



## MODEL FISIK REDAMAN ENERGI GELOMBANG DENGAN BREAKWATER TIANG

### PHYSICAL MODEL OF WAVE ENERGY REDUCTION BY USING PILE BREAKWATER

Juventus W.R. Ginting<sup>1)</sup> Ida Ayu Irawati Diah Ratna Putra<sup>1)</sup> Eduardo Meyrianso  
Simanjuntak<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Balai Litbang Pantai, Puslitbang Sumber Daya Air  
Jl. Gilimanuk – Singaraja KM 122 Gerokgak, Kabupaten Buleleng - Bali  
Email : [juventus.ginting@gmail.com](mailto:juventus.ginting@gmail.com)

Diterima: 20 Maret 2019; Direvisi: 30 Juni 2019; Disetujui: 8 Juli 2019

#### ABSTRACT

*Breakwaters is one of type coastal structure that is mainly used as part for coastal protection purposes. Among the various types of breakwaters, likely rigid and hollow vertical pole types are one of the alternative structures for coastal protection. The utilization of this structure usually in the port area or in marina which protrudes into the sea. The pile breakwater test was carried out at laboratory experimental station for coastal engineering Buleleng Bali, on a scale of 1:10. This trial was carried out using pile materials using PVC pipes with a diameter of 6 cm. Scaling of this model is based on the piles used in the project sea dike stage A-NCICD. In testing this physical model several variations were carried out such as tata letak variation (N), wave height (h), wave period (t), distance between piles (columns) relative to diameter (B/D), and distance between piles (row) relative to diameter (b / D). Based on the test results obtained the optimal stacking configuration to reduce wave energy is a configuration with pole configuration B / D = 1; b / D = 0.5*

**Keywords:** *Pile breakwater., tata letakEnergi reduction, wave energy, physical model*

#### ABSTRAK

*Pemecah gelombang adalah struktur yang banyak digunakan sebagai bagian dari pengaman pantai, yang dapat dibangun agak jauh dari pantai atau terhubung ke pantai. Di antara berbagai jenis pemecah gelombang, tipe tiang vertikal yang kaku dan berlubang merupakan salah satu struktur alternatif sebagai pengaman pantai. Pemanfaatan struktur ini biasanya di daerah pelabuhan atau marina yang agak menjorok ke laut. Pada ujicoba pemecah gelombang tiang ini dilakukan di Balai Litbang Pantai Buleleng, dengan skala 1:10. Ujicoba ini dilakukan dengan menggunakan bahan tiang pancang menggunakan pipa PVC dengan diameter 6 cm. Penentuan skala model ini berdasarkan tiang pancang yang digunakan pada pekerjaan tanggul tahap A-NCICD. Pada uji coba model fisik ini dilakukan beberapa variasi seperti variasi tata letak (N), ketinggian gelombang (h), Periode gelombang (t), jarak antar tiang pancang (kolom) relative terhadap diameter (B/D), dan jarak antar tiang pancang (baris) relative terhadap diameter (b/D). Berdasarkan hasil ujicoba diperoleh konfigurasi susunan optimal untuk meredam energi gelombang adalah konfigurasi dengan konfigurasi tiang B/D=1; b/D=0.5*

**Kata Kunci:** *Pemecah gelombang, tiang, tata letakPeredaman energi, model fisik*

## PENDAHULUAN

Pantai adalah wilayah yang harus dilindungi keindahan alamnya. Pantai juga merupakan bagian dari lingkungan kawasan pesisir yang dinamis dan selalu berubah. Proses perubahan yang terjadi di pantai merupakan akibat kombinasi berbagai gaya yang bekerja di pantai meliputi angin, gelombang (Triatmodjo, 1999). Permasalahan pantai yang sering terjadi adalah abrasi dan erosi. Untuk dapat menanggulangi permasalahan pantai yang diakibatkan oleh gelombang maka dibuatlah struktur perlindungan pantai untuk pemecah gelombang. Pemecah Gelombang didefinisikan sebagai struktur yang berfungsi untuk melindungi pantai, pelabuhan, atau kolam dari gelombang (CERC, 1984). Ada beberapa tipe bangunan untuk melindungi pantai, salah satunya adalah pemecah gelombang (*breakwater*). Pemecah gelombang merupakan bangunan laut yang dibuat untuk melindungi pantai dari gelombang, biasanya dibuat pada jarak tertentu sesuai dengan kondisi garis pantai. Salah satu tipe pemecah gelombang yang dapat meredam energi gelombang adalah pemecah gelombang tiang. Gelombang yang menjangar mengenai suatu bangunan peredam gelombang sebagian energinya akan dipantulkan (refleksi), sebagian diteruskan (transmisi) dan sebagian dihancurkan (dissipasi) melalui pecahnya gelombang, kekentalan fluida, gesekan dasar dan lain-lainnya. Dalam penelitian kali ini dilakukan serangkaian percobaan pemodelan fisik untuk mengetahui nilai Koefisien Transmisi ( $K_t$ ) yang dijadikan acuan untuk melihat seberapa efektif struktur tiang pancang dalam fungsinya untuk mengurangi transmisi gelombang dan memberi rekomendasi struktur tiang pancang yang paling efektif untuk mengurangi transmisi gelombang sesuai variasi struktur tiang pancang yang telah di uji. Tipe tiang pancang yang digunakan untuk penelitian ini menggunakan tiang pancang berbentuk silinder. Dimensi tiang pancang akan diskalakan sesuai dengan diameter tiang yang ada di lapangan, jarak *gap* antar dudukan (modul) tiang pancang dan jarak peletakan antar tiang (baris dan kolom). Uji model fisik dilakukan didalam *flume* gelombang 2D dengan bangkitan gelombang menggunakan tipe gelombang regular. Untuk muka air ditetapkan pada kedalaman 60 cm. Tinggi gelombang rencana 20 cm dan 15 cm dengan periode gelombang 2 s; 2,5 s; 3 s. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan dalam perencanaan perlindungan struktur akibat permasalahan gelombang. Kegiatan pengujian model fisik 2D tiang pancang ini dilaksanakan di Laboratorium Balai Penelitian dan Pengembangan Pantai Buleleng, Provinsi Bali.

Pemecah gelombang adalah struktur yang banyak digunakan sebagai bagian dari pengaman pantai, yang dapat dibangun agak jauh dari pantai atau terhubung ke pantai. Di antara berbagai jenis pemecah gelombang, tipe tiang vertikal yang kaku dan berlubang kadang-kadang lebih disukai untuk memberikan perlindungan dari gelombang yang lebih ekonomis untuk daerah pelabuhan atau marina (Isaacson, Premasiro, & Yang, 1998). Salah satu contohnya adalah pemecah tiang beton di Pass Christian, Mississippi, yang terdiri dari diameter 1,4 m dengan jarak rata-rata 15,2 cm di antara tiang pancang (Huang & Ghidaoui, 2007). Gambar 1 menunjukkan contoh lain, yaitu pemecah gelombang tiang tetap di sebelah Pasir Panjang, Singapura. Selain di Singapura penerapan tiang pancang ini juga dimanfaatkan pada proyek tanggul luar NCICD (gambar 2).



Sumber: Liu, Ghidaoui, Huang, Yuan, & Wang, 2011

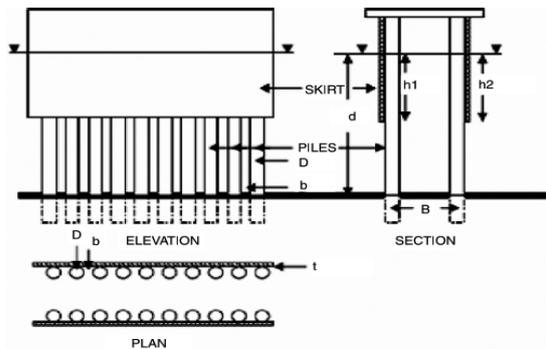
**Gambar 1** Bagian pemecah gelombang tiangdi sebelah Pasir Panjang, Singapura



**Gambar 2** Bagian tanggul luar dengan menggunakan spun pile pada tanggul tahap A NCICD

Pemanfaatan tiang pancang ini juga dimanfaatkan pada fasilitas pelabuhan terutama pada pelabuhan dengan kapal draft besar, kapal kontainer modern dan tanker. Peningkatan lalu lintas laut tersebut juga meningkatkan kebutuhan akan pelabuhan. Pemanfaatan tiang pancang ini dikenal sebagai *A Pile Supported Skirt Breakwater* (PSSB). Pemanfaatan PSSB dapat memenuhi persyaratan pembangunan pelabuhan terutama untuk pelabuhan dengan kapal *deadweight tonnage* (DWT) yang besar karena dapat digunakan pada perairan yang lebih dalam. Oleh karena itu PSSB ramah lingkungan dan ekonomis

untuk lokasi di mana fluktuasi pasang surut besar dan kondisi tanah buruk dibandingkan dengan jenis pemecah gelombang konvensional lainnya. Struktur terdiri tiang pancang yang ditanam dari dasar hingga sampai ke permukaan air dan dipasang kan suatu lapisan pelindung dapat dilihat pada gambar 3 dimana lapisan pelindung itu merupakan suatu pelindung seperti pile cap yang terhubung satu dengan tiang yang lain dapat dilihat pada (Laju, Sundar, & Sundaravadivelu, 2011)



Sumber: Laju et al., 2011

**Gambar 3** Bentuk Struktur sebagai A Pile Supported Skirt Breakwater (PSSB)

Dalam beberapa kasus, penerapan tiang pancang ini diaplikasi sebagai penghalang yang dapat ditembus (*permeable*), seperti penghalang vertikal yang dibuat dari kayu, sudah banyak juga diaplikasikan. Penerapan struktur ini lebih disukai. Karena itu, struktur ini dapat dipilih sebagai upaya untuk mengurangi pantulan gelombang yang tidak diinginkan pada sisi gelombang datang. Dengan demikian, prediksi interaksi gelombang dengan penghalang vertikal yang permeable merupakan penelitian yang banyak menarik (Isaacson et al., 1998). Solusi dari prediksi interaksi antara gelombang dan struktur penghalan ini sudah sudah banyak dilakukan misalnya oleh (Lamb, 1932) yang meneliti bagaimana interaksi gelombang terhadap struktur permeable dengan gelombang panjang dari laut bebas. Selain itu penelitian yang dilakukan oleh (Dalrymple, 1988) yang tidak melakukan perhitungan hilangnya energi dalam interaksi gelombang dengan struktur. Dari hasil penelitian tersebut diperoleh bahwa efek viskositas sangat berpengaruh terhadap transmisi gelombang. Percobaan tentang perbandingan efek viskos dengan transmisi gelombang ini dibandingkan dengan hasil laboratorium dilakukan oleh (Kakuno, 1983).

