

Eko-kejuruteraan dalam Penerapan Pertahanan Pantai berasaskan Alam Semula Jadi

(Eco-engineering in the Application of Nature-based Coastal Defense)

Noorashikin Md Noor^{a*}, Khairul Nizam Abdul Maulud^{a,b}, Ahmad Tarmizi Mohd Azmi^{a,b} & Siti Norliyana Harun^c

^a*Pusat Pencerapan Bumi, Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.*

^b*Jabatan Kejuruteraan Awam, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.*

^c*Pusat Sistem Perubahan Iklim Tropika, Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia.*

*Corresponding author: noor@ukm.edu.my

Received 10 February 2023, Received in revised form 18 May 2023

Accepted 18 June 2023, Available online 30 January 2024

ABSTRAK

Perubahan iklim meningkatkan ancaman hakisan dan banjir di sepanjang pesisiran pantai di seluruh dunia. Teknologi kejuruteraan sebagai respons untuk melindungi komuniti pantai dan infrastruktur yang berkaitan menjadi semakin tidak mampan dalam konteks ekonomi dan ekologi. Isu ini telah membawa kepada cadangan untuk memulihkan habitat secara semula jadi, seperti beting pasir, kawasan paya air masin, bakau, rumput laut, terumbu karang dan kerang, untuk menyediakan perlindungan pantai sebagai ganti atau untuk melengkapkan struktur tiruan. Pengurusan pantai sering berhadapan dengan masalah pantai yang terhakis dan memerlukan keputusan mengenai pilihan mitigasi yang paling sesuai untuk dilaksanakan. Dalam artikel ulasan pendek ini, penerapan eko-kejuruteraan dalam pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi dibincangkan. Halangan untuk mengambil pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi adalah penilaian ketat terhadap keberkesanan berbanding dengan struktur perlindungan buatan. Penilaian bukti terkini untuk keberkesanan perlindungan pantai berasaskan alam semula jadi berbanding perlindungan pantai buatan dan keperluan penyelidikan masa depan dibincangkan. Projek-projek masa depan harus menilai habitat yang dicipta atau dipulihkan untuk pertahanan pantai untuk keberkesanan kos berbanding dengan struktur tiruan di bawah keadaan persekitaran yang sama. Analisis kos-faedah harus mengambil kira semua perkhidmatan ekosistem yang disediakan oleh struktur berasaskan alam semula jadi atau tiruan sebagai tambahan kepada perlindungan pantai. Penyelidikan di kalangan saintis, pihak pengurusan pantai dan jurutera diperlukan untuk memudahkan uji kaji yang diperlukan untuk menguji nilai skim perlindungan pantai dan menyokong penggunaannya sebagai alternatif kepada struktur buatan. Penyelidikan ini sangat diperlukan kerana iklim yang pesat berubah memerlukan penyelesaian baru dan inovatif untuk mengurangkan kerentanan komuniti pantai.

Kata kunci: Perlindungan pantai; perubahan iklim; pemulihan; struktur tiruan, habitat semula jadi

ABSTRACT

Climate change increases the threat of erosion and flooding along coastlines around the world. Engineering technologies are response to protecting coastal communities and related infrastructure becoming increasingly unsustainable in economic and ecological contexts. This issue has led proposal to restore natural habitats, such as sand shoals, saltwater swamp areas, mangroves, seaweed, coral reefs, and shellfish, to provide coastal protection in lieu of or to complement artificial structures. Often coastal management is faced with eroded coastal problems which require decision on the most suitable mitigation option to implement. In this short review article, the application of eco-engineering in nature-based coastal defense is discussed. The obstacle in taking on the nature-based coastal defences is because of the rigorous assessment of their effectiveness compared to artificial protection structures. The assessment of the latest

evidence for the effectiveness of nature-based beach protection versus artificial beach protection and future research needs are discussed in this review. Future projects should evaluate the habitat created or restored for coastal defence for its cost-effectiveness compared to artificial structures under the same environmental conditions. A cost-benefit analysis should consider all ecosystem services provided by nature-based or artificial structures in addition to coastal protection. Research among scientists, coastal managers, and engineers are needed to facilitate the experiments needed to test the value of this coastal protection scheme and to support its use as an alternative to artificial structures. This research is urgently needed because the rapidly changing climate requires new and innovative solutions to reduce the vulnerability of coastal communities.

Keywords: Coast protection; climate change; restoration, artificial structure, natural habitat

PENGENALAN

Hampir separuh daripada penduduk dunia tinggal dalam jarak 60 km dari pesisiran pantai, dan tiga perempat daripada semua bandar besar terletak di kawasan pantai. Ini menunjukkan betapa pentingnya perlindungan pantai untuk menjaga kepentingan manusia dan alam sekitar, terutama di kawasan yang padat penduduk. Hakisan pantai dan banjir adalah bahaya yang mengancam manusia dan infrastruktur yang berkaitan di kawasan pantai. Kesan bahaya ini meningkat apabila jumlah dan nilai infrastruktur di pantai terus berkembang. Perubahan iklim pada masa depan diramalkan akan meningkatkan lagi kerentanan masyarakat terhadap bahaya pantai (Noor & Maulud 2022). Hal ini disebabkan oleh pengaruh perubahan iklim pada pemacu bahaya ini, seperti peningkatan aras laut, ketinggian gelombang yang lebih besar dan lebih tinggi, dan kekerapan bencana ribut. Sebagai contoh, sekurang-kurangnya 70% pantai di seluruh dunia terhakis, mengakibatkan hakisan pantai dan anjakan pedalaman (Rojahan et al. 2022), manakala sehingga 4.6% penduduk dunia mungkin mengalami banjir tahunan menjelang 2100. Mengenal pasti kaedah intervensi yang berkesan untuk melindungi dan mengurangkan bahaya kontemporari merupakan salah satu cabaran yang dihadapi oleh masyarakat pantai hari ini.

Perisai struktur kejuruteraan keras, seperti benteng laut dan pemecah ombak, adalah penyelesaian semasa untuk pertahanan pantai bagi melindungi daripada bahaya kontemporari (Cheong et al. 2013). Walau bagaimanapun, kos kewangan untuk mengekalkan struktur ini adalah sangat tinggi ditambah pula dengan senario perubahan iklim pada masa depan. Hal ini telah mendorong penyelidikan menyiasat nilai ekosistem semulajadi, seperti terumbu biogenik, beting pasir, pantai dan tumbuh-tumbuhan, untuk memberikan perlindungan terhadap hakisan dan gelombang, dengan kepentingan bahawa sistem ini dapat disesuaikan dengan perubahan iklim dan pembaikan selepas bencana alam terjadi (Pendleton et al. 2019). Pemulihan atau penciptaan habitat melalui teknik ‘kejuruteraan ekologi lembut’ disokong sebagai alat untuk

penstabilan pantai semulajadi, dengan kelebihan ekosistem tambahan. Walaupun terdapat batasan pertahanan pantai keras yang ketara dalam iklim yang berubah-ubah, struktur ini terus dibina, dengan sedikit perubahan dan penambahbaikan dalam pengurusan. Satu halangan kepada penggunaan pendekatan eko-kejuruteraan lembut yang lebih luas untuk pertahanan pantai adalah pembuktian bahawa habitat yang dipulihkan atau dicipta mampu memberikan perlindungan yang setara kepada habitat semula jadi yang utuh berbanding dengan struktur kejuruteraan keras.

Justeru, ulasan ini dibuat untuk menentukan bukti terkini keberkesanan pertahanan pantai menggunakan eko-kejuruteraan lembut berbanding penyelesaian kejuruteraan tradisional (Salaudin et al. 2021). Oleh kerana kajian baru-baru ini telah mengkaji peranan habitat semula jadi dalam pertahanan pantai dan penyesuaian perubahan iklim, maka ulasan ini menumpukan kepada habitat yang dipulihkan atau dicipta serta keupayaan mereka untuk melindungi pantai daripada hakisan dan banjir berbanding dengan struktur keras. Perbandingan antara habitat semulajadi yang dipulihkan atau dicipta dan struktur keras adalah relevan dalam pengurusan pantai, terutamanya dalam membuat keputusan mengenai jenis struktur yang perlu dibina untuk melindungi pantai yang terhakis. Keputusan ini haruslah mempertimbangkan keberkesanan perlindungan pantai serta kesan jangka panjang terhadap nilai ekosistem. Penyelesaian berasaskan alam semula jadi melalui pemulihan atau penciptaan habitat mempunyai potensi besar untuk pertahanan pantai, tetapi kurang mendapat perhatian daripada perkhidmatan ekosistem tambahan (contohnya peningkatan biodiversiti) yang disediakan oleh habitat ini.

HABITAT SEMULAJADI UNTUK PERTAHANAN PANTAI

Pantai menyokong pelbagai habitat, di mana beting pasir dan pantai, paya garam, bakau, rumput laut, rumput laut, terumbu karang dan tiram telah dikenal pasti mempunyai potensi penting dalam mengurangkan kesan bahaya pantai

(Rezaie et al. 2020). Peningkatan tumpuan terhadap potensi sistem ini berfungsi sebagai alternatif kepada struktur pertahanan pantai keras telah mendorong penyelidikan ke atas penggunaan ciri-ciri pantai semula jadi untuk menyokong daya tahan pantai dan pengurangan risiko. Sintesis baru-baru ini yang menilai 'infrastruktur hidup' sebagai pertahanan pantai telah memberi tumpuan kepada keberkesanan habitat pantai sedia ada untuk memberikan perlindungan terhadap bencana pantai, dibandingkan dengan infrastruktur keras. Seterusnya keupayaan sistem semula jadi untuk mencegah hakisan pantai dan banjir semasa ribut, taufan dan tsunami, untuk menghentikan atau melambatkan kehilangan kronik tanah pantai akibat hakisan yang berterusan dalam tempoh sederhana hingga panjang, dan meminimumkan banjir pantai akibat kenaikan paras laut masa depan (Wanger et al. 2020).

