



Desain Revetment Modular Menggunakan Ban Bekas untuk Mitigasi Perlindungan Pantai di Pantai Amal Baru, Tarakan

Edy Utomo*, Muhammad Djaya Bakri, Azis Susanto
Department Teknik Sipil, Universitas Borneo Tarakan, Indonesia
*edyutomo99@gmail.com

Abstract

Coastal abrasion in Tarakan City requires a protection system that is not only structurally effective but also economically feasible and implementable through community-based approaches. This study aims to design a modular revetment structure using recycled tires filled with concrete and compacted sand based on a design-based analytical approach. Wave transformation analysis at a depth of -0.52 meters indicates significant wave heights ranging from 1.19 to 1.70 meters, which serve as the primary basis for stability calculations using the Hudson formula with a conservative stability coefficient 1.25. The results show that a single concrete-filled tire unit weighs approximately 285 kg, and five units are required to form the primary armor layer with a height of 1.20 meters. To achieve the design crest elevation of +1.95 meters relative to HHWL, additional secondary protection layers and a toe protection system made of quarry stones were incorporated, resulting in a total structural height of 2.40 meters. Sensitivity analysis indicates that variations in significant wave height strongly influence the required weight of armor, whereas changes in material density produce more moderate effects. Compared with conventional stone revetments, the modular tire system offers greater flexibility, ease of installation without heavy equipment, and supports circular-economy principles through the reuse of waste tires. The implementation plan adopts a participatory approach by engaging local fishermen and coastal communities in material collection, assembly, and maintenance activities. This study provides a sustainable, low-cost, and adaptive alternative for coastal protection that can be replicated in other shoreline areas with similar environment conditions.

Keywords: Abrasion, Modular, Participatory Approach, Recycled Tires, Revetment, Wave Stability

1. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir sangat rentan terhadap dinamika oseanografi dan aktivitas manusia, terutama di tengah perubahan iklim global yang mempercepat terjadinya erosi pantai dan kenaikan muka air laut [1]. Fenomena ini juga terjadi di wilayah pesisir Kalimantan, termasuk Kota Tarakan, yang telah mengalami degradasi garis pantai akibat aksi gelombang, fluktuasi pasang surut, serta aktivitas pembangunan di kawasan pesisir [2], [3]. Kawasan Pantai Amal Baru merupakan salah satu zona pesisir di Kota Tarakan yang mengalami tingkat erosi cukup signifikan, dengan laju perubahan garis pantai yang mengancam kawasan permukiman dan fasilitas publik [4]. Studi numerik dan observasi lapangan menunjukkan adanya dinamika sedimentasi dan perubahan morfologi pantai yang dipengaruhi oleh arah dominan gelombang [5] serta keberadaan struktur pelindung pantai yang telah dibangun [6].

Beberapa pendekatan struktural telah diterapkan di sepanjang kawasan Pantai Amal Baru, termasuk struktur groin [7] dan desain *detached breakwater* yang telah diteliti sebelumnya [8]. Meskipun kedua jenis struktur tersebut menunjukkan tingkat efektivitas tertentu, revetment dinilai sebagai pilihan yang paling layak karena mampu memberikan perlindungan langsung terhadap garis pantai yang mengalami erosi [9]. Namun, desain sebelumnya umumnya masih bergantung pada material konvensional seperti beton pracetak (misalnya Tetrapod), yang menimbulkan kendala dari segi biaya dan pelaksanaan berbasis masyarakat. Oleh karena itu, pendekatan alternatif dengan memanfaatkan material daur ulang seperti ban bekas menjadi pilihan yang menjanjikan, terutama untuk wilayah dengan keterbatasan infrastruktur dan pendanaan [10], [11].



Beberapa penelitian internasional maupun nasional telah menyoroti pentingnya integrasi antara teknologi ramah lingkungan dan ketertiban masyarakat. Pendekatan *Building with Nature* (BwN) yang diterapkan di Demak, Jawa Tengah, telah menunjukkan efektivitas solusi berbasis ekosistem yang dikombinasikan dengan partisipasi masyarakat lokal dalam mitigasi abrasi pantai [12], [13]. Bahkan, struktur pelindung berbasis limbah seperti modular *seawall* [11] dan *eco-friendly breakwater* [14] juga memperlihatkan potensi serupa dalam meredam energi gelombang. Material daur ulang rendah karbon memiliki prospek untuk dikembangkan sebagai bagian dari sistem pertahanan pantai yang efisien dan berkelanjutan. Sementara itu, struktur konvensional seperti APO (Aneka Pelindung Ombak) juga telah diteliti sebagai upaya perlindungan garis pantai di wilayah pesisir Indonesia, meskipun efektivitasnya sangat bergantung pada karakteristik gelombang dan konfigurasi pantai [15]. Lubis, dalam penelitiannya, menyatakan bahwa data pasang surut dapat menjadi dasar penting dalam perencanaan struktur perlindungan pantai [16]. Selanjutnya, penelitian yang dilakukan oleh Sakka dan Baharuddin menegaskan bahwa efektivitas revetment modular yang dibuat dari ban bekas dapat dipertimbangkan sebagai alternatif yang layak, karena mampu mendukung efisiensi teknis sekaligus mendorong pendekatan partisipatif masyarakat [17], [18].

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk merancang struktur revetment modular dengan memanfaatkan ban bekas yang dapat diterapkan secara layak melalui inisiatif berbasis masyarakat di Pantai Amal Baru, Kota Tarakan. Pendekatan ini diharapkan dapat menjadi solusi alternatif untuk mitigasi abrasi pantai sekaligus memberdayakan masyarakat pesisir melalui keterlibatan langsung mereka dalam proses konstruksi dan pemeliharaan struktur tersebut. Sebagai penguatan kerangka regulasi nasional, perencanaan struktur revetment modular dalam penelitian ini diselaraskan dengan Permen PUPR No. 09/PRT/M/2010 tentang Pedoman Pengamanan Pantai, yang menetapkan landasan umum pengamanan garis pantai di Indonesia [19]. Selain itu, rancangan ini juga merujuk pada Surat Edaran Direktur Jenderal Sumber Daya Air No. 11/SE/D/2021 tentang Pedoman Kriteria Perencanaan Pengaman Pantai, yang memberikan kriteria teknis terbaru terkait prinsip desain bangunan pelindung pantai, termasuk struktur revetment, *seawall*, *breakwater*, dan groin [20]. Kedua dokumen tersebut menegaskan pentingnya kemiringan lereng yang stabil, keberadaan lapisan filter dan pelindung kaki, serta penentuan elevasi puncak struktur berdasarkan kombinasi muka air laut tertinggi, komponen *wave run-up*, proyeksi kenaikan muka air laut, dan *freeboard*. Integrasi Permen 2010 dan Surat Edaran 2021 ini memastikan bahwa konsep revetment modular berbahan ban bekas yang dikembangkan tetap konsisten dengan kerangka kebijakan nasional dan praktis perencanaan pengamanan pantai yang berlaku di Indonesia.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan di kawasan pesisir Pantai Amal Baru yang terletak di Kota Tarakan, Kalimantan Utara. Lokasi ini merupakan salah satu area yang terdampak signifikan oleh abrasi pantai dan telah menjadi fokus berbagai penelitian terkait perencanaan struktur pelindung pantai. Untuk menjamin efisiensi dan ketepatan hasil, penelitian ini menggunakan data sekunder yang berasal dari studi-studi sebelumnya yang dilakukan di lokasi yang sama. Data utama mencakup karakteristik gelombang signifikan, sudut datang gelombang, topografi pantai, serta komposisi material dasar laut, yang seluruhnya telah dianalisis secara komprehensif dalam studi oleh Maharani dan Utomo sebagai bagian dari desain struktur revetment [9]. Selain itu, data parameter dari Utomo dan Bakri terkait desain struktur groin, serta dari Haryanti dan Utomo terkait struktur *detached breakwater*, juga digunakan sebagai data pembanding untuk memperkuat justifikasi desain [7], [8]. Ketiga studi tersebut menunjukkan adanya variasi tinggi gelombang signifikan (H_s) dan parameter oseanografi lainnya yang mencerminkan dinamika lokal yang harus diperhatikan secara cermat dalam perancangan struktur modular ini. Data tersebut digunakan kembali secara langsung sebagai dasar dalam perancangan struktur revetment modular berbahan ban bekas, tanpa melakukan pengukuran ulang atau perhitungan ulang terhadap parameter-parameter tersebut.