Tujuan penelitian seharusnya adalah melakukan uji model di laboratorium untuk mengetahui besarnya redaman energi gelombang untuk berbagai variasi susunan tiang pancang dan

tata letak dengan berbagai variasi ketinggian dan periode gelombang

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan informasi mengenai hubungan antara kemampuan redaman struktur tiang pancang terhadap beberapa kondisi gelombang. susunan array yang optimum untuk meredam energi gelombang. Serta nantinya tiang pancang ini dapat dimanfaatkan sebagai salah satu perlindungan pantai yang ramah terhadap lingkungan dan berbiaya relative lebih murah serta dapat dilakukan secara swadaya oleh nelayan atau penduduk di sekitar daerah pesisir di pantai berlumpur untuk mengembalikan kondisi pantai.

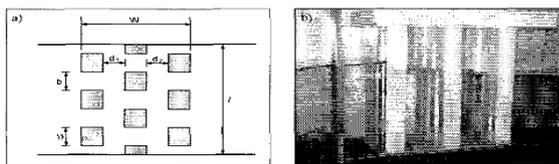
Pemanfaatan struktur tiang pancang berpori telah diperkenalkan tidak hanya untuk mengurangi biaya konstruksi pemecah gelombang dengan memanfaatkan berat jenis gravitasi, tetapi juga untuk meningkatkan sirkulasi dan kualitas air di dalam pelabuhan. Struktur permeabel, seperti pemecah gelombang, akan banyak digunakan untuk pelabuhan perikanan kecil atau marina rekreasi di mana pertukaran air antara di dalam dan di luar pelabuhan harus dipertahankan untuk menjaga air relatif bersih (Suh, Jung, & Pyun, 2007).

Di antara struktur berpori (*permeable*), pemecah gelombang tipe tiang telah dipelajari secara luas sebagai jenis struktur permeabel yang umum. Sebagai contoh, berbagai investigasi laboratorium karakteristik hidrolis pemecah gelombang tiang (Hayashi dan Kano, 1966; Kakuno dan Liu, 1993), serta pemodelan matematika dari karakteristik hidrodinamik dari pemecah gelombang *curtainwall-pile* (Suh et al., 2007), (Ji & Suh, 2010)

Salah satu cara efektif untuk menyebarkan gelombang datang melalui struktur tiang adalah dengan menggunakan beberapa baris susunan kolom tiang. Rao, Rao, dan Sathyanarayana (1999) menyelidiki transmisi gelombang melalui dua baris tiang dan menunjukkan bahwa koefisien transmisi ( $K_t$ ) sangat dipengaruhi oleh penambahan baris kedua. Mereka juga mengungkapkan bahwa  $K_t$  berkurang dengan bertambahnya jarak antara baris. Selain itu,  $K_t$  berkurang hingga jarak antara baris tiang meningkat hingga ketebalan tiang yang digunakan mulai meningkat lagi setelah jarak tersebut lebih besar dari ketebalan tiang. Duclos & Clément, 2004, mempelajari perambatan gelombang melalui tiang vertikal dengan spasi tidak rata dalam tiga susunan, menemukan bahwa transmisi gelombang tidak dipengaruhi melampaui ambang batas tertentu dari tingkat gangguan yang digunakan.

Menggunakan jenis tiang pancang konvensional, tiang pancang independen dapat digunakan untuk meningkatkan ketahanan struktur berpori vertikal terhadap beban berat eksternal. Dilihat dari segi hidraulik. Dari sudut pandang konstruksi, *pile caisson* sebagai metode pemecah gelombang tipe *pile* dapat mengurangi guncangan dan getaran struktur berpori yang ditimbulkan oleh dampak berat eksternal. Ketika fasilitas pengisian bahan bakar seperti tangki minyak yang rentan terhadap serangan eksternal perlu ditempatkan dekat dengan struktur berpori di pelabuhan, khususnya, pemecah ombak tiang dapat digunakan sebagai alternatif yang baik (Yoo, Kim, Kim, & Cho, 2010).

Pemanfaatan karakteristik hidrolis dari struktur pemecah gelombang tiang ini adalah untuk mengurangi gelombang yang dipantulkan di pelabuhan. Penerapan *pile breakwater* dengan menggunakan pile tipe caisson sudah diterapkan pada tahun 2006 di Pelabuhan Mokpo di pantai barat daya Korea. Namun, pelabuhan memiliki masalah gelombang amplitudo besar di sudut-sudut pelabuhan, yang secara konstruktif mengganggu gelombang pantulan karena struktur dermaga berpori dan dinding depan yang tidak dapat ditembus. Sehingga dilakukan penelitian mengenai karakteristik hidrolis dari struktur *caisson pile* dan bagai mana gaya yang berpengaruh pada susunan array caisson pile. Studi ini dapat berkontribusi untuk mengembangkan pengaturan optimalisasi array caisson-pile sehingga dapat mengurangi gelombang yang dipantulkan dan membantu menjaga keadaan pelabuhan menjadi lebih tenang (Yoo et al., 2010). Dalam studi tersebut, percobaan laboratorium untuk menyelidiki transmisi gelombang, refleksi, dan pelemahan oleh struktur *caisson-pile* yang memiliki tiga baris dilakukan, dan disajikan data eksperimen sketsa percobaan dapat dilihat pada gambar 4.



Sumber: Yoo et al., 2010

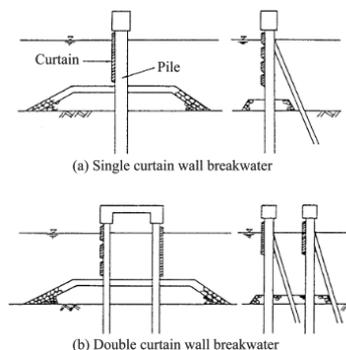
**Gambar 4** Sketsa percobaan independent caisson pile yang dilakukan oleh Yoo

Pemanfaatan tiang pancang ini selain dimanfaatkan secara konvensional dengan langsung memancang struktur tersebut ke dasar laut. Selain itu ada juga pemanfaatan struktur tersebut dengan memasang tabir pelindung atau tirai yang dipasang pada tiang. Pemanfaatan struktur dengan menggunakan

pelindung di depannya dipilih dengan mempertimbangkan refleksi gelombang dan koefisien transmisi. Sebuah pemecah gelombang tiang dengan menggunakan pelindung tirai adalah struktur yang didukung dari beberapa tumpukan tiang pancang dari jenis permeabel dan telah dikembangkan untuk area seperti teluk bagian dalam di mana ketinggian gelombang relatif kecil atau di mana tanah dasar laut lemah dan lunak. Tipe pemecah gelombang ini secara umum diklasifikasikan ke dalam jenis tirai tunggal dan jenis tirai ganda, tergantung pada konfigurasi panel tirai beton, baik dalam satu baris atau dalam baris ganda (lihat gambar 5). Mereka dapat diklasifikasikan lebih lanjut menjadi berbagai jenis tergantung pada jenis tumpukan yang mendukung panel tirai atau bentuk celah di panel tirai. Selain itu, pemecah gelombang tanpa panel gorden, yang biasa digunakan selain menggunakan tipe caisson dengan menggunakan beton, atau dengan beton pracetak ada juga tipe tiang pancang dengan menggunakan tiang baja dan konsep tirai ini juga dapat diterapkan pada jenis tiang pancang tersebut.

**Energi Gelombang**

Gelombang yang bergerak selain menimbulkan pergerakan partikel, juga dapat memberikan energi gelombang. Energi gelombang terdiri dari 2 (dua) jenis, yaitu energi kinetik dan energi potensial gelombang. Energi kinetik terjadi karena adanya kecepatan partikel akibat gerak gelombang. Sedangkan energi potensial terjadi karena adanya perpindahan muka air karena gerakan gelombang. Untuk teori gelombang amplitudo kecil, jika energi gelombang ditetapkan relatif terhadap muka air diam, dan semua gelombang menjalar dalam arah yang sama, maka akan didapat komponen energi potensial dan energi kinetik adalah sama.



Sumber: OCDI, 2009

**Gambar 5** Klasifikasi jenis pemecah gelombang tiang dengan menggunakan tirai

Total energi rata-rata per satuan luas permukaan gelombang adalah jumlah energi

potensial dan kinetik. Menunjukkan  $E$  sebagai total energi rata-rata per satuan luas permukaan

$$\begin{aligned}
 E &= \overline{PE} + \overline{KE} \\
 &= \frac{\rho g H^2}{16} + \frac{1}{16} \rho g H^2 \\
 &= \frac{1}{8} \rho g H^2 \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

Total energi per gelombang per satuan lebar kemudian sederhana

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \dots \dots \dots (2)$$

Hal ini bermanfaat untuk menekankan bahwa baik potensi rata-rata (di atas panjang gelombang) maupun energi kinetik per satuan luas bergantung pada kedalaman air atau panjang gelombang, namun masing-masing hanya sebanding dengan kuadrat tinggi gelombang (Dean & Dalrymple, 1984).

