

## **PENGEMBANGAN PENTAPOD<sup>1</sup> ARMOR BETON JENIS BARU UNTUK PELINDUNG BANGUNAN PANTAI**

Dantje Kardana Natakusumah<sup>1\*</sup>, Hendra Achiari<sup>2</sup>, Eka Oktariyanto Nugroho<sup>1</sup>,  
Syarif Hidayatulloh<sup>3</sup>, Jonathan Angelo<sup>3</sup>, Fitra Adinata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung

<sup>3</sup>Mahasiswa Program Studi MPSDA, Institut Teknologi Bandung

<sup>4</sup>Konsultan P.T. Sapta Adhi Pratama

\*dknpub@gmail.com

Pemasukan: 5 November 2023    Perbaikan: 24 November 2023    Diterima: 27 November 2023

### **Intisari**

Makalah ini membahas armor beton PentaPod, armor beton jenis baru pelindung bangunan pantai dari kerusakan akibat gelombang dan arus laut. Armor Beton PentaPod dapat disusun secara acak atau teratur tidak terikat dengan tali pengikat. Namun PentaPod dapat dipasang secara teratur, dalam satu atau beberapa lapisan yang saling terikat dengan tali pengikat. Stabilitas keseluruhan bangunan sangat besar jauh diatas pemasangan armor beton konvensional. Metode penelitian ini melibatkan penentuan Koefisien Stabilitas (Kd) untuk dua varian armor beton PentaPod, yaitu PentaCone dan PentaOcta, yang diuji di Tangki Gelombang. Dalam studi ini dicari koefisien stabilitas untuk kedua varian armor beton PentaPod yang dipasang acak dan teratur tanpa ikatan tali. Kebaruan penelitian adalah armor beton 1) dapat dipasang secara acak dan teratur, 2) pemasangan teratur tidak terikat mengurangi jumlah unit armor dan mengurangi biaya, 4) pemasangan teratur terikat meningkatkan stabilitas dan dapat pemberkecil ukuran armor akibatnya biaya turun 5) tali pengikat memudahkan pemasangan armor di permukaan dan dalam air. Dalam makalah ini, digunakan software Flow 3D sebagai Numerical Wave Flume. Meskipun belum ada hasil Numerical Wave Flume yang bisa dibandingkan dengan hasil Physical Wave Flume, ini merupakan langkah awal untuk mendapatkan hasil yang saling melengkapi antara metode Physical dan Numerical Wave Flume

Kata Kunci: Pengujian Kd, Koefisien stabilitas, Armor beton, PentaPod, Pelindung bangunan pantai.

### **Latar Belakang**

Gelombang adalah pendorong utama erosi pantai, dan intensitas, frekuensi, dan arahnya dipengaruhi oleh kondisi cuaca seperti kecepatan angin, tekanan atmosfer, dan curah hujan. Karena dampak buruk perubahan iklim, kebutuhan akan

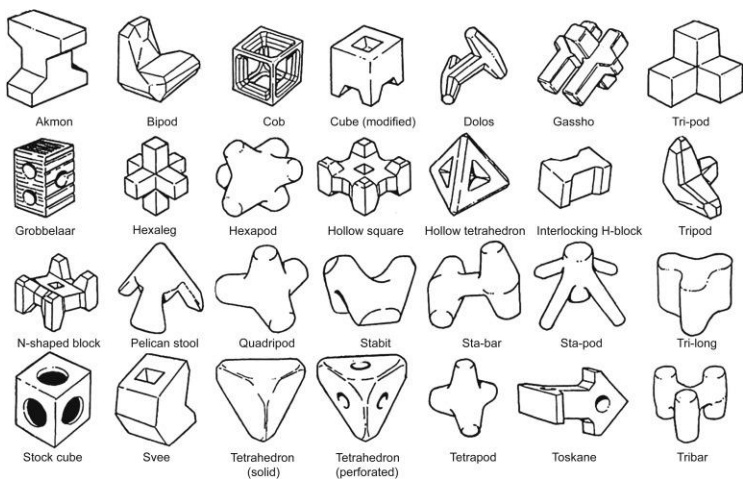
---

<sup>1</sup> PentaPod atau tepatnya armor beton PentaPod-PSE (PentaPod Piramida Segi Empat), adalah paten No. P00202305213, atas nama Institut Teknologi Bandung, terdaftar di Direktorat Jendral Kekayaan Intelektual, Kementrian Hukum dan HAM.



















perlindungan pantai semakin penting. Berbagai tindakan perlindungan pantai akibat dampak buruk perubahan iklim adalah bertujuan untuk melindungi tidak hanya infrastruktur fisik tetapi juga penduduk di daerah pantai.

Struktur pantai dirancang untuk menghilangkan energi gelombang, mengurangi ketinggian gelombang, atau mengalihkan energi gelombang dari area garis pantai yang rentan. Beberapa contoh bangunan pantai yang dapat meningkatkan perlindungan terhadap gelombang antara lain Pemecah gelombang (*Breakwater*), Tembok laut (*Seawalls*), Groyne (*Groyne*), Rivetmen (*Rivetment*), Terumbu buatan lepas pantai (*Reef Breakwater*).

Bangunan-bangunan pantai diatas biasanya dibangun menggunakan bongkahan batu yang kasar dan tidak beraturan, yang dikenal sebagai "gundukan rouble" (rouble Moud), yang terbuat dari batu alam yang umumnya berupa batuan beku dengan armor batu yang lebih besar atau berbagai armor beton buatan seperti ditunjukkan pada **Gambar 1**.



