

# PENGARUH PEMECAH GELOMBANG AMBANG RENDAH (PEGAR) TERHADAP PERLINDUNGAN PANTAI DI INDONESIA: *A LITERATURE REVIEW*

Fikri Aris MUNANDAR<sup>1\*</sup>, Anita YULIANA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

\*Email korespondensi: [fikriarism@uho.ac.id](mailto:fikriarism@uho.ac.id)

[diterima: 16 Mei 2026, disetujui: 24 Juni 2026]

## ABSTRACT

Low-crested breakwaters (LCB) have been widely examined as a coastal protection approach due to their capacity to reduce wave energy, support sediment accretion, and enhance the effectiveness of sand nourishment in tropical coastal environments. This systematic literature review analyzes the environmental impacts of LCB on sand nourishment, particularly along tropical Indonesian coasts and comparable coastal settings, while considering the influence of climate change on shoreline dynamics. The reviewed literature includes peer-reviewed studies employing field observations, numerical modeling, experimental testing, and literature synthesis. Findings indicate that LCB can improve sediment retention and reduce erosion when designed according to local hydrodynamic conditions, coastal morphology, and sediment supply. Their effectiveness, however, remains constrained by several limitations, including sediment distribution imbalance, limited high-resolution data, and insufficient long-term ecological assessment. The integration of LCB with mangroves restoration and hybrid nature-based solutions (HNBS) demonstrates a more adaptive potential, as it can simultaneously enhance wave attenuation, sediment stabilization, and ecological benefits. Methodological variation, limited integration of socio-economic aspects, and weak linkage with coastal policy reveal important knowledge gaps that require further investigation. This synthesis highlights the need for a multidisciplinary approach that connects coastal engineering, ecology, social sciences, and public policy to support sustainable coastal protection strategies in Indonesia under increasing climate change pressures.

**Keywords:** Low-crested breakwater, sand nourishment, sustainable coastal protection, climate change, Indonesian coasts.

## INTISARI

Pemecah gelombang ambang rendah (PEGAR) menjadi salah satu pendekatan perlindungan pesisir yang banyak dikaji karena kemampuannya dalam mereduksi energi gelombang, mendukung akresi sedimen, dan memperkuat efektivitas *sand nourishment* pada wilayah pesisir tropis. Artikel berbasis *systematic literature review* ini menganalisis dampak lingkungan PEGAR terhadap *sand nourishment*, khususnya pada pesisir tropis Indonesia dan wilayah sejenis, dengan mempertimbangkan pengaruh perubahan iklim terhadap dinamika garis pantai. Literatur yang dianalisis mencakup studi terbaru yang menggunakan observasi lapangan, pemodelan numerik, pengujian eksperimental, dan sintesis literatur. Temuan menunjukkan bahwa PEGAR dapat meningkatkan retensi sedimen dan mengurangi erosi apabila dirancang sesuai karakteristik hidrodinamika, morfologi pantai, dan suplai sedimen setempat. Efektivitas struktur ini masih menghadapi sejumlah keterbatasan, terutama ketidakseimbangan distribusi sedimen, keterbatasan data beresolusi tinggi, serta minimnya evaluasi ekologis jangka panjang. Integrasi PEGAR dengan restorasi *mangroves* dan pendekatan *Hybrid Nature Based Solution* (HNBS) memperlihatkan potensi yang lebih adaptif karena mampu meningkatkan pelemahan gelombang, stabilisasi sedimen, dan manfaat ekologis secara bersamaan. Variasi metodologi, keterbatasan integrasi aspek sosial-ekonomi, dan lemahnya keterkaitan dengan kebijakan pesisir menunjukkan adanya celah pengetahuan yang perlu ditangani. Kajian ini menegaskan pentingnya pendekatan multidisipliner yang menghubungkan rekayasa pantai, ekologi,

ilmu sosial, dan kebijakan publik untuk mendukung strategi perlindungan pesisir Indonesia yang berkelanjutan di tengah tekanan perubahan iklim.