**METODE PENELITIAN**

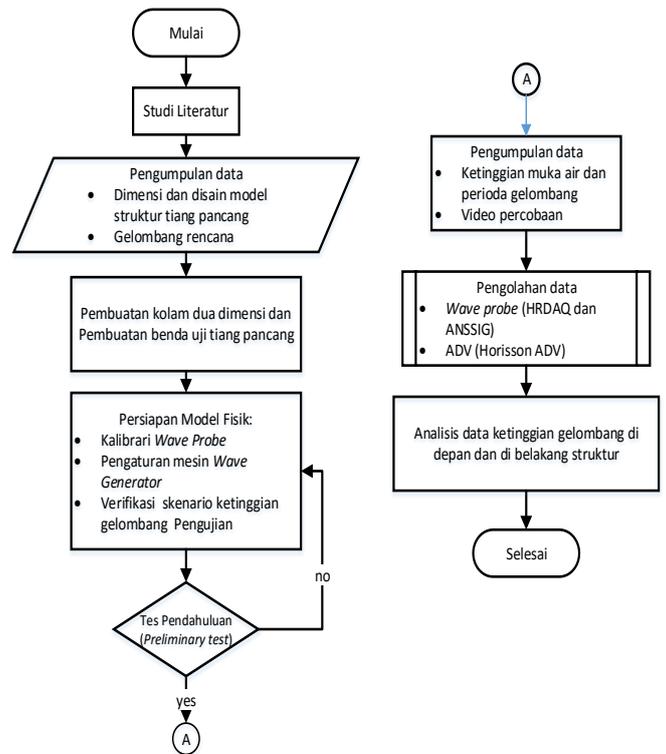
Metode penelitian pada penelitian redaman energi pada tiang dilakukan dengan permodelan fisik. Permodelan fisik yang dilakukan dengan model 2D. pada pelaksanaan model fisik ini memanfaatkan kolam gelombang 3D yang dimiliki oleh Balai Litbang Pantai, dengan cara melakukan penyekatan pada kolam gelombang yang ada. Sehingga hanya menggugkan beberapa segment dari mesin pembangkit gelombang. Pada penelitian ini lebar kolam yang digunakan dengan lebar 3m dan panjang 40 m. Setelah persiapan untuk kolam selesai selanjutnya dilakukan persiapan untuk alat pengukuran gelombang. Pada tahapan ini dilakukan kalibrasi *wave probe*, *set-up wave generator* dan kalibrasi ketinggian gelombang pengujian. Untuk tahapan dapat dilihat pada gambar 6.

Pemodelan fisik dilakukan untuk mengetahui perubahan karekteristik transformasi ketinggian gelombang terhadap berbagai susunan bentuk struktur tiang pancang. Untuk mengetahui perubahan ketinggian gelombang terhadap terhadap tiang disusun beberapa skenario model. Skematisasi model dengan merubah bentuk susunan tiang pancang dalam baris dan kolom terhadap ketinggian muka air. Pengubah yang akan diamati adalah tinggi gelombang datang  $H_i$ , gelombang setelah struktur  $H_t$  terhadap bentuk susunan bentuk tiang pancang. Penyusunan Skenario model dengan memvariasikan susunan bentuk tiang pancang, ketinggian muka air, periode dan ketinggian gelombang.

Metode pengujian di laboratorium ini sama seperti yang diperkenalkan oleh (Owen & Allsop, 1984), pada model fisik pengujian pemecah gelombang diamati juga bagaimana pengaruh

struktur terhadap variasi ketinggian gelombang. Pada penelitian ini dilakukan variasi tinggi gelombang signifikan pada puncak badai dan korespondensinya dengan periode gelombang dibangkitkan pada saluran gelombang pada 60%, 80%, 100%, dan 120%. Periode gelombang diperoleh berdasarkan asumsi kecuraman gelombang yang konstan (Owen & Allsop, 1984; Wolters et al, 2002).

Pada metode pengujian kejadian badai sering disimulasikan sebagai sejumlah pengujian yang berlangsung dengan elevasi muka air tetap (fixed), tinggi gelombang yang meningkat, dan peningkatan periode gelombang dalam langkah-langkah diskret (*discrete steps*) hingga kerusakan terjadi atau tinggi gelombang mencapai 120% dari tinggi gelombang desain (Owen & Allsop, 1984). Durasi dari tiap-tiap step harus berada pada 3 hingga 10 jam prototipe Jensen (1984) dan Owen & Allsop (1984) menyarankan durasi antara 100 hingga 500 gelombang. Metode yang disebut sebagai metode pengujian klasik (*classical testing method*) sehingga pada pengujian model fisik yang dilakukan oleh Balai Litbang pantai mengamati sekitar 100 gelombang yang terjadi pertama.



**Gambar 6** Metode Penelitian Tiang Pancang

**Pelaksanaan penelitian**

Tahapan persiapan

Pada tahap setup model fisik saluran gelombang uji model fisik tiang pancang sudah dibangun dengan lebar 3m selanjutnya akan dilakukan pembuatan lantai kerja dengan ketinggian 15 cm sebagai tempat dudukan base plat tiang pancang yang akan dibangun.



**Gambar 7** Kolam saluran gelombang uji model fisik tiang pancang

Pemodelan fisik biasanya dibuat dalam skala yang lebih kecil dibanding prototipenya (model dengan skala penuh). Skala model dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu ruang laboratorium yang tersedia, kapasitas pompa dan sistem sirkulasi air. Untuk dapat beroperasi sebuah model harus berada pada kapasitas faktor-faktor tersebut, di sini lah pengaturan skala menjadi sangat menentukan apakah sebuah model dapat beroperasi atau tidak. Penskalaan model fisik ini diambil berdasarkan referensi dari kegiatan teknologi modular apung (Balai Pantai, 2017) maka dalam uji model fisik 2D Tiang Pancang ini menggunakan skala 1: 10 dengan menggunakan pipa PVC diameter 6 cm. besaran nilai skala dapat disajikan pada tabel 1.

**Tabel 1** Nilai besaran skala

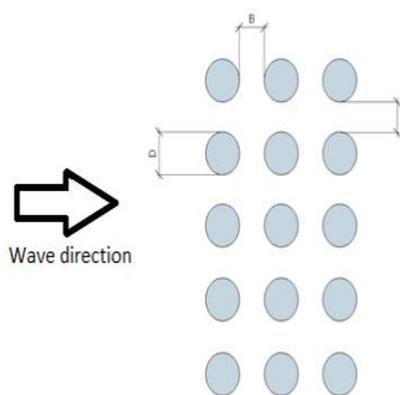
Besaran	Notasi	Skala
Tinggi Gelombang datang	$nH_i$	10
Diameter pipa	$nD$	10
Jarak antar baris	$nB$	10
Jarak antar kolom	$nb$	10
Kedalaman Perairan	$nh$	10
Waktu	$nT = nH^{0,5}$	3.16
Kecepatan	$nU = nH^{0,5}$	3.16

Setelah melakukan studi literatur didapatkan nilai untuk masing-masing dimensi struktur tiang pancang. Bentuk tiang yang digunakan berbentuk silinder yang terbuat dari cetakan pipa yang didalamnya berisi semen. Pencetakan jumlah tiang sebanyak delapan puluh tiang dan membuat enam cetakan modul (penyangga) tiang yang ukurannya sudah ditentukan. Struktur tiang pancang akan divariasikan berdasarkan jarak

antar *gap* penyangga tiang pancang, jarak *gap* antar tiang pancang (baris dan kolom), dan peletakan (*tata letak*) tiang pancang. Variasi dari jarak dan *tata letak* dan dimensi tiang pancang dapat di lihat pada tabel 2.

**Tabel 2** Dimensi Struktur Tiang Pancang

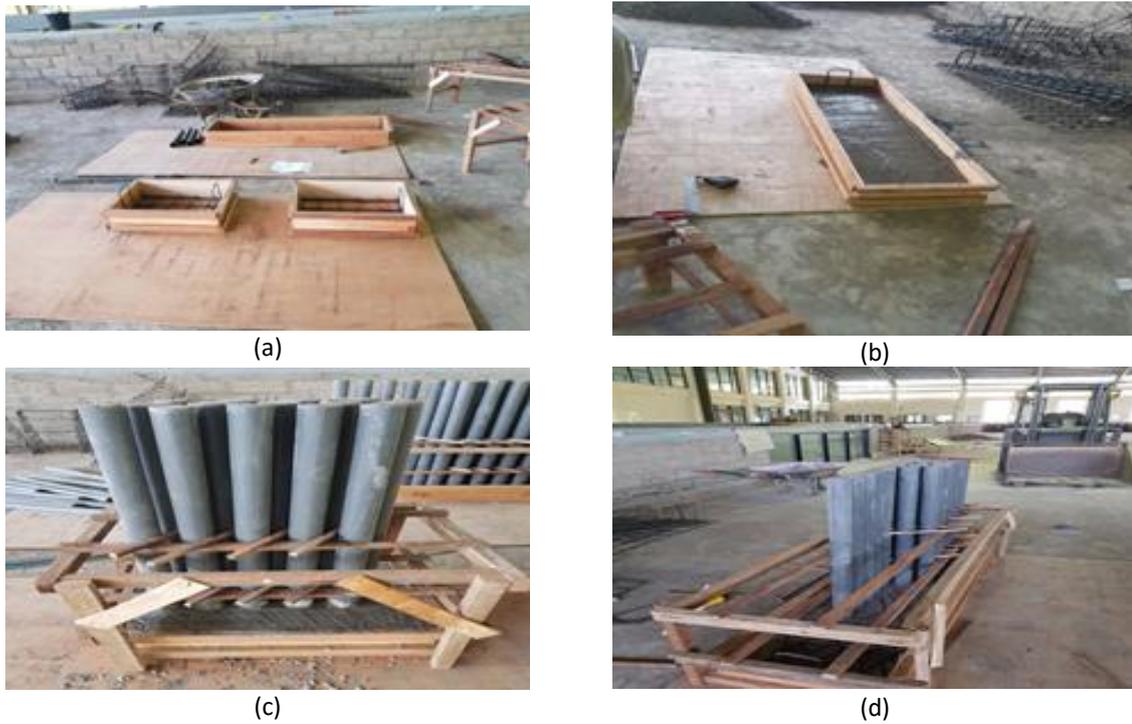
No	Variabel	Simbol	Jumlah Variasi	Variasi
1	Jarak antar tiang pancang (kolom)/Diameter	B/D	3	0.1; 0.5; 1.0
2	Jarak antar tiang pancang (kolom)/Diameter	b/D	2	0.5 ; 1.0
3	Tata letak tiang pancang	N	2	
4	Lebar celah antar grup tiang pancang	G	3	33, 50, 58.1 cm