Desain struktur revetment dalam penelitian ini menggunakan pendekatan perhitungan teknis yang didasarkan pada prinsip stabilitas hidraulik untuk lapisan pelindung utama (*primary armor layer*), sebagaimana diformulasikan dalam *Shore Protection Manual* (SPM) [21] dan buku Perencanaan Bangunan Pantai oleh Bambang Triatmodjo [22]. Unit pelindung dirancang dengan menggunakan ban bekas yang diisi material pada seperti beton atau pasir, disusun secara vertikal untuk membentuk struktur modular yang stabil dan mampu menyesuaikan diri dengan kemiringan alami pantai. Pendekatan ini dipilih karena material yang digunakan mudah diperoleh di wilayah setempat dan mendukung inisiatif berbasis masyarakat dalam pengendalian abrasi pantai. Untuk menentukan berat minimum satu unit pelindung (*armor unit*), digunakan persamaan Hudson sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

$$W = \frac{\gamma_r H_s^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (1)$$

dimana W adalah berat minimum satu unit pelindung (kg), γ_r adalah berat jenis satuan material pelindung, diperoleh dari gabungan berat ban dan material isian (pasir atau beton), H_s adalah tinggi gelombang signifikan (m), yang diperoleh dari data sekunder penelitian sebelumnya. K_D adalah koefisien stabilitas yang diestimasi berdasarkan karakteristik geometrik unit ban modular, S_r adalah berat jenis relatif terhadap air laut, dan θ adalah sudut kemiringan revetment.

Volume satu unit ban dihitung berdasarkan selisih antara volume silinder luar dan dalam dengan tinggi ban sebagai parameter utama. Berat total unit (W_{total}) diperoleh dari penjumlahan berat karet ban dan berat material isian berupa pasir atau beton. Berat satuan gabungan (γ_r) kemudian dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$\gamma_r = \frac{W_{total}}{V_{ban}} ; \& S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_{air\ laut}} \quad (2)$$

Setelah diperoleh berat minimum lapisan pelindung yang dibutuhkan, dilakukan evaluasi untuk memverifikasi apakah unit ban bekas yang dirancang memenuhi persyaratan stabilitas berdasarkan hasil perhitungan Hudson. Jika tidak, maka dilakukan penyesuaian konfigurasi seperti mengisi ban secara penuh dengan pasir atau beton, menambah jumlah unit, atau memodifikasi susunan struktur. Ketebalan lapisan pelindung (*armor layer thickness*) dan lebar puncak revetment kemudian dihitung menggunakan Persamaan (3)

$$t = n \cdot k_{\Delta} \cdot \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3} \& B = n_{min} \cdot k_{\Delta} \cdot \left(\frac{W}{\gamma_r}\right)^{1/3} \quad (3)$$

Dimana t adalah ketebalan laisan pelindung (m), n adalah jumlah minimum lapisan (umumnya 2), k_{Δ} adalah koefisien bentuk (*shape coefficient*) dari unit pelindung, yang ditentukan secara empiris berdasarkan geometri ban, dan B adalah lebar puncak (*crest width*) dari revetment.

Susunan modular dari ban bekas dirancang untuk membentuk sistem lapisan ganda yang stabil. Unit-unit tersebut disusun secara vertikal dalam 2 hingga 3 lapisan, tergantung pada ketebalan minimum yang diperoleh dari hasil perhitungan. Pada bagian depan struktur, direncanakan lapisan pelindung kaki (*toe protection layer*) yang terbuat dari batu pecah atau blok material lain yang tersedia secara lokal, disesuaikan dengan kondisi material di lokasi. Seluruh rancangan ini bersifat konseptual dan dimaksudkan untuk memberikan kerangka acuan teknis bagi penerapan dalam skala lapangan melalui upaya berbasis masyarakat, dengan tetap mempertimbangkan kelayakan rekayasa, ketersediaan material lokal, serta kesederhanaan dalam pelaksanaan konstruksi.

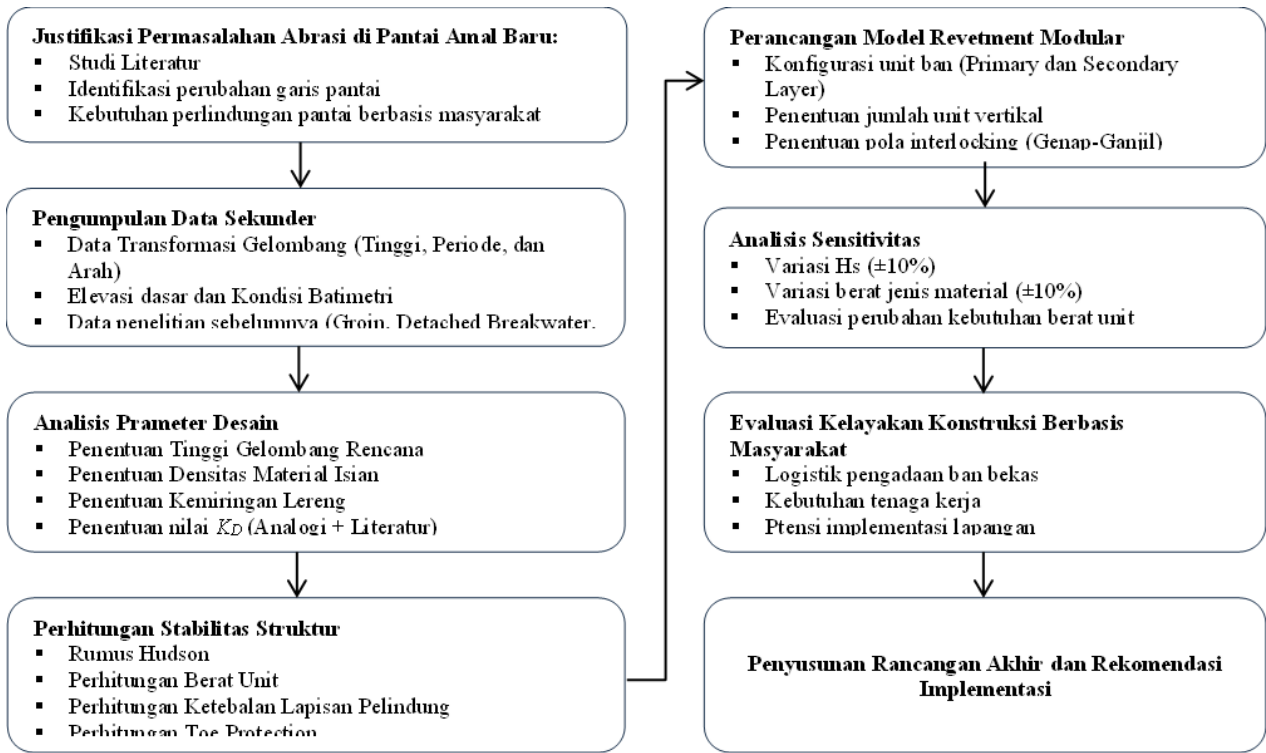
Dalam penelitian ini, ban bekas digunakan sebagai unit pelindung modular yang dirancang untuk disusun secara vertikal dan berlapis, mengikuti kemiringan alami pantai dengan perbandingan sekitar 1:1,5 hingga 1:2. Ukuran ban yang digunakan mengacu pada ban truk standar tipe 11.00-R20, dengan diameter luar sekitar 78 cm, diameter dalam sekitar 45 cm, dan tinggi sekitar 24 cm [23]. Untuk meningkatkan massa dan stabilitas, setiap unit ban diisi dengan pasir pantai atau beton lokal. Berat jenis karet ban diasumsikan sebesar 1,12 g/cm³, berdasarkan data teknis ASTM D297-15 mengenai karakteristik fisik karet padat. Sementara itu, berat jenis pasir pantai diambil dari kisaran umum tanah berbutir kasar dalam kondisi kering hingga lembab, yaitu sekitar 1,6-1,8 g/cm³ [22]. Volume isian efektif dihitung dari selisih antara volume silinder luar dan dalam ban, dengan asumsi bentuk silinder mendekati sempurna.

