

Model Gelombang di Sekitar Hexagonal Artificial Reef sebagai Submerged Breakwater Menggunakan Dualphysics

Haryo Dwito Armono^{1*}, Adelbert Manurung¹, Sujantoko¹

¹Prodi Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Kampus ITS Keputih Sukolilo 60111 Kota Surabaya

*armono@oe.its.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i1.13484>

ABSTRACT

The functions and uses of artificial reef have evolved from a method of coral reefs restoration to a coastal protection system. Artificial reef can reduce the hydraulic load on the coast to the level required to maintain shoreline balance. Various materials and shape of artificial reefs have been introduced. This paper discussed the wave transmission over hexagonal-shaped artificial reef with 6 holes on each side. The study was conducted using the Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) method integrated in DualSPHysics software to see the effect of gaps between structures with a predetermined configuration to the value of the transmission coefficient (K_t). It was found that the configuration with no gap was able to absorb waves better than the configuration with a gap of 0.15 m and 0.112 m based on the K_t value obtained. In terms of hydrodynamics, it was found that: (1) The increment of the wave steepness, the smaller the K_t value obtained, (2) The larger the wave height, the smaller the K_t value at 0.1 m freeboard depth, while on the freeboard with a depth of 0.2 m and 0.3 m, it was found that the greater the wave height, the greater the K_t value, (3) the increment of the wave period, the K_t were higher, and also (4) the higher the freeboard, the higher the K_t .

Key words : artificial reef, numerical wave tank, smoothed particle hydrodynamic, wave transmission

PENDAHULUAN

Pantai adalah daerah di tepi perairan yang dipengaruhi oleh air pasang tertinggi dan air surut terendah. Menurut (Triatmodjo, 2011), garis pantai adalah batas antara daratan dan air laut, dimana posisinya tidak tetap dan dapat berpindah sesuai dengan pasang surut air laut dan erosi pantai yang terjadi. Wilayah pantai merupakan salah satu daerah yang sering dimanfaatkan untuk kegiatan manusia, seperti kawasan pusat pemerintahan, pemukiman, industry, pelabuhan, pertambakan, perikanan, pariwisata, dan sebagainya. Adanya berbagai kegiatan tersebut dapat menimbulkan peningkatan masalah masalah baru pada lingkungan pantai. Namun selain karena kegiatan manusia, salah satu penyebab kerusakan pada lingkungan pantai seringkali terjadi karena fenomena alam seperti gelombang. Pertahanan alami pantai terkadang tidak dapat menahan energi gelombang yang begitu besar sehingga pantai dapat tererosi dan merusak daerah pemukiman dan

prasarana kota yang berupa mundurnya garis pantai.

Untuk menanggulangi kerusakan pantai, hal yang dapat dilakukan adalah dengan membuat bangunan pelindung pantai. Salah satu bangunan pantai yang dapat digunakan untuk melindungi pantai adalah pemecah gelombang (*breakwater*). Pemecah gelombang dapat melindungi pantai terhadap kerusakan dengan cara menghancurkan energi gelombang yang sampai ke pantai sehingga perairan di belakang bangunan menjadi tenang. Bangunan pantai ini dapat dibuat dari tumpukan batu, blok beton, beton massa, turap dan sebagainya. Dimensi pemecah gelombang tergantung pada banyak faktor, diantaranya adalah ukuran dan layout perairan, kedalaman laut, tinggi pasang surut dan gelombang.

Usaha perlindungan pantai yang pengembangannya dititikberatkan untuk wisata pesisir, perencanaan perlindungannya tidak cukup

Cite this as:

Armono, H.D., Manurung, A & Sujantoko (2022). Model Gelombang di Sekitar Hexagonal Artificial Reef sebagai Submerged Breakwater menggunakan Dualphysics. *Rekayasa* 15 (1). 36-45 pp.

doi: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v15i1.13484>

Article History:

Received: January, 25th 2022; **Accepted:** March, 26th 2022
Rekayasa ISSN: 2502-5325 has been Accredited by Ristekdikti (Arjuna) Decree: No. 23/E/KPT/2019 August 8th, 2019 effective until 2023

hanya sekedar bertujuan untuk menjaga kerusakan pantai akan tetapi perlu dipikirkan tentang keaslian, keindahan daerah pantai serta kehidupan biota laut (Surendro *et al.*, 2015). Untuk itu, dilakukan upaya memodifikasi pemecah gelombang konvensional menjadi pemecah gelombang yang dipandang lebih ramah lingkungan. Salah satunya adalah dengan menurunkan elevasi ambang pemecah gelombang sehingga sering disebut Pemecah Gelombang Ambang Rendah (PeGAR) (Sulaiman *et al.*, 2011). Puncak struktur pemecah gelombang ambang rendah muncul ke permukaan saat air rendah atau surut, namun tenggelam saat air laut pasang.

Pemecah gelombang ambang rendah umum dimanfaatkan sebagai struktur pertahanan pantai yang memungkinkan untuk mentransmisi sebagian gelombang. Kedalaman struktur dan bentuk struktur memiliki pengaruh yang besar pada koefisien transmisi dan refleksi yang pada akhirnya menentukan kemampuan struktur pemecah gelombang ambang rendah dalam mengurangi erosi pantai (Sulaiman *et al.*, 2014). Namun, tipe pemecah gelombang ini masih dapat dilalui gelombang overtopping dan hanya mengurangi beberapa persen energi gelombang datang yang mengenai pantai (Wirayuhanto & Armono, 2021).

