OPTIMALISASI RASIO CELAH CURTAIN-WALL PILE BREAKWATER UNTUK PENINGKATAN KESELAMATAN OPERASIONAL PELABUHAN

Subekti Subekti[1], Hamdan Akbar Notonegoro[2], Bambang Soegijono[3]
[1]Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
[2]Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
[3]Fakultas Sains Terapan dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Nasional
[*]Email: subekti@untirta.ac.id

ABSTRAK

Pelabuhan penghubung antar pulau merupakan tulang punggung logistik nasional, namun energi gelombang ekstrem mengancam stabilitas tambatan dan efisiensi bongkar muat kargo. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja hidrodinamika *Curtain-Wall Pile Breakwater* (CPB) dalam meredam energi gelombang. Metodologi dilakukan melalui pengujian model fisik pada saluran gelombang (*wave flume*) berdimensi 15 x 0,3 x 0,45 m menggunakan alat ukur gelombang (*wave probe*). Variabel independen yang diuji adalah rasio celah terhadap kedalaman (a/d) dengan variasi lebar celah 5 cm, 10 cm, dan 15 cm untuk mengukur respons koefisien transmisi (K_t) dan refleksi (K_r) terhadap tinggi gelombang datang (H_i). Hasil penelitian menunjukkan bahwa koefisien transmisi (K_t) meningkat secara non-linear seiring dengan pelebaran celah bawah. Pada rasio celah terkecil ($a/d \approx 0{,}1$), CPB mampu meredam gelombang secara signifikan dengan nilai K_t mencapai 0,20, yang memenuhi ambang batas "kolam tenang" ($H_t < 0{,}3$ m) untuk operasional bongkar-muat logistik pelabuhan. Sebaliknya, celah yang lebih lebar ($a/d > 0{,}3$) menghasilkan $K_t > 0{,}6$ yang berisiko memicu resonansi pada kapal yang bersandar, yang akan sangat mengganggu kegiatan logistik di pelabuhan. Optimalisasi rasio celah terbukti krusial untuk meminimalkan gerakan kapal (*vessel motion*) dan mencegah kecelakaan logistik maritim. Temuan ini memberikan dasar teknis bagi desain infrastruktur pelabuhan yang tangguh di wilayah pesisir rawan gelombang.

Kata Kunci : Pemecah gelombang *Curtain-wall*, koefisien transmisi gelombang, keselamatan logistik maritim, hidrodinamika, rasio celah terhadap kedalaman.

ABSTRACT

Inter-island hub ports serve as the backbone of national logistics; however, extreme wave energy remains a critical threat to mooring stability and cargo handling efficiency. This study investigates the hydrodynamic performance of Curtain-Wall Pile Breakwaters (CPB) in attenuating wave energy. The methodology involves physical model testing in a 15 x 0.3 x 0.45 m wave flume equipped with wave probes. The independent variables tested include the gap-to-depth ratio (a/d) with aperture variations of 5 cm, 10 cm, and 15 cm to measure the transmission (K_t) and reflection (K_r) coefficients against incident wave heights (H_i). Experimental results demonstrate that the transmission coefficient (K_t) increases non-linearly with the expansion of the bottom gap. At the minimum gap ratio ($a/d \approx 0{,}1$), the CPB significantly attenuates wave energy, achieving a K_t value of 0.20, which aligns with the "quiet water" threshold ($H_t < 0.3$ m) for port logistics loading and unloading operations. Conversely, wider gaps ($a/d > 0{,}3$) result in $K_t > 0.6$, posing a risk of inducing vessel resonance, which will significantly disrupt logistics activities at the port. Optimizing the gap ratio is proven essential to minimize vessel motion and prevent maritime logistics accidents. These findings provide a robust technical foundation for resilient port infrastructure design in wave-prone coastal regions.