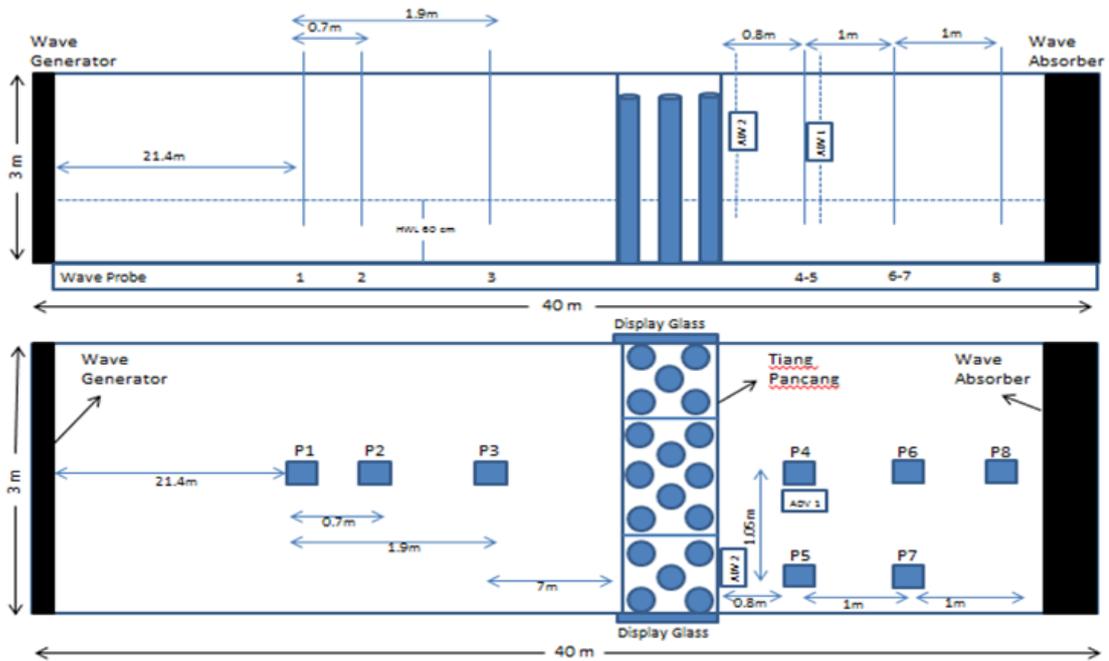
**Gambar 8** Parameter b, B, dan D

Penentuan variable parameter b, B dan D pada model fisik ini dapat dilihat pada Gambar 8. Pada tahapan selanjutnya adalah dilakukan pembangunan struktur tiang pancang berdasarkan nilai parameter pada di atas. Berikut dilakukan tahapan pembangunan struktur tiang pancang, proses pembangunan struktur tiang pancang dapat di lihat pada gambar 9.

Pada proses pengumpulan data model fisik 2D ini akan diamati perubahan ketinggian gelombang sebelum dan sesudah struktur. Dari hasil pengamatan ketinggian gelombang tersebut akan dihitung besaran perubahan energi gelombang selain itu diamati juga interaksi gelombang dengan struktur tiang pancang. Uji pemodelan struktur tiang pancang ini menggunakan tipe gelombang regular. Untuk pembangkitan gelombang menggunakan mesin pembangkit gelombang tipe piston multi-segmen yang dapat membangkitkan gelombang regular maupun acak. Berikut gambar 10 yang menunjukkan peletakan alat ukur dan struktur tiang pancang.



Gambar 9 (a), (b), (c), (d) Pembangunan struktur Tiang Pancang

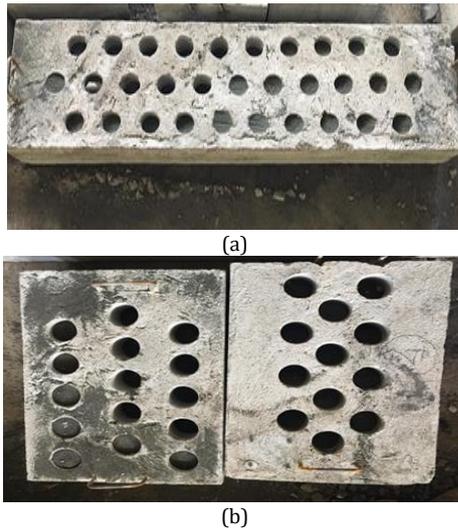


Gambar 10 Konfigurasi Model di Kolam Saluran Gelombang

Peletakan tiang pancang pada kolam saluran gelombang menggunakan penyangga atau yang dalam penelitian ini disebut modul. Modul ini di cetak dengan beton yang dimensinya diambil berdasarkan variasi jarak antar kolom dan jarak antar baris. Jumlah modul yang di cetak sebanyak enam modul. Formasi pemasangan modul dalam kolam saluran

gelombang adalah untuk bagian yang ditunjukkan oleh gambar 10 pada bagian konfigurasi model di kolam saluran gelombang struktur tiang pancang dibagi dalam tinggi modul yang terpisah. Dimana dua modul dengan ukuran kecil dan satu modul berukuran besar. Modul tersebut akan dipasang di daerah yang berdekatan dengan dinding kaca. Modul a (gambar 11.a) dipasang pada bagian

tengah dan diapit oleh modul b (gambar 11.b) yang dipasang di sisi samping.



**Gambar 11** a) Modul tiang yang di letakkan di tengah antara modul yang di tunjukan pada gambar (b). Modul gambar (b) modul sisi samping

Untuk menaruh modul tersebut dalam kolom saluran gelombang menggunakan alat bantu *forklift* atau mobil pengangkat beban. Gambar 12 adalah pengangkatan modul kedalam *wave saluran gelombang*.

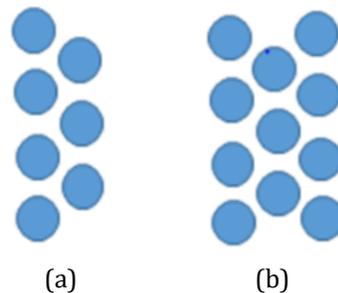


**Gambar 12** Proses pengangkatan modul dengan *forklift*

Pada pengujian ini terdapat dua tata letak formasi struktur pemecah gelombang tiang *tata letak* yang pada penelitian ini disebut "N". Susunan pertama untuk skenario awal menggunakan

variasi N1 (gambar 13.a) yang jika sudah selesai selanjutnya diganti dengan variasi N2 (gambar 13.b). perbedaan antara variasi N1 dan N2 terdapat dalam jumlah kolom tiang pancang yang disusun. Pada variasi N1 terdapat dua kolom tiang pancang sedangkan pada variasi N2 terdapat tiga kolom tiang pancang.

Untuk mendapatkan suatu bangunan tiang pancang yang dapat meredam gelombang secara optimal, maka diperlukan kajian terkait dengan desain struktur tiang. Desain tiang pancang ini ditentukan berdasarkan pertimbangan hasil penentuan skala pengujian ( $nL = 1:10$ ). Terdapat enam modul (penyangga) yang diajukan berdasarkan jarak antar kolom dan jarak antar baris dari masing-masing tiang. Dari hasil variasi yang telah ditetapkan maka model yang akan disimulasikan sebanyak 216 skenario. Berikut merupakan tabel ringkasan skenario uji pemodelan fisik 2D tiang pancang.



**Gambar 13** Variasi tata letak tata letak pemecah gelombang tiang (a) untuk dua baris tiang dan (b) untuk tiga baris tiang pancang

**Tabel 3** Skenario Model Uji Pemecah Gelombang Tiang

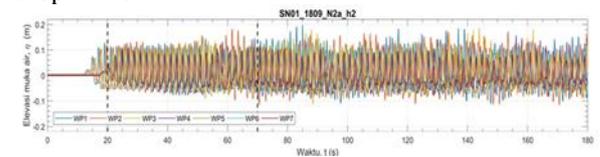
Modul	Tata letak	d (cm)	h (cm)	t (s)	B/D (cm)	b/D (cm)
1	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1
2	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1
3	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1
4	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1
5	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1
6	N1; N2	60	20; 15	2; 2.5; 3	0.1; 0.5; 1	0.5; 1