Volume isian dan massa total yang telah dihitung kemudian dibandingkan dengan berat minimum unit pelindung (W) yang diperoleh menggunakan rumus Hudson. Apabila massa aktual unit ban lebih kecil dari nilai (W) yang disyaratkan, maka dilakukan penyesuaian konfigurasi, seperti penambahan jumlah lapisan atau peningkatan volume isian pasir. Setiap unit disusun secara vertikal dalam lapisan bertingkat dan distabilkan menggunakan metode pengikatan dan jangkar sederhana, sebagaimana umum diterapkan pada konstruksi modular berbasis masyarakat yang diadaptasi dari pendekatan *participatory coastal management* [13], [18].

Peneran desain ini belum dilakukan secara langsung di lapangan karena keterbatasan waktu serta kompleksitas koordinasi dan keterlibatan masyarakat. Oleh karena itu, tahap penerapan dalam penelitian ini dibatasi pada penyusunan rencana implementasi berbasis masyarakat. Proses ini mencakup skema



pengumpulan ban bekas melalui kerja sama dengan masyarakat setempat dan bengkel, serta rencana pelibatan kelompok nelayan lokal dalam proses perakitan dan pemasangan struktur di lokasi yang terdampak abrasi. Model pendekatan partisipasi ini mengadopsi prinsip-prinsip yang umum diterapkan dalam pengolahan pesisir berbasis masyarakat, sebagaimana ditunjukkan oleh Damastuti dan Nopiana [13], [18]. Pelaksanaan lapangan dari desain ini akan menjadi fokus pengembangan selanjutnya, setelah dukungan dari pada pemangku kepentingan terkait diperoleh dan pengujian teknis yang lebih mendalam telah dilakukan. Adapun skema penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Skema Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam perancangan struktur pelindung pantai, tinggi gelombang signifikan setelah transformasi gelombang (H_s) merupakan salah satu parameter utama yang menentukan baik dimensi struktur maupun stabilitasnya terhadap gaya hidrodinamik. Mengingat keterbatasan data primer yang tersedia, penelitian ini menggunakan data sekunder yang diperoleh dari hasil penelitian sebelumnya yang dilakukan di lokasi yang sama, yaitu Pantai Amal Baru, Kota Tarakan. Tiga penelitian terdahulu digunakan sebagai acuan [7], [8], [9]. Ketiga penelitian tersebut meneliti jenis struktur pelindung pantai yang berbeda, yaitu revetment, *detached breakwater*, dan groin yang masing-masing ditempatkan pada posisi dan kedalaman berbeda, sehingga menghasilkan variasi nilai tinggi gelombang signifikan (H_s) di setiap lokasi struktur. Tabel 1 menyajikan perbandingan nilai H_s dari masing-masing studi, beserta informasi mengenai jenis struktur pelindung pantai dan elevasi dasar pemasangannya.

Tabel 1. Perbandingan Tinggi Gelombang Signifikan dari Penelitian Sebelumnya

Referensi	Jenis Struktur Pelindung Pantai	H_s (m)	Elevasi Dasar (m)
Maharani & Utomo (2024)	Revetment	1,70	-0,71
Haryanti & Utomo (2024)	Detached Breakwater	1,82	-4,02
Utomo & Bakri (2024)	Groin (Head)	1,97	-4,02
	Groin (Arm)	1,69	-2,00

Berdasarkan perbandingan tersebut, tinggi gelombang signifikan sebesar 1,70 meter dari penelitian Maharani dan Utomo dipilih sebagai nilai acuan utama, karena paling sesuai dengan kondisi struktur revetment

modular yang dianalisis dalam penelitian ini. Nilai tersebut merepresentasikan prediksi ulang 25 tahun berdasarkan data tahun 2024. Pemilihan ini didasarkan pada kesesuaian jenis struktur dan posisi pemasangan yang dianalisis dalam studi tersebut, yakni revetment yang ditempatkan langsung di sepanjang garis pantai dengan elevasi dasar sebesar -0,71 meter. Penggunaan nilai tinggi gelombang ini juga mencerminkan kondisi gelombang yang telah mengalami proses *shoaling*, sehingga dianggap mewakili beban dinamis aktual yang diperkirakan bekerja pada struktur modular.

Salah satu aspek penting dalam perancangan revetment modular adalah penentuan berat minimum unit yang mampu menahan gaya gelombang dominan seara stabil. Untuk tujuan tersebut, digunakan rumus Hudson yang secara analitis mempertimbangkan beberapa parameter kunci, yaitu tinggi gelombang signifikan, berat jenis material pelindung, koefisien stabilitas, serta kemiringan struktur. Dalam penelitian ini, parameter masukan disesuaikan dengan karakteristik material yang digunakan, yakni ban bekas yang diisi pasir padat sebagai unit pelindung modular. Berdasarkan hasil karakterisasi material, berat jenis gabungan diperoleh sebesar $1.345,76 \text{ kg/m}^3$ dengan berat jenis relatif terhadap air laut sebesar 1,31. Tinggi gelombang signifikan sebesar 1,70 meter diadopsi dari hasil transformasi gelombang di depan struktur revetment sebagaimana dilaporkan oleh Maharani dan Utomo. Sementara itu, kemiringan revetment yang digunakan dalam desain ini adalah 1:2 (vertikal: horizontal), yang konsisten dengan konfigurasi geometrik stabil yang umumnya diterapkan pada revetment modular di lingkungan pesisir dengan energi gelombang sedang.

Penentuan koefisien stabilitas (K_D) merupakan aspek penting dalam memperkirakan berat unit pelindung (*armor unit*) yang dibutuhkan. Karena ban bekas tidak tercantum dalam nilai standar koefisien stabilitas pada dokumen referensi seperti SPM 1984, maka pendekatan analogi digunakan berdasarkan karakteristik geometrik unit, perilaku *interlocking* alami, serta berat jenis gabungan materialnya. Ban bekas yang disusun secara horizontal dan diisi dengan pasir padat menunjukkan karakteristik yang mirip dengan batu pecah, yang secara empiris memiliki nilai koefisien stabilitas berkisar antara 1,0 hingga 2,0. Asumsi ini juga diperkuat oleh hasil studi ekperimental seperti yang dilakukan oleh Lubis dan Mayer [11], [16], yang menunjukkan bahwa struktur modular dari ban bekas dapat memberikan ketahanan stabilitas sedang hingga tinggi terhadap gaya gelombang. Berdasarkan pertimbangan teknis tersebut serta sifat konservatif dari desain awal, nilai koefisien stabilitas sebesar 1,25 diadopsi sebagai pendekatan estimasi. Nilai ini dianggap aman dan valid secara empiris dalam konteks kerangka desain konservatif.