Keywords *: Curtain-wall breakwater, wave transmission coefficient, Maritime logistics safety, Hydrodynamics, Gap-to-depth ratio.*

Journal of Economic, Business and Engineering (JEBE) is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

1. PENDAHULUAN

Transportasi maritim berperan sebagai urat nadi utama perdagangan global, terutama bagi negara kepulauan seperti Indonesia, di mana konektivitas antar-pulau identik dengan stabilitas ekonomi. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (2022), arus uatan kargo domestik telah mencapai hampir 400 juta ton, yang merefleksikan ketergantungan masif terhadap efisiensi pelabuhan (Badan Pusat Statistik, 2024). Namun, keandalan rantai pasok ini kian terancam oleh instabilitas hidrometeorologi (X. Zhang et al., 2022). Kerangka kerja "Ekonomi Biru" (*Blue Economy*) menuntut tidak hanya kapasitas arus muatan yang tinggi, tetapi juga standar keselamatan operasional yang mumpuni guna memastikan alur barang kebutuhan pokok tetap tidak terganggu oleh lonjakan gelombang musiman. Hambatan utama (*bottleneck*) dalam produktivitas pelabuhan sering kali bersumber dari pergerakan kapal yang berlebihan selama proses penambatan (*berthing*). Ketika energi gelombang datang mempenetrasi kolam pelabuhan, hal tersebut memicu respons hidrodinamika yang kompleks pada kapal yang sedang bersandar, khususnya dalam bentuk surge, sway, dan heave (He et al., 2024; Notonegoro et al., 2025). Contoh katastrofik dari kerentanan ini terjadi di Pelabuhan Merak pada tahun 2022 (Gambar 1), di mana resonansi akibat gelombang menyebabkan jatuhnya kendaraan logistik saat proses pemuatan (Suryana & Budiman, 2023). Insiden semacam itu bukan sekadar "kecelakaan" biasa, melainkan kegagalan sistem diredam gelombang pelabuhan dalam mempertahankan ambang batas "air tenang" (*quiet water*)—biasanya H_s < 0,3 m—yang diperlukan untuk keamanan operasional derek (*crane*) dan pintu rampa (*ramp-door*) (Arsyad et al., 2021; J. Zhang & Liu, 2020). Pemecah gelombang tumpukan batu (rubble-mound breakwater) konvensional, meskipun efektif, sering kali menimbulkan tantangan signifikan seperti biaya konstruksi yang tinggi, jejak lingkungan yang besar, serta gangguan terhadap transpor sedimen sepanjang pantai yang memicu pendangkalan (siltation) secara cepat (Rambabu & Mani, 2005).

Sebagai alternatif berkelanjutan, pemecah gelombang tiang dinding-tirai (*curtain-wall* pile breakwater) mulai banyak digunakan (Abraham et al., 1999; Mahdavi et al., 2016; Takahashi et al., 2019). Struktur ini dirancang untuk meredam kecepatan orbital berenergi tinggi di dekat permukaan bebas, sembari tetap memungkinkan sirkulasi air di lapisan bawah. Fungsionalitas ganda ini sangat krusial untuk menjaga kualitas air dan meminimalkan pemeliharaan pengerukan di dalam pelabuhan (Ajeng Amiati et al., 2020; Leng et al., 2024; Sierra et al., 2017).



Gambar 1. Sebuah truk bermuatan semen terjatuh ke laut saat mencoba menaiki kapal di Dermaga 5 Pelabuhan Merak pada 28 Desember 2022. Insiden ini terjadi akibat kegagalan peredaman gelombang laut yang datang.

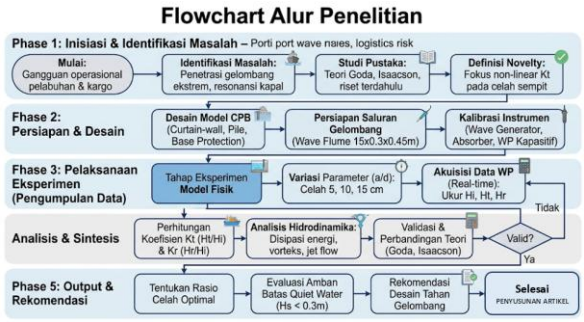
Terlepas dari keunggulan teoretis dinding-tirai, efisiensi hidraulisnya sangat sensitif terhadap konfigurasi geometris, terutama rasio celah bawah (a/d) (Khaldirian et al., 2025; Vu et al., 2022). Meskipun literatur yang ada dari Goda (2000) dan Isaacson (1998) telah memberikan pemahaman mendasar mengenai rintangan vertikal, masih terdapat kekurangan data empiris terkait hubungan non-linear antara lebar celah spesifik dengan koefisien transmisi (K_t) di bawah kondisi gelombang frekuensi

tinggi yang tipikal di perairan pesisir Indonesia (Isaacson et al., 2000; Yoshimi Goda, 2000).