**Data hasil percobaan**

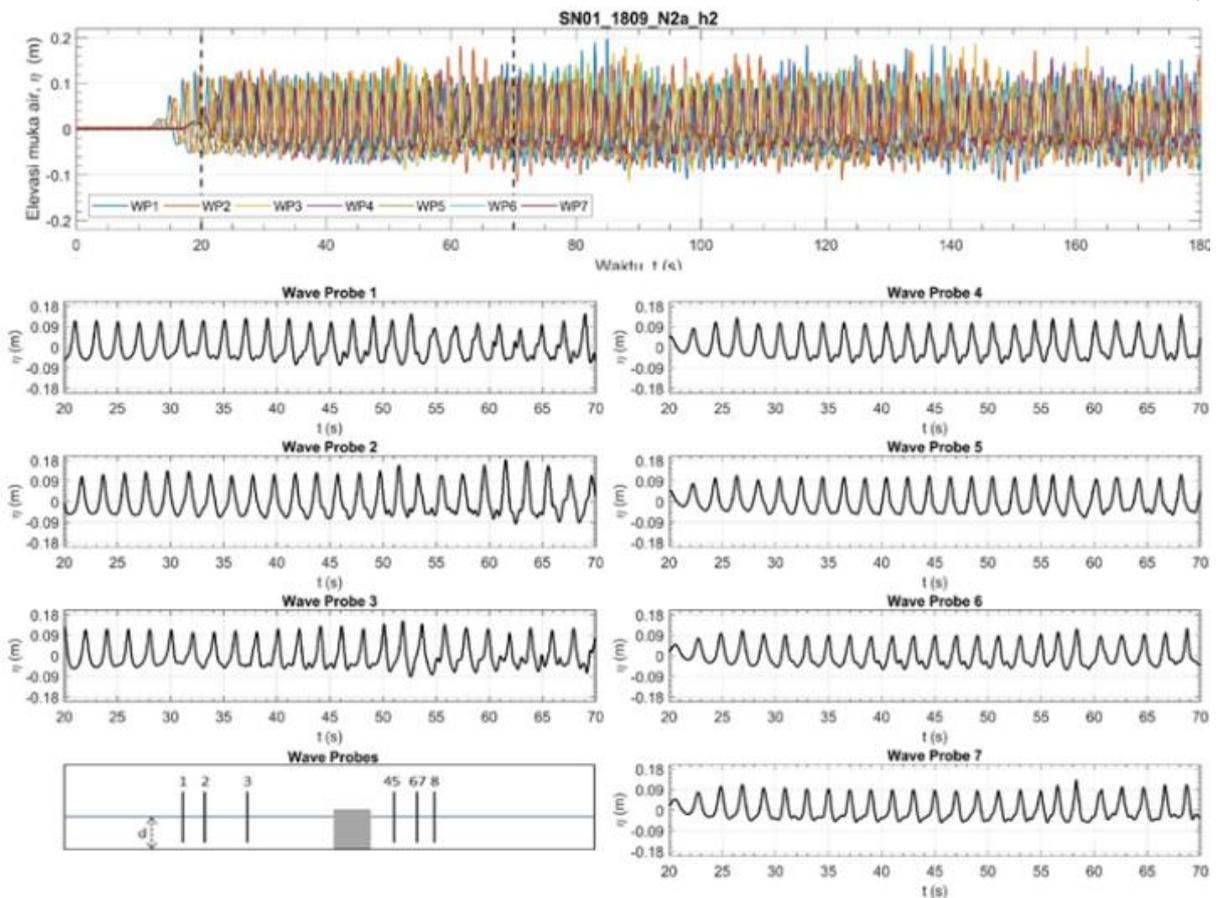
Hasil pengukuran data gelombang pada pengujian ini didapat dari *software* akuisisi data gelombang HR DAQ. Input parameter yang di proses pada *software* HR DAQ ini adalah tinggi gelombang, periode, dan durasi *running* selama 180 s atau selama 3 menit. Faktor yang mempengaruhi hasil dari pengukuran data gelombang ini adalah variasi tipe gelombang, elevasi muka air, dan parameter gelombang bangkitan. Input tipe gelombang penelitian kali ini adalah gelombang regular. Output dari hasil *software* HR DAQ ini berupa grafik *time series*, yang dimana grafik ini sudah mencakup pengukuran masing-masing gelombang dengan menggunakan *wave probe* yang berjumlah delapan channel. Sumbu X pada grafik ini menyatakan waktu (t) perekaman data *wave probe* dalam satuan detik. Sumbu y grafik menyatakan elevasi muka air ( $\eta$ ) dalam satuan meter. Melalui grafik ini dapat diamati tren tinggi gelombang yang terbentuk pada saat gelombang mulai dibangkitkan sampai dengan akhir dari eksperimen. Di samping itu, dapat pula diamati

perbandingan karakteristik gelombang yang terbentuk di lokasi masing-masing channel *wave probe* yang dapat diamati dari grafik *time series* ini adalah karakteristik parameter gelombang di tiap channel, yang meliputi tinggi dan periode; transformasi gelombang yang terjadi di sepanjang jalur perambatannya ketika melalui channel *wave probe*. Gambar 14 merupakan salah satu gambar dari hasil pengolahan data gelombang menggunakan *software* HR DAQ.

Untuk memberikan gambaran yang lebih jelas dari gelombang di tiap channel, ditampilkan grafik perbesaran pada rentang waktu perekaman tertentu untuk masing-masing channel *wave probe*. Grafik menampilkan gelombang yang terekam di area yang dibatasi garis hitam (detik ke-20 sampai dengan detik ke-70) pada eksperimen.



**Gambar 14** Data *Time Series* Hasil *Software* HR DAQ



**Gambar 15** Grafik *Time Series* masing-masing *wave probe*

Pada grafik di atas, pada rentang data 180 detik tinggi gelombang tampak sedikit meningkat secara merata, dibandingkan gelombang durasi awal. Akan tetapi, perubahan tidak terlalu signifikan dibanding dengan tinggi gelombang bangkitan yang diinputkan pada *wave generator*. Pada durasi,  $t > 60$  s, gelombang telah mengalami amplifikasi oleh proses refleksi. Gelombang datang yang mencapai struktur pemecah gelombang tiang akan dipantulkan kembali ke medan gelombang sebagai gelombang refleksi (berlawanan arah dengan gelombang datang). Gelombang refleksi merambat ke arah piston pembangkit gelombang dipantulkan kembali ke bersamaan dengan gelombang bangkitan, menghasilkan superposisi dengan karakteristik gelombang gabungan antara keduanya (terbentuk selimut gelombang). Proses tersebut berulang terus menerus selama eksperimen berlangsung, menghasilkan amplifikasi gelombang yang terus meningkat hingga akhir eksperimen. Fenomena refleksi akan menghasilkan tinggi gelombang yang terbentuk jauh lebih tinggi di atas target untuk tiap-tiap eksperimen. Untuk mengatasi masalah tersebut dan membatasi hasil pengujian agar tetap sesuai dengan kondisi rencana, pada proses analisis gelombang datang dan analisis gelombang refleksi digunakan rentang perekaman data dengan tinggi gelombang yang memungkinkan untuk dianggap sebagai gelombang laut dalam.

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

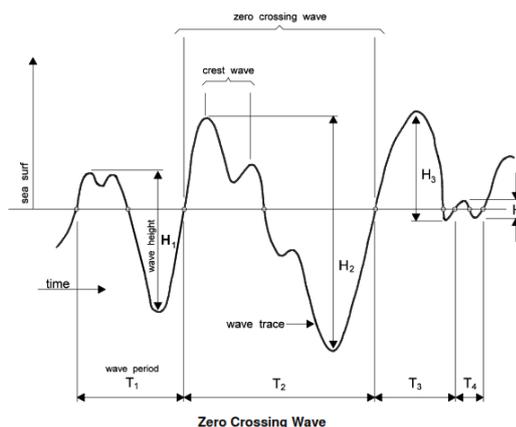
Hasil pengukuran data gelombang yang dihasilkan dari delapan channel *wave probe* pada setiap eksperimen disajikan dalam satu buah grafik *time series* (Gambar 15). Sumbu x grafik menyatakan waktu (t) perekaman data *wave probe* dengan satuan detik. Data awal (detik ke-0) merupakan waktu pengambilan data *wave probe*. Perekaman data gelombang ditargetkan pada 100 gelombang pertama yang dibangkitkan oleh mesin *wave generator*. Durasi masing-masing eksperimen bergantung pada periode gelombang yang diujikan. Durasi eksperimen berkisar antara 180 detik untuk setiap skenario. Sumbu y grafik menyatakan elevasi muka air ( $\eta$ ) dalam satuan meter. Melalui grafik ini dapat diamati trend tinggi gelombang yang terbentuk pada saat gelombang mulai dibangkitkan sampai dengan akhir dari eksperimen. Selain itu, dapat pula diamati perbandingan karakteristik gelombang yang terbentuk di lokasi masing-masing channel *wave probe*.

*Zero crossing period* adalah metode yang dilakukan dalam menganalisa gelombang kurun waktu pendek, dianalogikan sebagai permukaan laut yang terdiri dari satu puncak dan satu lembah (gambar 16). Dalam penggunaannya *zero crossing*

dibagi menjadi dua, yaitu *zero upcrossing* dan *zero downcrossing*. Dalam metode *zero upcrossing* dilakukan pengukuran yang dimulai dari titik potong elevasi terhadap garis datum, kemudian naik menuju puncak diikuti dengan elevasi menurun sampai lembah gelombang dan naik lagi hingga titik potong datum. Untuk *zero downcrossing* Metode ini sama dengan metode *zero up-crossing* tetapi arah pergerakan dari garis datum menuju ke lembah. Periode gelombang didefinisikan sebagai jarak horizontal dari dua titik *upcrossing/Downcrossing* yang berurutan.

Dari hasil analisis tersebut akan diperoleh:

- $H_s$  = Tinggi gelombang yang signifikan = tinggi rata-rata gelombang yang membentuk 33% bagian atas data
- $H_{10}$  = Tinggi gelombang rata-rata, yang merupakan 10% teratas
- $H_{max}$  = Tinggi gelombang maksimum dalam burst yang direkam
- $H_{mean}$  = Tinggi gelombang rata-rata
- $T_z$  = Zero crossing period = periode rata-rata
- $T_{sig}$  = Periode signifikan = periode rata-rata gelombang yang digunakan untuk menentukan  $H_{sig}$
- $T_c$  = Periode puncak = waktu rata-rata antara puncak berturut-turut