**Kata kunci:** PEGAR, *sand nourishment*, perlindungan pesisir berkelanjutan, perubahan iklim, pesisir Indonesia.

## PENDAHULUAN

Penelitian mengenai dampak lingkungan pemecah gelombang ambang rendah, selanjutnya disebut PEGAR, terhadap pengisian pasir pantai (*sand nourishment*) di wilayah pesisir tropis, khususnya Indonesia, telah berkembang menjadi bidang kajian yang penting seiring meningkatnya ancaman erosi pantai dan kenaikan muka air laut akibat perubahan iklim. Kawasan pesisir Indonesia memiliki karakteristik morfodinamika yang beragam serta didukung oleh sistem ekologis penting, seperti *mangroves* dan padang lamun, sehingga menghadapi tantangan besar akibat ketidakseimbangan sedimen dan perubahan garis pantai (Solihuddin dkk., 2020). Dalam beberapa dekade terakhir, orientasi penelitian perlindungan pesisir mulai bergeser dari pendekatan rekayasa keras (*hard engineering*) menuju integrasi pendekatan hibrida dan solusi berbasis alam (*nature-based solutions*) yang tidak hanya menekankan efektivitas perlindungan, tetapi juga keberlanjutan ekologis (Huynh dkk., 2024; Saengsupavanich dkk., 2022). Signifikansi praktis topik ini terlihat pada kerentanan wilayah pesisir padat penduduk, seperti pantai utara Jawa, yang mengalami laju erosi hingga 2 m/tahun dan mengancam infrastruktur serta mata pencaharian masyarakat (Candrayana dkk., 2023; Sagala dkk., 2024). Sebagai contoh, dalam kurun tahun 1990–2018, garis pantai daerah Legonkulon, Subang, Jawa Barat telah bergeser sejauh 2361,46 m ke daratan dengan kehilangan 1012,25 ha akibat erosi. (Kalthar & Itaya, 2022). Pada tingkat global, sekitar 70% pantai mengalami erosi, sehingga kebutuhan terhadap strategi perlindungan pesisir yang efektif menjadi semakin mendesak (Dong dkk., 2024; Morris dkk., 2018)

Permasalahan spesifik yang dibahas dalam artikel ini adalah terbatasnya pemahaman mengenai pengaruh LCB terhadap dinamika sedimen dan *sand nourishment* dalam kondisi iklim tropis, terutama ketika dikombinasikan dengan dampak perubahan iklim seperti kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas badai (Dong dkk., 2024; Hassanpour dkk., 2024). Meskipun LCB telah banyak digunakan sebagai struktur perlindungan pesisir, masih terdapat celah pengetahuan mengenai dampak lingkungan jangka panjangnya, khususnya pada ekosistem pesisir Indonesia yang kompleks (Dm dkk., 2021; Medina, 2024; Xia, 2025). Perdebatan juga muncul antara pihak yang mendukung penggunaan struktur keras untuk pengendalian erosi secara cepat dan pihak yang menekankan rekayasa ekologis (*eco-engineering*) serta solusi berbasis alam yang lebih memperhatikan manfaat ekologis dan keberlanjutan (Md Noor dkk., 2024). Kesenjangan pengetahuan tersebut berpotensi menghasilkan keputusan pengelolaan pesisir yang kurang optimal, bahkan dapat memperburuk erosi atau menurunkan kualitas habitat pesisir (Arifanti, 2020; Haryani, 2022).

Kerangka konseptual penelitian ini mengintegrasikan prinsip rekayasa pantai dan konservasi ekologi dengan mendefinisikan LCB sebagai struktur pesisir berprofil rendah yang dirancang untuk meredam energi gelombang dan mendorong pengendapan sedimen (Hassanpour dkk., 2024; Torres-Freyermuth dkk., 2019). *Sand nourishment* merujuk pada proses penambahan sedimen secara artifisial maupun alami untuk mempertahankan profil Pantai (Kindeberg dkk., 2022). Faktor perubahan iklim, termasuk kenaikan muka air laut dan perubahan hidrodinamika, berinteraksi dengan struktur dan proses tersebut sehingga

memengaruhi stabilitas garis Pantai (Dong dkk., 2024; Jayson-Quashigah dkk., 2025). Kerangka ini menjadi dasar bagi tinjauan sistematis dalam menilai keterkaitan antara LCB, dinamika sedimen, dan dampak iklim dalam konteks pesisir tropis.

Tinjauan sistematis ini bertujuan menyintesis literatur mutakhir mengenai dampak lingkungan LCB terhadap sand nourishment di wilayah pesisir tropis Indonesia, dengan perhatian khusus pada pengaruh perubahan iklim. Tujuan tersebut diarahkan untuk mengidentifikasi keterbatasan dan celah penelitian guna mendukung perumusan strategi perlindungan pesisir berkelanjutan yang mampu menyeimbangkan efektivitas rekayasa dan integritas ekologis. Artikel ini memberikan kontribusi dengan menjembatani perspektif rekayasa dan ekologi, terutama karena studi terintegrasi dalam konteks pesisir tropis masih relatif terbatas (Sayar dkk., 2024; Xia, 2025).

Tinjauan ini menggunakan penelusuran literatur secara terstruktur dan analisis kritis terhadap artikel terulas sejawat, laporan, serta studi kasus yang relevan dengan LCB, dinamika sedimen, dan adaptasi perubahan iklim di Indonesia maupun wilayah tropis yang sebanding. Temuan disusun secara tematik untuk menjelaskan perubahan morfologi, dampak ekologis, dan pendekatan rekayasa hibrida. Penyusunan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai perkembangan pengetahuan saat ini serta arah penelitian mendatang dalam perlindungan pesisir berkelanjutan (Roldán dkk., 2024; Santoso, 2025).