Penelitian ini menjawab kesenjangan tersebut dengan melakukan analisis mekanika yang ketat terhadap transmisi gelombang melalui variasi bukaan *curtain-wall*. Tujuannya adalah untuk menetapkan tolok ukur desain kuantitatif yang mengoptimalkan peredaman gelombang tanpa mengorbankan konektivitas hidraulis, sehingga meningkatkan keamanan dan resiliensi pusat logistik maritim. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada interaksi gelombang-struktur secara umum, penelitian ini secara eksplisit membahas ambang batas keselamatan operasional logistik maritim dengan mengkuantifikasi transmisi non-linier melalui rasio celah yang dioptimalkan.

2. METODE

Penelitian ini dilaksanakan mengikuti alur penelitian yang ditampilkan pada Gambar 1. Kegiatan penelitian ini terbagi dalam 5 fasa kegiatan.



Gambar 2. Alur penelitian pemecah gelombang tipe *Curtain wall*.

2.1 Kerangka Teoretis

Efikasi sebuah pemecah gelombang (*breakwater*) utamanya diukur dari kemampuannya untuk mendisipasikan atau memantulkan energi gelombang datang (H_i). Gelombang yang melewati bukaan bawah pada *curtain-wall* didefinisikan sebagai gelombang transmisi (H_t). Koefisien Transmisi (K_t) dinyatakan sebagai berikut:

$$K_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (1)$$

Dalam penelitian ini, perilaku mekanis gelombang dianalisis dengan memvariasikan lebar celah (a) terhadap total kedalaman (d). Variasi yang menggunakan rasio nilai kecuraman gelombang (H/L), baik dalam skala besar maupun kecil, merepresentasikan bentuk gelombang yang curam atau landai sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Nilai Kecuraman Gelombang

No.	Rasio Kecuraman (*H/L*)
1	4.85/500
2	8.485/500
3	14.24/500

Metodologi penelitian ini melibatkan serangkaian eksperimen terkontrol, di mana tinggi gelombang datang (H_i) diuji terhadap berbagai konfigurasi *curtain-wall.* Tujuannya adalah untuk mengidentifikasi batas celah kritis yang menjaga nilai (K_t) tetap berada dalam ambang batas aman "air tenang" yang diperlukan untuk operasional derek (*crane*)—umumnya $H_t < 0{,}3$ meter untuk kapal berukuran kecil hingga menengah.

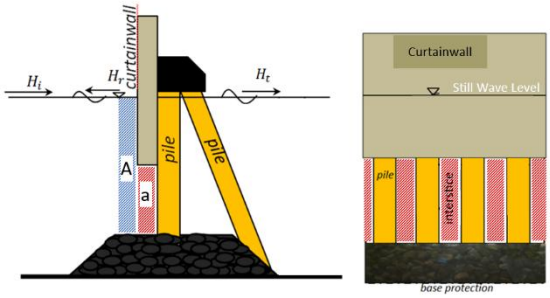
2.2. Desain Model CPB dan Variasi Celah

Eksperimen dilakukan di dalam saluran gelombang (*wave flume*) berukuran 15.0 m × 0.3 m × 0.45 m yang dilengkapi dengan dinding samping akrilik transparan untuk memudahkan pengamatan visual (Gambar 4).



Gambar 3. Fasilitas Pengujian Gelombang (Flume)

Perangkat eksperimen ini mengintegrasikan tiga komponen utama: (1) pembangkit gelombang yang mampu menghasilkan karakteristik gelombang terkontrol; (2) penyerap gelombang yang dirancang untuk menghilangkan interferensi gelombang pantul; dan (3) alat ukur gelombang (*wave probe*) tipe kapasitif untuk pemantauan elevasi permukaan air secara waktu nyata (*real-time*) dengan presisi tinggi.