Berdasarkan kesetaraan karakteristik tersebut, nilai $K_D = 1,25$ dipilih sebagai nilai konservatif yang berada di batas bawah kisaran stabilitas batu pecah. Nilai ini memberikan margin keamanan tambahan terhadap ketidakpastian perilaku material alternatif seperti ban bekas. Penurunan nilai K_D (misalnya menjadi 1,10) akan meningkatkan kebutuhan berat unit pelindung sebesar $\pm 10\text{-}15\%$, sedangkan peningkatan nilai K_D (misalnya menjadi 1,50) dapat mengurangi berat unit hingga $\pm 15\text{-}20\%$ tetapi berpotensi menurunkan faktor keamanan. Oleh karena itu, nilai $K_D = 1,25$ dianggap sebagai nilai yang representatif untuk tahap perencanaan awal struktur revetment modular ini. Tabel 2 berikut menyajikan ringkasan parameter desain serta hasil perhitungan berat unit pelindung berdasarkan persamaan Hudson.

Table 2. Hasil Perhitungan Hudson untuk Berat Lapisan Pelindung

Parameter	Nilai	Keterangan
Tinggi Gelombang (H_s)	1,70 m	Hasil Transformasi Gelombang
Berat Satuan (γ_r)	1884,1 kg/m^3	Gabungan berat ban dan pasir
Berat Jenis Relatif (S_r)	1,84	Terhadap air laut
Koefisien Stabilitas (K_D)	1,25	Pendekatan empiris
Kemiringan Struktur ($\cot \theta$)	2,00	Slope 1:2
Berat Minimum Unit Pelindung (W)	6245 kg (6,25 ton)	Hasil perhitungan rumus Hudson

Nilai-nilai dalam Tabel 2 menunjukkan hasil perhitungan berat minimum unit pelindung berdasarkan rumus Hudson. Dari parameter gelombang signifikan sebesar 1,70 meter dan karakteristik material ban dengan pasir, diperoleh berat unit minimum sebesar 6,25 ton untuk mencapai stabilitas yang memadai terhadap gaya gelombang dominan. Nilai ini menjadi acuan utama dalam menentukan konfigurasi dan jumlah lapisan unit modular yang diperlukan pada struktur revetment.

Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur revetment yang mampu menahan gelombang signifikan setinggi 1,70 meter memerlukan unit pelindung dengan berat ekuivalen sekitar 6,25 ton. Karena dalam penelitian ini digunakan unit modular berbahan ban bekas dengan berat sekitar 216,5 kg per unit, maka diperlukan pengaturan struktur dan sistem interlocking yang tepat untuk mencapai tingkat perlindungan hidrodinamik yang setara. Dalam perencanaan struktur pelindung pantai, khususnya dengan pendekatan berbasis



masyarakat, perlu dipertimbangkan tidak hanya aspek teknis yang didasarkan pada parameter hidrodinamik, tetapi juga aspek kelayakan praktis pelaksanaan konstruksi di lapangan. Dalam konteks ini, penggunaan ban bekas sebagai unit modular untuk desain revetment di Pantai Amal Baru menunjukkan potensi yang menjanjikan, meskipun masih terdapat tantangan implementasi yang perlu diselesaikan agar dapat diterapkan secara efektif dalam kondisi nyata di lapangan.

Berdasarkan analisis awal dengan menggunakan tinggi gelombang signifikan sebesar 1,70 meter, yang merepresentasikan gelombang ekstrem hasil transformasi dengan periode ulang 25 tahun pada kedalaman - 4,50 meter (HHWL), diperoleh berat unit pelindung yang dibutuhkan sekitar 6,25 ton. Dengan pendekatan ketebalan lapisan pelindung, diperoleh ketebalan lapisan pelindung yang diperlukan sebesar 3,04 meter. Jika dikonversikan ke tinggi fisik unit ban bekas sebesar 0,24 meter per unit, maka dibutuhkan sekitar 13 ban yang disusun secara vertikal. Jumlah unit pelindung yang besar tersebut menimbulkan tantangan signifikan bagi penerapan berbasis masyarakat, terutama terkait ketersediaan ban bekas, logistik transportasi, dan kebutuhan tenaga kerja. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi desain dengan tujuan untuk mengurangi beban struktural yang harus ditanggung oleh setiap unit modular.

Salah satu strategi utama yang diterapkan dalam penelitian ini adalah memindahkan posisi struktur revetment ke arah darat (*landward*), menempatkannya pada zona yang lebih dangkal dibandingkan lokasi desain awal. Penyesuaian ini secara efektif mengurangi tinggi gelombang efektif yang bekerja pada struktur akibat pengaruh gabungan dari proses *shoaling*, gesekan dasar laut, dan disipasi energi gelombang. Pendekatan ini divalidasi dari beberapa prespektif berikut:

- Teoritis: Berdasarkan SPM 1984, tinggi gelombang secara alami menurun ketika gelombang mendekati zona perairan dangkal karena efek *shoaling* dan gesekan dasar. Oleh karena itu, pemindahan struktur ke arah darat merupakan salah satu metode yang paling efektif untuk mengurangi tinggi gelombang aktual yang berdampak langsung pada struktur.
- Empiris: Triatmodjo dan Muliati melaporkan bahwa penempatan struktur pada zona *non-impact*, seperti MSL dan LLWL yang secara signifikan mengurangi intensitas beban gelombang [24], [25]. Selain itu, hasil observasi lapangan oleh Utomo dan Bakri juga mengkonfirmasi bahwa tidak terjadi tumbukan langsung gelombang pada garis pantai selama kondisi LLWL [26].
- Praktis: Strategi ini sejalan dengan konsep perencanaan adaptif berbasis masyarakat, yang menekankan kesesuaian dengan kondisi lingkungan lokal serta keterbatasan sumber daya. Seperti yang dicatat oleh Henly, desain infrastruktur pantai adaptif perlu mengintegrasikan pendekatan teknis dan sosial secara seimbang [27].

Dengan demikian, modifikasi teknik melalui relokasi struktur ke arah darat merupakan keputusan yang sah secara teknis dan terukur, serta konsisten dengan prinsip efisiensi, keberlanjutan, dan kelayakan penerapan di lapangan.

Meskipun strategi awal mempertimbangkan pemindahan struktur revetment ke arah darat untuk mengurangi kedalaman perairan dan menurunkan tinggi gelombang yang bekerja, hasil perhitungan menunjukkan bahwa penggunaan material isian berupa pasir padat masih kurang efektif. Hal ini terlihat dari berat unit pelindung yang tetap tinggi, dengan jumlah unit ban modular yang dibutuhkan berkisar antara 10 hingga 13 unit pada setiap titik perlindungan. Persyaratan tersebut masih menjadi tantangan bagi implementasi berbasis masyarakat, mengingat keterbatasan ketersediaan material dan tenaga kerja. Sebagai solusi strategis, dilakukan modifikasi desain lanjutan dengan mengganti material isian dari pasir padat menjadi beton cor. Penyesuaian ini terbukti jauh lebih efisien. Dengan menggunakan beton sebagai material isian, berat setiap unit ban modular meningkat menjadi sekitar 285,3 kg, dengan berat jenis relatif terhadap air laut sebesar 2,42. Hasilnya, total berat unit pelindung yang diperlukan pada setiap titik perlindungan berkurang menjadi sekitar 1,7 ton, bahkan di bawah kondisi tinggi gelombang signifikan maksimum sebesar 1,70 meter.

Berdasarkan hasil simulasi, jumlah unit ban modular yang dibutuhkan berkurang secara signifikan menjadi hanya 5 hingga 7 unit pada rentang kedalaman yang dianalisis. Temuan ini menunjukkan bahwa revetment modular dengan isian beton cor sangat layak untuk diimplementasikan melalui pendekatan berbasis masyarakat, baik dari segi kinerja teknis, efisiensi biaya, maupun logistik di lapangan. Perbandingan antara desain dengan isian pasir padat dan isian beton cor pada berbagai kondisi kedalaman disajikan pada Tabel 3 berikut.