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* untuk mengkaji integritas struktural PEGAR terhadap gelombang badai ekstrem dalam skenario perubahan iklim. Penyusunan artikel ini dibantu oleh *AI-assisted literature search* pada tahap pen-

carian, pengumpulan, penyaringan awal, pengurutan relevansi, dan *citation chaining*. AI digunakan untuk mengubah kata kunci penelitian menjadi beberapa *search queries*, menjalankan pencarian artikel pada basis data ilmiah, menyaring artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, serta mengidentifikasi artikel tambahan melalui *backward citation chaining* dan *forward citation chaining*. Namun, penulis tetap melakukan pemeriksaan akhir terhadap judul, abstrak, kata kunci, dan substansi artikel untuk memastikan kesesuaian literatur dengan fokus penelitian. Pada tahap pencarian awal ditemukan 132 artikel kandidat, kemudian proses *citation chaining* menghasilkan 112 artikel tambahan, sehingga total artikel kandidat yang diperoleh berjumlah 244 artikel. Setelah dilakukan penilaian relevansi berdasarkan kedekatan dengan pertanyaan penelitian, kontribusi metodologis, dan kualitas ilmiah, sebanyak 237 artikel dinilai relevan dengan topik penelitian, sedangkan 36 artikel dikategorikan sangat relevan dan digunakan sebagai dasar utama analisis mendalam. Literatur terpilih kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola temuan, keterbatasan metodologis, dan celah pengetahuan terkait integritas struktural PEGAR, skenario perubahan iklim, *overtopping*, stabilitas struktur, biaya siklus hidup, serta pendekatan perlindungan pesisir berbasis hibrida maupun ekologis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Dampak Lingkungan

Penilaian dampak lingkungan menunjukkan bahwa struktur pemecah gelombang memiliki pengaruh yang signifikan terhadap transport sedimen, morfologi garis pantai, dan kondisi ekologis pesisir. Berbagai penelitian mengungkapkan bahwa dampak tersebut dapat bersifat positif maupun negatif, bergantung pada desain struktur, karakteristik lingkungan, serta konteks hidrodinamika setempat (Saengsupavanich dkk., 2022; Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019).

Sejumlah studi menyoroti terjadinya ketidakseimbangan sedimen dan erosi pada sisi hilir arus sedimen (*downdrift*) dari struktur pemecah gelombang. Temuan ini menunjukkan pentingnya perencanaan tata letak, permeabilitas struktur, dan hubungan antara pola gelombang, arus, serta suplai sedimen dalam desain perlindungan pesisir (Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019; Vasconcelos dkk., 2024). Dampak ekologis yang teridentifikasi meliputi gangguan habitat dan perubahan keanekaragaman hayati. Perkembangan penelitian terbaru mulai mendorong penggunaan material ramah lingkungan dan pendekatan *ecological retrofitting* untuk mengurangi dampak negatif struktur keras terhadap ekosistem pesisir (Medina, 2024; Sayar dkk., 2024; Xia, 2025). Solusi berbasis alam, seperti *mangroves* dan padang lamun, juga diakui memiliki peran penting dalam stabilisasi sedimen dan perlindungan garis pantai, baik sebagai pelengkap maupun sebagai alternatif terhadap struktur keras (James dkk., 2019; Jordan & Fröhle, 2022; Risandi dkk., 2023). Beberapa tinjauan juga menegaskan bahwa kajian dampak ekologis jangka panjang masih terbatas, sehingga diperlukan penilaian lingkungan yang lebih terintegrasi dalam perencanaan dan desain pemecah gelombang (Jordan & Fröhle, 2022; Xia, 2025).

### Efektivitas

Efektivitas PEGAR dalam mendukung *sand nourishment* menunjukkan hasil yang bervariasi. Studi eksperimental dan observasi lapangan memperlihatkan bahwa akresi sedimen di belakang struktur dapat terjadi, tetapi tingkat keberhasilannya sangat dipengaruhi oleh permeabilitas pemecah gelombang, konfigurasi tata letak, serta kondisi hidrodinamika lokal (Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019). Hasil analisis yang dilakukan oleh Solihuddin dkk. (2020) menunjukkan bahwa sedimentasi mencapai 0,01 – 0,04 m dibelakang struktur. Studi oleh Soeprbowati dkk. (2025) menunjukkan pendekatan gabungan antara pemecah gelombang

dan *mangroves* terbukti dapat meningkatkan retensi sedimen dan meredam energi gelombang secara lebih efektif hingga 94% dibandingkan penggunaan pemecah gelombang secara tunggal (Utomo dkk., 2024). Metode *beach nourishment*, seperti *berm nourishment*, *profile nourishment*, dan *bar nourishment*, menunjukkan tingkat efisiensi yang berbeda pada kondisi badai maupun nonbadai. *Bar nourishment* dinilai efektif dalam mendisipasikan energi gelombang karena posisinya dapat membantu mengurangi energi gelombang sebelum mencapai garis pantai (Meng dkk., 2024). Pemodelan numerik dan pemanfaatan lapangan juga menunjukkan bahwa pengangkatan struktur pemecah gelombang dapat mendorong pemulihan garis pantai secara alami, meskipun durasi dan tingkat keberhasilan pemulihan bergantung pada berbagai faktor lokal (Chi dkk., 2023). Analisis biaya-manfaat menegaskan pentingnya desain berbasis lokasi dan integrasi faktor ekologis agar hasil *sand nourishment* dapat berlangsung secara berkelanjutan (Pais-Barbosa dkk., 2023).