Gambar 4. Desain Model CPB dan Variasi Celah

Model *Curtain-wall Pile Breakwater* (CPB) yang digunakan dalam penelitian eksperimental ini (Gambar 3) dirancang untuk mereplikasi komponen fungsional dasar dari struktur skala prototipe. Model tersebut terdiri dari tiga elemen struktural utama:

- ***Curtain-wall:*** Penghalang vertikal kaku yang dirancang sebagai mekanisme utama redaman energi gelombang melalui pemantulan dan disipasi akibat turbulensi.
- **Substruktur Tiang:** Serangkaian tiang penyangga yang memberikan integritas struktural pada *curtain-wall,* yang dipancang dalam ke dasar laut untuk mensimulasikan penetrasi ke dalam lapisan tanah yang kompeten.
- **Perlindungan Dasar:** Konfigurasi tingkat dasar khusus yang dirancang untuk memitigasi gerusan (*scour*) lokal di sekitar fondasi tiang dan meningkatkan stabilitas hidrodinamika struktur secara keseluruhan.

Variabel bebas utama dalam penelitian ini adalah lebar bukaan (celah) di bawah *curtain-wall.* Variasi geometris ini dikuantifikasi menggunakan rasio porositas $\left({}^{a}/_{A}\right)$, di mana a merepresentasikan luas total bukaan bawah dan A menunjukkan total luas penampang proyeksi yang terpapar medan gelombang datang.

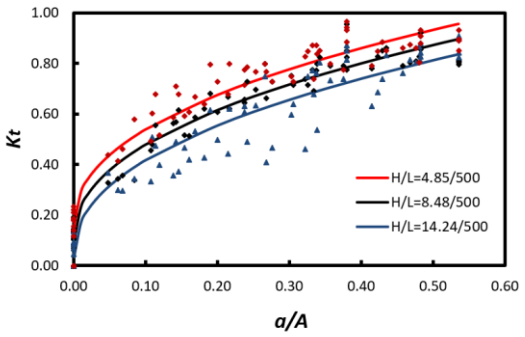
Dengan menyesuaikan rasio ${}^{a}/_{A}$ secara sistematis, respons hidrodinamika dari CPB dapat diselidiki melalui berbagai spektrum tingkat porositas. Sensor presisi tinggi dikerahkan untuk mencatat tinggi gelombang datang (H_i) , tinggi gelombang pantul (H_r), dan tinggi gelombang transmisi (H_t). Pengukuran empiris ini memungkinkan penurunan koefisien transmisi K_t dan koefisien refleksi K_r, yang berfungsi sebagai tolok ukur kuantitatif kritis untuk mengevaluasi efisiensi hidraulis CPB dalam menjaga ketenangan kolam pelabuhan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Koefisien Transmisi (K_t)

Analisis data mengungkapkan bahwa koefisien transmisi (K_t) meningkat secara non-linear seiring dengan perluasan lebar celah (a). Saat nilai a meningkat, sebagian besar kecepatan orbital gelombang melewati bagian bawah struktur, yang memicu turbulensi lebih tinggi serta pembentukan gelombang sekunder di sisi belakang (*lee side*) pemecah gelombang (Gambar 5).

Dari perspektif mekanis, *curtain-wall* berfungsi sebagai penyaring lolos-tinggi (*high-pass filter*). Untuk menjamin keselamatan logistik bongkar muat, celah a harus direkayasa sedemikian rupa agar dapat menyeimbangkan kebutuhan lingkungan (transpor sedimen) dan stabilitas penambatan (He et al., 2024; Zhao et al., 2025).



Gambar 5. Koefisien transmisi(K_t) meningkat secara non-linear seiring dengan perluasan lebar celah (a).

Nilai K_t yang berlebihan (K_t > 0,5) ditemukan dapat memicu resonansi pada kapal yang tertambat, yang secara signifikan meningkatkan risiko putusnya tali tambat.