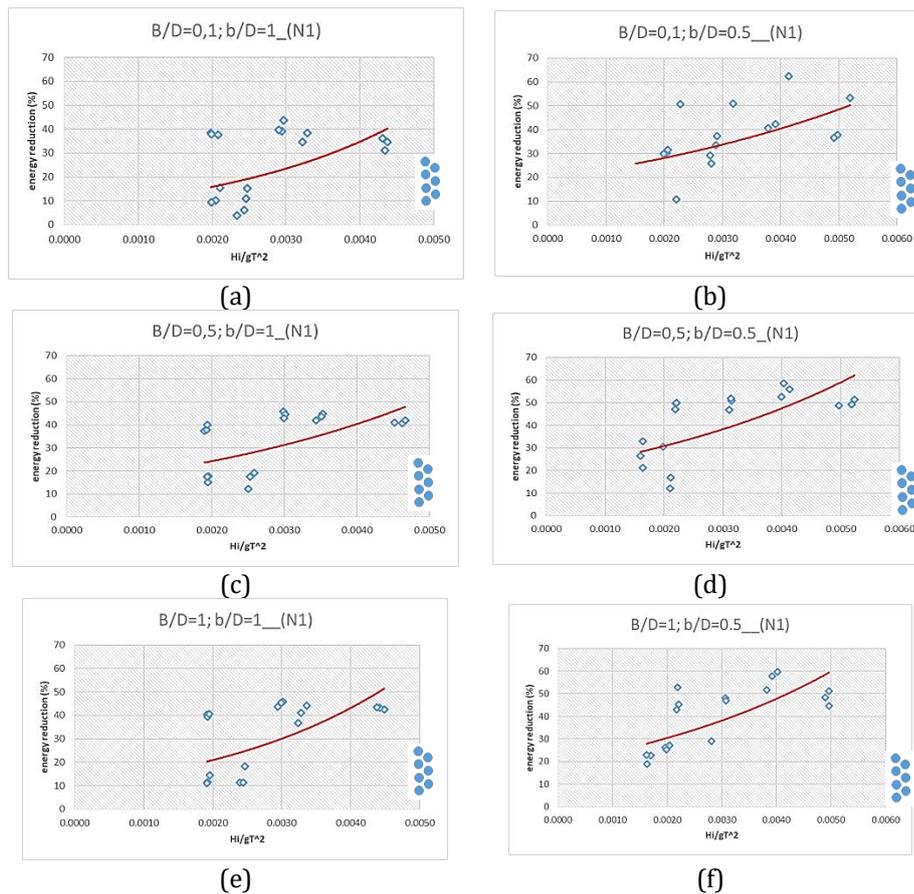


Gambar 16 Ilustrasi *zero crossing wave*

Dari hasil analisis ketinggian gelombang dilakukan perhitungan di masing-masing *wave probe* dengan menggunakan metode *zero crossing*. Hasil dari perhitungan tersebut kemudian dianalisis menggunakan perhitungan energi gelombang oleh (Dean & Dalrymple, 1984). Dari hasil perhitungan *wave probe* parameter tersebut kemudian dibandingkan energi gelombang di depan struktur dengan dibelakang struktur kemudian dihitung berapa persentase peredaman energi gelombang akibat adanya struktur tersebut. Hasil pengolahan data dengan metode *zero crossing* ditampilkan pada tabel 4.

Tabel 4 Tabel perhitungan wave probe parameter untuk B/D = 0.1;b/D=1 untuk N1

No	Skenario Name	Properties Tiang pancang			Wave Parameter		Wave Probe parameter H sig								
		B/D	b/D	Hi (m)	T (s)	N	Peak Period (s)	WP1 (m)	WP2 (m)	WP3 (m)	WP4 (m)	WP5 (m)	WP6 (m)	WP7 (m)	WP8 (m)
109	SN109_0210_N1A_h20_t2_d60	0.1	1	0.2	2	N1	2.05	0.179	0.188	0.180	0.182	0.164	0.148	0.141	0.175
110	SN110_0210_N1A_h15_t2_d60	0.1	1	0.15	2	N1	2.05	0.136	0.142	0.138	0.133	0.124	0.106	0.099	0.132
111	SN111_0210_N1A_h20_t2.5_d60	0.1	1	0.2	2.5	N1	2.56	0.191	0.192	0.183	0.172	0.172	0.143	0.147	0.162
112	SN112_0210_N1A_h15_t2.5_d60	0.1	1	0.15	2.5	N1	2.56	0.128	0.134	0.124	0.117	0.117	0.100	0.099	0.111
113	SN113_0210_N1A_h20_t3_d60	0.1	1	0.2	3	N1	2.93	0.208	0.154	0.172	0.170	0.153	0.192	0.199	0.191
114	SN114_0210_N1A_h15_t3_d60	0.1	1	0.15	3	N1	2.93	0.177	0.129	0.142	0.131	0.128	0.163	0.158	0.154
115	SN115_0210_N1B_h20_t2_d60	0.1	1	0.2	2	N1	2.05	0.180	0.181	0.183	0.177	0.162	0.145	0.141	0.176
116	SN116_0210_N1B_h15_t2_d60	0.1	1	0.15	2	N1	2.05	0.133	0.140	0.136	0.132	0.125	0.107	0.101	0.131
117	SN117_0210_N1B_h20_t2.5_d60	0.1	1	0.2	2.5	N1	2.56	0.190	0.190	0.182	0.173	0.171	0.148	0.151	0.166
118	SN118_0210_N1B_h15_t2.5_d60	0.1	1	0.15	2.5	N1	2.56	0.128	0.132	0.124	0.117	0.117	0.101	0.099	0.112
119	SN119_0210_N1B_h20_t3_d60	0.1	1	0.2	3	N1	2.93	0.207	0.157	0.174	0.173	0.153	0.195	0.199	0.197
120	SN120_0210_N1B_h15_t3_d60	0.1	1	0.15	3	N1	2.93	0.172	0.131	0.138	0.126	0.127	0.163	0.155	0.148
121	SN121_0210_N1C_h20_t2_d60	0.1	1	0.2	2	N1	2.05	0.177	0.180	0.181	0.176	0.162	0.142	0.141	0.171
122	SN122_0210_N1C_h15_t2_d60	0.1	1	0.15	2	N1	2.93	0.196	0.152	0.164	0.155	0.146	0.192	0.184	0.186
123	SN123_0210_N1C_h20_t2.5_d60	0.1	1	0.2	2.5	N1	2.56	0.187	0.184	0.181	0.170	0.167	0.145	0.147	0.165
124	SN124_0210_N1C_h15_t2.5_d60	0.1	1	0.15	2.5	N1	2.56	0.134	0.136	0.130	0.124	0.122	0.105	0.105	0.117
125	SN125_0210_N1C_h20_t3_d60	0.1	1	0.2	3	N1	2.93	0.205	0.157	0.173	0.170	0.147	0.198	0.194	0.196
126	SN126_0210_N1C_h15_t3_d60	0.1	1	0.15	3	N1	2.93	0.168	0.128	0.136	0.122	0.121	0.159	0.150	0.146



Gambar 17 Grafik redaman energi untuk masing-masing B/D dan b/D untuk variasi peletakan tiang pancang N1

Dari hasil perhitungan tabel 4 diperoleh H sig untuk masih wave probe. Dengan menggunakan persamaan total energi per gelombang per satuan

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \dots\dots\dots(3)$$

Dihitung nilai total energi untuk masing-masing probe. nilai peredaman energi gelombang atau energy reduction merupakan nilai perbandingan energi gelombang di belakang

struktur dibandingkan dengan energi gelombang di depan struktur.

$$E_{red}(\%) = \frac{E_{L(WP6)}}{E_{L(WP1)}} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

dimana :

$E_{red}(\%)$  = Energy reduction (%) / Peredaman energi gelombang dalam %

$E_{L(WP6)}$  = Energi gelombang di wave probe 6 belakang struktur

$E_{L(WP1)}$  = Energi gelombang di *wave probe 1* depan struktur

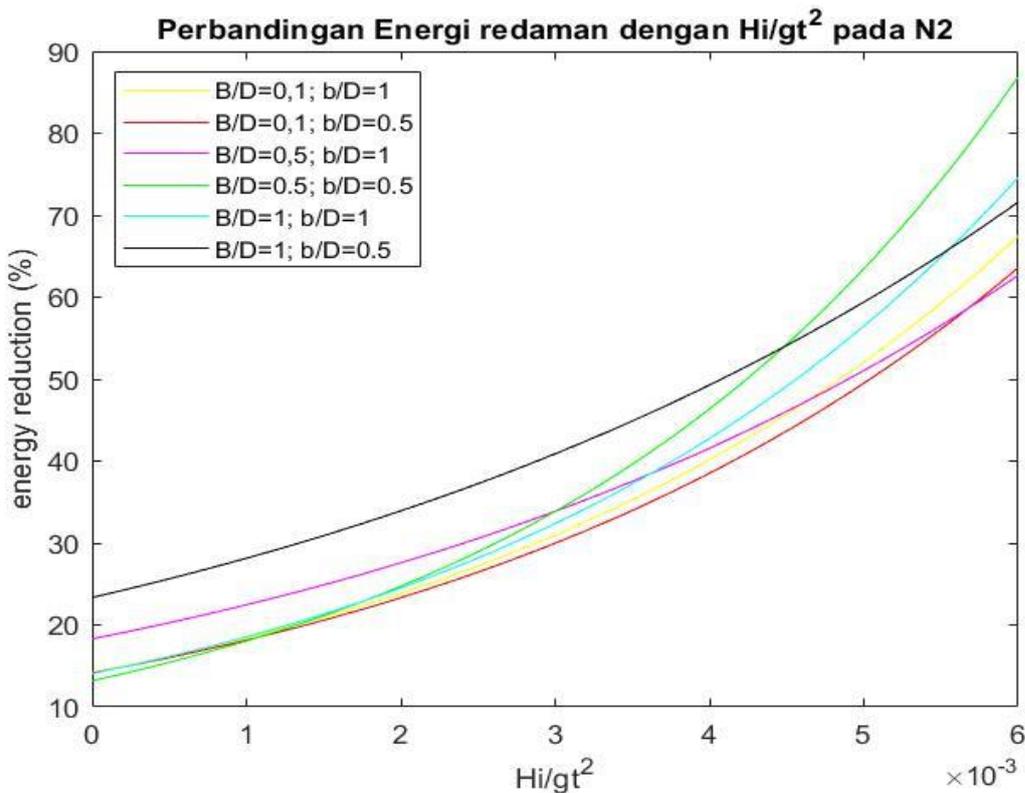
Hubungan antara kecuraman gelombang ( $H_i/gT^2$ ) dan redaman energi gelombang dengan tata letak N1 dapat dilihat pada gambar 17. Gambar 17 Grafik redaman energi untuk masing-masing B/D dan b/D untuk variasi peletakan tiang pancang N1

A, B, C, D, E, dan F sesuai dengan penemuan dipenelitian terdahulu oleh Hayashi & Kano (2019) dimana trend peningkatan energi gelombang yang teredam akibat adanya struktur semakin meningkat dengan semakin meningkatnya nilai kecuraman gelombang dapat dijelaskan dengan semakin meningkatnya gerakan partikel air.