Terumbu buatan (*artificial reefs*) yang merupakan salah jenis pemecah gelombang ambang rendah yang puncaknya selalu terendam air, meskipun pada kondisi air surut. Jenis pemecah gelombang ini sering disebut pemecah gelombang terbenam (*submerged breakwater*) yang juga merupakan salah satu solusi yang dapat digunakan untuk memenuhi tujuan dalam menjaga keindahan pantai sekaligus melindungi pantai. Terumbu buatan dapat mengurangi beban hidraulik di pantai ke tingkat yang dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan garis pantai (Voorde *et al.*, 2009). Dalam pengaplikasiannya, terumbu buatan yang sekaligus berfungsi sebagai pemecah gelombang terbenam harus mampu meredam gelombang dengan baik.

Terdapat berbagai jenis terumbu buatan yang telah dikembangkan seperti Aqua Reef (Hirose, Watanuki, & Saito, 2002), Turtle Reef, Reef Ball, Ultra Ball, Bay Ball (Harris, 1995; Seaman, 2000), Square Reef (Kotak) (Sudoto, 2008), Bottle Reef (Akhwady, 2012), Star reef (Liua *et al.*, 2013), Seadome (Srisuwan & Rattanamanee, 2015). Berbagai terumbu buatan tersebut lebih difungsikan untuk konservasi

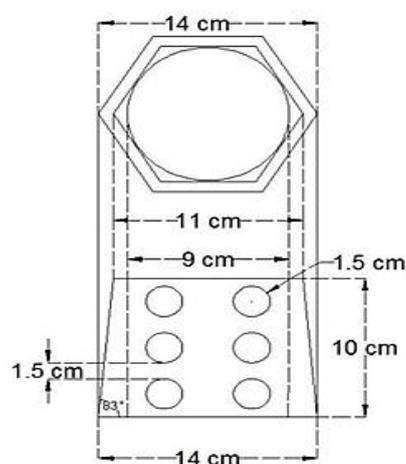
dan peningkatan kualitas habitat perairan. Geometri dan desain terumbu buatan berbeda-beda karena bergantung pada fungsi utama struktur dan bahan yang digunakan, namun terumbu buatan memiliki ciri khas tersendiri, yaitu sisi-sisi berongga yang berfungsi memecah energi gelombang yang mengenai struktur terumbu buatan tersebut.

Dalam artikel ini pengaruh variasi konfigurasi pada kinerja terumbu buatan bentuk heksagonal satu lapis akan di uji dengan model numerik. Kemampuan terumbu buatan bentuk hexagonal dalam mentransmisi gelombang dikaji dengan metode numerik menggunakan metode *Smooth Particle Hydrodynamics* (SPH) (Gingold & Monaghan, 1977) yang tersedia dalam software open source DualSPHysics (Crespo *et al.*, 2015). Metode SPH merupakan skema numerik dengan metode Lagrangian tanpa menggunakan grid yang sudah mulai banyak digunakan dalam Computational Fluid Dynamics (CFD) (Gomez-Gesteira, Rogers, Dalrymple, & Crespo, 2010). Informasi detail mengenai teori dan aplikasi metode ini bisa ditelusuri pada berbagai literatur seperti (Crespo *et al.*, 2015; Huan, Harahap, & Alaloul, 2018; Ren, He, Li, & Dong, 2017; Rogers, Dalrymple, & Stansby, 2009).

METODE PENELITIAN

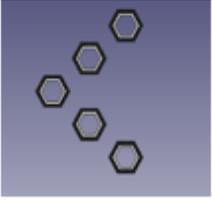
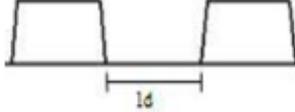
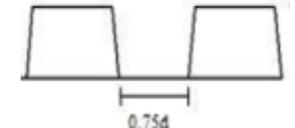
Data Hexagonal Reef

Pada penelitian ini model yang diuji adalah terumbu buatan dengan bentuk hexagonal yang memiliki 6 lubang pada setiap sisinya. Model yang digunakan pada penelitian ini memiliki perbandingan dengan struktur aslinya sebesar 1:10. Dimensi dari model struktur dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Dimensi Hexagonal Reef

Tabel 1. Konfigurasi Pengujian Hexagonal Reef

Konfigurasi	Gap	Sketsa Penempatan Hexagonal Reef	
	<i>m</i>		
1d	0.150		
0.75d	0.112		
0d	0		

Dengan dimensi yang telah ditentukan (Tabel 1), maka *hexagonal reef* disusun di dalam *numerical wave tank* sesuai dengan konfigurasi yang telah ditentukan. Konfigurasi model akan divariasikan dengan jarak (gap) berdasarkan diameter *hexagonal reef* (*d*) yang telah ditentukan untuk kemudian diuji terhadap variasi tinggi gelombang (*H*), periode gelombang (*T*) dan *freeboard*. Berikut merupakan gambar dari penyusunan konfigurasi terumbu buatan bentuk hexagonal.

Data Hidrodinamika

Hal yang diamati dalam penelitian kali ini adalah dampak parameter hidrodinamika terhadap transmisi yang dihasilkan struktur pemecah gelombang. Parameter hidrodinamika dalam hal ini adalah *freeboard* atau tinggi muka air dari puncak struktur, tinggi gelombang dan periode gelombang yang dibangkitkan melalui *numerical flume tank*. Berikut adalah variasi *freeboard*, periode gelombang, dan tinggi gelombang yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Variasi Periode dan Tinggi Gelombang