3.2. Mekanisme Hidrodinamika Transmisi Gelombang

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa koefisien transmisi sangat sensitif terhadap rasio celah terhadap kedalaman. Dari perspektif mekanis, pemecah gelombang *curtain-wall* berfungsi sebagai penghalang parsial yang memotong kecepatan orbital maksimum gelombang yang terkonsentrasi di dekat permukaan air (Anh et al., 2025). Namun, adanya celah bawah memungkinkan sebagian

besar energi kinetik gelombang melintas di bawah struktur sebagai "aliran jet" (*jet flow*) (Jubaer et al., 2019).

Sebagaimana ditunjukkan dalam hasil penelitian, peningkatan lebar celah dari 5 cm menjadi 15 cm menyebabkan lonjakan tajam pada nilai koefisien transmisi. Fenomena ini dapat dijelaskan melalui pengurangan disipasi energi akibat turbulensi. Ketika celah sempit, energi gelombang dipaksa melewati area terbatas yang menciptakan perbedaan tekanan, sehingga memicu pelepasan pusaran (*vortex shedding*) pada tepi bawah *curtain-wall* (Vu et al., 2022). Proses ini mengubah energi gelombang koheren menjadi energi kinetik turbulen yang terdisipasi dengan cepat. Sebaliknya, celah yang lebih besar mengurangi "efek penyempitan" ini, sehingga memungkinkan gelombang mempertahankan gerak orbitalnya dengan kehilangan energi minimal, sesuai dengan teori model Disipasi Daya Gelombang (Isaacson et al., 2000; Zhao et al., 2025).

3.3. Perbandingan dengan Pemecah Gelombang Konvensional

Dibandingkan dengan pemecah gelombang tumpukan batu (*rubble-mound*) tradisional, sistem tiang *curtain-wall* menawarkan keunggulan unik dalam hal pertukaran air. Meskipun struktur tumpukan batu mampu mencapai K_t < 0,1, struktur tersebut sering kali menyebabkan masalah sedimentasi di dalam pelabuhan.

Temuan kami menunjukkan bahwa dengan celah optimal sebesar 5 cm, *curtain-wall* mencapai nilai K_t sebesar 0,20. Nilai ini berada dalam ambang batas "air tenang" yang diperlukan untuk pengoperasian derek *Ship-to-Shore* (STS) secara aman (Nguyen et al., 2022; Serway & Jewett, 2004), yang umumnya memerlukan tinggi gelombang di bawah 0,3 meter guna mencegah ayunan kontainer yang berlebihan (Leng et al., 2024; Teh et al., 2011).



Gambar 6. Desain pelabuhan yang menangani kapal Roll-on/Roll-off (Ro-Ro) dan truk logistik harus memprioritaskan nilai K_t di bawah 0,3.

3.4. Implikasi terhadap Logistik dan Keselamatan Pelabuhan

Korelasi langsung antara koefisien transmisi dan stabilitas kapal sangatlah krusial. Nilai K_t yang tinggi menyebabkan peningkatan gerakan *Surge* (gerak maju-mundur) dan *Sway* (gerak geser samping) pada kapal yang tertambat (X. Zhang et al., 2022). Dalam konteks insiden Merak (Gambar 1), kegagalan dalam meredam energi gelombang mengakibatkan kondisi resonansi di mana pergerakan kapal melampaui batas kemampuan sistem penambatan.

Dengan menerapkan desain *curtain-wall* dengan rasio celah yang terkendali, pelabuhan dapat menjaga keseimbangan antara:

- **Konektivitas Hidraulis:** Memastikan transpor sedimen guna mencegah pembengkakan biaya pengerukan pelabuhan.
- **Ketahanan Operasional:** Meminimalkan waktu henti (*downtime*) selama musim monsun, di mana tinggi gelombang biasanya melebihi 2,0 meter.