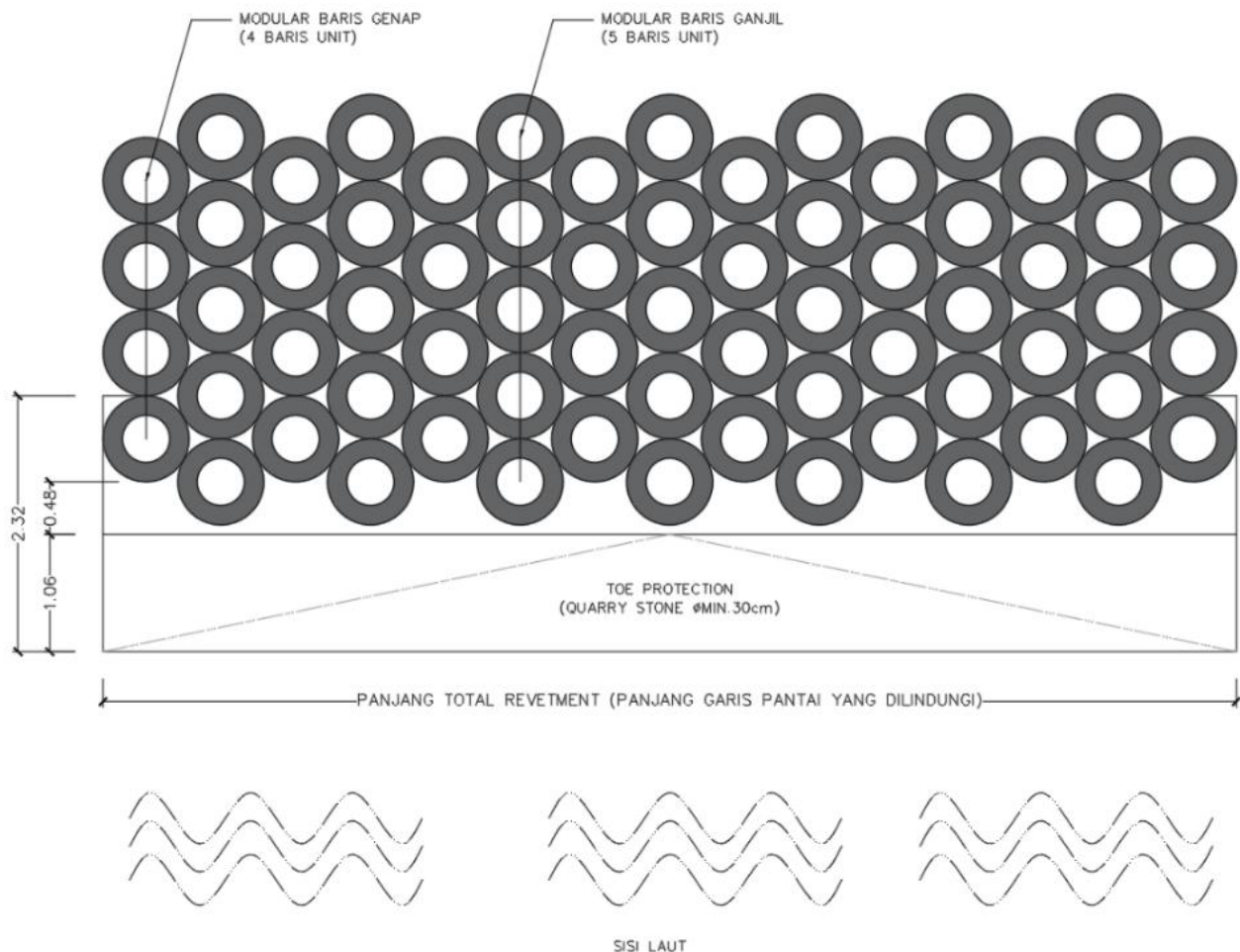


Tabel 3. Hasil Perbandingan Desain: Isian Pasir Padat vs. Isian Beton Cor

Kedalaman	H_s (m)	W_{min} [pasir] (kg)	Ketebalan [pasir] (m)	Jumlah Ban [pasir]	W_{min} [beton] (kg)	Ketebalan [beton] (m)	Jumlah Ban [beton]
-0,11	1,16	2935,2	2,35	10	541,5	1,23	5
-0,52	1,18	3063,1	2,40	10	571,0	1,25	5
-1,02	1,29	3793,9	2,65	11	744,8	1,37	6
-4,50	1,70	6245,0	3,04	13	1704,5	1,80	7

Selain itu, penilaian sensitivitas juga dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi desain utama terhadap kebutuhan berat minimum unit pelindung. Dua parameter yang diuji adalah tinggi gelombang signifikan (H_s) dan berat jenis gabungan unit ban modular, yang masing-masing divariasikan sebesar $\pm 10\%$ dari nilai dasar. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa variasi tinggi gelombang memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap berat unit pelindung dibandingkan variasi berat jenis material. Peningkatan H_s sebesar 10% (menjadi 1,87 m) menyebabkan peningkatan berat unit pelindung hingga 44,8%, sedangkan penurunan H_s sebesar 10% menurunkan berat unit hingga 34%. Hal ini sejalan dengan sifat non-linier rumus Hudson yang dipengaruhi oleh komponen kubik dari tinggi gelombang.

Sebaliknya, variasi berat jenis material sebesar $\pm 10\%$ hanya menghasilkan perubahan berat unit pelindung dalam kisaran 9-12%. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material isian (pasir vs beton) memberikan pengaruh yang lebih moderat terhadap kebutuhan stabilitas dibandingkan dengan kondisi hidrodinamika seperti H_s . Berdasarkan hasil ini dapat disimpulkan bahwa sensitivitas terbesar berada pada parameter gelombang, sehingga perubahan kondisi gelombang ekstrem di masa depan, baik akibat perubahan iklim maupun variabilitas musiman, perlu menjadi pertimbangan penting dalam implementasi desain modular. Sementara itu, penggunaan isian beton cor tetap menjadi pilihan optimum untuk meningkatkan berat unit tanpa menambah jumlah komponen modular secara signifikan.



Gambar 2. Desain Layout Revetment Modular dengan Lapis Pelindung Ban Bekas



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis stabilitas, ditetapkan bahwa struktur revetment modular akan menggunakan ban bekas yang diisi beton cor untuk meningkatkan berat unit dan efisiensi jumlah lapisan pelindung yang dibutuhkan. Dalam konfigurasi ini, setiap unit memiliki berat sekitar 285 kg dengan berat jenis relatif terhadap air laut sebesar 2,42 sehingga hanya diperlukan 5 hingga 7 unit pada setiap titik perlindungan. Struktur direncanakan ditempatkan pada kedalaman -0,52 meter, dengan muka air laut pasang tertinggi (HHWL = 0,00 meter) sebagai datum acuan. Dengan demikian, elevasi dasar pada lokasi pemasangan ditetapkan pada -0,52 meter. Penempatan ini dianggap sebagai yang paling layak secara teknis dan praktis untuk implementasi berbasis masyarakat di wilayah pesisir. Namun, posisi tersebut juga memerlukan pertimbangan terhadap *wave run-up*, kenaikan muka air laut (*sea-level rise*), serta kebutuhan *freeboard* minimum sebesar 2,47 meter. Sementara itu, tinggi struktur utama yang terdiri dari lima unit ban modular hanya mencapai 1,20 meter. Oleh karena itu, dilakukan modifikasi teknik tambahan berupa penambahan lapisan pelindung sekunder dan perlindungan kaki (*toe protection*) untuk mengkompensasi kekurangan tinggi struktur sebesar 1,27 meter.