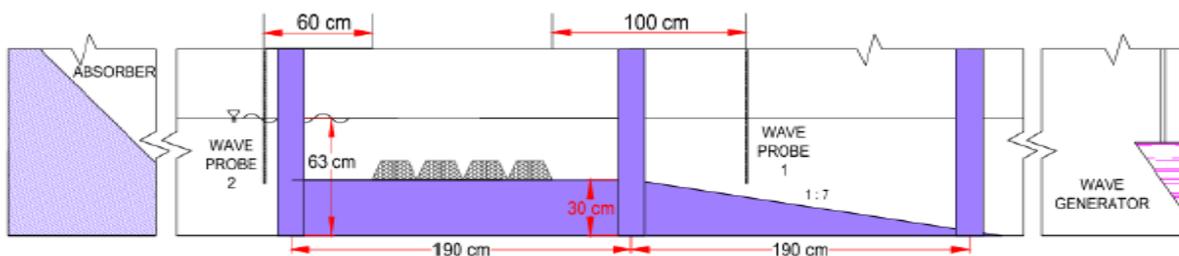
<i>H_i</i>	<i>T_i</i>	<i>Freeboard</i>	<i>Keterangan</i>
<i>m</i>	<i>s</i>	<i>m</i>	
0.1	1;1.5 ; 2	0.1 ; 0.2 ; 0.3	Reguler Wave
0.15	1;1.5 ; 2	0.1 ; 0.2 ; 0.3	
0.2	1;1.5 ; 2	0.1 ; 0.2 ; 0.3	

Kalibrasi Model

Dalam pengujian yang dilakukan, struktur akan dimodelkan di dalam *numerical flume tank*. Untuk itu kalibrasi perlu dilakukan pada *numerical wave tank* sebelum dilanjutkan pada proses pengujian. Kalibrasi pada *numerical wave tank* dilakukan sebagai validasi apakah *numerical wave tank* sudah sesuai dengan kondisi fisik dan layak untuk digunakan pada penelitian yang dilakukan. Proses kalibrasi menggunakan data hasil uji model fisik pada *wave tank* yang digunakan oleh (Winarto, 2017), seperti ditunjukkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Dimensi Wave Tank

<i>Dimensi Flume Tank</i>	
<i>Keterangan</i>	<i>Ukuran</i>
Panjang	14
Tinggi	1.5
Lebar	0.6



Gambar 2. Penempatan Terumbu buatan pada Uji Model Fisik (Winarto, 2017)

Wave probe diletakkan sesuai dengan lokasi yang sudah ditentukan pada pengujian sebelumnya, dimana wave probe 1 diletakkan sejauh 100 cm sebelum struktur dan wave probe 2 diletakkan sejauh 60 cm di belakang struktur. Pada kolam gelombang juga terdapat slope dengan kemiringan 1:7 dengan tinggi struktur 30 cm dan panjang struktur 380 cm sesuai dengan Gambar 2. Elevasi air, tinggi gelombang dan periode gelombang yang ditentukan untuk melakukan kalibrasi masing masing dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Elevasi, Tinggi Gelombang dan Periode Gelombang

Keterangan	Nilai
Elevasi Air	0.63 m
Tinggi Gelombang	0.1 m
Periode Gelombang	1.1 detik

Pada penelitian ini, kalibrasi model dilakukan dengan analisis sensitifitas sebanyak tiga kali menggunakan jarak antar partikel yang berbeda. Jarak antar partikel yang digunakan adalah sebagai berikut :

1. Jarak antar partikel 0.04 m
2. Jarak antar partikel 0.03 m
3. Jarak antar partikel 0.02 m

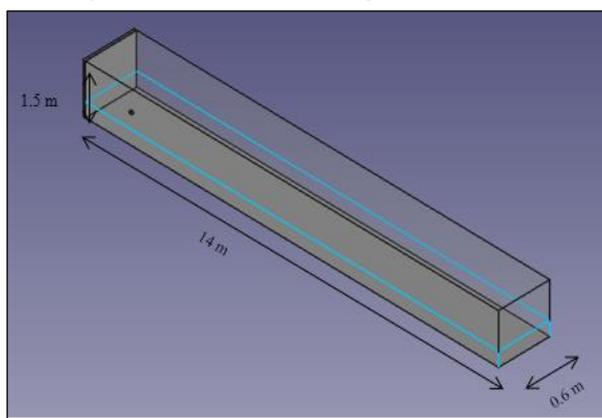
Model Wave Tank

Untuk pengujian diperlukan *numerical wave tank* untuk membangkitkan gelombang. Pembuatan model flume tank didesain menggunakan *open source software* FreeCAD 0.18. Penentuan dimensi *wave tank* dapat dilakukan setelah melewati proses kalibrasi model dan data. Gambar 3 menampilkan *wavetank* yang dibuat dengan menggunakan software FreeCAD 0.18.

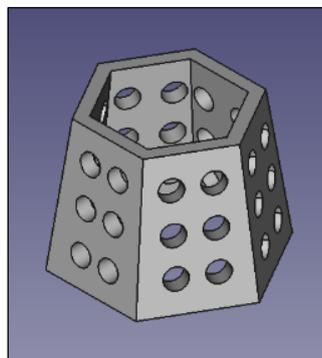
Model Hexagonal Reef

Model *hexagonal reef* yang digunakan dalam pengujian ini juga dibuat menggunakan software FreeCAD. Struktur yang dibuat sesuai dengan data ukuran yang telah ditentukan. Setelah pemodelan

struktur *hexagonal reef* selesai dilakukan, model disimpan dalam bentuk file .stl agar dapat diinput bersama dengan data hidrodinamika. Gambar 4 menunjukkan sketsa dari *hexagonal reef*.