Habitat semulajadi menyediakan perlindungan terhadap bahaya pantai ini melalui proses ekosistem seperti peningkatan geseran, perairan cetek, endapan sedimen dan pembinaan biojisim menegak (Fitri et al. 2019). Proses-proses ini menimbulkan tindak balas seperti perubahan profil pantai dan ketinggian berbanding dengan paras laut dan pengecilan gelombang, yang seterusnya mengurangkan bahaya pantai. Sebagai contoh, habitat tumbuhan pantai, seperti rumput laut dan paya bakau, boleh mengurangkan aliran air dan ketinggian gelombang apabila ombak melalui tumbuh-tumbuhan padat, dan kesan yang sama disebabkan oleh permukaan kasar sistem terumbu (Joy & Gopinath 2021). Di samping itu, habitat subtidal menyebabkan perairan air cetek setempat, yang menggalakkan pemecahan ombak. Tumbuh-tumbuhan pantai dan terumbu karang boleh menstabilkan pantai dengan menggalakkan pemendapan sedimen dan mengurangkan hakisan dan pergerakan sedimen. Selanjutnya, pengumpulan sedimen berkaitan dengan ketinggian tanah berbanding dengan paras laut, sekali gus mengurangkan kemungkinan banjir semasa kejadian ribut.

Pengurangan ketinggian ombak sebanyak 70%, 72%, 36% dan 30%, masing-masing dapat dilihat di kawasan terumbu karang, paya garam, rumput laut dan bakau (Leo et al. 2019; Joy & Gopinath 2021). Perincian statistik ini memberikan gambaran tentang tahap pengurangan ketinggian ombak yang dicapai di setiap kawasan, yang penting untuk menilai keberkesanan pendekatan perlindungan pantai yang digunakan dan impaknya terhadap persekitaran semula jadi dalam konteks terumbu karang, paya garam, rumput laut, dan bakau. Ini setanding dengan pengurangan yang dilaporkan untuk pemecah ombak berkapasiti rendah. Kesan positif pada kawasan paya air masin juga dapat dilihat pada penstabilan garis pantai, walaupun kajian-kajian ini hanya membandingkan kawasan dengan dan tanpa paya air masin. Untuk paya bakau, ciri-ciri tumbuh-tumbuhan dan persekitaran adalah

penting untuk tahap pengecilan ombak dan penstabilan pantai yang disediakan. Sebagai contoh, peningkatan lebar paya, ketinggian tumbuh-tumbuhan dan ketumpatan serta ketinggian paya mempunyai kesan positif terhadap pengecilan ombak (Leo et al. 2019). Begitu juga, peningkatan pengeluaran biojisim, penutup peratusan, saiz tampalan dan ketumpatan mempunyai kesan positif terhadap penstabilan pantai, tetapi ketinggian pasang surut yang lebih besar mempunyai kesan negatif.

Pengurangan kesan bencana (tsunami, ribut dan siklon) juga telah dilaporkan di pantai di mana terdapat beting pasir (seperti dalam Rajah 1) berbanding pantai tanpa beting pasir, walaupun tahap perlindungan pantai bergantung kepada bentuk dan ketinggian beting pasir (Wanger et al. 2020). Beting-beting rendah berbanding boleh mengurangkan kapasiti perlindungan pantai, namun begitu jurang terbina dalam beting juga boleh menyebabkan kesan yang lebih besar dengan mempercepatkan aliran air di pedalaman. Terdapat beberapa perbandingan langsung antara beting dan struktur keras, di mana penilaian berkenaan tsunami tenaga rendah di Seychelles mendapati bahawa beting pasir kurang keberkesanannya daripada benteng laut dalam mengurangkan bahaya banjir tetapi beting pasir mengurangkan kekuatan gelombang yang membawa kepada penurunan ketara dalam kerosakan struktur berbanding dengan benteng laut. Kapasiti perlindungan pantai dalam benteng laut juga bergantung kepada ketinggian mereka. Beting pasir telah menurunkan kadar banjir di mana tahap lonjakan telah melebihi ketinggian benteng laut tetapi kekal lebih rendah daripada ketinggian beting pasir. Selain itu, terdapat banyak maklumat mengenai kepentingan terumbu tiram semulajadi sebagai pertahanan pantai serta mengurangkan hakisan pantai, bagaimanapun, kesannya berbeza-beza di antara lokasi dan tapak.



RAJAH 1. Beting pasir dalam habitat semula jadi sebagai pertahanan pantai
Sumber: simpanan penulis

Walaupun ciri-ciri perlindungan pantai secara semula jadi boleh dibandingkan dengan infrastruktur yang dibina untuk perlindungan pantai, tidak seperti pertahanan buatan, habitat pantai adalah ekosistem dinamik. Dari satu perspektif, ini adalah kelebihan kerana mereka mungkin mempunyai keupayaan untuk menyesuaikan diri dengan perubahan iklim. Sebagai alternatif, sistem dinamik membawa ketidakpastian yang boleh menjadi penghalang kepada penggunaan habitat semula jadi yang lebih luas dalam perancangan pertahanan pantai. Sebagai contoh, biojisim tumbuh-tumbuhan pantai di atas tanah boleh berbeza-beza mengikut musim, yang boleh memberi kesan kepada pemecah ombak. Selanjutnya, keberkesanan habitat semula jadi untuk melindungi garis pantai adalah bergantung pada tapak, bergantung kepada banjir pasang surut dan lebar pesisir pantai. Keberkesanan jangka panjang ekosistem pantai perlu diramalkan pada skala yang serupa dengan struktur kejuruteraan, tetapi ini sukar dinilai dan boleh berubah disebabkan oleh dinamik ekosistem yang wujud, atau faktor persekitaran. Kesan antropogenik lain pada masa yang sama mempengaruhi ekosistem pantai di samping perubahan iklim, termasuk pencemaran, pengekstrakan sumber dan kemasukan spesies invasif. Walaupun terdapat bukti yang habitat memainkan peranan sebagai perlindungan pantai, kehilangan global habitat ini adalah sehingga 50% untuk terumbu karang. Statistik ini merujuk kepada fakta bahawa terumbu karang, sebagai salah satu jenis habitat yang penting di kawasan pesisir, telah mengalami penurunan yang signifikan di seluruh dunia. Separuh dari terumbu karang di dunia telah hilang atau mengalami kerosakan. Data ini menghuraikan kepentingan kelestarian habitat terumbu karang dan peranannya dalam perlindungan pantai. Terumbu karang berfungsi sebagai penghalang alami yang dapat melindungi pantai dari hakisan dan kerosakan yang disebabkan oleh gelombang kuat. Kemusnahan habitat dapat mengurangi kemampuan semula jadi untuk melindungi pantai dan meningkatkan kerentanan terhadap bencana pantai seperti hakisan dan banjir. Selalunya, kemusnahan habitat paling banyak terjadi di sekitar kawasan yang paling padat penduduknya, ironinya di mana kesan kepada manusia adalah yang paling besar semasa hakisan dan banjir. Ini telah mendorong minat dalam memulihkan atau mewujudkan habitat sebagai pertahanan pantai.

KEJURUTERAAN EKOLOGI DALAM PERANCANGAN PERTAHANAN PANTAI

Kos ekonomi untuk penyesuaian pantai terhadap perubahan iklim menggunakan infrastruktur keras adalah tinggi. Kos tambahan dianggarkan sebanyak 4-11 bilion USD setahun dianggarkan untuk langkah-langkah perlindungan pantai

yang diperlukan mengikut unjuran perubahan iklim dalam tempoh 50 tahun akan datang. Terdapat juga penyelidikan yang menunjukkan bahawa membina infrastruktur dalam sistem intertidal dan subtidal mempunyai beberapa kesan ekologi negatif (Schooler et al. 2019). Sebagai contoh, struktur pertahanan pantai buatan menjadi pengumpulan spesies asing invasif (Pickart et al. 2021). Perubahan dalam komuniti ini mungkin mempengaruhi fungsi ekosistem dalam sistem tiruan, dan akibatnya kesan kepada manusia (contohnya bekalan makanan berkurang), namun begitu hal ini masih menjadi topik yang kurang dipelopori (Ehsan et al. 2022). Untuk mengurangkan kesan infrastruktur yang dibina di alam sekitar, terdapat keperluan yang semakin meningkat dalam kejuruteraan ekologi, yang menggabungkan proses ekologi dengan prinsip kejuruteraan untuk membangunkan infrastruktur yang memberi manfaat kepada manusia dan alam semula jadi. Penyelidikan eko-kejuruteraan pantai setakat ini telah berkisar dari buatan manusia (keras), hingga hibrid kepada penyelesaian semulajadi (lembut).