Lapisan pelindung kedua dirancang menggunakan 2-3 unit ban modular yang diisi dengan pasir padat sebagai material yang lebih ekonomis, sedangkan bagian pelindung kaki struktur (*toe protection*) menggunakan batu pecah kasar dengan berat desain sebesar 5,71 kg. Berdasarkan persamaan ketebalan dan lebar dari Triatmodjo, pelindung kaki tersebut dihitung memiliki ketebalan 0,637 meter dan lebar minimum 0,478 meter, yang setara dengan diameter nominal batu sekitar 27,7 cm. Dengan demikian, struktur revetment modular yang direncanakan terdiri dari unit ban bekas yang disusun bertingkat dan diisi beton cor sebagai lapisan pelindung utama (*armor layer*), serta ban berisi pasir padat sebagai lapisan sekunder (*secondary layer*). Kedua lapisan ini disusun secara vertikal dan horizontal dalam pola berselang-seling sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Konfigurasi bergantian antara baris ganjil dan genap memungkinkan setiap unit saling mengunci secara alami, membentuk ikatan struktural yang stabil tanpa memerlukan tulangan kompleks.

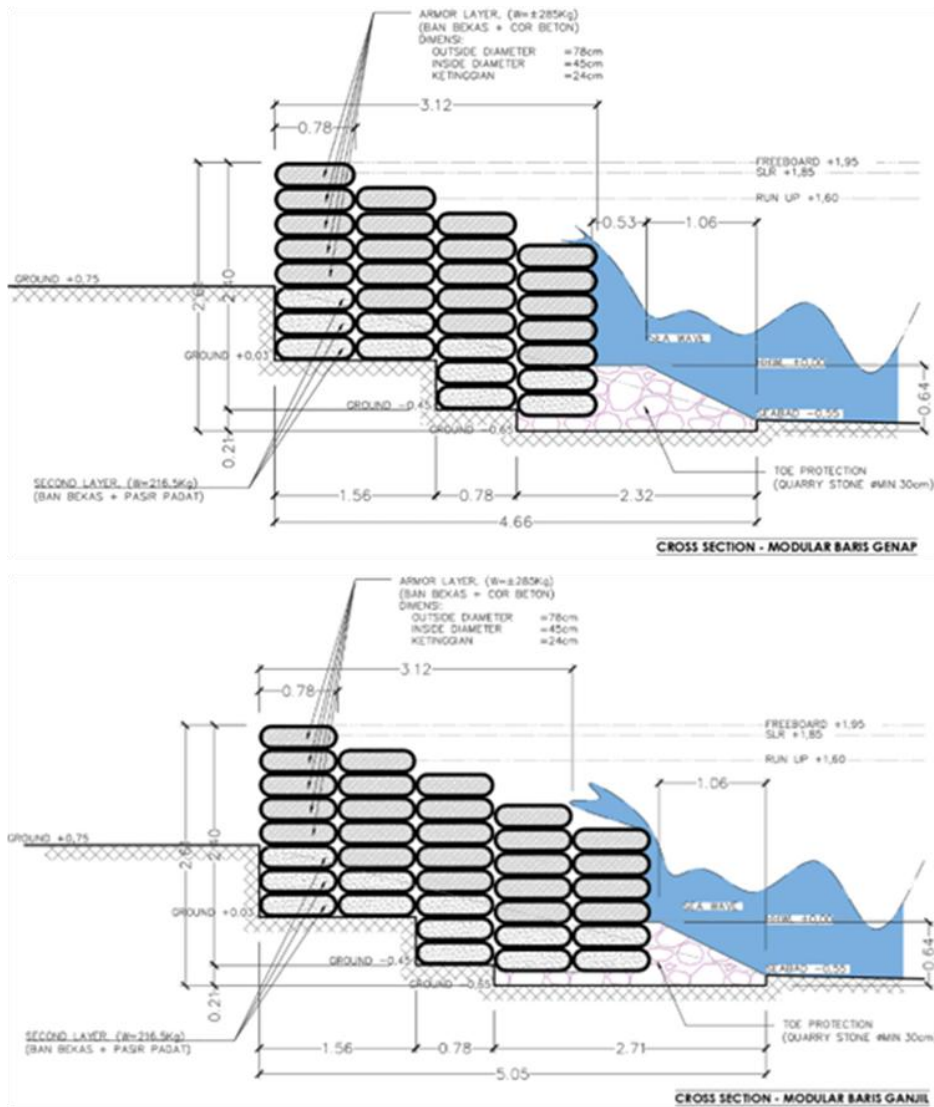
Baik baris genap maupun ganjil pada penampang melintang terdiri dari lima lapisan unit primer dan dua hingga tiga lapisan pelindung sekunder, menghasilkan tinggi total struktur sekitar 2,40 meter yang diukur dari dasar pelindung kaki hingga puncak struktur (*crest*). Elevasi puncak struktur dirancang pada +1,95 meter terhadap HHWL dan dijadikan acuan utama perencanaan, sesuai dengan analisis gelombang ekstrem periode ulang 25 tahun yang mempertimbangkan *wave run-up* (1,70 meter), kenaikan muka air laut (*sea-level rise* 0,25 meter), serta *freeboard* (0,10 meter) sebagaimana diperoleh dari studi sebelumnya.

Perbedaan antara baris genap dan ganjil hanya terletak pada pola penyusunan horizontal unit modular, tanpa mempengaruhi tinggi vertikal keseluruhan struktur. Bagian bawah struktur diperkuat dengan lapisan pelindung kaki (*toe protection*) yang terbuat dari batu pecah kasar seberat $\pm 5,71$ kg per unit, dengan diameter nominal ± 30 cm, ketebalan 0,637 meter, dan lebar 0,478 meter. Lapisan ini ditempatkan pada kemiringan 1:2 untuk mengurangi efek gerusan (*scouring*) akibat tumbukan gelombang. Visualisasi penampang melintang struktur ditunjukkan pada Gambar 3. Desain ini menunjukkan efektivitas teknis yang tinggi serta kemudahan penerapan oleh masyarakat setempat tanpa ketergantungan pada peralatan berat. Fleksibilitas sistem modular menjadi keunggulan utama karena memungkinkan struktur untuk menyesuaikan diri terhadap variasi kontur dan elevasi garis pantai.

Desain revetment modular yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak hanya dirancang agar efektif secara teknis, tetapi juga dapat diterapkan secara praktis melalui pendekatan berbasis masyarakat. Implementasi lapangan direncanakan melibatkan komunitas pesisir lokal, khususnya nelayan dan petani rumput laut, dalam proses pengumpulan ban bekas, perakitan unit modular, serta pemasangan struktur di lokasi yang terdampak abrasi. Skema ini mendorong kolaborasi antara masyarakat setempat dan bengkel otomotif di sekitar Kota Tarakan sebagai penyedia material daur ulang, sekaligus memperkuat rasa kepemilikan sosial terhadap infrastruktur pesisir. Pendekatan ini mengadopsi prinsip partisipatif yang telah banyak diterapkan dalam praktik pengelolaan pesisir berbasis masyarakat [13], [18]. Dari sisi logistik, beban unit yang relatif ringan memungkinkan transportasi manual sehingga mempermudah mobilisasi material di daerah yang sulit dijangkau kendaraan berat. Potensi keterlibatan masyarakat dalam tahap pemeliharaan juga menjadi nilai tambah, karena inspeksi berkala, penggantian unit yang rusak, serta pembersihan area struktur dapat dilakukan oleh masyarakat secara mandiri.