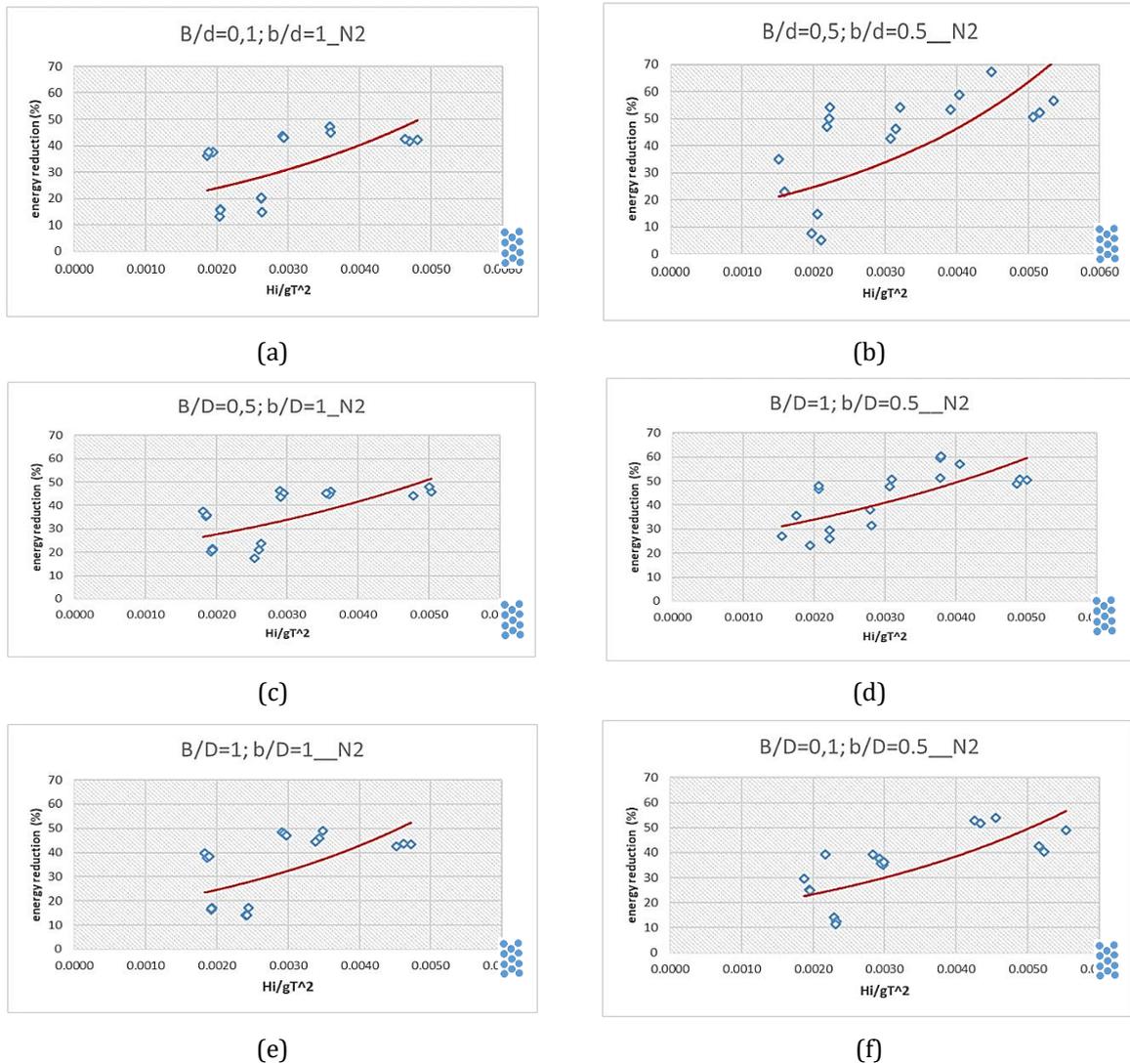
Dengan meningkatnya nilai kecuraman gelombang dan kecepatan gelombang yang semakin meningkat mengakibatkan perioda akan semakin mengecil sehingga panjang gelombang setelah struktur juga akan semakin mengecil. Ketika gelombang datang melintasi stuktur tiang pancang kecepatan partikel dan percepatan partikel tiba-tiba berubah mengakibatkan pengurangan energi karena turbulensi yang

dihasilkan oleh perubahan gerakan partikel air yang berubah akibat adanya struktur tiang pancang. Oleh karena itu, makin tinggi nilai kecuraman gelombang, turbulensi akan menjadi meningkatkan sehingga nilai peredaman energi gelombang akan semakin meningkat.

Dari gambar 18 untuk tata letaktata letak tiang pancang N1 dengan berbagai konfigurasi B/D (jarak antar tiang pancang (kolom) relative terhadap diameter) dan b/D (jarak antar tiang pancang (baris) relative terhadap diameter) diperoleh bahwa jika jarak antar tiang pancang (baris) relative terhadap diameter semakin kecil maka peredaman energi menjadi semakin besar diakibatkan oleh jarak antar baris tiang semakin rapat. Sedangkan untuk konfigurasi jarak antar tiang pancang (kolom) relative terhadap diameter yang optimum untuk meredam energi gelombang adalah dengan nilai B/D = 0.5. Berdasarkan hasil percobaan konfigurasi tiang pancang untuk tata letaktata letak N1 nilai B/D dan b/D yang optimum untuk meredam energi gelombang adalah dengan konfigurasi B/D=0.5 dan b/D=0.5.



Gambar 18 Grafik untuk masing-masing susunan tiang pancang pada kondisi N1

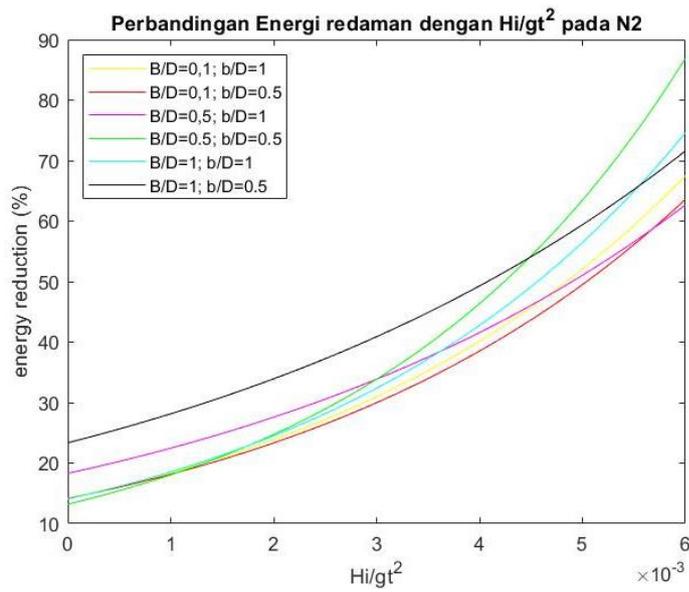


**Gambar 19** Grafik redaman energi untuk masing-masing B/D dan b/D untuk variasi peletakan tiang pancang N2

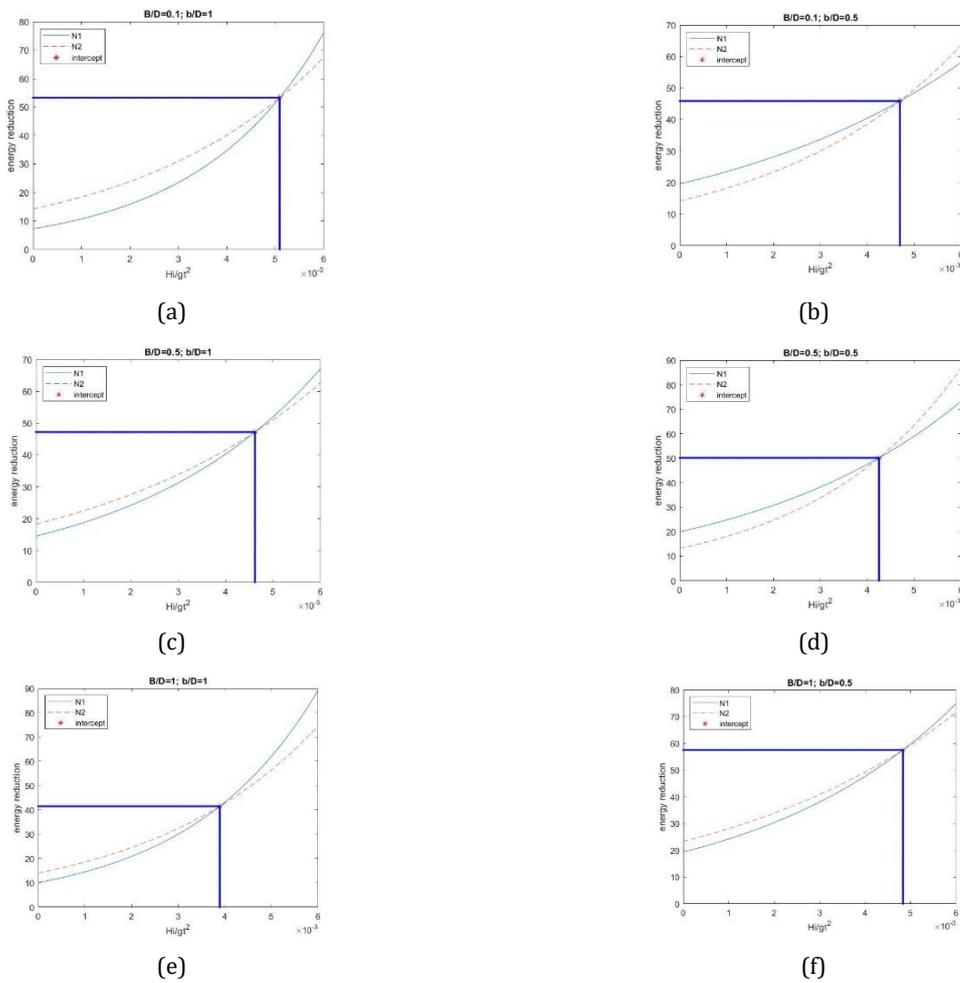
Hubungan antara kecuraman gelombang dan redaman energi gelombang dengan tata letak tata letak N1 dapat dilihat pada gambar 19 A,B,C,D,E dan F menyerupai dengan tren pada dimana tren peningkatan energi gelombang yang teredam akibat adanya struktur semakin meningkat dengan semakin meningkatnya kecuraman gelombang. Perubahan percepatan partikel air secara tiba-tiba akibat adanya struktur tiang mengakibatkan terjadinya pengurangan energi karena turbulensi. Oleh karena itu, makin tinggi nilai kecuraman gelombang, turbulensi akan menjadi meningkatkan sehingga nilai peredaman energi gelombang akan semakin meningkat.