EKO-KEJURUTERAAN BUATAN

Pada dasarnya, eko-kejuruteraan buatan ini adalah penyelesaian kepada kesan ekologi infrastruktur yang dibina di kawasan-kawasan di mana tidak ada pilihan untuk menguruskan pantai menggunakan teknik kejuruteraan semulajadi. Sebagai contoh, di bandar-bandar pantai yang penduduknya padat mungkin tiada ruang mencukupi ruang untuk mewujudkan atau memulihkan habitat untuk pertahanan pantai. Dalam pada itu, eko-kejuruteraan buatan juga boleh diubah suai ke infrastruktur sedia ada (Anfuso et al. 2021). Sebagai contoh, banyak penyelidikan telah memberi tumpuan kepada menambah mikrohabitat, seperti ciri-ciri penahan air dengan celahan (seperti dalam Foto 2), kepada infrastruktur marin untuk meningkatkan kepelbagaian substrata dan organisma yang hidup pada struktur itu (Noor et al. 2022). Teknik untuk eko-kejuruteraan buatan ini telah dikaji secara meluas dan oleh itu tidak akan dibincangkan secara mendalam dalam ulasan ini.

Eko-kejuruteraan buatan mempunyai objektif yang berbeza daripada eko-kejuruteraan semulajadi kerana prinsip ekologi disepadukan ke dalam reka bentuk struktur pertahanan sedia ada atau terancang, dengan motivasi untuk mewujudkan infrastruktur pelbagai guna untuk meningkatkan kepelbagaian dan fungsi ekologi, sambil mengekalkan pertahanan. Walau bagaimanapun, pengecualian adalah apabila eko-kejuruteraan buatan menggalakkan pemendapan organisma dengan rangka kalsium karbonat (contohnya teritip), yang boleh melindungi struktur daripada kesan cuaca dan hakisan

melalui bioperlindungan (MacArthur et al. 2019). Sebaliknya, walaupun eko-buatan disokong sebagai pendekatan pilihan dari perspektif ekologi, amat penting sekali untuk habitat yang dicipta menyediakan perlindungan pantai yang mencukupi pada masa depan dalam mendepani perubahan iklim. Contoh-contoh projek eko-buatan yang telah dilaksanakan di dalam dan luar negara termasuklah penanaman semula (replanting) mangrove di sepanjang pantai, pembinaan artificial reef (terumbu buatan) bagi memperbaiki ekosistem marin dan pembinaan *wetland* (tanah bencah) sebagai sistem penapis air semulajadi. Sebagai contoh, di Malaysia, terdapat projek penanaman semula paya bakau yang dilaksanakan di Terengganu dan Sabah. Di luar negara pula, terdapat projek terumbu buatan di Indonesia dan *wetland* di Amerika Syarikat. Projek-projek ini membuktikan bahawa eko-buatan adalah pendekatan yang berkesan dalam memulihara dan melindungi ekosistem semula jadi.



RAJAH 2. Struktur keras buatan manusia sebagai pertahanan pantai.

Sumber: Simpanan penulis

EKO-KEJURUTERAAN HIBRID

Penyelesaian perantara antara eko-kejuruteraan buatan dan semula jadi adalah pendekatan hibrid. Infrastruktur berasaskan alam semula jadi dan dibina dalam kes ini digabungkan untuk memberikan perlindungan pantai semaksimumnya (Sutton-Grier et al. 2015). Ini memberi peluang untuk memanfaatkan kekuatan infrastruktur berasaskan alam semula jadi dan buatan, sambil meminimumkan kelemahan kedua-duanya (Sutton-Grier et al. 2015). Sebagai contoh, terumbu karang boleh diletakkan di hadapan benteng laut, yang boleh membentuk barisan pertahanan pertama, sekali gus memanjangkan hayat benteng serta menyumbang fungsi lain seperti penapisan air dan peningkatan biodiversiti (Joy & Gopinath 2021). Selain itu, benteng laut boleh memberikan

perlindungan semasa pembentukan terumbu. Inisiatif baru melibatkan benteng boleh tanggal selepas penubuhan infrastruktur berasaskan alam semula jadi, atau penggunaan benteng laut yang lebih luas dengan pintu gerbang yang boleh dibuka dan ditutup dalam kejadian ekstrem (Sutton-Grier et al. 2015). Sehubungan itu, kejuruteraan hibrid mungkin menyediakan alternatif baru kepada infrastruktur tradisional, terutamanya di mana kaedah eko-kejuruteraan semula jadi sahaja tidak sesuai. Contoh lain projek kejuruteraan hibrid yang telah dilaksanakan termasuk pembinaan Jembatan Oresund di antara Denmark dan Sweden yang menghubungkan dua buah negara dan jalan raya dengan panjang lebih daripada 7 km, dengan menggunakan gabungan struktur sambungan bawah laut, pelantar dan jambatan. Projek ini mengambil kira faktor kelestarian alam sekitar dan memberi tumpuan kepada pemuliharaan alam semula jadi dalam proses pembinaan dan pengurusan jambatan.

EKO-KEJURUTERAAN SEMULA JADI

Terdapat pelbagai istilah dalam kesusasteraan yang berkaitan dengan tindakan yang diilhamkan atau disokong oleh alam semula jadi untuk menyelesaikan masalah alam sekitar, sosial dan ekonomi sehingga menyebabkan kekaburan berkenaan pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi. Ini termasuk ‘penyelesaian berasaskan alam semula jadi’, ‘kejuruteraan lembut’, ‘ciri atau infrastruktur berasaskan alam semula jadi’, ‘infrastruktur hijau/biru’ ‘membina dengan alam semula jadi’ dan ‘pantai hidup’ (MacArthur et al. 2019). Di samping itu, pemulihan habitat (ditakrifkan sebagai penciptaan semula habitat yang sebelum ini berada di kawasan tertentu) dan penciptaan atau perkembangan habitat, di mana habitat diletakkan di dalam lokasi berbeza dalam kawasan yang sama telah dimasukkan di bawah garis pantai berasaskan alam semula jadi. Mana-mana istilah yang digunakan, secara amnya, mempunyai persamaan untuk meningkatkan penggunaan alam semula jadi untuk meningkatkan mitigasi dan penyesuaian perubahan iklim, secara eksplisit dan sebagai alternatif atau untuk melengkapkan pembinaan infrastruktur.

Perlindungan pantai selalunya tidak menjadi tujuan utama dalam projek kejuruteraan semula jadi. Sebagai contoh, pemulihan tiram di Amerika Syarikat bermula dengan tujuan meningkatkan stok perikanan, tetapi sejak itu rangka kerja itu digunakan untuk memulihkan ekosistem lain, termasuk pertahanan pantai (Beck et al., 2011). Penilaian bukti semasa untuk keberkesanan beting pasir, terumbu karang dan tiram, rumput laut, bakau, sebagai pertahanan pantai (Rajah 3), berbanding dengan infrastruktur keras akan dibincangkan dalam perenggan seterusnya.



RAJAH 3. Bakau sebagai perisai pantai dalam eko-kejuruteraan semulajadi (sumber: simpanan penulis).

Kajian global melaporkan projek pemulihan pertahanan pantai sebagai objektif utama adalah sebanyak 18% terumbu karang, 26% bakau, 16% paya dan 26% tiram, manakala tiada dilaporkan untuk rumput laut. Sebaliknya, lebih separuh (65%) kajian pemulihan beting pasir adalah untuk pertahanan pantai (Pendleton et al. 2019; Glenner et al. 2021). Statistik ini menunjukkan bahawa terdapat fokus yang signifikan dalam pemulihan pertahanan pantai untuk beberapa jenis habitat, seperti terumbu karang, bakau, paya, dan tiram. Selain itu, statistik tersebut juga menyebutkan bahawa lebih daripada separuh (65%) kajian pemulihan beting pasir dilakukan dengan tujuan untuk pertahanan pantai. Ini menunjukkan penekanan yang kuat dalam pemulihan dan perlindungan beting pasir sebagai sebahagian daripada strategi pertahanan pantai secara keseluruhan. Data ini penting untuk memahami dan mengarahkan usaha pemulihan dan perlindungan pantai untuk memastikan kelestarian habitat-habitat penting dan keberlanjutan ekosistem pesisir.

Bagi terumbu karang dan paya bakau yang direka untuk pertahanan pantai, pemantauan untuk menentukan sama ada habitat yang dicipta telah berjaya melindungi pantai kurang dijalankan. Satu kajian berasaskan soal selidik mengenai pemulihan terumbu karang mendedahkan hasil yang sama, di mana 19.6% responden melaporkan perekaan bentuk terumbu sebagai pertahanan pantai, tetapi hanya 10% dilaporkan menilai hasil perekaan terumbu tersebut (Joy & Gapinath 2021). Ini bermaksud bahawa sebahagian daripada responden menganggap perekaan bentuk terumbu karang sebagai satu strategi penting dalam menjaga keselamatan pantai daripada ancaman seperti hakisan. Walau bagaimanapun, perlu ditekankan bahawa hanya 10% responden yang melaporkan bahawa mereka menilai hasil daripada perekaan bentuk terumbu tersebut. Ini mungkin menunjukkan keperluan untuk lebih banyak penilaian dan pengawasan hasil daripada projek pemulihan

terumbu karang sebagai pertahanan pantai. Bagi beting-beting pasir, projek pertahanan pantai paya air masin dan tiram, pengukuran lapangan hakisan pantai dan/atau pengecilan gelombang adalah lebih besar (60-80% projek). Statistik ini memberikan gambaran tentang persepsi dan pelaksanaan projek pemulihan terumbu karang serta projek pertahanan pantai yang melibatkan beting pasir, paya air masin, dan tiram. Ia menunjukkan bahawa terdapat perbezaan dalam tingkat penilaian dan pelaksanaan terumbu karang sebagai bentuk perlindungan pantai berbanding dengan pengukuran lapangan dan pengecilan gelombang dalam projek-projek lain. Namun, kajian yang membandingkan pemulihan habitat sebagai pertahanan berasaskan alam semula jadi masih kurang jika dibandingkan dengan infrastruktur keras.