### Integrasi Perubahan Iklim

Integrasi adaptasi perubahan iklim menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan desain perlindungan pesisir. Banyak penelitian telah memasukkan faktor kenaikan muka air laut, gelombang badai (*storm surge*), dan variabilitas monsun ke dalam desain perlindungan pesisir, meskipun tingkat integrasinya masih sangat beragam antarstudi (Dong dkk., 2024; Hassanpour dkk., 2024; Sagala dkk., 2024). Berbagai tinjauan menegaskan bahwa pesisir tropis semakin rentan terhadap dampak perubahan iklim, sehingga diperlukan solusi perlindungan yang adaptif dan hibrida dengan menggabungkan pendekatan rekayasa teknik dan solusi berbasis alam (*nature-based solutions/NbS*) (Atmaja dkk., 2025; Dong dkk., 2024; Huynh dkk., 2024). Beberapa penelitian juga mengidentifikasi adanya kesenjangan dalam mempertim-

bangkan perubahan sosial-ekonomi dan lingkungan masa depan dalam perencanaan adaptasi, terutama pada kawasan pesisir perkotaan seperti Jakarta (Alaudin dkk., 2025; Murthy dkk., 2023). Program restorasi *mangroves* dan NbS sering dikaitkan dengan tujuan peningkatan ketahanan iklim karena mampu mendukung akresi sedimen dan stabilisasi garis pantai dalam kondisi lingkungan yang terus berubah (Jayson-Quashigah dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Hasil meta-analisis juga menunjukkan bahwa pendekatan hibrida memiliki keunggulan dalam pengurangan risiko bahaya dan efektivitas biaya hingga 8% pada skenario perubahan iklim (Huynh dkk., 2024).

### **Ketelitian Metodologis dan Kualitas Data**

Ketelitian metodologis dan kualitas data menjadi faktor penting dalam menilai validitas temuan penelitian terkait perlindungan pesisir. Studi-studi terdahulu menggunakan beragam metode, antara lain penginderaan jauh berbasis satelit, survei lapangan, pengujian eksperimental pada saluran gelombang (*flume testing*), pemodelan numerik seperti IH2VOF, CFD, dan GIS, serta *systematic literature review* (Munandar dkk., 2020; Roldán dkk., 2024; Santoso, 2025; Solihuddin dkk., 2020). Model numerik lanjutan umumnya dikalibrasi menggunakan data eksperimental untuk mensimulasikan interaksi gelombang-struktur dan dinamika transport sedimen (Chi dkk., 2023; Hassanpour dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Tinjauan sistematis dan meta-analisis juga menerapkan protokol seperti PRISMA untuk memastikan sintesis literatur dilakukan secara komprehensif dan mengurangi potensi bias (Atmaja dkk., 2025; Santoso, 2025). Sebagian studi mencatat keterbatasan akibat minimnya data lapangan, terutama dalam memahami interaksi hidrodinamika dengan padang lamun serta pemantauan ekologis jangka panjang (Risandi dkk., 2023). Pendekatan interdisipliner yang menggabungkan rekayasa teknik, ekologi, dan ilmu sosial dinilai penting untuk

meningkatkan kualitas data, ketepatan interpretasi, dan daya guna hasil penelitian (Morris dkk., 2018; Md Noor dkk., 2024).

### **Hybrid dan Nature Base Solutions**

Sinergi antara pendekatan hibrida dan solusi berbasis alam menunjukkan potensi besar dalam meningkatkan ketahanan pesisir sekaligus menjaga fungsi ekosistem. Banyak penelitian menunjukkan manfaat integrasi PEGAR dengan restorasi *mangroves*, penghalang permeabel, atau material ramah lingkungan untuk meningkatkan ketahanan pesisir dan layanan ekosistem (Atmaja dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Solusi hibrida terbukti mampu meningkatkan pelemahan energi gelombang, retensi sedimen, dan dukungan terhadap keanekaragaman hayati dibandingkan penggunaan struktur keras secara tunggal (Huynh dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Keterlibatan masyarakat dan pengelolaan partisipatif juga diidentifikasi sebagai faktor penting bagi keberhasilan implementasi NbS dan keberlanjutan program perlindungan pesisir (Ardhi Prasetyo Utomo dkk., 2024; Soeprbowati dkk., 2025). Kesenjangan penelitian masih terdapat pada upaya kuantifikasi fungsi ekologis jangka panjang dan dampak sosial-ekonomi dari solusi hibrida, sehingga diperlukan studi empiris dan pemodelan yang lebih mendalam (Xia, 2025). Efektivitas biaya dan integrasi kebijakan juga menjadi aspek penting agar perlindungan pesisir berbasis hibrida dan alam dapat diterapkan secara lebih luas di wilayah tropis (Atmaja dkk., 2025; Morris dkk., 2018).