Dengan demikian, pendekatan berbasis komunitas tidak hanya menekan biaya konstruksi, tetapi juga meningkatkan keberlanjutan jangka panjang melalui meningkatnya rasa memiliki terhadap bangunan pengaman pantai yang dibangun.





Gambar 3. Sketsa Potongan Melintang Desain Struktur Revetment Modular

Dibandingkan dengan struktur revetment konvensional berbahan batu pecah atau blok beton, desain revetment modular berbahan ban bekas menawarkan sejumlah keunggulan terutama dalam konteks lokasi dengan keterbatasan sumber daya. Struktur konvensional memiliki stabilitas hidrodinamik lebih tinggi karena menggunakan material berunit besar dengan nilai koefisien stabilitas yang umumnya berada pada rentang 2 hingga 4 untuk batu pecah dan dapat mencapai >5 untuk unit beton khusus. Namun, struktur tersebut membutuhkan alat berat dalam proses pemasangannya, biaya material yang tinggi, serta logistik transportasi yang lebih kompleks. Sebaliknya, struktur modular berbahan ban bekas memiliki berat unit yang relatif kecil sehingga memungkinkan proses instalasi dilakukan sepenuhnya secara manual oleh masyarakat. Dari sisi biaya dan keberlanjutan, penggunaan ban bekas secara signifikan menurunkan biaya konstruksi sekaligus mengurangi limbah padat melalui pendekatan *circular economy*. Fleksibilitas unit modular juga memberikan adaptabilitas yang lebih baik terhadap variasi kontur pantai dibandingkan struktur konvensional. Dengan demikian, meskipun stabilitas dasar struktur konvensional masih lebih tinggi, sistem modular berbahan ban bekas menjadi alternatif yang layak terutama untuk daerah terpencil atau untuk implementasi berbasis komunitas.

Untuk menilai kelayakan desain modular berbahan ban bekas dibandingkan metode perlindungan pantai yang lazim digunakan, dilakukan analisis perbandingan teknis antara revetment modular dan struktur konvensional berbahan batu pecah atau blok beton. Ringkasan perbandingan teknis tersebut disajikan pada Tabel 4.

Table 4. Perbandingan Teknis Revetment Modular Ban Bekas dan Struktur Konvensional

Aspek Teknis	Revetment Modular Ban Bekas	Revetment Konvensional (Batu Pecah/ Blok Beton)
Material Armor	Ban bekas berisi pasir / beton	Batu pecah besar / Blok beton
Densitas Efektif	1,7 – 2,3 t/m ³	2,4 – 2,7 t/m ³
Nilai Koefisien Stabilitas	1,0 – 1,25 (konservatif, analogi)	2 – 4 (Batu), 5 – 10 (Blok beton)
Kemiringan Lereng Umum	1:2 – 1:3	1:1,5 – 1:2
Stabilitas Hidrodinamik	Sedang (bergantung pada interlocking)	Tinggi
Kebutuhan Alat Berat	Tidak diperlukan	Dibutuhkan (Crane / Excavator)
Kemudahan Transportasi	Sangat mudah (berat unit kecil)	Terbatas (berat unit besar)
Adaptasi terhadap Kontur	Fleksibel	Cukup kaku
Perawatan	Mudah, berbasis komunitas	Lebih kompleks, butuh tenaga profesional

Hasil perbandingan menunjukkan bahwa struktur konvensional masih unggul dari sisi stabilitas hidrodinamik karena memiliki densitas material yang lebih tinggi dan nilai koefisien stabilitas yang berada dalam kisaran 2-4 atau lebih, terutama untuk unit beton khusus. Namun, revetment modular berbahan ban bekas menawarkan keunggulan signifikan pada aspek biaya, kemudahan konstruksi, fleksibilitas adaptasi terhadap kontur pantai, serta potensi implementasi tanpa alat berat. Hal ini menjadikan struktur modular sebagai alternatif yang layak untuk daerah terpencil atau lokasi yang membutuhkan pendekatan berbasis komunitas.

Penggunaan ban bekas sebagai material revetment modular perlu mempertimbangkan potensi dampak ekologis, terutama risiko *leaching* (ekstraksi zat padat ke cair) dan pembentukan mikroplastik akibat degradasi karet dalam lingkungan laut. Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa material karet dapat melepaskan partikel dan senyawa kimia tertentu ke lingkungan perairan, meskipun laju pelepasannya relatif lambat [28]. Pada desain ini, penggunaan isian beton atau pasir padat serta penerapan geotekstil dan *toe protection* berfungsi untuk meningkatkan stabilitas unit sekaligus mengurangi gesekan yang dapat mempercepat degradasi material. Dari sisi keberlanjutan, pemanfaatan ban bekas dalam struktur modular mendukung konsep *circular economy* dan *eco-engineering*, yaitu dengan mengubah material limbah menjadi komponen proteksi pantai yang bernilai fungsi [27]. Konsep ini sejalan dengan kerangka *Sustainable Development Goals*, khususnya SDG 13 (*Climate Action*) dan SDG 14 (*Life Below Water*) [29], serta memperkuat aspek sosial melalui keterlibatan masyarakat lokal dalam proses pengumpulan, perakitan, dan pemeliharaan struktur.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan desain struktur revetment modular berbahan ban bekas yang diisi beton cor dan pasir padat, dengan dimensi serta berat unit yang ditentukan berdasarkan kondisi gelombang ekstrem pada kedalaman -0,52 meter. Konfigurasi modular yang dirancang terbukti mampu memberikan perlindungan abrasi yang efektif secara teknis, dengan tinggi total struktur sebesar 2,40 meter yang mengakomodasi komponen *wave run-up*, kenaikan muka air laut, dan *freeboard*. Keunggulan utama dari desain ini terletak pada fleksibilitas bentuk, kemudahan perakitan, potensi pengelolaan mandiri oleh masyarakat, serta penggunaan material lokal yang murah dan ramah lingkungan. Namun demikian, ditemukan keterbatasan terkait efisiensi berat unit ketika hanya menggunakan isian pasir padat, sehingga peningkatan material melalui penggunaan beton cor diperlukan untuk mencapai stabilitas yang diinginkan. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa tinggi gelombang signifikan merupakan parameter yang paling berpengaruh terhadap kebutuhan berat unit pelindung, sedangkan variasi berat jenis material memberikan dampak yang lebih moderat. Temuan ini menegaskan bahwa kondisi hidrodinamik lokal harus menjadi dasar utama dalam menentukan konfigurasi modul.

Di sisi lain, keunggulan non-teknis dari sistem modular ini terletak pada potensi implementasinya melalui pendekatan berbasis masyarakat. Bobot unit yang relatif ringan memungkinkan proses pemasangan dilakukan tanpa alat berat, sementara pemanfaatan ban bekas mendukung konsep *circular economy* serta berkontribusi pada pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan. Dengan demikian, desain ini tidak hanya menawarkan solusi teknis terhadap abrasi, tetapi juga menghadirkan manfaat sosial-ekonomi yang signifikan. Untuk pengembangan lebih lanjut, penelitian ini merekomendasikan dilakukannya uji lapangan guna menilai respons struktur terhadap gelombang ekstrem, proses penggerusan kaki, serta perubahan morfologi pantai. Selain itu, pemodelan hidrodinamika atau *Computational Fluid Dynamics* (CFD) diperlukan untuk memvalidasi pola stabilitas dan efektivitas unit modular pada berbagai skenario gelombang. Pendekatan ini diharapkan dapat