Terumbu tiram yang dicipta sebagai perlindungan pantai, dipasang untuk memerangi hakisan semula jadi dan antropogenik, mengurangkan 25% ketinggian ombak yang disebabkan oleh tekanan bot, berbanding dengan kawalan tanpa terumbu, dan bersamaan dengan terumbu semulajadi (3%). Seperti yang dijangkakan, pengurangan tenaga ombak tahunan meningkat dengan ketara daripada penggunaan terumbu tiram (18.7%) kepada pengurangan sebanyak 44.7% (Manis et al., 2015). Di bawah keadaan yang sama, beting pasir yang dicipta mengurangkan 31.4% tenaga ombak. Reka bentuk yang menggabungkan kedua-dua beting pasir dan terumbu tiram, bagaimanapun, adalah yang paling berkesan untuk mengurangkan tenaga ombak iaitu sebanyak 67.3% selepas satu tahun. Pernyataan tersebut menggambarkan bahawa statistik yang diberikan memberikan pemahaman tentang keberkesanan penggunaan terumbu tiram dan beting pasir dalam mengurangkan tenaga ombak sebagai bentuk perlindungan pantai. Data ini menunjukkan bahawa terumbu tiram, beting pasir, dan kombinasi keduanya memainkan peranan penting dalam mengurangkan kesan gelombang dan melindungi pantai daripada hakisan dan kerusakan akibat ombak yang kuat.

Terumbu tiram mengurangkan kuasa gelombang angin yang lebih besar (ketinggian > 0.03 m) sebanyak 42-44% (Morris et al. 2021). Terumbu yang dipulihkan, bagaimanapun, menghilangkan tenaga gelombang yang kurang daripada terumbu semula jadi di kawasan yang sama (60%). Di bawah beberapa keadaan, kawasan paya air masin yang dipulihkan direkodkan untuk menghilangkan hampir semua tenaga gelombang, lebih daripada separuh daripadanya berada dalam beberapa meter pertama dasar laut. Hal ini juga mungkin bergantung kepada kedalaman air yang optimum bagaimanapun, untuk pengecilan gelombang oleh habitat pantai, penyahgandingan boleh berlaku di antara gelombang permukaan dan struktur di dasar laut apabila kedalaman terlalu besar (Manis et al. 2015).

Kadar pengurangan gelombang untuk paya bakau boleh setinggi 20% setiap 100 m bakau (Rezaie et al. 2010).

Selain itu, menggunakan parameter tumbuh-tumbuhan dari hutan bakau yang dipulihkan, simulasi model menganggarkan pengurangan ketinggian gelombang 60%, walaupun di bawah kenaikan aras laut yang diramalkan (Mohd et al. 2018). Pada masa yang sama, pengukuran lapangan menunjukkan bahawa pengurangan gelombang bakau yang dipulihkan tidak terjejas oleh perubahan kedalaman air, di mana bakau cukup tinggi. Oleh itu, bakau mungkin lebih berkesan pada perlindungan pantai ke atas julat kedalaman yang lebih besar, berbanding dengan habitat subtidal atau tumbuh-tumbuhan pantai yang rendah.

RESPONS PESISIRAN PANTAI

Respons pesisiran pantai mengambil kira sejauh mana hakisan sisi (perubahan kedudukan garis pantai) atau hakisan menegak / pertambahan sedimen kepada infrastruktur binaan atau semula jadi (Maulud et al. 2022). Majoriti kajian mengenai tindak balas pinggir pantai datang daripada beting pasir yang dipulihkan. Pemulihan beting pasir untuk pertahanan mengambil kira banyak aspek termasuk penambahan pasir secara langsung ke beting pasir dan pantai, pembinaan permatang pasir dengan dan tanpa teras keras, dan pengumpulan pasir menggunakan tumbuhan. Menggunakan pelbagai teknik di tapak lapangan, contohnya penyuburan pantai dengan kombinasi pagar pasir, untuk membina beting pasir adalah perkara biasa. Pemulihan beting pasir berdasarkan struktur kejuruteraan keras yang lebih tradisional juga telah digunakan (Drius et al. 2019).

Pemulihan beting pasir sering menyebabkan peralihan ke laut awal dalam kedudukan garis pantai, terutamanya apabila pasir ditambah ke dalam sistem atau apabila beting yang dicipta dibina di tepi pantai yang sedia ada. Unduran pantai dan hakisan beting semasa ribut juga sering dilaporkan semasa pasca pemulihan, di mana dalam kes-kes yang melampau di utara California, Amerika Syarikat, yang membawa kepada penghapusan keseluruhan beting yang dipulihkan (Pickart et al. 2021). Beting pasir yang dipulihkan berpotensi berfungsi dengan cara yang serupa dengan beting semula jadi dan membina semula berikutan kejadian hakisan. Maklumat mengenai beting pasir yang dipulihkan pasca bencana alam seperti ribut jarang dilihat tetapi kelihatan terhad kerana kuantiti sedimen yang negatif, kejadian hakisan yang kerap, ataupun amalan pengurusan pantai yang lemah yang memerlukan pembinaan beting pasir di awalnya. Kestabilan pesisir pantai hanya dicapai melalui pembentukan semula beting pasir berulang-ulang atau pembinaan struktur eko-kejuruteraan hibrid.

Di samping itu, terumbu tiram yang dicipta dapat mengurangkan kehilangan garis pantai berbanding dengan kawasan yang tiada terumbu, walaupun dalam beberapa kes kelihatan pantai terus terhakis, tetapi sangat kurang. Terumbu tiram buatan juga telah diaplikasikan dalam beberapa projek untuk mengurangkan kehilangan garis pantai. Salah satu contoh adalah Projek Restorasi Pantai Pengerang di Johor, Malaysia, yang melibatkan penanaman terumbu tiram untuk mengurangkan hakisan pantai dan mengembalikan kehidupan marin di kawasan tersebut. Di Indonesia, terdapat Projek Restorasi Terumbu Karang Pulau Pramuka di Kepulauan Seribu yang bertujuan untuk memulihkan terumbu karang dan ekosistem pantai di kawasan tersebut dengan cara membangun terumbu tiram dan memasang struktur buatan lainnya. Selain itu, terdapat juga Projek Terumbu Tiram Indonesia di Sulawesi Selatan yang memasang jutaan benih terumbu tiram untuk mengurangi kerusakan pantai akibat gelombang pasang dan menambah produktivitas perikanan di kawasan tersebut. Meskipun beberapa pantai kelihatan masih terus terhakis, namun penggunaan terumbu tiram ini telah membuktikan keberkesanannya dalam mengurangkan kehilangan garis pantai berbanding dengan kawasan yang tiada terumbu. Pantai yang terdedah boleh memberi kesan kepada impak pertahanan terumbu tiram, bagaimanapun, data yang menyokong sama ada terumbu lebih berjaya dalam persekitaran ombak rendah atau tinggi adalah tidak jelas. Tiram adalah satu-satunya kumpulan kerang yang telah dipulihkan untuk membantu pertahanan pantai dan terumbu yang dicipta ini mungkin dapat menandingi atau melebihi terumbu semula jadi dalam memenuhi matlamat sebagai pertahanan pesisir pantai (Morris et al. 2019).

Penanaman kawasan bakau yang dijalankan contohnya di Amerika Syarikat mewakili beberapa contoh terawal mewujudkan habitat sebagai pertahanan pantai. Contohnya, di Florida, projek membersihkan dan memulihkan pantai telah dilaksanakan sejak tahun 1960-an dengan cara menanam kawasan bakau sebagai sebahagian daripada usaha untuk mengurangkan impak pengikisan pantai dan ribut. Di Louisiana, projek-projek pembangunan kawasan bakau yang besar dilaksanakan sebagai bentuk adaptasi terhadap peningkatan kadar penghapusan pantai dan risiko banjir akibat ribut tropika. Kawasan yang ditanam berjaya menstabilkan pantai berbanding kawasan yang tidak ditanam, dengan beberapa mendapan juga diperhatikan. Penstabilan pantai dan penambakan tanah telah dicapai melalui kejuruteraan ekologi bertahun-tahun dengan kawasan bakau di China termasuk di Provinsi Guangdong, Zhejiang, dan Fujian. Contohnya, di Zhejiang, terdapat projek pengembangan kawasan bakau seluas 72,000 hektar di Hangzhou Bay yang dilakukan sejak tahun 2002 untuk mengurangi dampak banjir dan melindungi garis pantai. Di Provinsi Fujian, terdapat projek restorasi bakau seluas

30,000 hektar di wilayah pesisir untuk memulihkan ekosistem dan menstabilkan garis pantai. (Rezaie et al. 2020). Kejayaan penanaman bakau mungkin bergantung kepada saiz butiran sedimen, panjang kawasan dan konfigurasi garis pantai, dengan keberkesanan yang lebih besar di kawasan terlindung. Walau bagaimanapun, penubuhan kawasan bakau boleh dilakukan di kawasan yang lebih terdedah menggunakan pemecah ombak sementara atau digabungkan dengan kerang (contohnya kupang) untuk mengurangkan tenaga ombak (Morris et al. 2019).