### **Implikasi Teoretis**

Sintesis literatur menunjukkan adanya hubungan yang kompleks antara PEGAR, dinamika sedimen, dan respons ekosistem pesisir pada lingkungan tropis, khususnya Indonesia. Temuan yang dikaji menantang pandangan tradisional bahwa struktur keras saja sudah memadai untuk mewujudkan perlindungan pesisir berkelanjutan. Kinerja LCB perlu dipahami secara lebih terpadu dengan

proses ekologis, termasuk interaksi mangrove dan padang lamun dalam memengaruhi stabilitas sedimen, morfologi garis pantai, dan efektivitas perlindungan pesisir (Risandi dkk., 2023; Solihuddin dkk., 2020; Torres-Freyermuth dkk., 2019).

Studi-studi yang ditinjau mendukung perkembangan teori bahwa pendekatan rekayasa hibrida, yang menggabungkan PEGAR dengan NbS, dapat meningkatkan ketahanan pesisir melalui perlindungan fisik dan restorasi ekologis secara bersamaan. Pandangan ini sejalan dengan kerangka konseptual perlindungan pesisir multifungsi yang tidak hanya berorientasi pada pengurangan energi gelombang, tetapi juga mampu beradaptasi terhadap dampak perubahan iklim (Hassanpour dkk., 2024; Huynh dkk., 2024; Roldán dkk., 2024). Bukti dari pemodelan numerik dan eksperimen juga memperkuat pemahaman teoretis mengenai adaptasi pemecah gelombang terhadap tekanan perubahan iklim, seperti kenaikan muka air laut dan peningkatan intensitas badai. Model-model tersebut menunjukkan bahwa modifikasi struktur, termasuk penurunan elevasi mercu dan penggunaan unit pelindung ramah lingkungan, dapat mengoptimalkan kinerja hidraulik sekaligus mengurangi dampak lingkungan (Chi dkk., 2023; Munandar dkk., 2020; Sayar dkk., 2024)

Literatur yang ditinjau juga memperlihatkan masih adanya kesenjangan besar dalam penilaian dampak ekologis jangka panjang dan integrasi faktor sosial-ekonomi ke dalam teori perlindungan pesisir. Kondisi ini menunjukkan perlunya perluasan kerangka interdisipliner yang mencakup fungsi ekologis, keterlibatan masyarakat, dan dinamika tata kelola untuk memahami keberlanjutan penerapan PEGAR secara lebih menyeluruh (Jordan & Fröhle, 2022; Xia, 2025). Peran ekosistem pesisir sebagai agen dinamis dalam transport sedimen dan pembentukan morfologi garis pantai juga semakin diakui. Padang lamun dan mangrove dipahami dapat memodulasi hidrodinamika

serta meningkatkan stabilitas sedimen, sehingga keduanya perlu dimasukkan ke dalam model morfodinamika pesisir dan strategi perlindungan Pantai (James dkk., 2019; Risandi dkk., 2023; Twomey dkk., 2022). Pengaruh perubahan iklim terhadap dinamika garis pantai, termasuk perubahan rezim gelombang dan suplai sedimen, secara teoretis berkaitan langsung dengan kinerja serta umur layanan pemecah gelombang. Asumsi desain yang berbasis pada kondisi statis perlu dikaji kembali dengan memasukkan prinsip pengelolaan adaptif dalam teori rekayasa pantai (Candrayana dkk., 2023; Dong dkk., 2024; Medina, 2024).

### Implikasi Praktis

Dalam konteks pengelolaan pesisir di Indonesia, integrasi PEGAR dengan NbS, seperti restorasi *mangroves*, menawarkan pendekatan yang lebih hemat biaya dan berkelanjutan secara lingkungan untuk mengurangi erosi serta meningkatkan stabilitas garis pantai. Strategi hibrida ini mendukung layanan ekosistem sekaligus menjawab kerentanan pesisir terhadap perubahan iklim (Atmaja dkk., 2025; Soeprbowati dkk., 2025). Pembuat kebijakan dan praktisi perlu memprioritaskan desain dan pemeliharaan PEGAR yang adaptif dengan mempertimbangkan dinamika sedimen lokal, iklim gelombang, dan konteks ekologis setempat. Pertimbangan tersebut penting untuk menghindari dampak negatif yang tidak diinginkan, seperti erosi pada sisi hilir arus sedimen (*downdrift erosion*) atau degradasi habitat pesisir (Dm dkk., 2021; Torres-Freyermuth dkk., 2019; Vasconcelos dkk., 2024).