**Gambar 1.** Armour Beton Pemecah Gelombang (Smith, 2016, Chapter 3)

Randomly placed armour units				Uniformly placed armour units			
Double layer placement			Single layer placement				
Stability factor: Own weight		Own weight and interlocking		Interlocking	Friction		
Cube		Tetrapode France, 1950		Accropode France, 1980		Cob UK, 1969	
Modified Cube USA, 1959		Akmon NL, 1962		Core-loc® USA, 1996		Diahitis Ireland, 1998	
Antifer Cube France, 1973		Tribar USA, 1958		A-Jack USA, 1998		Seabee Australia, 1978	
Haro Belgium, 1984		Stabit UK, 1961		Xbloc NL, 2003		Shed UK, 1982	
Tripod NL, 1962		Dolos South Africa, 1963					

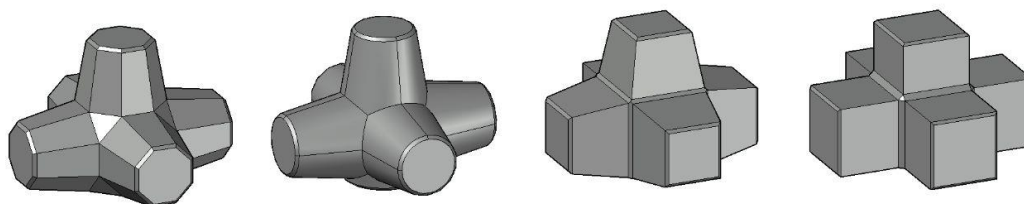
**Gambar 2.** Armour beton pemecah gelombang (Muttray and Reedijk, 2008).

### PentaPod, Armor Beton Jenis baru?

Makalah ini membahas tentang PentaPod, inovasi armor beton untuk perlindungan pantai dari kerusakan gelombang dan arus. PentaPod, ditemukan oleh Natakusumah, D.K. dan pertama kali dipresentasikan dalam Konferensi HATHI-40 tanggal 26 Agustus 2023 di Bandar Lampung (Natakusumah dkk., 2023).

Pada **Gambar 1** dan **Gambar 2** ditunjukkan beberapa armor beton pelindung bangunan pantai yang sudah ada sebelumnya serta umum digunakan untuk melindungi bangunan pantai. Beberapa armor beton pelindung pada gambar tersebut memiliki bentuk yang secara topologi mirip. Sebagai contoh Tetrapod dan Quadripod atau Hexaleg dan Hexapod atau Ajack dan Xblock atau StaBar dan Dolos, secara topologi sama, namun memiliki perbedaan dalam bentuk detailnya, sehingga dianggap sebagai armor beton pelindung yang berbeda.

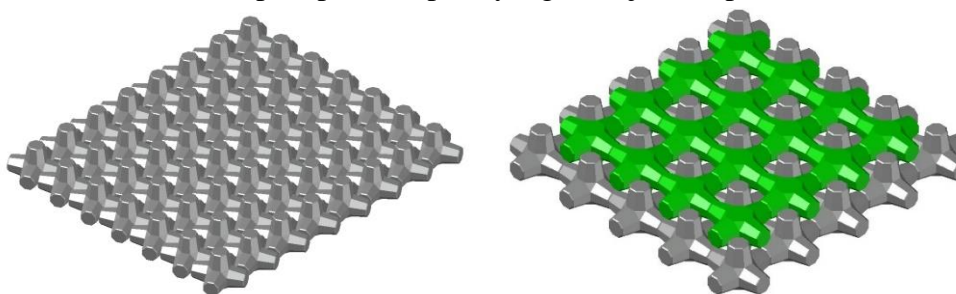
Pada **Gambar 3**, terlihat beberapa varian bentuk PentaPod dari kiri ke kanan, yaitu PentaOcta, PentaCone, PentaSquare, dan PentaCube. Dibandingkan dengan armor beton pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**, tidak ada yang memiliki topologi dan bentuk detail yang sama dengan PentaPod. Nama "PentaPod" juga tidak terlihat pernah digunakan sebelumnya untuk armor beton yang umum digunakan. Oleh karena itu, Armor Beton PentaPod dapat dikategorikan sebagai invensi baru.



**Gambar 3.** Beberapa varian bentuk PentaPod.

Armor beton yang umum digunakan pada bangunan pantai seperti ditunjukkan pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**, umumnya dapat disusun secara acak atau teratur tanpa terikat satu sama lain, sehingga stabilitas keseluruhan bangunan pantai yang dilindungi sangat tergantung pada stabilitas individu setiap unit armor. Armor Beton PentaPod dapat secara acak maupun teratur.

Dalam susunan teratur, Armor Beton PentaPod dapat dipasang tanpa saling terikat, seperti yang terlihat pada **Gambar 4.a**. Namun juga dapat disusun secara teratur dalam dua atau beberapa lapisan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.b**



a. Teratur dan Tidak Saling Terikat

Teratur dan Saling Terikat

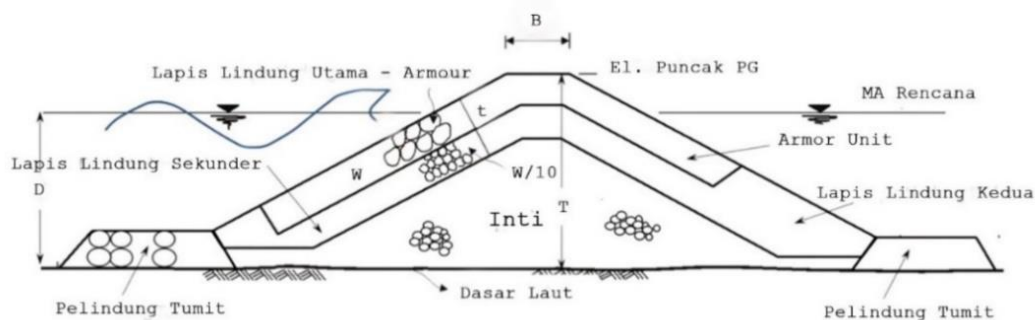
**Gambar 4.** Pemasangan PentaPod secara Teratur.