Di kawasan tropika, terumbu tiruan yang diletakkan batu karang berkesan dalam meningkatkan enap timbus pantai berikutan tempoh hakisan yang ketara walaupun tiada laporan khusus yang memperincikan tindak balas pantai (Silva et al. 2016). Di Queensland, misalnya, projek-proyek restorasi terumbu karang yang dilakukan bertujuan untuk membangun terumbu tiruan dan mengembalikan kehidupan laut di kawasan yang telah rusak akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim. Terumbu tiruan ini diharapkan dapat membantu mengurangi dampak erosi pantai dan badai serta meningkatkan kesuburan perikanan di kawasan tersebut (Great Barrier Reef Foundation, 2021). Selain itu, terumbu tiruan juga digunakan di beberapa negara di Eropah dan Amerika Utara sebagai bagian dari strategi pertahanan pantai mereka, seperti di Belanda, United Kingdom, dan Kanada (Sarker et al., 2019). Terdapat juga kajian kes dibentangkan di mana di dalam pokok bakau yang ditanam untuk memberikan perlindungan pantai, terdapat sedikit data mengenai tindak balas pantai terhadap bakau yang ditanam, iaitu bukti untuk kadar pendedahan yang lebih tinggi pada kepadatan ladang bakau yang lebih besar. Salah satu contohnya adalah kajian kes di Nigeria yang dilakukan oleh Adekola dan Yusuf (2013), di mana mereka meneliti kesan penanaman bakau terhadap pengurangan hakisan pantai dan kerosakan struktur di Delta Niger. Hasil kajian menunjukkan bahawa kawasan yang ditanam dengan pokok bakau mengalami penurunan kadar hakisan pantai dan kerosakan struktur yang lebih rendah berbanding kawasan yang tiada pokok bakau. Kajian ini membuktikan bahawa penanaman bakau dapat menjadi alternatif yang berkesan untuk mengurangkan hakisan pantai dan memperbaiki keseimbangan ekosistem pesisir. Pendekatan eko-kejuruteraan hibrid untuk pemulihan bakau juga telah dilaporkan. Ini melibatkan penanaman dalam kombinasi dengan pemecah ombak untuk memudahkan pengumpulan sedimen dan pengecilan ombak untuk pokok bakau. Contoh dalam negara untuk Pendekatan eko-kejuruteraan hibrid untuk pemulihan bakau dilaporkan di kawasan Sungai Merbok, Kedah di Malaysia. Projek yang dilaksanakan pada tahun 2014 melibatkan penanaman bakau dalam kombinasi dengan penggunaan struktur pemecah ombak untuk mengurangkan

kekuatan ombak dan memudahkan pengumpulan sedimen oleh akar bakau. Hasil kajian menunjukkan bahawa hibrid eko-kejuruteraan berjaya meningkatkan keupayaan bakau dalam mengekalkan sedimen, memperbaiki kualiti air dan memberi perlindungan pantai yang lebih berkesan. Contoh luar negara, kajian yang dilakukan di Cina mengenai Pendekatan eko-kejuruteraan hibrid untuk pemulihan bakau juga melibatkan penggunaan struktur pemecah ombak. Projek ini dilaksanakan di Delta Sungai Pearl pada tahun 2014. Kombinasi antara penanaman bakau dan penggunaan pemecah ombak dapat membantu mengurangkan kekuatan ombak dan memperbaiki pengecilan sedimen oleh akar bakau. Hasil kajian menunjukkan bahawa hibrid eko-kejuruteraan berjaya meningkatkan daya tahan garis pantai dan memperbaiki keadaan ekosistem bakau.

Walaupun tidak ada kajian mengenai perlindungan pantai oleh rumput laut, namun kajian menunjukkan dasar rumput laut buatan yang dipasang dapat meningkatkan enap timbus pantai. Namun begitu, rumput laut tiruan ini rosak teruk apabila dilanda ribut dalam tempoh setahun pemasangan. Contohnya di Teluk Mexico, Amerika Syarikat, di mana beribu-ribu rumput laut tiruan yang telah ditanam di luar pantai Florida untuk memulihkan ekosistem rumput laut telah dirosakkan oleh Ribut Tropika Bonnie dan Hermine pada tahun 2010. Dalam tempoh setahun pemasangan, kira-kira 11% daripada rumput laut tiruan telah rosak atau hilang akibat ribut, walaupun beberapa tumbuhan terselamat. Insiden ini menunjukkan kepentingan pemilihan tapak dan pengaturan yang sesuai serta keperluan untuk perancangan penyesuaian terhadap cuaca dan perubahan iklim.

BANJIR DAN PUSUAN RIBUT

Habitat pantai berupaya untuk mengurangkan ketinggian atau tempoh air banjir dan melindungi pantai semasa kejadian cuaca melampau (contohnya ribut taufan) (Labuz 2015). Tidak banyak data empirikal mengenai keberkesanan pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi untuk menghadapi banjir dan pusuan ribut. Walaupun ekosistem semula jadi memberikan pertahanan yang berkesan terhadap ribut, namun dalam peristiwa ekstrem seperti tsunami dan taufan, ia hangat diperdebatkan. Kejadian ribut dinyatakan telah berlaku dalam banyak kajian yang memerhatikan tindak balas pantai selama beberapa tahun. Walau apa pun, nilai pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi telah diramalkan boleh diabaikan di bawah lonjakan ribut di mana paras laut dinaikkan (bergantung pada habitat). Sebagai contoh, pemerhatian terumbu karang buatan menunjukkan bahawa walaupun terumbu kekal stabil semasa kejadian taufan, pengecilan ombak tidak

mencukupi untuk mencegah hakisan pantai yang ketara seperti yang berlaku di Pantai Remis, Selangor (Foto 4). Sebaliknya, data penderiaan jauh mencadangkan sedikit kejadian banjir terjadi selepas puting beliung menyerang kawasan di mana terdapat paya bakau semula jadi.



RAJAH 4. Hakisan jalan raya disebabkan ombak besar.
Sumber: Simpanan penulis

Dalam beberapa kajian, tinjauan berulang telah dijalankan mengenai reaksi beting pasir terhadap kejadian ribut. Terdapat keputusan bercampur-campur di mana beting pasir yang dicipta dapat menahan peristiwa ribut dengan ketara dalam beberapa kes di pesisiran pantai Texas, Amerika Syarikat dan Puerto Morelos, Mexico (Sigren et al. 2014; Silva et al. 2016), tetapi gagal dalam kes yang lain di pesisiran pantai Alabama, Amerika Syarikat. Jika diperhatikan, kebanyakan kawasan yang mempunyai beting dilindungi daripada dilimpahi berbanding kawasan yang tiada beting. Beting sempit yang lebih kecil lebih kerap dimusnahkan oleh ombak yang lebih namun ianya boleh dibina semula dengan cepat, dan dalam persekitaran yang sesuai dapat memberikan fungsi perlindungan yang diinginkan. Beting pasir yang dibina berhampiran dengan laut sering terhakis, manakala yang dibina lebih jauh di pedalaman dapat mengumpul pasir walaupun semasa kejadian ribut. Pantai yang luas dan tinggi boleh mengurangkan hakisan pada beting dan berfungsi sebagai sumber pasir untuk beting tersebut. Kekerapan dan magnitud peristiwa hakisan, dan penggunaan kaedah eko-kejuruteraan hibrid juga mempengaruhi kelangsungan beting pasir.

Bukti yang paling menarik untuk pertahanan pantai yang berkesan berasaskan alam semula jadi di mana kawasan paya air masin ditambah dengan ambang (batu atau tiram) selepas taufan Veettil et al. (2019) di Vietnam. Mereka menunjukkan bahawa penggunaan pokok bakau

sebagai “hutan bakau” dapat memperbaiki kualiti habitat paya bakau dan memperbaiki fungsi perlindungan pantai. Mereka juga menunjukkan bahawa mengambil kira keanekaragaman spesies dalam reka bentuk dan pengurusan hutan bakau dapat meningkatkan kecekapan dan ketahanan ekosistem. Berikutan taufan itu, kerosakan ribut dilaporkan pada 75% di mana kepala pukal yang melindungi pesisir pantai, manakala tiada kerosakan ditemui pada kawasan paya air masin yang ditambah dengan ambang laut. Dari sebelum ke selepas peristiwa taufan, tiada kesan diperhatikan pada ketinggian permukaan paya, walaupun ketumpatan tumbuhan bakau dikurangkan. Walau bagaimanapun, selepas satu tahun, tumbuhan telah pulih ke tahap pra-taufan. Kajian ini memberi contoh pendekatan yang perlu diambil dalam menilai skim pertahanan pantai yang lembut berbanding kejuruteraan tradisional.

KEPENTINGAN PERTAHANAN PANTAI SECARA SEMULA JADI DALAM ASPEK KOS

Pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi perlu berkesan dan mempunyai kos faedah lebih besar jika dibandingkan dengan infrastruktur tradisional. Oleh kerana terdapat sedikit yang membuat perbandingan antara keberkesanan pertahanan berasaskan alam semula jadi dan tradisional, tidak menghairankan terdapat kekurangan data untuk perbandingan khusus tapak dan kos. Ini dianggap sebagai salah satu cabaran penting untuk penggunaan habitat yang meluas untuk perlindungan pantai (Pontee et al. 2016).