Analisis kami menunjukkan bahwa untuk pelabuhan yang menangani kapal *Roll-on/Roll-off* (Ro-Ro) dan truk logistik, desain harus memprioritaskan nilai K_t di bawah 0,3 (Gambar 6). Di atas ambang batas tersebut, keselamatan penanganan kargo menurun secara eksponensial akibat gaya non-linear yang bekerja pada tali tambat, mengikuti persamaan matematik berikut:

$$\boldsymbol{F = \frac{1}{2} C_d \rho A v^2} \quad (2)$$

Persamaan ini merujuk pada total gaya non-linear (F) yang bekerja pada struktur atau tali tambat kapal dipengaruhi oleh koefisien hambat (*Drag Coefficient*) (C_d), massa jenis air laut () yang umumnya berkisar antara 1.025 kg/m³, luas area kapal (A) yang terendam air dan menghadap langsung ke arah datangnya arus atau gelombang, dan kecepatan relatif fluida terhadap benda (v). Perubahan kecil pada kecepatan gelombang yang ditransmisikan akan berdampak sangat besar pada beban tali tambat.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

Pemecah gelombang tipe *curtain-wall* (*curtain-wall pile breakwater*) terbukti efektif meredam gelombang periode pendek. Kinerja struktur sangat bergantung pada pengendalian rasio celah terhadap kedalaman air secara ketat. Koefisien transmisi (K_t) memiliki hubungan non-linear dengan lebar celah; celah yang lebih besar akan mengurangi disipasi energi turbulen dan meningkatkan penetrasi gelombang ke pelabuhan. Desain ini lebih unggul dibanding struktur masif karena mendukung sirkulasi air yang lebih baik, sehingga meminimalkan sedimentasi dan biaya pengerukan pelabuhan.

4.2. Saran

Disarankan menggunakan celah optimal (sekitar 5 cm pada skala model) untuk menjaga nilai $K_t \leq 0{,}20$ agar operasional derek *Ship-to-Shore* (STS) tetap aman di kondisi "air tenang". Selain itu, Nilai K_t harus dijaga di bawah 0,3 untuk mencegah resonansi kapal tertambat (khususnya kapal Ro-Ro). Kondisi ini berpotensi menimbulkan resiko putusnya tali tambat dan menyebabkan kecelakaan logistik.

5. DAFTAR PUSTAKA

Abraham, D. M., Joanne Yeh, M. H., & Yeh, M. H. J. (1999). Breakwater construction: an effective method for industrial waste utilization. *Engineering, Construction and Architectural Management*, *6*(2), 145–154. https://doi.org/10.1108/eb021107

Ajeng Amiati, S., Lingkar Luar Tanjungpura, J., Karawang, W., Regency, K., & Java, W. (2020). Breakwater Effectiveness to Reduce Ocean Waves In The Karangantu Fisheries Port, Serang City, Banten Province, Indonesia. *Jurnal Grouper*, *11*(2), 27–32.

Anh, D. T., Dan, T. C., Thanh, P. N., Tanim, A. H., Wright, D., Pham, N. T., & Nguyen Anh, T. (2025). Hydraulic performance and wave transmission through nature-inspired perforated hollow-base piles breakwater. *Ocean Engineering*, *322*, 120423. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120423

Arsyad, M. N., Setyandito, O., Kesuma, L. M., Armono, H. D., Anda, M., & Kusumadewi, R. A. (2021). Wave transformation around breakwater (case study: Tourism harbour, Eastern Bali, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *894*(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/894/1/012028

Badan Pusat Statistik. (2024). *Bongkar Muat Barang Antar Pulau dan Luar Negeri di Pelabuhan Indonesia Tahun 1988-2022 (Ribu ton)* (Vol. 2022). https://www.bps.go.id/id/statistics-table/1/MTQxOSMx/bongkar-muat-barang-antar-pulau-dan-luar-negeri-di-pelabuhan-indonesia-tahun-1988-2022--ribu-ton-.html

He, F., Pan, J., Li, J., Zheng, S., & Yuan, Z. (2024). An experimental study of a rectangular floating breakwater with flexible curtains as wave-dissipating components. *Applied Ocean Research*,

152, 104185. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104185

Isaacson, M., Fellow, ASCE, Baldwin, J., Allyn, N., & Cowdell, S. (2000). Wave Interactions with Perforated Breakwater. *Journal Of Waterway, Port, Coastal, And Ocean Engineering*, *126*(October), 229–235.