Pada susunan teratur seluruh unit armor diikat dengan tali pengikat yang dipasang melalui lubang yang melewati sumbu kaki-kaki horizontal maupun vertikal. Dengan cara ini, stabilitas keseluruhan bangunan pantai ditentukan oleh stabilitas gabungan dari unit-unit armor yang terhubung satu sama lain yang dipastikan jauh lebih besar dari stabilitas pemasangan konvensional.

Kebaruan penelitian ini terletak pada pemasangan armor beton yang 1) dapat dipasang secara acak dan teratur, 2) pemasangan secara teratur tidak terikat mengurangi biaya karena dapat mengurangi jumlah unit armor, dan 4) pemasangan secara teratur terikat mengurangi biaya karena ukuran armor mengecil namun stabilitas armor beton meningkat karena saling terikat serta 5) adanya tali pengikat memudahkan pemasangan armor di permukaan dan terutama dalam air.

## Metodologi

Tujuan penelitian ini adalah melakukan pengujian armor beton PentaPod dalam Flume Gelombang Fisik sehingga PentaPod memenuhi persyaratan teknis untuk bisa digunakan untuk melindungi bangunan pantai seperti rivertment, groin dan pemecah gelombang sisi miring yang lain terbuat dari gundukan batu. Konfigurasi pemecah gelombang sisi miring bisa dilihat pada buku Shore Protection Manual (1984) dan pada buku Teknik Pantai, Triatmojo (2006) seperti ditunjukkan pada **Gambar 5**.

**Gambar 5.** Perencanaan bangunan pemecah gelombang sisi miring.

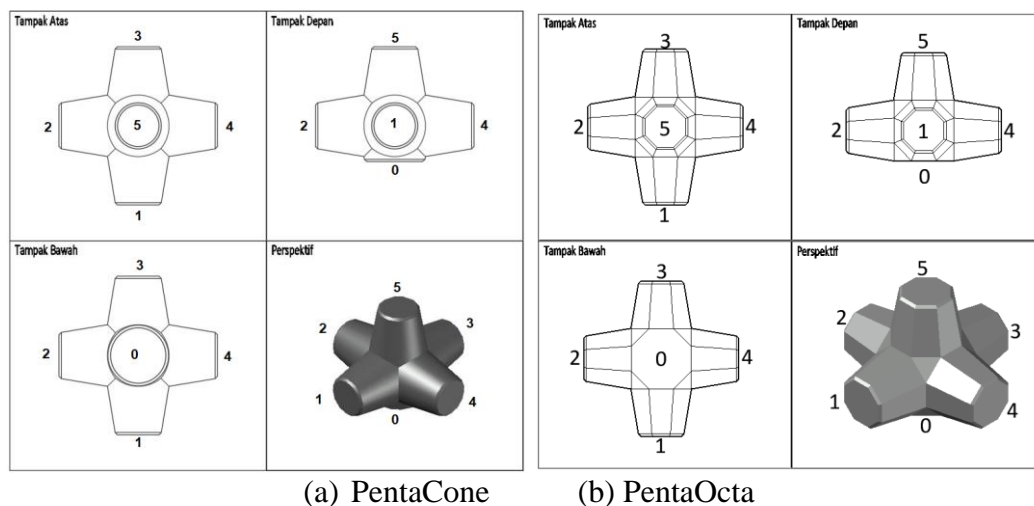
Untuk perencanaan penggunaan PentaPod diperlukan nilai Koefisien Stabilitas  $K_d$  yang dapat diturunkan dari Rumus Hudson (1950), sebagai berikut.

$$K_d = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{W \cdot (S_r - 1)^3 \cdot \cot \theta} \quad S_r = \frac{\gamma_r}{\gamma_a}$$

Dimana  $K_d$  adalah Koefisien Stabilitas,  $W$  adalah berat batu pelindung,  $\gamma_r$  adalah berat jenis batu/beton,  $\gamma_a$  adalah berat jenis air laut,  $H$  adalah tinggi gelombang, dan  $\theta$  adalah sudut kemiringan sisi pem. Gel.

Pada **Gambar 6** ditunjukkan dua bentuk varian dari armor beton PentaPod yaitu jenis PentaCone dan PentaOcta yang dalam penelitian ini, akan diuji di Wave Flume

yang ada di Laboratorium Teknik Kelautan, campus ITB di Jatinangor. Besarnya Kd untuk armor beton PentaPod akan ditentukan dari eksperiment di Flume Gelombang pada **Gambar 7**