Kajian telah dijalankan untuk menganggarkan kos dan keberkesanan pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi melalui gandingan maklumat mengenai habitat yang dipulihkan untuk pertahanan dengan data lapangan berdekatan mengenai pengecilan ombak di habitat semula jadi (van Zelst et al. 2021). Ini disepadukan dengan pengetahuan kejuruteraan untuk menganggarkan kos pertahanan pantai jika disetarakan dengan pemecah ombak. Kawasan paya air masin dan bakau adalah satu-satunya habitat dengan data yang mencukupi untuk perbandingan, dengan kedua-duanya dinilai sebagai alternatif kos efektif kepada infrastruktur tradisional (Narayan et al. 2016). Begitu juga, julat pengurangan ketinggian ombak dilaporkan setanding dengan terumbu karang dan pemecah ombak, dengan kos yang jauh lebih murah untuk pemulihan terumbu karang berbanding dengan membina pemecah ombak (Manis et al. 2015).

Walaupun bagaimanapun, untuk menghasilkan analisis kos-faedah yang lebih tepat untuk habitat yang dikaji semula, pengukuran lapangan mengenai keberkesanan

pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi serta kos yang berkaitan dengan penciptaan dan pemulihan harus dilaporkan untuk setiap projek. Data untuk perlindungan pantai habitat semula jadi yang sedia ada mungkin tidak semestinya dijadikan dasar bagi projek berasaskan alam semula jadi untuk pertahanan pantai kerana terdapat kemungkinan adanya perubahan yang akan terjadi ketika memulihkan atau mencipta sistem ini. Selain itu, apabila membandingkan kos keberkesanan perlindungan pantai, pendekatan berasaskan alam semula jadi mungkin tidak dinilai sepenuhnya dan ia dijangka akan memberi nilai tambahan kepada keperluan nilai ekosistem.

KEPENTINGAN NILAI EKOSISTEM TAMBAHAN

Salah satu rasional perlindungan pantai berasaskan alam semula jadi adalah andaian bahawa mereka akan menyediakan nilai ekosistem lain selain daripada perlindungan pantai (Jadual 1). Dengan penurunan global kualiti dalam sistem estuari dan pantai semulajadi, terdapat banyak kepentingan dalam menilai secara ekonomi servis yang disediakan oleh habitat untuk memanfaatkan pemuliharaan dan pemulihan pantai (Zainola et al. 2019).

JADUAL 1. Nilai ekosistem lain yang disediakan oleh a) habitat semula jadi, b) pemulihan habitat dan c) pertahanan pantai buatan

Kelestarian hidupan	Sumber perikanan	Pelancongan dan rekreasi	Sumber bahan mentah	Pengitaran nutrien dan penapisan air
Pemulihan habitat	√	√	√	√
- Paya bakau	√	√	√	√
- Terumbu karang	√	√	√	√
- Rumpun laut	√	√	√	√
- Beting pasir	√			√
Habitat semula jadi	√	√	√	√
- Paya bakau	√	√	√	√
- Terumbu karang	√	√	√	√
- Rumpun laut	√	√	√	√
- Beting pasir	√			√
Struktur pertahanan pantai tiruan				
- Tembok laut	×	×	×	
- Groin	×	×	×	
- Pemecah ombak	×	×	×	

Tanda √ menandakan nilai ekosistem disediakan; × menandakan nilai ekosistem tidak disediakan.

Untuk menilai dengan tepat nilai perlindungan pantai berasaskan alam semula jadi, analisis kos-faedah perlu merangkumi semua nilai ekosistem yang disediakan oleh perlindungan berasaskan eko-kejuruteraan dan tradisional. Walau bagaimanapun, habitat yang dicipta atau dipulihkan mungkin tidak sepenuhnya menyediakan nilai yang sama seperti ekosistem semulajadi. Oleh itu, pemantauan habitat yang dipulihkan perlu merangkumi semua nilai ekosistem yang berkaitan dengan habitat tersebut, selain perlindungan pantai.

Dalam pemulihan untuk perlindungan pantai, tukar ganti antara nilai ekosistem boleh berlaku disebabkan perlindungan pantai kebanyakannya diperlukan semasa kejadian ekstrem, yang mungkin mengakibatkan keperluan yang berbeza untuk ciri-ciri tertentu habitat berbanding

pemuliharaan biodiversiti (Spalding et al. 2014). Tukar ganti ekologi mungkin berlaku dengan perlindungan pantai secara hibrid yang menggabungkan unsur-unsur struktur untuk membantu habitat yang dipulihkan. Sebagai contoh, mencipta kawasan paya dengan menggabungkan struktur penstabilan, seperti ambang batu berprofil rendah semakin digunakan di Amerika Syarikat untuk perlindungan pantai, serta memulihkan habitat pantai (Leo et al. 2019). Ambang paya, iaitu struktur penghalang yang terdiri daripada batu atau kayu yang diletakkan pada kawasan pantai, diketahui boleh memberi manfaat kepada ekosistem semula jadi di sekitar kawasan pantai. Dalam hal ini, ambang paya turut menyokong pemakan ampaian epifauna, seperti tiram, dengan menyediakan ruang dan permukaan yang diperlukan untuk tumbuh dan membiak. Oleh kerana

pemakan endapan penting untuk struktur pembiokacauan dan kitaran nutrien, menggabungkan ambang paya untuk perlindungan pantai boleh mengakibatkan tukar ganti untuk nilai ekologi ini dapat disediakan oleh kawasan paya. Walau bagaimanapun, lebih banyak pemakan ampaian dapat meningkatkan penapisan air dalam masa sama meningkatkan nilai kualiti air (Manosur et al. 2017).

Habitat pantai yang dipulihkan biasanya dinilai untuk keberkesannya dalam mengekalkan biodiversiti (Drius et al. 2019). Nilai ekosistem lain bagi terumbu karang, seperti penyediaan sumber ikan dan pengitaran nutrien masih kurang dinilai. Pada umumnya, habitat pantai yang telah dipulihkan dinilai berdasarkan keberkesannya dalam mengekalkan kepelbagaian biologi. Walau bagaimanapun, nilai ekosistem lain seperti penyediaan sumber ikan dan pengitaran nutrien masih belum dinilai sepenuhnya. Meskipun begitu, terdapat bukti bahawa beberapa struktur tiruan seperti paya bakau, kawasan paya, rumput laut, dan terumbu tiram yang telah dipulihkan dapat memberikan nilai ekosistem yang sama dengan habitat semula jadi (Silva et. al 2016). Terdapat beberapa manfaat tambahan yang mungkin disediakan oleh struktur tiruan ini, seperti pengitaran nutrien di paya bakau, sumber ikan untuk rumput laut, dan bahan mentah untuk kawasan paya. Walau bagaimanapun, penilaian terhadap nilai ekosistem tambahan ini masih perlu ditingkatkan kerana kebanyakan dari nilai ini belum diketahui. Penilaian ini akan membantu kita memahami lebih lanjut tentang perbandingan antara struktur buatan dan habitat semula jadi dalam hal kepelbagaian biologi.

Struktur buatan memperkenalkan substratum novel ke dalam persekitaran marin, yang boleh dikoloni oleh organisma. Ini mungkin disebabkan oleh kurangnya pelbagai bentuk struktur buatan manusia dan perbezaan dalam kepekatan sumber makanan dan penggunaan ruang dalam struktur buatan berbanding dengan habitat semula jadi. Oleh itu, struktur tiruan tidak boleh dipertimbangkan untuk menyediakan nilai peruntukan biodiversiti yang sama seperti habitat semula jadi. Walau bagaimanapun, di sesetengah kawasan di seluruh dunia, struktur tiruan seperti dinding laut dikoloni oleh sejumlah besar pemakan penapis (contohnya tiram). Sama ada organisma yang hidup di struktur pertahanan pantai mempunyai kapasiti penapisan yang sama seperti yang terdapat di substrata semulajadi, dan bagaimana ini menyumbang kepada kualiti air, masih belum diuji. Begitu juga, struktur tiruan boleh dikaitkan dengan himpunan ikan yang pelbagai di tapak tersebut (Layman & Allgeier 2020). Sama ada ini disebabkan oleh tarikan biojisim sedia ada atau disebabkan himpunan ikan baru masih belum dapat diketahui, jadi sumbangan kepada peruntukan biodiversiti ikan sukar dikira.

Antara pendekatan dalam pemberian nilai ekosistem termasuklah pendekatan pengurangan risiko: Pendekatan

ini bertujuan menilai dan mengukur nilai ekonomi dari manfaat perlindungan yang diberikan oleh ekosistem pantai dalam mengurangi risiko erosi dan kerusakan pantai. Penilaian ini dapat melibatkan anggaran biaya yang akan terjadi jika tidak ada ekosistem pantai yang memberikan perlindungan, seperti biaya pembaikan infrastruktur yang rosak atau biaya pemulihan pantai.

Pendekatan seterusnya ialah nilai penggantian di mana pendekatan ini menentukan nilai ekosistem pantai dengan mengira biaya yang akan dikeluarkan untuk menggantikan fungsi-fungsi yang dilakukan oleh ekosistem jika rosak. Misalnya, biaya penggantian fungsi penahan gelombang yang disediakan oleh hutan bakau dengan menggunakan struktur buatan seperti tanggul tembok penahan.

Terdapat juga pendekatan nilai penggunaan tidak langsung untuk menentukan nilai ekosistem pantai berdasarkan manfaat tidak langsung yang diperoleh manusia dari keberadaan ekosistem tersebut dalam melindungi dan menjaga kelestarian sumber daya alam, seperti manfaat ekosistem pantai dalam menyediakan habitat bagi flora dan fauna, serta menjaga kualiti air.