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

memperkuat dasar teknis serta membuka peluang replikasi konsep revetment modular berbahan ban bekas di wilayah pesisir Indonesia lainnya yang memiliki karakteristik serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan atas dukungan, fasilitas, dan kesempatan yang diberikan selama proses penyelesaian penelitian ini. Lingkungan penelitian yang kondusif serta komunikasi kolaboratif diantara para peneliti telah berperan penting dalam keberhasilan penyelesaian karya ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Widada, A. Ismanto, I. B. Priambodo, and H. Siagian, "Perubahan Garis Pantai dan Dampaknya Terhadap Banjir Rob di Kecamatan Pekalongan Utara, Kota Pekalongan, Provinsi Jawa Tengah," *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 25, no. 1, pp. 121–130, Mar. 2022, doi: 10.14710/jkt.v25i1.13843.
- [2] T. Rachman, H. Umar, and I. Haq Bahtiar, "Dampak Perubahan Garis Pantai Terhadap Pemanfaatan Lahan Pesisir Kecamatan Tamalanrea Kota Makassar," *Zona Laut, Jurnal Inovasi Sains dan Teknologi Kelautan*, vol. 3, no. 1, pp. 7–14, Mar. 2022.
- [3] M. P. Susunaga, I. A. G. Gongora, and E. M. Palmeira, "Evaluation of the Impact of Sustainable Infrastructure on the Perception of the Community Through the Use of Geocells Made of Recycled Tires in an Educational Environment," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 5, Mar. 2025, doi: 10.3390/su17051791.
- [4] M. D. Bakri, E. Utomo, and D. Nawir, "Linear Regression Analysis on predicting the level of damage and changes in Amal Baru Beach Tarakan City Indonesia," *SINERGI*, vol. 27, no. 1, p. 133, Jan. 2023, doi: 10.22441/sinergi.2023.1.015.
- [5] C. Paotonan and F. Arif Nurdin, "Pemilihan Jenis Bangunan Pelindung Pantai Bonto Bahari Menggunakan Metode Analytical Hierarchy Process (AHP)," *SENSISTEK*, vol. 3, no. 1, pp. 55–62, Nov. 2020.
- [6] A. H. M. Rashidi, M. H. Jamal, M. Z. Hassan, S. S. M. Sendek, S. L. M. Sopie, and M. R. A. Hamid, "Coastal structures as beach erosion control and sea level rise adaptation in malaysia: A review," *Water (Switzerland)*, vol. 13, no. 13, pp. 1–34, Jul. 2021, doi: 10.3390/w13131741.
- [7] E. Utomo and M. D. Bakri, "Studi Desain Bangunan Pelindung Pantai Tipe Groin Sebagai Upaya Penanganan Abrasi di Pantai Amal Baru Pulau Tarakan," *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 8, no. 3, pp. 292–310, Dec. 2024.
- [8] G. T. Haryanti and E. Utomo, "Penanganan Abrasi Pantai Amal Baru Kota Tarakan dengan Bangunan Pelindung Pantai Tipe Detached Breakwater," *CESJ: Civil Engineering Scientific Journal*, vol. 3, no. 2, pp. 95–106, May 2024.
- [9] A. Isyamelia Maharani and E. Utomo, "Studi Bangunan Pelindung Pantai Tipe Revetment Sebagai Alternatif Penanganan Abrasi di Pantai Amal Baru Kota Tarakan," *CESJ: Civil Engineering Scientific Journal*, vol. 3, no. 3, pp. 138–149, Sep. 2024.
- [10] T. A. S.V.J, "Analisis Mitigasi Bencana Abrasi pada Wilayah Pantai Galesong Kabupaten Takalar," *SENSISTEK*, vol. 6, no. 2, pp. 237–241, Nov. 2023.
- [11] P. M. Mayer *et al.*, "Where the rubber meets the road: Emerging environmental impacts of tire wear particles and their chemical cocktails," Elsevier B.V., Jun. 2024. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.171153.
- [12] I. S. Bumi, Widyaningtias, and M. B. Adityawan, "Coastal Erosion Management by Implementing Concept of Building with Nature (BwN) in Demak Regency, Central Java, Indonesia," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing Ltd, Mar. 2021. doi: 10.1088/1755-1315/698/1/012005.
- [13] E. Damastuti, B. K. van Wesenbeeck, R. Leemans, R. S. de Groot, and M. J. Silvius, "Effectiveness of community-based mangrove management for coastal protection: A case study from Central Java, Indonesia," *Ocean Coast Manag*, vol. 238, May 2023, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2023.106498.
- [14] V. Perricone, M. Mutalipassi, A. Mele, M. Buono, D. Vicinanza, and P. Contestabile, "Nature-based and bioinspired solutions for coastal protection: An overview among key ecosystems and a promising pathway for new functional and sustainable designs," *ICES Journal of Marine Science*, vol. 80, no. 5, pp. 1218–1239, Jul. 2023, doi: 10.1093/icesjms/fsad080.



- [15] R. Hartati, R. Pribadi, R. W. Astuti, R. Yesiana, and I. Yuni H, “Kajian Pengamanan dan Perlindungan Pantai di Wilayah Pesisir Kecamatan Tugu dan Genuk, Kota Semarang,” *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 19, no. 2, pp. 95–110, Nov. 2016.
- [16] A. M. Lubis, N. Veronica, R. Saputra, J. Sinaga, M. Hasanudin, and E. Kusmanto, “Investigasi Arus Sejajar Pantai (Longshore Current) di Daerah Abrasi Bengkulu Utara,” *Jurnal Kelautan Tropis*, vol. 23, no. 3, pp. 316–324, Nov. 2020, doi: 10.14710/jkt.v23i3.8045.
- [17] S. Sakka and B. Baharuddin, “Analisis Model Penanganan Garis Pantai di Pantai Ujung Pandaran Kabupaten Kotawaringin Timur,” *JURNAL GEOCELEBES*, pp. 23–34, Apr. 2021, doi: 10.20956/geocelebes.v5i1.9152.
- [18] K. Regency, M. Nopiana, F. Yulianda, A. Fahrudin, and G. Yulianto, “Coastal rehabilitation efforts through community perception: A case study in,” 2021. [Online]. Available: <http://www.bioflux.com.ro/aacl>
- [19] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, “Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat No. 09/PRT/M/2010 tentang Pedoman Pengaman Pantai,” Jakarta, 2010.
- [20] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, “Surat Edaran Direktur Jenderal Sumber Daya Air No. 11/SE/D/2021 tentang Pedoman dan Kriteria Perencanaan Pengaman Pantai,” Jakarta, 2021.
- [21] CERC, *Shore Protection Manual*, vol. 1. Washington, DC: Department of The Army US Army Corps of Engineers, 1984.
- [22] B. Triatmodjo, *Perencanaan Bangunan Pantai*, 3rd ed. Yogyakarta: Beta Offset, 2014.
- [23] Michelin, “Technical data book: Truck & Bus tires - Regional & On/Off Road.,” Clermont-Ferrand: Michelin Group.
- [24] B. Triatmodjo, *Teknik Pantai*, 8th ed. Yogyakarta: Beta Offset, 2016.
- [25] Y. Muliati, *Rekayasa Pantai*, 1st ed. Bandung: Itenas, 2020.
- [26] E. Utomo and M. Djaya Bakri, “Studi Perubahan Garis Pantai dengan Metode DSAS (Digital Shoreline Analysis System) Sebagai Upaya Identifikasi Erosi di Pantai Utara Pulau Tarakan,” *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, vol. 7, no. 2, pp. 216–233, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.35334/be.v7i2.4208>.
- [27] M. E. Hanley, R. C. Thompson, and E. Tyllianakis, “Designing resilient infrastructure for coastal communities: A framework for incorporating ecosystem-based approaches.,” 2018.
- [28] A. Wik and G. Dave, “Occurrence and effects of tire wear particles in the environment – A critical review and an initial risk assessment,” *Environmental Pollution*, vol. 157, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.envpol.2008.09.028.
- [29] United Nations, “Transforming our world: The 230 agenda for sustainable development,” 2015.