**Gambar 6.** Bentuk bentuk PentaPod jenis a) PentaCone dan b) PentaOcta.



**Gambar 7.** Gambar penempatan model breakwater pada tangki gelombang.



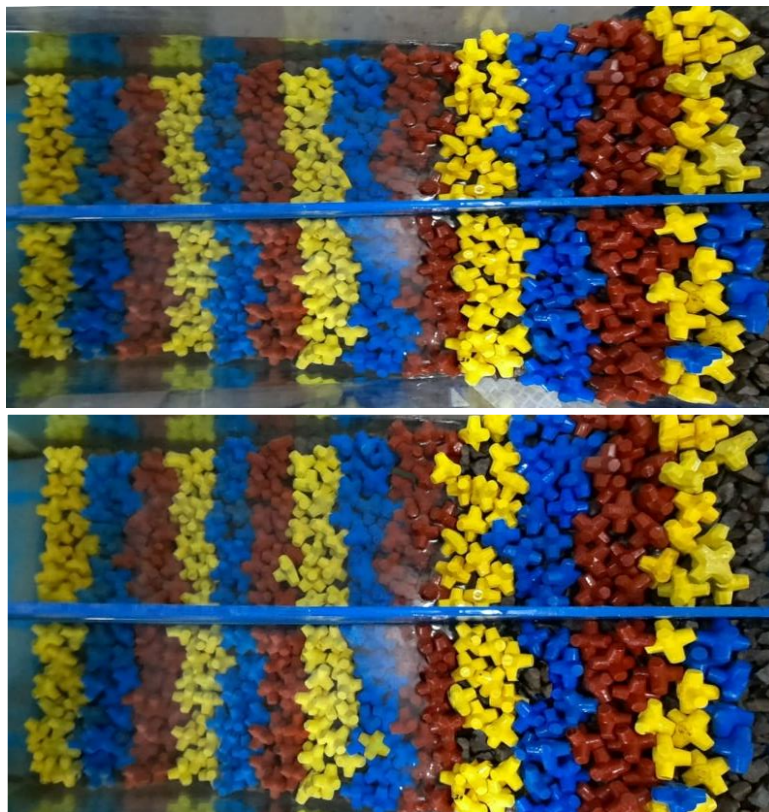
## Hasil Studi dan Pembahasan

Penelitian ini bertujuan untuk mengamati kerusakan PentaPod yang digunakan sebagai lapis lindung breakwater dengan berbagai variasi tinggi dan periode gelombang tertentu dan penempatan *teratur* dan *acak*. Parameter utama yang harus diketahui untuk mengkaji stabilitas breakwater adalah kerusakan unit lapis lindung pada saat terjadi gelombang tertentu.

Tabel 1. Data karakteristik uji model armor PentaPod.

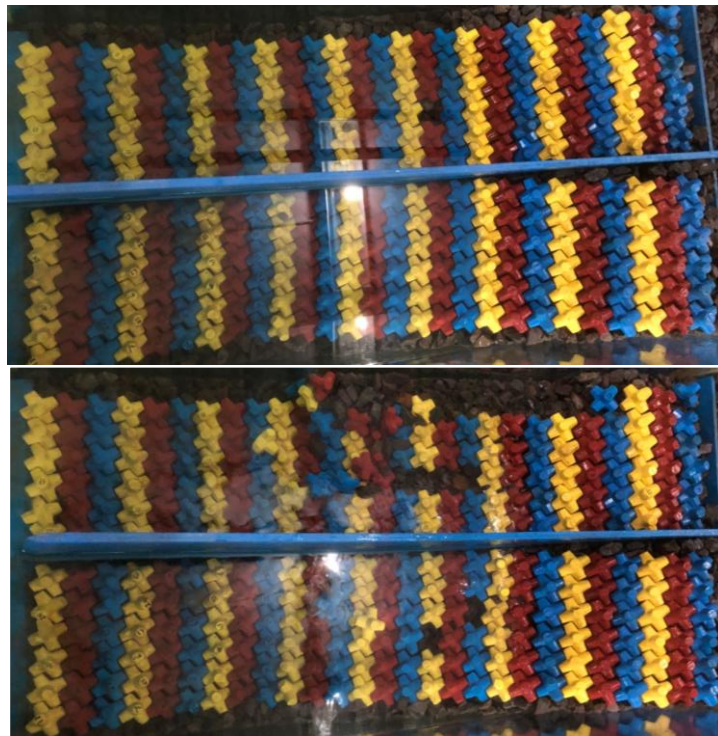
	PentaCone	PentaOcta
Berat ( $W$ )	117.70 kg	116.49 kg
Berat Jenis ( $\gamma_r$ )	1.89 g/cm <sup>3</sup>	1.91 g/cm <sup>3</sup>
Berat Jenis Air ( $\gamma_a$ )	1.00 g/cm <sup>3</sup>	1.00 g/cm <sup>3</sup>
$S_r$ ( $\gamma_r/\gamma_a$ )	1.89	1.91
Kemiringan cot ( $\alpha$ )	1.50	1.50
Skala model	1/25	1/25
Jenis Gelombang	Tidak Pecah	Tidak Pecah
Jml Model acak	60 buah	60 buah

Pola penempatan PentaPod secara *acak* bisa dilihat pada **Gambar 8** berikut



**Gambar 8.** Pola penempatan secara acak sebelum dan setelah terjadi kerusakan.

Pola penempatan PentaPod secara *teratur* bisa dilihat pada **Gambar 9** berikut :



**Gambar 9.** Pola penempatan teratur sebelum dan setelah terjadi kerusakan.

Hasil diatas menunjukkan bahwa penempatan tunggal yang kompak dan teratur lebih cenderung gagal ketika satu unit terlepas karena stabilitasnya bergantung pada gaya interlocking antara unit yang berdekatan.

### Perhitungan Stabilitas PentaPod

Berat model PentaPod tipe *PentaCone* adalah yang digunakan 117,70 gram dengan berat jenis 1,89 g/cm<sup>3</sup>, tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah tinggi gelombang insiden hasil perhitungan, berat jenis air tawar 1 g/cm<sup>3</sup>, dan cot  $\alpha$  adalah 1,5. Dari hasil perhitungan didapat bahwa nilai koefisien stabilitas *PentaCone* adalah sebesar 39,24 pada penempatan *teratur* dan 31,51 pada penempatan *acak*.

Sedangkan berat model PentaPod tipe *PentaOcta* adalah yang digunakan 116,49 gram dengan berat jenis 1,91 g/cm<sup>3</sup>, tinggi gelombang rencana yang dipakai adalah tinggi gelombang insiden hasil perhitungan, berat jenis air tawar 1 g/cm<sup>3</sup>, dan cot  $\alpha$  adalah 1,5. Dari hasil perhitungan didapat bahwa nilai koefisien stabilitas *PentaCone* adalah sebesar 32,82 pada penempatan *teratur* dan 14,12 pada penempatan *acak*.

Tabel 2. Nilai  $K_D$  dengan pemasangan *acak*.