Penggunaan material dan unit pelindung ramah lingkungan dalam konstruksi pemecah gelombang dapat mengurangi jejak ekologis serta mendukung keanekaragaman hayati. Pendekatan ini menyelaraskan pembangunan infrastruktur pesisir dengan tujuan konservasi, sehingga membutuhkan kolaborasi antara insinyur, ahli ekologi, pemerintah, dan pemangku kepentingan lokal dalam menyusun

pedoman pertahanan pesisir yang berkelanjutan (Md Noor dkk., 2024; Sayar dkk., 2024; Xia, 2025). Peningkatan kapasitas pemantauan dan pemodelan, termasuk penggunaan *digital twins* dan simulasi numerik lanjutan, juga menjadi faktor penting untuk mengoptimalkan NbS dan solusi hibrida. Perangkat tersebut memungkinkan pengujian skenario dan evaluasi kinerja struktur di bawah kondisi iklim masa depan, sehingga keputusan pengelolaan dapat disusun berbasis bukti (Chi dkk., 2023; Roldán dkk., 2024).

Kebutuhan terhadap penguatan kapasitas dan peningkatan pendanaan menjadi semakin mendesak untuk mendukung riset interdisipliner serta implementasi perlindungan pesisir terpadu di Indonesia. Pengisian kesenjangan pengetahuan, terutama terkait hidrodinamika dan dampak sosial-ekonomi, akan meningkatkan efektivitas serta penerimaan intervensi berbasis PEGAR dan NbS (Atmaja dkk., 2025; Risandi dkk., 2023; Wannewitz & Garschagen, 2021). Strategi perlindungan pesisir juga perlu memasukkan partisipasi masyarakat dan reformasi tata kelola agar hasil yang dicapai lebih adil dan berkelanjutan. Upaya tersebut mencakup pengakuan terhadap pengetahuan lokal, penguatan keterlibatan pemangku kepentingan, serta penyelarasan intervensi pesisir dengan kerangka adaptasi perubahan iklim nasional (Alaudin dkk., 2025; Atmaja dkk., 2025; Wannewitz & Garschagen, 2021).

## KESIMPULAN

PEGAR memiliki peran penting dalam perlindungan pesisir tropis karena mampu mereduksi energi gelombang, mendukung akresi sedimen, dan meningkatkan efektivitas *sand nourishment* apabila dirancang sesuai karakteristik hidrodinamika, morfologi pantai, dan suplai sedimen lokal. Hasil sintesis menunjukkan bahwa efektivitas struktur ini tidak bersifat tunggal, melainkan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi tata letak, permeabilitas, elevasi mercu, kondisi gelombang,

serta interaksi dengan ekosistem pesisir. Pada beberapa kondisi, PEGAR dapat membantu menstabilkan garis pantai dan mengurangi erosi. Pada kondisi lain, desain yang kurang tepat berpotensi menimbulkan ketidakseimbangan sedimen, erosi pada sisi *downdrift*, gangguan habitat, serta perubahan keanekaragaman hayati. Hal ini menunjukkan bahwa pendekatan rekayasa keras tidak cukup untuk menjawab kompleksitas perlindungan pesisir berkelanjutan, terutama di wilayah tropis seperti Indonesia yang memiliki dinamika pantai dan ekosistem pesisir yang beragam.

Integrasi PEGAR dengan NbS, seperti restorasi *mangroves*, padang lamun, penghalang permeabel, dan material ramah lingkungan, menunjukkan potensi yang lebih adaptif dalam menghadapi tekanan perubahan iklim. Pendekatan hibrida mampu meningkatkan pelemahan gelombang, retensi sedimen, stabilitas garis pantai, serta manfaat ekologis dibandingkan penggunaan struktur keras secara terpisah. Temuan ini menegaskan pentingnya desain perlindungan pesisir yang tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga memasukkan faktor ekologis, sosial-ekonomi, partisipasi masyarakat, dan tata kelola kebijakan. Keterbatasan utama yang masih ditemukan meliputi kurangnya data lapangan beresolusi tinggi, minimnya pemantauan ekologis jangka panjang, heterogenitas metode penelitian, serta terbatasnya integrasi aspek sosial-ekonomi dalam evaluasi perlindungan pesisir. Arah penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan model interdisipliner, pemantauan jangka panjang, analisis biaya-manfaat berbasis lokasi, serta penguatan kebijakan adaptasi pesisir agar penerapan PEGAR dan solusi hibrida dapat mendukung perlindungan pesisir Indonesia yang lebih berkelanjutan, adaptif, dan ekologis.