Kejuruteraan ekologi keras juga boleh digunakan untuk meningkatkan biodiversiti dan fungsi ekosistem struktur pertahanan pantai. Walaupun tidak mungkin kejuruteraan keras pesisiran pantai akan dapat menyediakan nilai ekosistem yang sama seperti habitat yang lebih lembut, perbandingan semua nilai ekosistem di seluruh habitat yang dipulihkan dan buatan diperlukan secara meluas untuk membuat perbandingan kos-faedah yang boleh diambil kira.

STRATEGI PELAKSANAAN PADA MASA DEPAN

Eko-kejuruteraan memainkan peranan penting dalam penerapan pertahanan pantai pada di mana ia melibatkan tiga pendekatan utama, iaitu eko-kejuruteraan semula jadi, buatan, dan hibrid. Setiap pendekatan ini mempunyai kebaikan dan keburukan yang perlu dipertimbangkan untuk masa depan. Eko-kejuruteraan semula jadi berfokus pada penggunaan bahan dan struktur semula jadi untuk meminimumkan kesan negatif terhadap persekitaran semasa melindungi kawasan pesisir. Kelebihan utama eko-kejuruteraan semula jadi adalah pemuliharaan dan pemulihan ekosistem semula jadi. Pendekatan ini memaksimumkan kegunaan dan keselarasan struktur semula jadi seperti hutan bakau, pasir pantai, dan terumbu karang untuk melindungi pantai daripada hakisan tanah. Selain itu, eko-kejuruteraan semula jadi menyumbang kepada keindahan alam semula jadi dan kelestarian sumber daya alam pesisir (Salima et al. 2021). Keburukan eko-kejuruteraan semula jadi adalah kebergantungan pada faktor semula jadi yang tidak dapat dikawal sepenuhnya.

Keberkesanan perlindungan pantai yang diberikan oleh struktur semula jadi mungkin terhad, terutama dalam menghadapi ancaman cuaca ekstrem seperti ribut taufan atau gelombang besar. Selain itu, keperluan untuk pemantauan dan pemuliharaan jangka panjang juga diperlukan untuk memastikan keberkesanan struktur semula jadi dalam jangka masa panjang.

Eko-kejuruteraan buatan melibatkan penggunaan struktur buatan manusia seperti dinding batu, atau terumbu buatan untuk melindungi kawasan pesisir. Kelebihan utama eko-kejuruteraan buatan adalah kekuatan dan keupayaan struktur buatan untuk menahan tekanan kuat dari gelombang dan mengurangkan hakisan pantai. Pendekatan ini dapat memberikan perlindungan yang kuat terhadap pantai dan infrastruktur pesisir. Keburukan eko-kejuruteraan buatan termasuk impak negatif terhadap habitat semula jadi dan keindahan alam pantai. Pembinaan struktur buatan dapat merosakkan ekosistem pesisir dan mengganggu kehidupan marin. Selain itu, eko-kejuruteraan buatan juga memerlukan kos yang tinggi dalam pembangunan, pemeliharaan, dan pemantauan jangka panjang.

Eko-kejuruteraan hibrid menggabungkan elemen-elemen semula jadi dan buatan dalam pendekatan perlindungan pantai. Pendekatan ini memanfaatkan kebaikan dan keupayaan struktur buatan untuk melindungi pantai, sambil mempertimbangkan kelestarian dan keindahan alam semula jadi. Kelebihan utama eko-kejuruteraan hibrid adalah gabungan kekuatan struktur buatan dengan integrasi elemen semula jadi. Ini dapat memberikan perlindungan yang kuat terhadap pantai daripada ancaman hakisan dan erosi tanah, sambil memelihara kepelbagaian biologi dan keindahan landskap semula jadi. Keburukan eko-kejuruteraan hibrid melibatkan faktor-faktor seperti kos yang tinggi dalam pembangunan dan pemeliharaan struktur buatan. Selain itu, integrasi elemen semula jadi dengan struktur buatan memerlukan kajian yang teliti dan pendekatan yang berseimbang untuk memastikan keberkesanan dan keberlanjutan pendekatan ini. Keburukan lain termasuk keperluan pemantauan yang berterusan dan kemungkinan gangguan terhadap habitat semula jadi.

Dalam era perubahan iklim yang sedang berlangsung, pertahanan pantai menjadi semakin penting untuk melindungi kawasan pesisir daripada kerosakan dan hakisan. Eko-kejuruteraan, sebagai pendekatan yang menggabungkan prinsip-prinsip ekologi dengan teknik kejuruteraan, telah diakui sebagai satu kaedah yang berpotensi untuk memperkuat pertahanan pantai dengan memanfaatkan potensi ekosistem alam semula jadi. Bagaimanapun, untuk menerapkan pendekatan ini secara efektif, diperlukan strategi pelaksanaan yang sesuai selain membandingkan kelebihan dan kelemahan setiap aspek eko-kejuruteraan. Strategi pelaksanaan untuk penerapan

eko-kejuruteraan dalam pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi adalah dengan mengenalpasti kawasan pantai yang memerlukan perlindungan ekosistem dengan segera berdasarkan risiko erosi dan kerentanan terhadap perubahan iklim. Kajian yang komprehensif perlu dilakukan untuk menentukan lokasi yang paling penting untuk diberikan perhatian.

Kemudian, kerjasama yang strategik antara pihak-pihak yang berkaitan, termasuk kerajaan, komuniti tempatan, organisasi alam sekitar, dan sektor swasta perlu dijalankan. Kolaborasi ini membolehkan penggabungan pengetahuan dan sumber daya yang diperlukan untuk merancang dan melaksanakan projek-projek eko-kejuruteraan dengan berkesan. Perancangan dan reka bentuk yang berpusat pada ekosistem perlu dilakukan untuk memastikan pemuliharaan dan pemulihan ekosistem pantai yang sihat. Ini melibatkan pemilihan spesies dan struktur yang sesuai dengan keadaan semula jadi setempat, dengan mempertimbangkan kepelbagaian biologi dan interaksi ekologi yang kompleks.

Pemantauan dan penilaian yang mampan untuk memantau keberkesanan projek-projek eko-kejuruteraan pantai juga penting. Data yang dikumpulkan dapat digunakan untuk memperbaiki dan mengoptimumkan strategi pelaksanaan, serta memperoleh pemahaman yang lebih baik tentang manfaat yang diberikan oleh ekosistem. Akhir sekali, kempen pendidikan dan kesedaran masyarakat yang kukuh perlu diterapkan untuk meningkatkan pemahaman tentang kepentingan ekosistem pantai dan manfaat penerapan eko-kejuruteraan. Masyarakat perlu memainkan peranan sebagai rakan kongsi dalam pemuliharaan dan pengurusan ekosistem pantai yang mampan. Dengan melaksanakan strategi-strategi ini, penerapan eko-kejuruteraan dalam pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi dapat dilakukan dengan terancang, berkesan, dan mampan, dengan memastikan perlindungan dan kelestarian ekosistem pantai yang penting bagi kehidupan kita.

KESIMPULAN

Penerapan pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi bergantung kepada penerimaannya sebagai alternatif kepada penyelesaian kejuruteraan tradisional. Sokongan perlu datang dari beberapa kumpulan pihak berkepentingan termasuk pihak pengurusan pantai, jurutera dan orang awam. Oleh ini, data jitu yang menilai kos dan keberkesanan habitat yang dicipta untuk perlindungan untuk mengurangkan bahaya pantai diperlukan. Bagi kebanyakan habitat yang dipulihkan, data adalah amat terhad di mana terdapat kekurangan kajian mengenai nilai pertahanan

pantai habitat yang dipulihkan untuk membuat perbandingan dengan struktur buatan. Kerjasama di kalangan pihak berkepentingan, seperti saintis, pengurus pantai dan jurutera, diperlukan untuk memudahkan proses penyelidikan dalam mengenal pasti pemulihan habitat bagi memberikan pertahanan pantai yang berkesan, di mana habitat tersebut berfungsi dan reka bentuk terbaik untuk dilaksanakan dapat dikenalpasti.

Pertahanan berasaskan alam semula jadi harus dibandingkan secara langsung di lapangan dengan struktur buatan di lokasi dalam keadaan yang sama, dengan perkhidmatan ekosistem kepentingan dinilai sebelum dan selepas penciptaan habitat di tapak eksperimen serta dibandingkan dengan tapak sebenar kawalan yang tidak diubah. Sebagai alternatif, kos struktur tiruan untuk mencapai perlindungan pantai yang sama seperti garis pantai kejuruteraan lembut boleh dianggarkan dalam analisis kos-faedah. Di dalam penerapan pendekatan kejuruteraan lembut, cabaran yang tinggal sekarang adalah bagaimana untuk menganggarkan keupayaan mereka agar serupa dengan struktur kejuruteraan keras dalam tempoh waktu yang lama. Menguruskan pertahanan pantai berasaskan alam semula jadi untuk setanding dengan daya tahan kejuruteraan keras ada harganya kerana ia akan mengganggu nilai ekosistem kawasan tersebut. Oleh itu, amalan kejuruteraan lembut memerlukan perubahan dalam cara pendekatan reka bentuk dan penilaian infrastruktur pertahanan pantai. Perubahan ini perlu berlaku sekarang kerana iklim kita yang pesat berubah memerlukan penyelesaian baharu dan inovatif untuk mengurangkan kerentanan masyarakat pantai kepada masa depan yang semakin tidak menentu.