Percobaan	PentaCone		PentaOcta	
	H (cm)	$K_D$	H (cm)	$K_D$
1	12.41	29.26	8.28	8.19
2	12.92	33.01	10.64	17.36
3	12.82	32.25	10.53	16.81
Rata-rata		<b>31.51</b>		<b>14.12</b>

Tabel 3. Nilai  $K_D$  dengan pemasangan *teratur*

Percobaan	PentaCone		PentaOcta	
	H (cm)	$K_D$	H (cm)	$K_D$
1	13.96	41.64	14.10	35.71
2	13.33	36.23	13.53	40.39
3	13.76	39.84	11.58	22.37
Rata-rata		<b>39.24</b>		<b>32.82</b>

Hasil diatas menunjukkan suatu temuan yang tidak terduga. Untuk semua skenario Armor beton PentaCone menunjukkan koefisien stabilitas yang lebih tinggi daripada PentaOcta.

Sebagai pembandingan harga  $K_d$  tetrapod yang diperoleh beberapa peneliti berbeda-beda yaitu  $K_d=10$  s/d 25 (Kinog et al., 2018),  $K_d = 12.57$  (Wardhani, et.al., 2021),  $K_d = 7.8$  (Setyandito et al., 2014), perbedaan tersebut adalah karena perbedaan kriteria kerusakan. Jika dibandingkan dengan Pentacone  $K_d=31.51-39.4$ , PentaOcta=14.12-32.90, harga  $K_d$  PentaPod lebih besar dari TetraPod.

### Pengujian Dengan Flume Gelombang NUMERIK

*Numerical Wave Flume* (NWF) adalah program komputer yang mensimulasikan perilaku gelombang air pada Flume Gelombang Fisik. Dalam penelitian ini, Flow-3D digunakan sebagai perangkat lunak NWF karena mampu melakukan simulasi aliran permukaan bebas dengan baik. Beberapa keuntungan flume gelombang numerik dibanding Flume gelombang fisik adalah

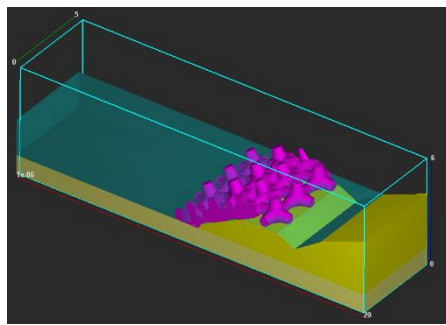
- 1) Dapat mensimulasikan kondisi gelombang dan faktor lingkungan yang lebih luas daripada flume fisik, seperti peristiwa gelombang ekstrim dan geometri pantai yang kompleks.
- 2) Memungkinkan peneliti untuk secara langsung mengukur jumlah yang sulit atau tidak mungkin diukur dalam flume fisik, seperti medan gelombang dan arus yang terperinci, turbulensi, dan transportasi sedimen.
- 3) Dapat memberikan wawasan yang berharga ke dalam mekanisme yang mendorong proses pantai dan membantu menginformasikan rancangan bangunan pantai untuk pengendalian erosi dan perlindungan banjir.
- 4) Selain itu, simulasi numerik dapat dijalankan lebih cepat dan dengan biaya lebih rendah daripada eksperimen fisik, memungkinkan penyelidikan yang lebih luas dan terperinci.

Pengujian Dengan Flume Gelombang Numerik akan dilakukan dengan dua kasus berikut yaitu pengujian Breakwater Timbul (Emerged breakwater) dan Breakwater Tenggelam (Submnerged Breakwater)

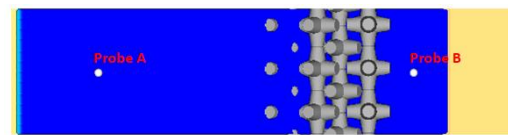
- 1) **Breakwater Timbul:** Pada **Gambar 10**, ditunjukkan breakwater timbul (emerged breakwater) di tepi pantai yang dilindungi oleh armor beton PentaCone berukuran volume 1.0 m<sup>3</sup> dengan berat armor 2.7 ton. break water timbul dimodelkan berdasarkan geometri aslinya yang disusun secara teratur dalam dua lapis (lihat **Gambar 10.a**). Simulasi dilakukan dengan kondisi awal elevasi muka air +0 m, menggunakan gelombang Stokes dan Cnoidal, tinggi



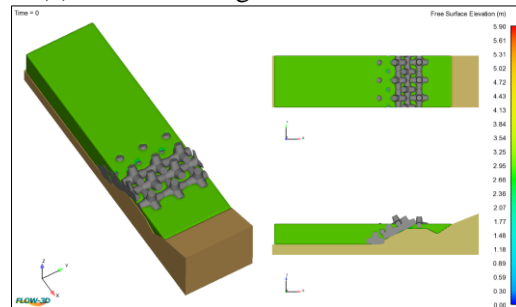
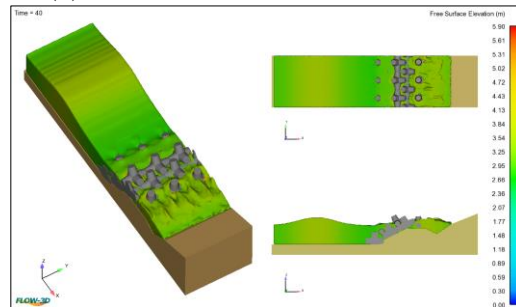
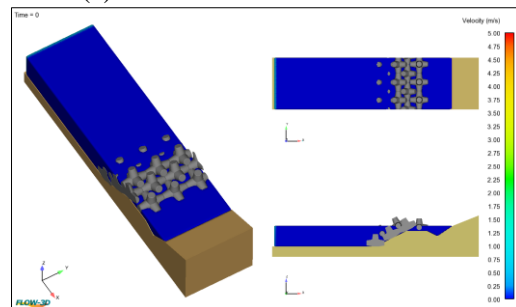
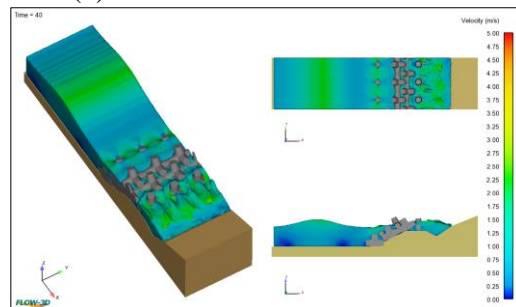
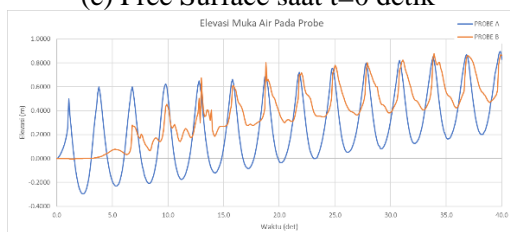
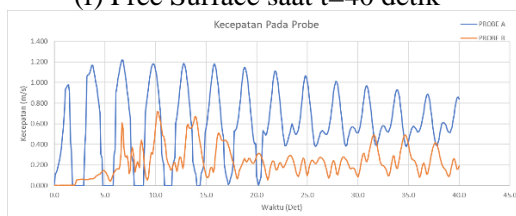
gelombang datang 1.0 m, serta muka air rata-rata 0 m. Geometri konfigurasi breakwater diimpor ke FLOW-3D untuk mengevaluasi interaksi hidrodinamika dalam studi propagasi gelombang. Posisi probe A dan B ditunjukkan pada **Gambar 10.b**. Selanjutnya pada **Gambar 10.c** dan **Gambar 10.d** menunjukkan elevasi permukaan dan kecepatan pada  $t=0$  dan  $t=40$  detik. Hasil pencatatan elevasi permukaan dan kecepatan pada Probe A dan B terlihat pada **Gambar 10.e** dan **Gambar 10.f**.