Gambar 3. Model Numerical Wave Tank



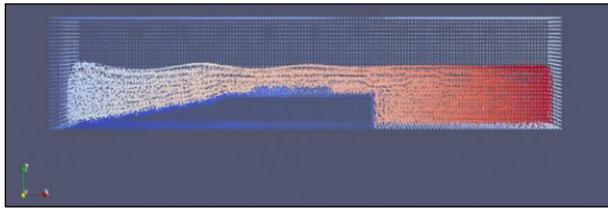
Gambar 4. Model Hexagonal Reef pada FreeCAD

HASIL DAN PEMBAHASAN

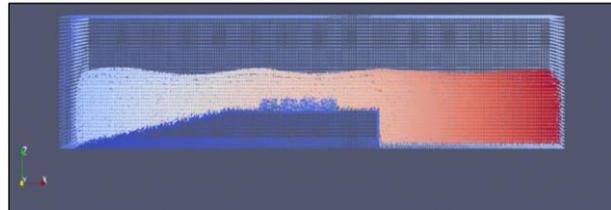
Analisis Hasil Simulasi

Setelah melakukan pacu program dengan 3 variasi jarak antar partikel tersebut, hasil simulasi dapat dilihat dengan menggunakan *software paraview*. Hasil simulasi pada variasi jarak antar partikel yang telah ditentukan sebelumnya ditunjukkan pada Gambar 5 sampai dengan gambar 7. Berdasarkan hasil simulasi dengan 3 jarak antar partikel yang ditunjukkan, terlihat hasil yang cukup berbeda. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin kecil jarak antar partikel maka semakin baik

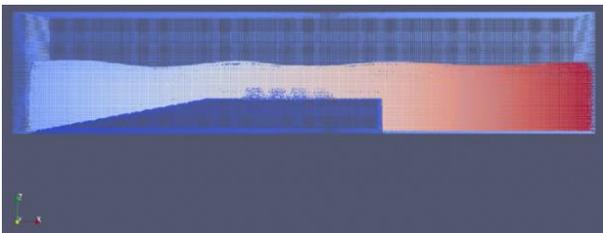
resolusi yang didapatkan. Seperti pada jarak antar partikel sebesar 0.02 m menunjukkan resolusi yang jauh lebih baik dan jelas dibandingkan dengan jarak antar partikel sebesar 0.03 m dan 0.02 m.



Gambar 5. Simulasi jarak antar partikel = 0.04 m

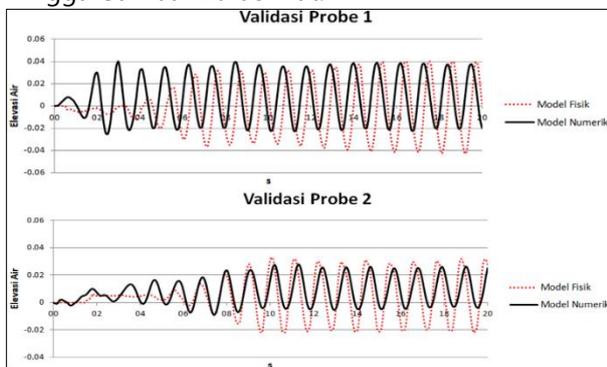


Gambar 6. Simulasi jarak antar partikel 0.03 m

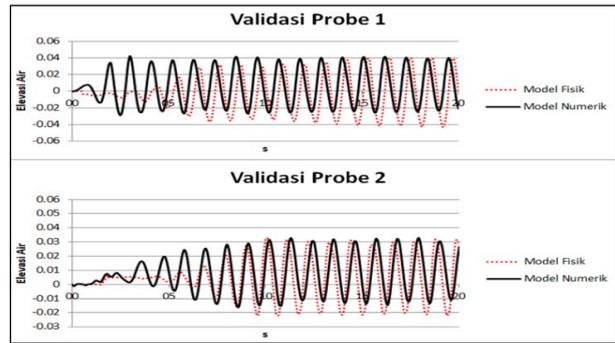


Gambar 7. Simulasi jarak antar partikel 0.02 m

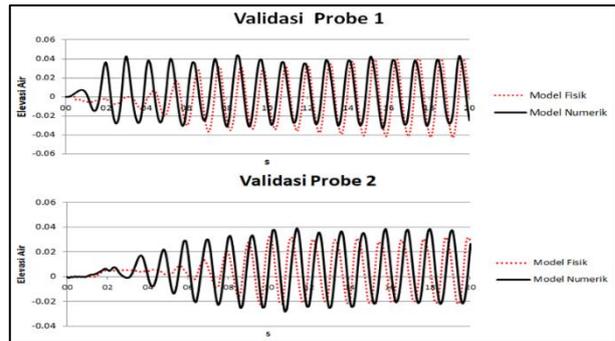
Setelah program selesai dijalankan, dengan menggunakan *measuretool* akan didapatkan pencatatan tinggi gelombang sesuai dengan titik lokasi *waveprobe* yang sudah ditentukan pada rencana perancangan kalibrasi sebelumnya. Hasil pengukuran tinggi gelombang tersebut akan dibandingkan dengan hasil dari perhitungan model fisik yang disajikan dalam bentuk grafik. Hasil kalibrasi yang baik memperlihatkan bahwa elevasi gelombang antara model numerik dan model fisik yang tidak jauh berbeda seperti pada Gambar 8 hingga Gambar 10 berikut.