## REFERENSI

Alaudin, Sujantoko, & Mustain, M. (2025). Impact of Sea Level Rise on the North Coast of Java, Indonesia: A Systematic

- Literature Review. *E3S Web of Conferences*, 674, 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202567403004>
- Utomo, A. P., Haerani, J. O., Ferdian, R. N., Paradise, R., & Radianto, D. O. (2024). Pemaksimalan Fungsi Penanaman Mangrove di Daerah Rawan Abrasi Jakarta. *Jurnal Ilmiah Nusantara*, 1(3), 12–22. <https://doi.org/10.61722/jinu.v1i3.1502>
- Arifanti, V. B. (2020). Mangrove management and climate change: A review in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 487(1), 012022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/487/1/012022>
- Atmaja, T., Yulianti, W., Arini, E. Y., Santoso, H., Setiawati, M. D., & Akita, N. (2025). Scaling Nature-Based Solutions (NbS): Lessons from Global Progress and Indonesia's Path to Sustainability. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00842-5>
- Candrayana, K. W., Sinarta, I. N., & Putu Eryani, I. G. A. (2023). Evaluasi Sistem Pengaman Pantai di Bali Selatan untuk Mengatasi Tantangan Perubahan Iklim. *Jurnal Ilmiah MITSU (Media Informasi Teknik Sipil Universitas Wiraraja)*, 11(2), 21–34. <https://doi.org/10.24929/ft.v11i2.2319>
- Chi, S., Zhang, C., & Zheng, J. (2023). Sandy shoreline recovery ability after breakwater removal. *Frontiers in Marine Science*, 10, 1191386. <https://doi.org/10.3389/fmars.2023.1191386>
- Dm, S., Nurhabni, F. & Null, H. B. (2021). Lessons Learned From Low-Crested Breakwaters Installation in North Coast of Java. *SCIREA Journal of Hydraulic Engineering*, 4(3), 40–50. <https://doi.org/10.54647/hydraulic57026>
- Dong, W. S., Ismailluddin, A., Yun, L. S., Ariffin, E. H., Saengsupavanich, C., Abdul Maulud, K. N., Ramli, M. Z., Miskon, M. F., Jeofry, M. H., Mohamed, J., Mohd, F. A., Hamzah, S. B., & Yunus, K. (2024). The impact of climate change on coastal erosion in Southeast Asia and the compelling need to establish robust adaptation strategies. *Heliyon*, 10(4), e25609. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25609>
- Haryani, E. B. S. (2022). Kerusakan Pesisir Akibat Sedimentasi dan Abrasi di Pantai Karawang. *Grouper*, 13(2), 117–125. <https://doi.org/10.30736/grouper.v13i2.127>
- Hassanpour, N., Contestabile, P., Lara, J. L., & Vicinanza, D. (2024). Analisis Of Upgrading Low-Crested Structures As An Adaptation Measure To Climate Change For Coastal Protection: A Hybrid Approach. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.770>
- Huynh, L. T. M., Su, J., Wang, Q., Stringer, L. C., Switzer, A. D., & Gasparatos, A. (2024). Meta-analysis indicates better climate adaptation and mitigation performance of hybrid engineering-natural coastal defence measures. *Nature Communications*, 15(1), 2870. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-46970-w>
- James, R. K., Silva, R., Van Tussenbroek, B. I., Escudero-Castillo, M., Mariño-Tapia, I., Dijkstra, H. A., Van Westen, R. M., Pietrzak, J. D., Candy, A. S., Katsman, C. A., Van Der Boog, C. G., Riva, R. E. M., Slobbe, C., Klees, R., Stapel, J., Van Der Heide, T., Van Katwijk, M. M., Herman, P. M. J., & Bouma, T. J. (2019). Maintaining Tropical Beaches with Seagrass and Algae: A Promising Alternative to Engineering Solutions. *BioScience*, 69(2), 136–142. <https://doi.org/10.1093/biosci/biy154>