(a) Breakwater dgn armor PentaCone

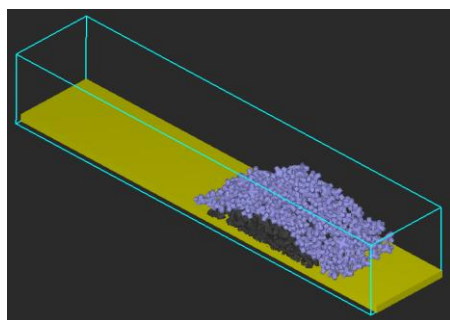


(b) Posisi Probe Sekitar Breakwater

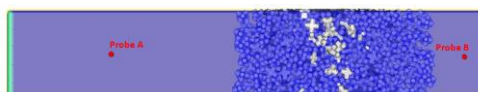
(c) Free Surface saat  $t=0$  detik(d) Free Surface saat  $t=40$  detik(e) Free Surface saat  $t=0$  detik(f) Free Surface saat  $t=40$  detik(g) Free Surface saat  $t=0$  detik(h) Free Surface saat  $t=40$  detik

**Gambar 10.** Simulasi *breakwater* timbul dengan armor beton PentaCone.

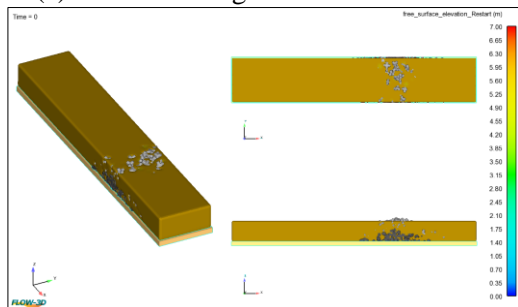
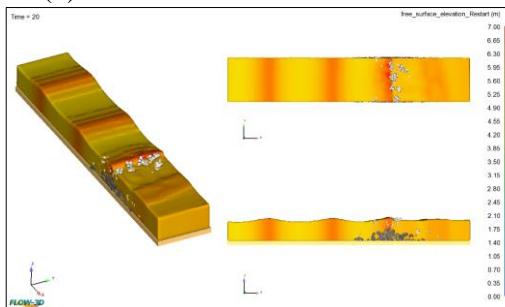
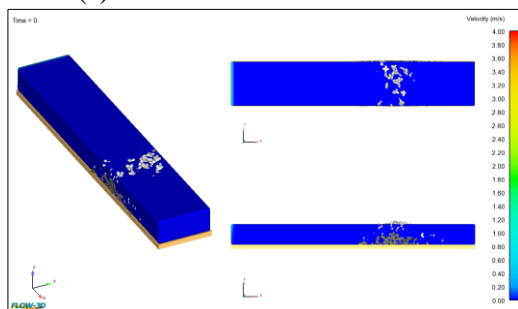
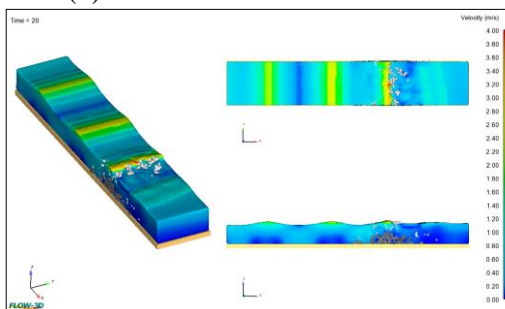
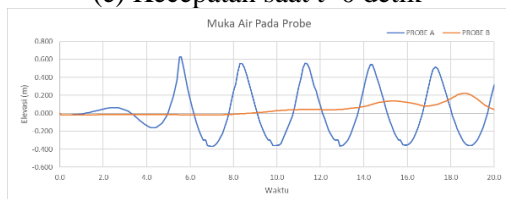
- 2) **Breakwater Tenggelam** : Pada **Gambar 11** ditunjukkan breakwater tenggelam, (reef breakwater) yang terbuat dari armor beton PentaCone berukuran volume 1.0 m<sup>3</sup> dengan berat 2.7 ton, disusun secara teratur dalam dua lapis (Lihat **Gambar 10.a**). Simulasi dilakukan tinggi gelombang datang 1.0 m, serta muka air rata-rata 0 m. Posisi probe A dan B ditunjukkan pada **Gambar 11.b**. Selanjutnya pada **Gambar 11.c** dan **Gambar 11.d** menunjukkan elevasi permukaan dan pada **Gambar 11.e** dan **Gambar 11.f** ditunjukkan kecepatan pada  $t=0$  dan  $t=40$  detik. Hasil pencatatan elevasi permukaan dan kecepatan pada Probe A dan B terlihat pada **Gambar 11.g** dan **Gambar 11.h**.