Gambar 8. Hasil validasi dengan jarak antar partikel = 0.04 m



Gambar 9. Hasil validasi dengan jarak antar partikel = 0.03 m



Gambar 9. Hasil validasi dengan jarak antar partikel = 0.02 m

Selanjutnya untuk melihat seberapa besar error yang terjadi antara model numerik dan model fisik maka digunakan perhitungan menggunakan perhitungan *Root Mean Square Error (RMSE)*. Hasil perhitungan RMSE dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

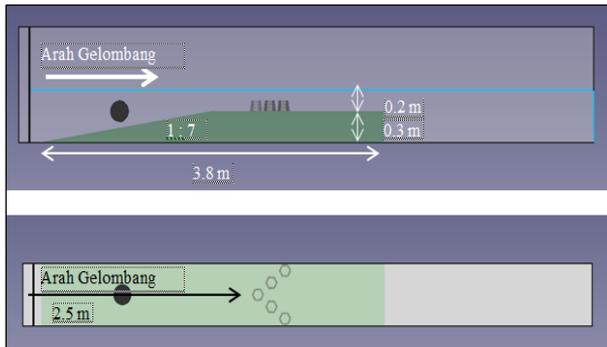
Tabel 5. Perhitungan *Root Mean Square Error (RMSE)*

Partikel 0.04 (30 menit)		Partikel 0.03 (50 menit)		Partikel 0.02 (1.5 jam)	
RMSE		RMSE		RMSE	
Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2	Probe 1	Probe 2
0.1303	0.1252	0.1306	0.1228	0.1310	0.1292

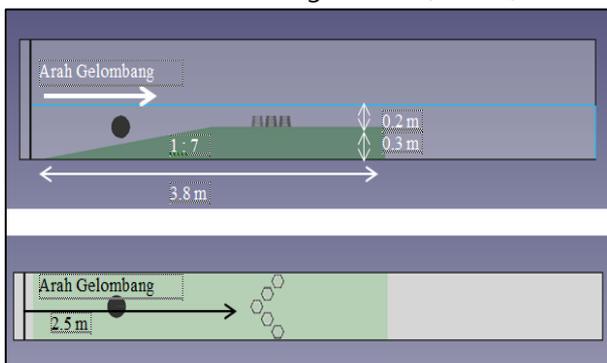
Berdasarkan hasil perhitungan RMSE, didapatkan hasil bahwa perbedaan tinggi gelombang yang dihasilkan dalam model tidak begitu berbeda jauh meskipun ada perbedaan jarak antar partikel. Sehingga pada penelitian ini, akan digunakan model dengan menggunakan jarak antar partikel sebesar 0.04 m. Pemilihan ini dengan mempertimbangkan hasil perhitungan RMSE yang tidak jauh berbeda dengan model yang lainnya dan waktu perjalanan program yang lebih cepat dari yang lainnya.

Konfigurasi Rancangan

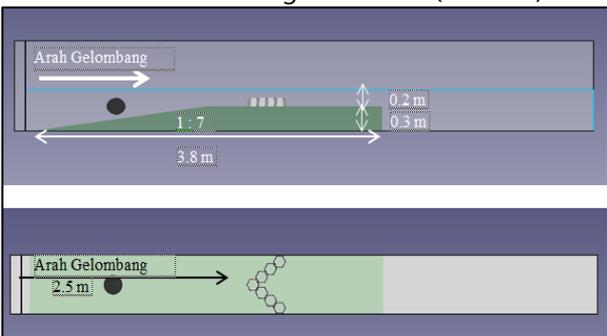
Pada tahap ini, masing masing model 3D dari *numerical wave tank* dan struktur disatukan ke dalam satu bagan kerja di FreeCAD 0.18 Berikut adalah gambar rancangan penelitian yang dilakukan.



Gambar 10. Konfigurasi 1d (0.15 m)



Gambar 11. Konfigurasi 0.75d (0.112 m)



Gambar 12. Konfigurasi 0d (0 m)

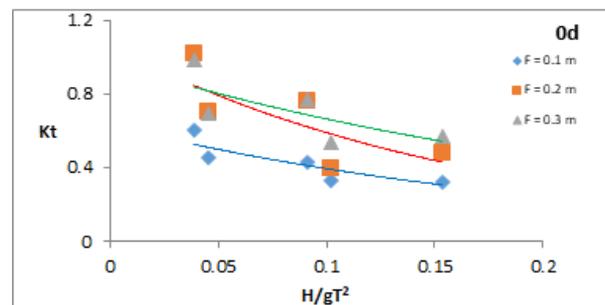
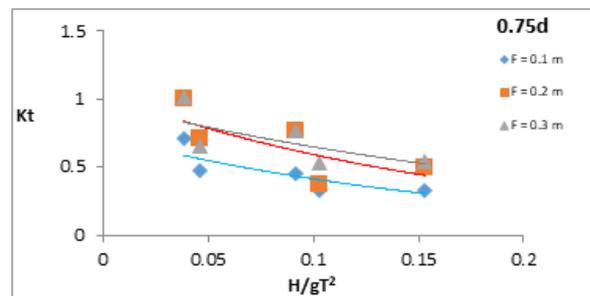
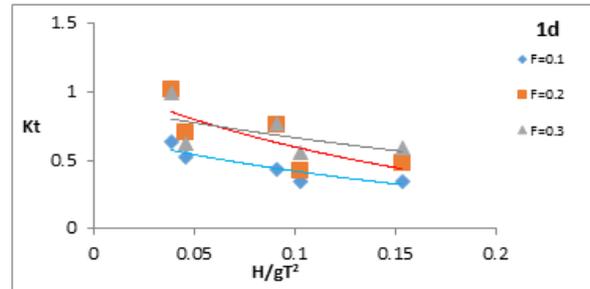
Pengaruh Parameter Hidrodinamika

Parameter hidrodinamika yang digunakan yakni tinggi gelombang, periode gelombang dan *freeboard* dapat berpengaruh pada nilai transmisi gelombang (K_t).

- Hubungan Kemiringan Gelombang Pada Koefisien Transmisi (K_t)

Kemiringan gelombang (*wave steepness*) merupakan variabel non-dimensional yang dipengaruhi oleh nilai gelombang dan periode

gelombang. Kemiringan gelombang yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari 0.038, 0.045, 0.091, 0.102, dan 0.153. Penyusunan grafik untuk hubungan kemiringan gelombang terhadap koefisien transmisi (K_t) dibedakan oleh *freeboard* pada masing masing konfigurasi 1d, 0.75d, dan 0d.