Dari gambar 20 untuk tata letak tata letak tiang pancang N2 dengan berbagai konfigurasi

B/D (jarak antar tiang pancang (kolom) relative terhadap diameter) dan b/D (jarak antar tiang pancang (baris) relative terhadap diameter). Dari grafik tersebut diperoleh bahwa jika jarak antar tiang pancang (baris) relative terhadap diameter yang optimum untuk meredam energi gelombang adalah dengan konfigurasi  $b/D=0.5$ . Sedangkan untuk konfigurasi jarak antar tiang pancang (kolom) relative terhadap diameter yang optimum untuk meredam energi gelombang adalah dengan nilai  $B/D = 1.0$ . Berdasarkan hasil percobaan konfigurasi tiang pancang untuk tata letak tata letak N2 nilai B/D dan b/D yang optimum untuk meredam energi gelombang adalah dengan konfigurasi  $B/D=1.0$  dan  $b/D=0.5$ .



**Gambar 20** Grafik untuk masing-masing susunan tiang pancang pada kondisi N2



**Gambar 21** Optimasi peredaman energi gelombang untuk berbagai konfigurasi tiang pancang pada tata letak tata letak N1 dan N2

**Tabel 5** Nilai optimum peredaman energi gelombang untuk masing-masing konfigurasi

Konfigurasi tiang pancang	Persamaan eksponensial		Pengurangan energi gelombang
	Tata letak (N1)	Tata letak (N2)	
<b>B/D=0,1; b/D=1</b>	$y = 7.2512e^{391.92x}$	$y = 14.206e^{259.76x}$	53.27
<b>B/D=0,1; b/D=0.5</b>	$y = 19.532e^{181.79x}$	$y = 14.128e^{250.77x}$	45.86
<b>B/D=0,5; b/D=1</b>	$y = 14.539e^{254.99x}$	$y = 18.298e^{205.2x}$	47.21
<b>B/D=0,5; b/D=0.5</b>	$y = 19.958e^{216.77x}$	$y = 13.192e^{314.19x}$	50.14
<b>B/D=1; b/D=1</b>	$y = 10.099e^{363.09x}$	$y = 14.054e^{278.19x}$	41.50
<b>B/D=1; b/D=0.5</b>	$y = 19.371e^{225.43x}$	$y = 23.35e^{186.76x}$	57.56

Dari grafik hubungan antara kecuraman gelombang dan peredaman gelombang untuk konfigurasi tiang pancang dengan tata letak N1 (gambar 17) dan konfigurasi dengan tata letak N2 (gambar 19) diperoleh *trendline* berbentuk persamaan eksponensial untuk masing-masing konfigurasi dan tata letak. Persamaan eksponensial yang diperoleh dapat dilihat pada tabel 5.

Persamaan grafik eksponensial hubungan antara nilai peredaman energi dan kecuraman gelombang yang terbentuk dihitung nilai optimumnya pada masing-masing tata letak N1 dan N2 untuk satu konfigurasi susunan tiang pancang. Dari berbagai konfigurasi tiang pancang dihitung nilai perpotongan (*intercept*) dari tata letak tiang N1 dan N2. Perhitungan *intercept* dianggap sebagai nilai optimum dari konfigurasi tiang pancang dikarenakan perbedaan tata letak N1 dan N2 merupakan hanya perbedaan jumlah kolom susunan tiang pancang. Pada tata letak N1 jumlah kolom terdapat dua susunan tiang pancang sedangkan pada tata letak N2 terdapat tiga susunan tiang. Perhitungan nilai *intercept* dianggap sebagai solusi suatu solusi optimal yang layak dari suatu fungsi objektif dimana fungsi objektif ini dapat berupa nilai maksimum atau minimum. Dimana pada persamaan ini fungsi objektif berupa nilai maksimum dari berbagai susunan tiang pancang. Penentuan nilai optimum dari peredaman energi untuk tata letak N1 dan N2 digunakan agar dengan berbagai tata letak yang berbeda atau jumlah susunan dalam kolom melebihi dua kolom dianggap nilai *intercept* mewakili nilai redaman energi maksimal untuk berbagai konfigurasi tiang.

Titik pertemuan antara dua nilai persamaan tersebut untuk masing-masing susunan tiang pancang merupakan nilai optimum peredaman energi gelombang untuk berbagai konfigurasi tiang dapat dilihat pada gambar 21. Dari hasil tersebut diperoleh dengan konfigurasi tiang B/D=1; b/D=0.5 mempunyai nilai peredaman energi terbesar dengan nilai peredaman sebesar 57.61%. Nilai masing-masing nilai peredaman

gelombang untuk berbagai konfigurasi dapat dilihat pada tabel 5.

**KESIMPULAN**

Dari hasil uji coba model fisik tiang pancang di laboratorium Balai Litbang Pantai diperoleh bahwa redaman energi gelombang dipengaruhi oleh kecuraman gelombang. Dengan meningkatnya kecuraman gelombang mengakibatkan meningkatnya gerakan partikel air sehingga kecepatan yang diakibatkan oleh gelombang semakin meningkat. mengakibatkan periode gelombang semakin mengecil akibatnya panjang gelombang juga mengecil sehingga energi gelombang akan semakin menurun akibat adanya struktur tiang pancang.

Berdasarkan uji coba di laboratorium disain konfigurasi terbaik dalam meredam energi gelombang adalah dengan konfigurasi B/D=1 dan b/D=0.5. Berdasarkan hasil pengujian pengaruh jarak tiang dalam kolom yang semakin rapat tidak terlalu mempengaruhi nilai redaman energi gelombang. Sedangkan untuk jarak dalam baris susunan tiang pancang sangat berpengaruh terhadap redaman gelombang yang terjadi

Penentuan posisi penyusunan tiang pancang berpengaruh terhadap berapa besar energi gelombang yang ingin diredam oleh struktur tiang. Semakin besar energi yang ingin diredam maka jarak tiang pancang dalam baris yang disusun harus semakin rapat. Semakin rapat susunan tiang pancang maka semakin tinggi biaya konstruksi peredam gelombang dengan menggunakan tiang pancang. Sehingga penentuan jarak tiang pancang atau konfigurasi tiang pancang sangat penting untuk memilih susunan tiang pancang yang optimum serta besar energi yang akan diredam atau berapa ketinggian gelombang yang diinginkan untuk melalui tiang pancang. Sehingga harus dipilih susunan tiang pancang yang optimum dari segi redaman dan biaya konstruksi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan rasa terimakasih kepada kepala Balai Litbang Pantai Dr. Leo Eliasta Sembiring, S.T.,M.Sc., atas bimbingannya selama proses penelitian. Serta kepada teman-teman tim Tiang Pancang dan Buis Beton dan staff laboratorium yang telah bekerjasama dengan baik sehingga pelaksanaan penelitian ini dapat berjalan dengan baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- CERC, U. A. (1984). *Shore protection manual*. Washington: US Army Corps of Engineers
- Dalrymple, R. A. (1988). Scattering of long waves by cylindrical obstacles and gratings using matched asymptotic expansions. *Journal of Fluid Mechanics*, 188(May 2014), 465–490. <https://doi.org/10.1017/S0022112088000801>
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists. Advanced Series on Ocean Engineering* (Vol. 2). <https://doi.org/10.1142/9789812385512>
- Duclos, G., & Clément, A. H. (2004). Wave propagation through arrays of unevenly spaced vertical piles. *Ocean Engineering*, 31(13), 1655–1668. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2004.03.006>
- Hayashi, T., & Kano, T. (2019). Hydraulic Research on the Closely Spaced Pile Breakwater. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(10), 49. <https://doi.org/10.9753/icce.v10.49>
- Huang, Z., & Ghidaoui, M. S. (2007). A model for the scattering of long waves by slotted breakwaters in the presence of currents. *Acta Mechanica Sinica/Lixue Xuebao*, 23(1), 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10409-006-0044-3>
- Isaacson, M., Premasiro, S., & Yang, G. (1998). Wave interaction with vertical slotted barrier. *Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.*, 124(June), 118–126.
- Ji, C., & Suh, K. (2010). Wave interactions with multiple-row curtainwall-pile breakwaters. *Coastal Engineering*, 57(5), 500–512. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.12.008>
- Kakuno, K. (1983). Simplified Estimation of Wace Effects on Vertical Barriers. *Proceedings of the Costal Structure Conference, Arlington, Virginia, ASCE*, 939-952.
- Laju, K., Sundar, V., & Sundaravadivelu, R. (2011). Hydrodynamic characteristics of pile supported skirt breakwater models. *Applied Ocean Research*, 33(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.12.004>
- Lamb, H. (1932). *HYDRODYNAMICS* (5th ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Liu, H., Ghidaoui, M. S., Huang, Z., Yuan, Z., & Wang, J. (2011). Numerical investigation of the interactions between solitary waves and pile breakwaters using BGK-based methods. *Computers and Mathematics with Applications*, 61(12), 3668–3677. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2010.06.012>
- OCDI. Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan, Table of content 599 (2009). <https://doi.org/10.1111/j.1744-6570.1993.tb00867.x>
- Suh, K. D., Jung, H. Y., & Pyun, C. K. (2007). Wave reflection and transmission by curtainwall-pile breakwaters using circular piles. *Ocean Engineering*, 34(14–15), 2100–2106. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.02.007>
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Penerbit Beta Offset.
- Yoo, J., Kim, S.-Y., Kim, J.-M., & Cho, Y.-S. (2010). Experimental Investigation of the Hydraulic Performance of Caisson-Pile Breakwaters. *Journal of Coastal Research*, 26(3), 444–450. <https://doi.org/10.2112/08-1131.1>