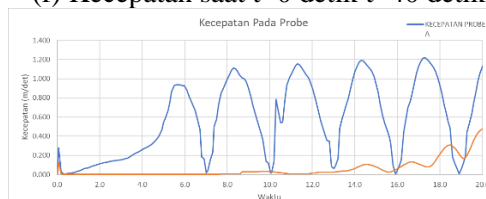
(a) Breakwater dgn armor PentaCone



(b) Posisi Probe Sekitar Breakwater

(c) Free Surface saat  $t=0$  detik(d) Free Surface saat  $t=40$  detik(e) Kecepatan saat  $t=0$  detik(f) Kecepatan saat  $t=0$  detik  $t=40$  detik

(g) Muka Air Pada Probe A dan B

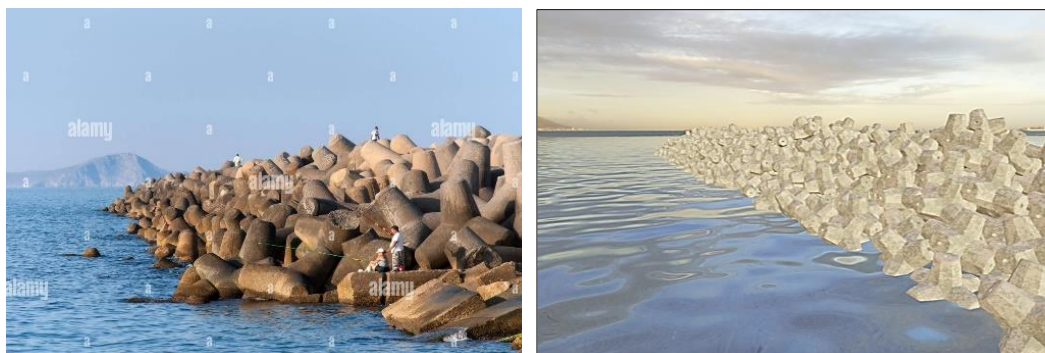


(h) Kecepatan Pada Probe A dan B

**Gambar 11.** Simulasi *breakwater* tenggelam dengan armor beton PentaCone.

### Perbandingan Cara Pemasangan Tetrapod dan Pentapod

Untuk memberikan gambaran lebih jelas tentang bagaimana pemasangan armor beton PentaPod dilakukan di pantai, dalam bagian ini kami akan menyajikan perbandingan antara pemasangan PentaPod dengan pelindung beton yang umum digunakan, yaitu Tetrapod. Perbandingan ini akan dimulai dengan menggambarkan pola Pemasangan Tetrapod dan Pentapod secara acak (lihat **Gambar 12**). Selanjutnya Pemasangan rapat satu lapis Tetrapod dan Pentapod (lihat **Gambar 13**), Pemasangan satu lapis Tetrapod dan Pentapod yang longgar (lihat **Gambar 14**), Pemasangan dua lapis Tetrapod dan Pentapod (lihat **Gambar 15**), dan terakhir, Pemasangan Lebih dari dua lapis Tetrapod dan Pentapod (lihat **Gambar 16**).



**Gambar 12:** Pemasangan Tetrapod dan Pentapod secara acak



**Gambar 13:** Pemasangan rapat satu lapis Tetrapod dan Pentapod



**Gambar 14:** Pemasangan satu lapis Tetrapod dan Pentapod yang longgar





**Gambar 15:** Pemasangan dua lapis Tetrapod dan Pentapod



**Gambar 16:** Pemasangan Lebih dari dua lapis Tetrapod dan Pentapod

Pada **Gambar 16**, terlihat jelas bahwa jumlah lapisan Tetrapod semakin berkurang seiring dengan bertambahnya ketinggian. Di sisi lain, PentaPod mempertahankan dimensi bawah dan atas yang seragam dan saling mengunci. Saling mengunci vertikal dapat ditambatkan dengan aman ke pelat dasar beton. Dalam skenario di mana PentaPod ditumpuk dalam beberapa lapisan, segmen yang lebih rendah menyatu untuk membentuk permukaan imajiner yang rata. Permukaan ini memungkinkan penempatan pelat, sehingga memungkinkan lapisan PentaPod diposisikan di antara pelat bawah dan atas, yang berfungsi sebagai titik penahan. Dengan memasukkan pelat beton yang rata pada permukaan atas, lapisan beton ini juga dapat berfungsi sebagai ruang kerja yang fungsional. Selain itu, alat berat seperti backhoe dan truk yang mengangkut unit PentaPod dapat menggunakan jalur beton ini, sehingga merampingkan kegiatan di daerah pantai yang dangkal dan menghilangkan kebutuhan akan solusi transportasi sementara seperti jalan raya atau tongkang.

### Kesimpulan

- 1) Armor Beton PentaPod dapat disusun secara acak dan teratur dan dipasang tanpa terikat satu sama lain. Namun PentaPod juga dapat dipasang secara teratur dalam satu atau beberapa lapisan, di mana seluruh unit armor saling terikat secara horizontal dan vertikal sehingga stabilitas keseluruhan bangunan pantai ditentukan oleh stabilitas gabungan unit-unit armor yang terikat.
- 2) Metode penelitian ini melibatkan penentuan Indeks Stabilitas ( $K_d$ ) untuk dua varian armor beton PentaPod, yaitu PentaCone dan PentaOcta, yang diuji di Wave Flume. Studi ini menunjukkan nilai koefisien stabilitas untuk kedua varian armor Beton PentaPod ternyata cukup tinggi. Armor PentaPod yang

disusun secara teratur dan saling terikat dipastikan akan memiliki koefisien stabilitas yang sangat tinggi.