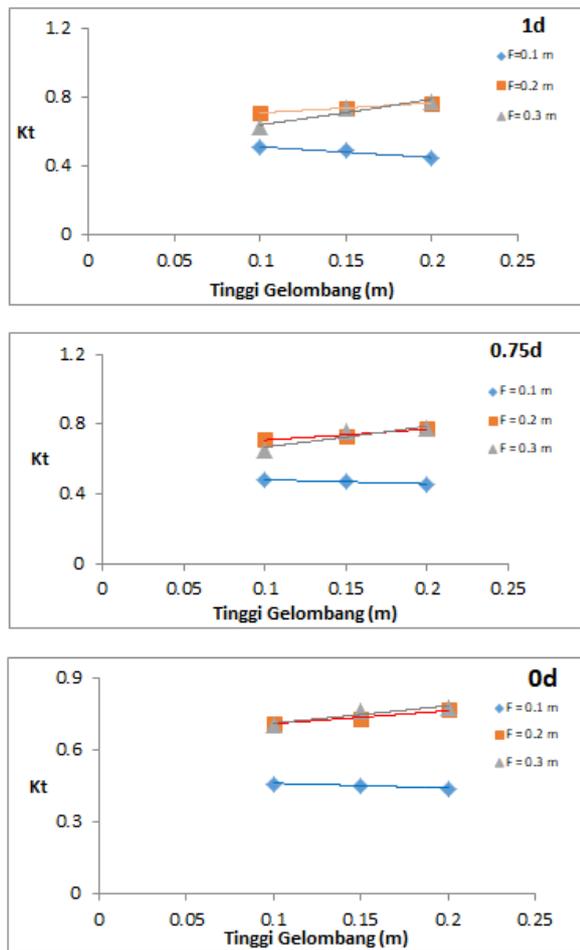
Gambar 13. Hubungan Kemiringan Gelombang terhadap K_t

Grafik diatas menunjukkan perubahan pada koefisien transmisi (K_t) yang dipengaruhi oleh kemiringan gelombang. Grafik menunjukkan bahwa semakin besar nilai kemiringan gelombang, maka nilai koefisien transmisi (K_t) semakin kecil. Periode gelombang dan tinggi gelombang merupakan variabel yang mempengaruhi kemiringan gelombang, sehingga semakin besar periode gelombang maka semakin besar juga nilai koefisien transmisi (K_t). Selain itu, nilai koefisien transmisi (K_t) masing masing juga dibedakan oleh *freeboard* atau tinggi muka air dari puncak struktur. Pada grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi *freeboard* maka nilai koefisien transmisi semakin bertambah. Hal ini dikarenakan *freeboard* yang besar

memberikan ruang yang cukup lebar agar gelombang dapat mengalir diatas struktur tanpa adanya gesekan. Kondisi ini menyebabkan reduksi gelombang menjadi lebih rendah dari pada *freeboard* yang kecil.

- Hubungan Tinggi Gelombang Pada Koefisien Transmisi (K_t)

Untuk melihat pengaruh tinggi gelombang terhadap K_t , tinggi gelombang dibedakan oleh kedalaman *freeboard*, dimana nilai H_i yang digunakan yakni gelombang setinggi 0.1, 0.15, dan 0.2 meter. Pengaruh tinggi gelombang terhadap koefisien transmisi (K_t) diplotkan kedalam grafik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14 berikut ini.



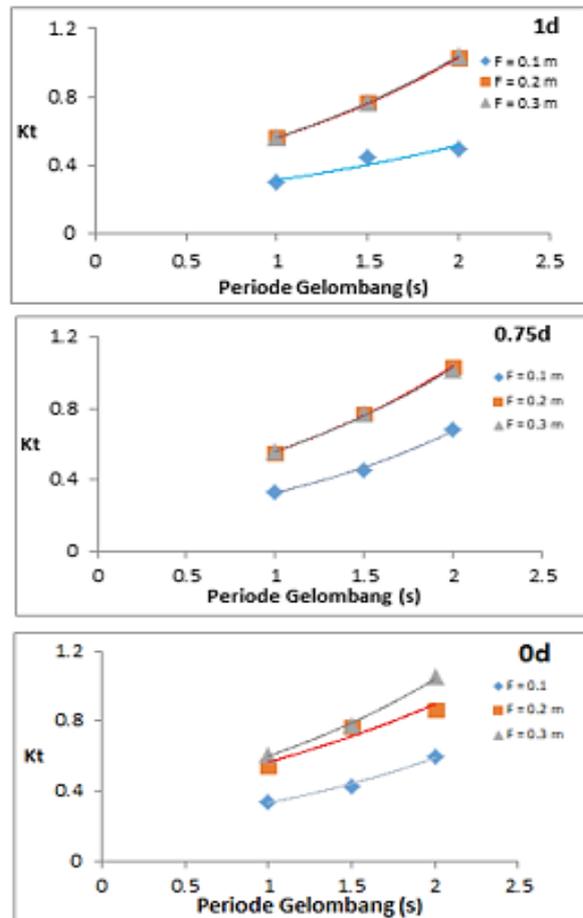
Gambar 14. Hubungan Tinggi Gelombang terhadap K_t

Grafik diatas menunjukkan perubahan pada koefisien transmisi (K_t) yang dipengaruhi oleh tinggi gelombang. Grafik menunjukkan bahwa semakin besar nilai tinggi gelombang, maka nilai koefisien transmisi (K_t) semakin kecil. Hal ini terjadi karena semakin besar tinggi gelombang maka

semakin besar pula kemungkinan gelombang yang pecah pecah ketika mengenai puncak struktur sehingga gelombang yang tereduksi semakin besar pula. Namun hal tersebut hanya terjadi pada *freeboard* dengan tinggi 0.1 m. Sementara itu yang terjadi pada *freeboard* 0.2 m dan 0.3 adalah semakin tinggi gelombang maka nilai koefisien transmisi (K_t) semakin besar.