- Jayson-Quashigah, P.-N., Staneva, J., Chen, W., and Djath, B.: *Mangroves and Coastal Resilience: A Model-Based Evaluation*, EGU General Assembly 2025, Vienna, Austria, 27 Apr–2 May 2025, EGU25-17068. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-17068>
- Jordan, P. & Fröhle, P. (2022). Bridging the gap between coastal engineering and nature conservation?: A review of coastal ecosystems as nature-based solutions for coastal protection. *Journal of Coastal Conservation*, 26(2). <https://doi.org/10.15480/882.4238>
- Kalther, J. & Itaya, A. (2020). Coastline changes and their effects on land use and cover in Subang, Indonesia. *Journal of Coastal Conservation*. 24. <https://doi.org/10.1007/s11852-020-00736-w>
- Kindeberg, T., Almström, B., Skoog, M., Olsson, P. A., & Hollander, J. (2022). Toward a multifunctional nature-based coastal defense: A review of the interaction between beach nourishment and ecological restoration. *Nordic Journal of Botany*, 2023(1), e03751. <https://doi.org/10.1111/njb.03751>
- Medina, J. R. (2024). Breakwaters in a Living Environment. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.819>
- Meng, Y., Qu, Z., Li, X., Zhu, M., & Liang, B. (2024). An experimental study on the evolution of beach profiles under different beach nourishment methods. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1381937. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1381937>
- Morris, R. L., Konlechner, T. M., Ghisalberti, M., & Swearer, S. E. (2018). From grey to green: Efficacy of eco-engineering solutions for nature-based coastal defence. *Global Change Biology*, 24(5), 1827–1842. <https://doi.org/10.1111/gcb.14063>
- Munandar, F. A., Triatmadja, R., & Yuwono, N. (2020). The performance of low crested breakwaters as a sand trap for shore protection. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 426(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012005>
- Md Noor, N., Abdul Maulud, K.N., Mohd Azmi, A.T., & Harun, S.N. (2024). Eco-engineering in the Application of Nature-based Coastal Defense. *Jurnal Kejuruteraan*. <https://doi.org/10.60692/0P1VA-T9P16>
- Pais-Barbosa, J., Ferreira, A. M., Lima, M., Filho, L. M., Roebeling, P., & Coelho, C. (2023). Cost-benefit analysis of artificial nourishments: Discussion of climate change adaptation pathways at Ovar (Aveiro, Portugal). *Ocean & Coastal Management*, 244, 106826. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106826>
- Ramana Murthy, M. V., Ravichandran, V., Vendhan, M., Alluri, S. K. R., & Ram Kumar, J. (2023). Coastal Research—Beach Restoration and Protection. In V. K. Gahalaut & M. Rajeevan (Eds.), *Social and Economic Impact of Earth Sciences* (pp. 297–311). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-6929-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-981-19-6929-4_15)
- Risandi, J., Rifai, H., Lukman, K. M., Sondak, C. F. A., Hernawan, U. E., Quevedo, J. M. D., Hidayat, R., Ambo-Rappe, R., Lanuru, M., McKenzie, L., Kohsaka, R., & Nadaoka, K. (2023). Hydrodynamics across seagrass meadows and its impacts on Indonesian coastal ecosystems: A review. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1034827. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1034827>

- Roldán, M., Maza, M., Lara, J. L., & Losada, I. J. (2024). Analysis Of Hybrid Solutions For Coastal Protection Combining Physical And Numerical Cfd Modeling. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.813>
- Saengsupavanich, C., Ariffin, E. H., Yun, L. S., & Pereira, D. A. (2022). Environmental impact of submerged and emerged breakwaters. *Heliyon*, 8(12), e12626. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12626>
- Sagala, P. M., Bhomia, R. K., & Murdiyarso, D. (2024). Assessment of coastal vulnerability to support mangrove restoration in the northern coast of Java, Indonesia. *Regional Studies in Marine Science*, 70, 103383. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2024.103383>
- Santoso, E. H. (2025). Tinjauan Pustaka: Metode Analisis Perubahan Morfologi Pantai. *Jurnal Penginderaan Jauh Indonesia*, 5(1), 1–8. <https://doi.org/10.12962/jpji.v5i1.8217>
- Sayar, S. D., Nistor, I., Baker, S., & Martínez, J. G. (2024). Low-crested and Emergent Breakwaters with Eco-Friendly Armour Units. *CoastLab 2024: Physical Modelling in Coastal Engineering and Science*. <https://doi.org/10.59490/coastlab.2024.775>
- Soeprobowati, T. R., Khotimperwati, L., Jumari, J., & Helmy, M. (2025). Integrating nature-based solutions in estuary management: A climate mitigation perspective from Demak, Central Java. *Estuarine Management and Technologies*, 2, 119–140. <https://doi.org/10.3897/emt.2.172938>
- Solihuddin, T., Prihantono, J., Mustikasari, E., & Husrin, S. (2020). Perubahan Garis Pantai di Perairan Teluk Banten Dan Sekitarnya. *Jurnal Geologi Kelautan*, 18(2). <https://doi.org/10.32693/jgk.18.2.2020.596>
- Torres-Freyermuth, A., Medellín, G., Mendoza, E. T., Ojeda, E., & Salles, P. (2019). Morphodynamic Response to Low-Crested Detached Breakwaters on a Sea Breeze-Dominated Coast. *Water*, 11(4), 635. <https://doi.org/10.3390/w11040635>
- Twomey, A. J., Callaghan, D. P., O'Brien, K. R., & Saunders, M. I. (2022). Contextualising shoreline protection by seagrass using lessons from submerged breakwaters. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 276, 108011. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108011>
- Vasconcelos, Y., De Paula, D., Ferreira, Ó., & Leisner, M. (2024). Contrasting short-term shoreline behaviour after the construction of sinusoidal groynes in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 136, 104832. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.104832>
- Wannewitz, M. & Garschagen, M. (2021). Review article: Mapping the adaptation solution space – lessons from Jakarta. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(11), 3285–3322. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3285-2021>
- Xia, Y. (2025). Multifunctional integration of breakwaters: Taking ecological protection and restoration as an example. *E3S Web of Conferences*, 606, 05006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560605006>