- 3) PentaCone menunjukkan koefisien stabilitas yang lebih tinggi daripada PentaOcta di semua skenario, yang merupakan temuan yang tidak terduga. Stabilitas yang meningkat ini dapat dikaitkan dengan penampang melingkar dari PentaCone, yang mengalami gaya hambat yang lebih rendah dari gelombang dibandingkan dengan penampang heksagonal dari PentaOcta.
- 4) Kebaruan penelitian ini terletak pada pemasangan armor beton yang 1) dapat dipasang secara acak dan teratur, 2) pemasangan secara teratur tidak terikat mengurangi biaya karena dapat mengurangi jumlah unit armor, dan 4) pemasangan secara teratur terikat mengurangi biaya karena ukuran armor mengecil namun stabilitas armor beton meningkat karena saling terikat serta 5) adanya tali pengikat memudahkan pemasangan armor di permukaan dan terutama dalam air.
- 5) Dalam makalah ini, digunakan software FLOW-3D sebagai numerical wave flume. Walaupun belum ada hasil yang bisa dibandingkan dengan wave flume fisik, namun langkah ini merupakan hal penting untuk mendapatkan hasil pengujian yang saling melengkapi.

### **Saran**

- 1) Berbagai perbedaan harga Kd armor beton (misalnya Tetrapod) diperoleh oleh berbagai peneliti yang berbeda karena perbedaan kriteria kerusakan. Agar perbandingan harga Kd untuk armor beton tertentu (misalnya Tetrapod) tidak membingungkan, maka pengujian PentaPod harus dilakukan bersamaan dengan armor pembanding seperti Tetrapod. Dengan demikian, harga Kd armor yang diuji dan armor pembanding diperoleh berdasarkan kriteria kerusakan dan rumus perhitungan nilai Kd yang sama.
- 2) Karena Numerical Wave Flume (NWF) mampu menghitung perubahan posisi pusat massa dari semua armor beton yang terkena gelombang, maka kriteria kerusakan pada NWF dapat ditentukan berdasarkan prosentase jumlah armor yang berpindah melebihi jarak tertentu. Penelitian ke arah itu dapat dilakukan untuk melengkapi kriteria kerusakan dalam menentukan nilai Kd pada NWF. Kesimpulan berikut dapat diperoleh dari hasil percobaan dan evaluasi:
- 3) Setelah pengujian model berskala selesai dilakukan, perlu dilanjutkan dengan tahap pembuatan prototype untuk ukuran tertentu. Selanjutnya, prototipe ini akan diuji coba dengan menempatkannya di salah satu lokasi pantai yang mengalami kerusakan akibat gelombang, kemudian dilihat dampaknya.
- 4) Penggunaan PentaPod untuk perlindungan alur dan tebing sungai akan dimulai dengan melakukan pengujian model berskala di laboratorium, kemudian diikuti dengan pembuatan prototype yang ditempatkan di lokasi sungai atau bangunan di sungai yang memerlukan perlindungan terhadap daya rusak arus sungai.



### Ucapan Terima Kasih

Para penulis makalah berterima kasih kepada staf Laboratorium Teknik Kelautan, terutama Muhammad Asad, yang membantu mahasiswa MPSDA dalam penelitian tesis mereka, dan kepada staf Laboratorium Teknik Sumber Daya Air, yaitu Soka Wiangga, Anwar Abdurahman, Darmanto Ady Saputra, teknisi Jajang, dan Ade Sarigan, yang membantu dalam pembuatan model PentaCone dan PentaOcta serta konstruksi model pemecah gelombang skala 1/25 yang menjadi landasan pengujian.

### Daftar Referensi

- Coastal Engineering Research Center, 1984. *Shore Protection Manual*. US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
- Hidayatulloh, S., 2023. Penentuan Nilai KD untuk Armor Unit Tipe PentaOcta (PentaPod Tipe Octagon) Melalui Pengujian Model Fisik pada Wave Flume. [Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air]. Institut Teknologi Bandung.
- Hudson, R. Y., 1959. *Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters*. ASCE. Transaction Paper 3213. <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000142>
- Ishakputra, J., 2023. Penentuan Nilai KD Untuk Armor Unit Tipe Pentacone (PentaPod Tipe Conus Terpotong) Melalui Pengujian Model Fisik Pada Wave Flume. [Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air]. Institut Teknologi Bandung.
- Kinog, K., Tuah, H., Wurjanto, A., & Idris, K., 2018. Stabilitas Armor pada Breakwater Tenggelam. *Jurnal Teknik Sipil*, 5(2), 25-32. <https://doi.org/10.5614/jts.2005.12.1.1>
- Natakusumah, D. K., Achiari, H., Nugroho, E. O., Hidayatulloh, S., Angelo, J., & Adinata, F., 2023. Pengembangan PentaPod: Armor Beton Jenis Baru untuk Pelindung Bangunan Pantai. dalam Pertemuan Ilmiah Tahunan ke-40 HATHI. Bandar Lampung.
- Setyandito, O., Yuwono, N., Triatmodjo, B., Bakti, T. E., & Kesuma, L. M., 2014. Stability of Armour Layer under Wave Attack, 2-D Physical Model and Case Study in South Java Coastline, Indonesia. *World Applied Sciences Journal*, 32(3), 415-421. <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2014.32.03.977>
- Smith, P.E., 2016. Design and specification of marine concrete structures. Dalam *Marine Concrete Structures*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100081-6.00003-9>
- Triatmodjo, B., 1999. *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset,
- Wardhani, S. R., Rochaddi, B., & Purwanto, 2021. Studi Model Fisik Stabilitas Desain Breakwater terhadap Hempasan Gelombang di Pantai Glagah Yogyakarta. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 13(1), 9-16. <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/joce/article/view/4518>