- Hubungan periode gelombang pada koefisien transmisi (K_t)

Gambar 15 berikut ini memperlihatkan bagaimana pengaruh periode gelombang terhadap koefisien transmisi (K_t). Untuk melihat pengaruh periode gelombang terhadap K_t , periode gelombang dibedakan oleh kedalaman *freeboard*, dimana nilai periode gelombang yang digunakan adalah 1 s, 1.5 s, dan 2 s.



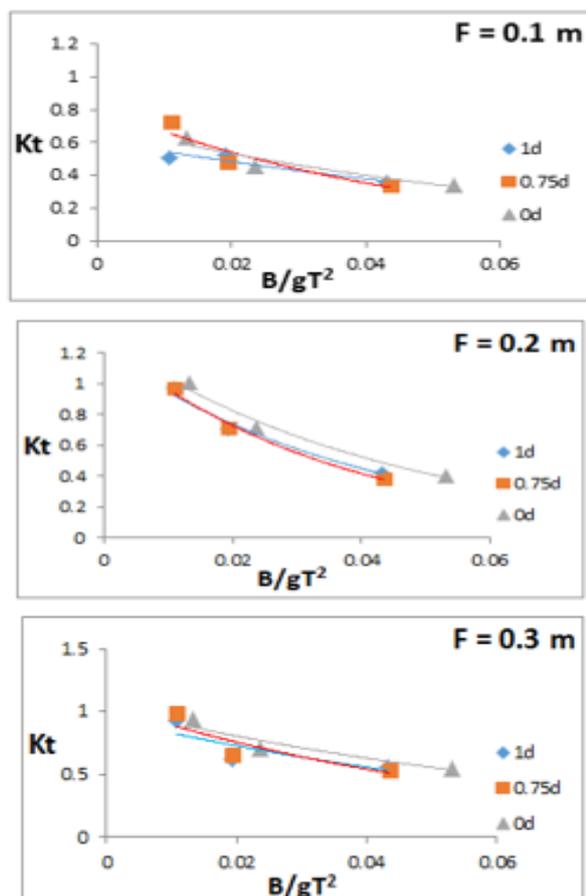
Gambar 15. Hubungan Periode Gelombang Terhadap K_t

Grafik-grafik pada gambar di atas menunjukkan perubahan pada koefisien transmisi (K_t) yang dipengaruhi oleh periode gelombang. Gambar 17 di atas menunjukkan bahwa semakin besar nilai periode gelombang, maka nilai koefisien transmisi

(Kt) semakin besar. Hal ini terjadi karena semakin kecil periode gelombang maka semakin banyak pula kemungkinan gelombang yang terbentuk dan bergesekan dengan struktur sehingga menyebabkan energy gelombang yang tereduksi semakin besar pula. Selain itu, nilai koefisien transmisi (Kt) masing masing juga dibedakan oleh *freeboard*. Hasil pada grafik menunjukkan bahwa semakin tinggi *freeboard* maka nilai koefisien transmisi semakin besar.

Pengaruh Konfigurasi Struktur

Konfigurasi *hexagonal reef* pada penelitian ini dibedakan menjadi 3 berdasarkan gap antara strukturnya dengan masing masing kode yakni 1d, 0.75d, dan 0d. Masing masing konfigurasi memiliki lebar puncak yang berbeda karena dipengaruhi oleh variasi gap. Masing masing konfigurasi akan dibandingkan satu dengan yang lainnya dengan cara di plot dalam satu grafik. Pada grafik dapat dilihat bagaimana efektifitas dari masing masing struktur dalam mereduksi gelombang yang dipengaruhi oleh lebar puncak relatif yang dibedakan oleh kedalaman *freeboard*.



Gambar 16. Hubungan konfigurasi struktur terhadap koefisien transmisi (Kt)

Grafik diatas menunjukkan perubahan pada koefisien transmisi (Kt) yang dipengaruhi lebar puncak relatif. Grafik menunjukkan bahwa semakin lebar puncak struktur, maka nilai koefisien transmisi (Kt) semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa dengan lebar puncak hexagonal reef yang besar maka gelombang yang tereduksi semakin besar.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian ini maka selanjutnya dapat ditarik kesimpulan berdasarkan hasil pengujian sebagai berikut.

1. Pengaruh Hidrodinamika

- Kemiringan gelombang (*wave steepness*) dapat mempengaruhi nilai koefisien transmisi (KT). Semakin besar nilai kemiringan gelombang, maka nilai koefisien transmisi (KT) semakin kecil
- Freeboard memiliki pengaruh dalam perubahan nilai koefisien transmisi (KT). Semakin tinggi *freeboard* maka nilai koefisien transmisi (KT) semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa semakin dalam hexagonal reef terendam maka efisiensi dari *hexagonal reef* dalam meredam gelombang akan semakin kecil.
- Tinggi gelombang dapat mempengaruhi nilai koefisien transmisi (KT). Ketika tinggi gelombang semakin besar maka nilai koefisien transmisi (KT) akan semakin kecil. Namun hal ini hanya terjadi pada *freeboard* setinggi 0.1 m. Pada *freeboard* setinggi 0.2 m dan 0.3 m didapatkan bahwa semakin besar gelombang maka nilai koefisien transmisi (KT) semakin besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada *freeboard* setinggi 0.2 m dan 0.3 m *hexagonal reef* sudah tidak efisien dalam meredam gelombang.
- Periode gelombang dapat mempengaruhi nilai koefisien transmisi (KT). Semakin besar periode gelombang, maka nilai koefisien transmisi (KT) akan semakin besar.