Jubaer, H., Afshar, S., Xiao, J., Chen, X. D., Selomulya, C., & Woo, M. W. (2019). On the effect of turbulence models on CFD simulations of a counter-current spray drying process. *Chemical Engineering Research and Design*, *141*, 592–607. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.11.024

Khaldirian, M. F., Tahalele, M., Tri, I., & Wahyu, R. (2025). Numerical Study of Wave Reflection by The Curtain Wall-Pile Breakwater Using the SPH Model. *Journal of the Civil Engineering Forum*, *11*(2), 113–124. https://doi.org/10.22146/jcef.15085

Leng, S., Xue, S., Jin, Y., Xu, G., & Xie, W. (2024). Wave dissipation effect of a new combined breakwater and its protective performance for coastal box girder bridges. *Advances in Bridge Engineering*, *5*(1), 18. https://doi.org/10.1186/s43251-024-00130-8

Mahdavi, H., Fatahi, B., Khabbaz, H., Vincent, P., & Kelly, R. (2016). Comparison of Coupled Flow-deformation and Drained Analyses for Road Embankments on CMC Improved Ground. *Procedia Engineering*, *143*(Advances in Transportation Geotechnics 3 . The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics (ICTG 2016)), 462–469. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.058

Nguyen, H. P., Nguyen, P. Q., Phong, & Nguyen, T. P. (2022). Green Port Strategies in Developed Coastal Countries as Useful Lessons for the Path of Sustainable Development: A Case study in Vietnam. *International Journal of Renewable Energy Development*, *11*(4), 950–962. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.46539

Notonegoro, H. A., Sofyan, M. A., Rizkynawan, B., Soegijono, B., Setiawan, J., Aritonang, S., Suherman, A., & Ali, N. (2025). Layer Influence on Organosilica Composites Strength to Withstand the Impact of 9mm Caliber Bullets. *JURNAL SAINS MATERI INDONESIA (JUSAMI)*, *27*(1), 54–59. https://doi.org/https://doi.org/10.55981/jsmi.2025.10243

Rambabu, A. C., & Mani, J. S. (2005). Numerical prediction of performance of submerged breakwaters. *Ocean Engineering*, *32*(10), 1235–1246. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.10.023

Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2004). *Physics for Scientists and Engineers* (6th ed.). Thomson Brooks/Cole.

Sierra, J. P., Casas-Prat, M., & Campins, E. (2017). Impact of climate change on wave energy resource: The case of Menorca (Spain). *Renewable Energy*, *101*, 275–285. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.060

Suryana, M., & Budiman, B. (2023). *Truk pengangkut semen jatuh di Dermaga 5 Merak berhasil dievakuasi*. 1–5. https://www.antaranews.com/berita/3336246/truk-pengangkut-semen-jatuh-di-dermaga-5-merak-berhasil-dievakuasi

Takahashi, H., Morikawa, Y., & Kashima, H. (2019). Centrifuge modelling of breaking waves and seashore ground. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, *19*(3), 115–127. https://doi.org/10.1680/jphmg.17.00037

Teh, H. M., Venugopal, V., & Bruce, T. (2011). Hydrodynamic Performance of a Free Surface Semicircular Perforated Breakwater. *Coastal Engineering Proceedings*, *32*, 20. https://doi.org/10.9753/icce.v32.structures.20

Vu, H. T. D., Zemann, M., Oberle, P., Seidel, F., & Nestmann, F. (2022). Investigating Wave Transmission through Curtain Wall Breakwaters under Variable Conditions. *Journal of Coastal and Hydraulic Structures*, *2*, 19. https://doi.org/10.48438/jchs.2022.0019

Yoshimi Goda. (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures* (15th ed.). World Scientific.

Zhang, J., & Liu, Y. (2020). Study on Estimation Method of Port Container Handling Cost Based on Interval Analysis. *Journal of Coastal Research*, *95*(sp1), 979–984. https://doi.org/10.2112/SI95-191.1

Zhang, X., Li, J., Yang, Z., & Wang, X. (2022). Collaborative optimization for loading operation planning and vessel traffic scheduling in dry bulk ports. *Advanced Engineering Informatics*, *51*(January), 1–8. https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101489

Zhao, X., Pan, S., Zou, Q., & Geng, J. (2025). Slamming loads induced by dam-break flow on land-based oscillating water columns: Numerical and experimental study. *Coastal Engineering*, *198*, 104715. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2025.104715