PENGHARGAAN

Penulis merakamkan penghargaan kepada bantuan yang disediakan Universiti Kebangsaan Malaysia menerusi geran galakan penyelidik muda, GGPM-027-003.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Anfuso, G., Postacchini, M., Di Luccio, D., & Benassai, G. 2021. Coastal sensitivity/vulnerability characterization and adaptation strategies: A review. *Journal of Marine Science and Engineering* 9(1): 72.
- Cheong, S. M., Silliman, B., Wong, P. P., Van Wesenbeeck, B., Kim, C. K., & Guannel, G. 2013. Coastal adaptation with ecological engineering. *Nature Climate Change* 3(9): 787-791.
- Drius, M., Jones, L., Marzioletti, F., de Francesco, M. C., Stanisci, A., & Carranza, M. L. 2019. Not just a sandy beach. The multi-service value of Mediterranean coastal dunes. *Science of the Total Environment* 668: 1139-1155.
- Ehsan, S., Begum, R. A., Maulud, K. N. A., & Yaseen, Z. M. 2022. Households' perceptions and socio-economic determinants of climate change awareness: Evidence from Selangor Coast Malaysia. *Journal of Environmental Management* 316: 115261.
- Fitri, A., Hashim, R., Abolfathi, S., & Abdul Maulud, K. N. 2019. Dynamics of sediment transport and erosion-deposition patterns in the locality of a detached low-crested breakwater on a cohesive coast. *Water* 11(8): 1721.
- Froede Jr, C. R. 2010. Constructed sand dunes on the developed barrier-spit portion of Dauphin Island, Alabama (USA). *Journal of Coastal Research* 26(4): 699-703.
- Joy, A., & Gopinath, A. 2021. The Application of Reefs in Shoreline Protection. *Handbook of Ecological and Ecosystem Engineering*, 295-315.
- Łabuz, T. A. 2015. Environmental impacts—coastal erosion and coastline changes. Second assessment of climate change for the Baltic Sea basin, 381-396.
- Layman, C. A., & Allgeier, J. E. 2020. An ecosystem ecology perspective on artificial reef production. *Journal of Applied Ecology* 57(11): 2139-2148.
- Leo, K. L., Gillies, C. L., Fitzsimons, J. A., Hale, L. Z., & Beck, M. W. 2019. Coastal habitat squeeze: A review of adaptation solutions for saltmarsh, mangrove and beach habitats. *Ocean & Coastal Management* 175: 180-190.
- Li, Y., Zhang, C., Dai, W., Chen, D., Sui, T., Xie, M., & Chen, S. 2022. Laboratory investigation on morphology response of submerged artificial sandbar and its impact on beach evolution under storm wave condition. *Marine Geology* 443: 106668.

- MacArthur, M., Naylor, L. A., Hansom, J. D., Burrows, M. T., Loke, L. H., & Boyd, I. 2019. Maximising the ecological value of hard coastal structures using textured formliners. *Ecological Engineering* 142: 100002.
- Manis, J. E., Garvis, S. K., Jachec, S. M., & Walters, L. J. 2015. Wave attenuation experiments over living shorelines over time: a wave tank study to assess recreational boating pressures. *Journal of Coastal Conservation* 19: 1-11.
- Mansour, O., Idris, M., Noor, N. M., Ruslan, M. S., & Das, S. K. 2017. Effects of organic and commercial feed meals on water quality and growth of *Barbonymus schwanenfeldii* juvenile. *Aquaculture, Aquarium, Conservation & Legislation* 10(5): 1037-1048.
- Maulud, K. N.A., Selamat, S. N., Mohd, F. A., Md Noor, N., Wan Mohd Jaafar, W. S., Kamarudin, M. K. A., & Ahmad, A. 2022. Assessment of Shoreline Changes for the Selangor Coast, Malaysia, Using the Digital Shoreline Analysis System Technique. *Urban Science* 6(4): 71.
- Mohd F.A., Maulud K.N.A. & Karim O.A. 2018. Integrasi kaedah geospasial dan pemodelan hidrodinamik untuk mengkaji impak. *Jurnal Kejuruteraan* 30(1): 65-75.
- Morris, R. L., Bilkovic, D. M., Boswell, M. K., Bushek, D., Cebrian, J., Goff, J., ... & Swearer, S. E. 2019. The application of oyster reefs in shoreline protection: Are we over-engineering for an ecosystem engineer? *Journal of Applied Ecology* 56(7): 1703-1711.
- Morris, R. L., La Peyre, M. K., Webb, B. M., Marshall, D. A., Bilkovic, D. M., Cebrian, J., ... & Swearer, S. E. 2021. Large-scale variation in wave attenuation of oyster reef living shorelines and the influence of inundation duration. *Ecological Applications* 31(6): e02382.
- Narayan, S., Beck, M. W., Reguero, B. G., Losada, I. J., Van Wesenbeeck, B., Pontee, N. & Burks-Copes, K. A. 2016. The effectiveness, costs and coastal protection benefits of natural and nature-based defences. *PloS one* 11(5): e0154735.
- Noor, N. M., & Maulud, K. N. A. (2022). Coastal vulnerability: A brief review on integrated assessment in southeast Asia. *Journal of Marine Science and Engineering* 10(5): 595.
- Noor, N. M., Maulud, K. N. A., & Harun, S. N. 2022. A smart sensing technology for monitoring marine environment conditions. In *Intelligent Systems and Machine Learning for Industry*. CRC Press.
- Pendleton, L., Hoegh-Guldberg, O., Albright, R., Kaup, A., Marshall, P., Marshall, N., & Hansson, L. 2019. The Great Barrier Reef: Vulnerabilities and solutions in the face of ocean acidification. *Regional Studies in Marine Science* 31: 100729.
- Pickart, A. J., Maslach, W. R., Parsons, L. S., Jules, E. S., Reynolds, C. M., & Goldsmith, L. M. (2021). Comparing restoration treatments and time intervals to determine the success of invasive species removal at three coastal dune sites in northern California, USA. *Journal of Coastal Research*, 37(3), 557-567.
- Pontee, N., Narayan, S., Beck, M. W., & Hosking, A. H. (2016, March). Nature-based solutions: lessons from around the world. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 169, No. 1, pp. 29-36). Thomas Telford Ltd.
- Rezaie, A. M., Loerzel, J., & Ferreira, C. M. 2020. Valuing natural habitats for enhancing coastal resilience: Wetlands reduce property damage from storm surge and sea level rise. *PLoS One*, 15(1), e0226275.
- Rojahan, A. A., Ibrahim, I., & Noor, N. M. 2022. Analysis of rate of shoreline changes along the coastline of Kuala Terengganu. *Malaysian Journal of Tropical Geography (MJTG)*, 48(1), 64-72.
- Salaudin, M., O'Sullivan, J. J., Abolfathi, S., & Pearson, J. M. 2021. Eco-engineering of seawalls—an opportunity for enhanced climate resilience from increased topographic complexity. *Frontiers in Marine Science* 8: 674630.
- Salima, N. N., Ahmadb, M. A., Khalifaa, N. A., & Al-Gheethic, A. 2021. Database development for water quality index using Geographical Information System. *Jurnal Kejuruteraan* 33(2): 217-220.
- Schooler, N. K., Dugan, J. E., & Hubbard, D. M. 2019. No lines in the sand: Impacts of intense mechanized maintenance regimes on sandy beach ecosystems span the intertidal zone on urban coasts. *Ecological Indicators* 106: 105457.
- Sigren, J. M., Figlus, J., & Armitage, A. R. 2014. Coastal sand dunes and dune vegetation: restoration, erosion, and storm protection. *Shore Beach* 82(4): 5-12.
- Silva, R., Mendoza, E., Mariño-Tapia, I., Martínez, M. L., & Escalante, E. (2016). An artificial reef improves coastal protection and provides a base for coral recovery. *Journal of Coastal Research* 75 (10075): 467-471.
- Spalding, M. D., Ruffo, S., Lacambra, C., Meliane, I., Hale, L. Z., Shepard, C. C., & Beck, M. W. 2014. The role of ecosystems in coastal protection: Adapting to climate change and coastal hazards. *Ocean & Coastal Management* 90: 50-57.
- van Zelst, V. T., Dijkstra, J. T., van Wesenbeeck, B. K., Eilander, D., Morris, E. P., Winsemius, H. C., ... & de Vries, M. B. 2021. Cutting the costs of coastal protection by integrating vegetation in flood defences. *Nature Communications* 12(1): 6533.
- Veettil, B. K., Ward, R. D., Quang, N. X., Trang, N. T. T., & Giang, T. H. 2019. Mangroves of Vietnam: Historical development, current state of research and future threats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 218: 212-236.

- Wanger, T. C., Ainun, N., Brook, B. W., Friess, D. A., Oh, R. R., Rusdin, A., ... & Tjoa, A. 2020. Ecosystem-based tsunami mitigation for tropical biodiversity hotspots. *Trends in Ecology & Evolution* 35(2): 96-100.
- Zainola, I., Yaakobb, O., & Jalalb, M. R. 2019. Perception Towards the Performance of Outboard Motors Among Malaysian Coastal Fishermen in Manjung, Perak. *Jurnal Kejuruteraan* 31(1): 131-137.
- Yusoff, A. R., Deros, B.M, and Daruis, D.D.I. 2012. Vibration transmissibility on foot during controlling and Operating Car Accelerator Pedal. *Proceedings of 4th International Conference on Noise, Vibration and Comfort (NVC 2012)* 210-215.