2. Pengaruh Konfigurasi Struktur

- Semakin lebar puncak struktur, maka nilai koefisien transmisi (Kt) semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa dengan lebar puncak *hexagonal reef* yang besar maka luas bidang gesekan antar struktur dan gelombang yang besar sehingga

gelombang yang tereduksi akan semakin besar.

- Konfigurasi yang paling efektif dalam meredam gelombang adalah konfigurasi $0d$ (0 m) disusul dengan $0.75d$ (0.112 m), dan $1d$ (0.15 m) diurutan terakhir. Hal ini menunjukkan bahwa dengan jarak antara struktur yang rapat maka semakin kecil celah untuk gelombang dapat melewati struktur. Semakin lebar jarak antar struktur maka semakin besar celah untuk gelombang dapat melewati struktur.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhwady, R. (2012). Kinerja Terumbu Buatan Silinder berongga (Bottle Reef TM) sebagai Pemecah Gelombang Ambang Terbenam. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Crespo, A. J. C., Domínguez, J. M., Rogers, B. D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., García-Feal, O. (2015). DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). *Computer Physics Communications*, 187, 204–216. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2014.10.004>
- Gingold, R. A., & Monaghan, J. J. (1977). Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 181(3), 375–389. <https://doi.org/10.1093/mnras/181.3.375>
- Gomez-Gesteira, M., Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., & Crespo, A. J. C. (2010). State-of-the-art of classical SPH for free-surface flows. *Journal of Hydraulic Research*, 48(SUPPL. 1), 6–27. <https://doi.org/10.1080/00221686.2010.964124>
- Harris, L. E. (1995). Engineering design of artificial reefs. *Oceans Conference Record (IEEE)*, 1, 1139–1148. <https://doi.org/10.1109/oceans.1995.528585>
- Hirose, N., Watanuki, A., & Saito, M. (2002). New type units for artificial reef development of ecofriendly artificial reefs and the effectiveness thereof. *Proceedings 30th International Navigation Congress, PIANC*.
- Huan, V. N. P., Harahap, I. S. H., & Alaloul, W. S. (2018). Modelling of Tsunami Due to Submarine Landslide by Smoothed Particle Hydrodynamics Method. *MATEC Web of Conferences*, 203, 1–6. <https://doi.org/10.1051/matecconf/20182030101>
- Liua, Y., Zhaoa, Y. P., Dong, G. H., Guan, C. T., Cui, Y., & Xu, T. J. (2013). A study of the flow field characteristics around star-shaped artificial reefs. *Journal of Fluids and Structures*, 39, 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2013.02.018>
- Ren, B., He, M., Li, Y., & Dong, P. (2017). Application of smoothed particle hydrodynamics for modeling the wave-moored floating breakwater interaction. *Applied Ocean Research*, 67, 277–290. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.07.011>
- Rogers, B. D., Dalrymple, R. A., & Stansby, P. K. (2009). Simulation of caisson breakwater movement using 2-D SPH. *Journal of Hydraulic Research*, 48(extra), 135–141. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2010.9641254>
- Seaman, W. (2000). Artificial reef evaluation: With application to natural marine habitats. In *Artificial Reef Evaluation: With Application to Natural Marine Habitats*. [https://doi.org/10.1016/s0165-7836\(03\)00126-7](https://doi.org/10.1016/s0165-7836(03)00126-7)
- Srisuwan, C., & Rattanamanee, P. (2015). Modeling of Seadome as artificial reefs for coastal wave attenuation. *Ocean Engineering*, 103, 198–210. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.04.069>
- Sudoto. (2008). Karakteristik Transmisi Gelombang Yang Melalui Terumbu Buatan Kubus Berongga Sebagai Submerged Breakwater. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sulaiman, D. M., Effendi, S. S., Azhar, R. M., & Suprpto. (2014). Rehabilitasi Pantai Dengan Pagar Bercelah Studi Kasus Sigandu, Batang, Jawa Tengah. (1).
- Sulaiman, D. M., Sudjana, M. E., Abimanyu, A., Junarsa, D., & Azhar, R. M. (2011). Respon garis pantai karena pemecah gelombang ambang rendah di pantai anyer, serang, banten. *HATHI Seminar*, 1–12.
- Surendro, B., Yuwono, N., & Darsono, S. (2015). Transmisi dan Refleksi Gelombang pada Pemecah Gelombang Ambang Rendah Ganda Tumpukan Batu. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 20(2), 179–187. <https://doi.org/10.12777/mkts.20.2.179-187>
- Triatmodjo, B. (2011). *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.

- Voorde, M. Ten, Carmo, J. S. A. Do, & Neves, M. D. G. (2009). Multi-functional artificial reefs for coastal protection. In C. A. Hudspeth & T. E. Reeve (Eds.), *Agricultural Runoff, Coastal Engineering and Flooding* (pp. 153–201). New York: Nova Science Publishers, Inc.
- Winarto, A. (2017). Pengaruh Konfigurasi Terumbu Buatan Bentuk Hexagonal pada Transmisi Gelombang. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wirayuhanto, H., & Armono, H. D. (2021). Pengaruh Konfigurasi Terumbu Buatan Bentuk Heksagonal pada Kemampuan Peredaman Gelombang. *Rekayasa*, 14(1), 106–113. <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v14i1.10042>