

Transformasi Gelombang Reguler Akibat Pemecah Gelombang Tiang Pancang Dua Baris Selang-Seling

Regular Wave Transformation Due to A Two-Row Staggered Pile Breakwater

Totok Suprijo ¹⁾* Gandhi Napitupulu ¹⁾, Juventus W.R. Ginting ²⁾, Eduardo M. Simanjuntak ²⁾, Faizal A.R. Abdullah ^{1,3)}, dan Faruq Khadami ¹⁾

¹⁾ Faculty of Earth Sciences and Technology, Bandung Institute of Technology (ITB), Jl. Ganeca No. 10, Bandung 40132, Indonesia

²⁾ Experimental Station for Coastal Engineering, The Ministry of Public Works, Bali, 81116, Indonesia

³⁾ Marine Disaster Research Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, 49111, Republic of Korea

*corresponding email: totok.suprijo@itb.ac.id

Accepted: 21 December 2023; Revised: 31 Januari 2024; Approved: 08 August 2024

ABSTRACT

Hydraulic experiments in a two-dimensional physical laboratory were conducted to evaluate the performance of pile breakwaters in reducing wave energy. The piles on the breakwater were arranged in a staggered pattern in two rows. A total of seventy-two simulation scenarios were run based on variations in the incoming wave height and period, and the spacing between the piles, using a 1:10 model scale. The data from the hydraulic tests were then processed using a spectral method that could separate the energy spectra of reflected and transmitted waves. These changes result in reflected and transmitted waves. The laboratory test data were used to estimate the values of the transmission coefficient and reflection coefficient. Both coefficients were then used to validate semi-empirical formulas for the two coefficients. The semi-empirical formulas for the two coefficients were developed based on a model for estimating the spatial porosity of pile breakwaters. The porosity estimation model takes into account the dimensions of the piles and the dimensional components of the breakwater, including the arrangement, number of rows, and spacing between the piles. The validation results of the semi-empirical formulas with the laboratory test data showed a coefficient of determination of 0.917 and a root mean square of 0.077. The staggered arrangement improves the effectiveness of the breakwater in reducing the transmission wave height. The developed semi-empirical model can be used to design the pile dimensions to achieve optimal reflected and transmitted wave heights for coastal protection.

Keywords: pile breakwater, coastal protection, hydraulic experiment, physical wave simulation, wave transmission new formula

ABSTRAK

Uji hidrolika di laboratorium fisik dua dimensi telah dilakukan dalam rangka mengevaluasi kinerja pemecah gelombang tiang pancang untuk meredam energi gelombang. Tiang pancang pada pemecah gelombang tersebut disusun secara selang-seling (staggered) dalam dua baris. Sebanyak tujuh puluh dua skenario simulasi telah dijalankan berdasarkan variasi tinggi dan periode gelombang datang, serta jarak antar tiang pancang dengan skala model 1:10. Selanjutnya data dari hasil uji hidraulika diolah dengan menggunakan metode spektrum yang dapat memisahkan spektrum energi gelombang refleksi dan transmisi. Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa gelombang datang mengalami perubahan ketika berinteraksi dengan struktur tiang pancang. Periode dan panjang gelombang refleksi dan transmisi hampir sama (perubahan <5%) dengan gelombang datang, dengan kemungkinan terdapat sedikit perbedaan. Di dalam studi ini, data uji laboratorium juga digunakan untuk mengestimasi nilai koefisien transmisi dan koefisien refleksi. Kemudian hasil estimasi kedua koefisien tersebut dimanfaatkan untuk validasi formula semi-empiris dari kedua koefisien tersebut. Formula semi empiris dari kedua koefisien dikembangkan berdasarkan pada model pendekatan nilai porositas spasial dari pemecah gelombang tiang pancang. Model pendekatan nilai porositas tersebut memperhitungkan dimensi tiang pancang maupun komponen dimensi dari pemecah gelombang yang meliputi susunan, jumlah baris, dan jarak antara tiang pancang. Hasil validasi formula semi empiris dengan data uji laboratorium menunjukkan koefisien determinasi sebesar 0,917 dan root mean square sebesar 0,077. Formasi selang-seling meningkatkan efektifitas pemecah gelombang dalam mengurangi tinggi gelombang transmisi. Model semiempiris yang dikembangkan dapat digunakan untuk mendesain dimensi tiang pancang sehingga menghasilkan tinggi gelombang refleksi dan transmisi yang optimum untuk pelindung pantai.

Kata Kunci: pemecah gelombang tiang pancang, perlindungan pesisir pantai, uji hidrolika, simulasi fisik gelombang, rumus baru transmisi gelombang

PENDAHULUAN

Pemecah gelombang merupakan struktur buatan yang didirikan untuk melindungi berbagai macam infrastruktur dan aktivitas manusia di wilayah pesisir, kolam pelabuhan, bahkan di lepas pantai (*offshore*). Pemecah gelombang dapat berupa struktur paralel pantai seperti krib, ataupun struktur lepas pantai seperti breakwater (Saengsupavanich et al., 2022).

Pemilihan tipe pemecah gelombang yang tepat menjadi aspek krusial dalam desain perlindungan pantai. Berbagai faktor perlu dipertimbangkan, seperti tinggi gelombang, periode gelombang, kedalaman air, kondisi dasar laut, ketersediaan material di sekitar lokasi, dan keterbatasan peralatan konstruksi (Angnuureng et al., 2023). Setiap tipe pemecah gelombang memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Pemecah gelombang tipe gravitasi, seperti pemecah gelombang kerikil dan caisson vertikal, dikenal efektif dalam meredam gelombang tinggi dan gelombang dengan periode pendek (gelombang cepat). Perawatannya relatif mudah karena batu atau kerikil yang lepas dan rusak dapat dengan mudah diganti atau diperbaiki (Rui et al., 2024). Namun, konstruksi pemecah gelombang tipe gravitasi membutuhkan material yang berlimpah, terutama jika dibangun di perairan dalam. Selain itu, struktur ini dapat menghalangi aliran air dan mengganggu sirkulasi di dalam pelabuhan, yang berakibat pada penurunan kualitas air (Ye et al., 2024). Diperlukan pula dasar laut yang kokoh untuk menopang beban berat struktur ini.

Sirkulasi aliran dalam kolam pelabuhan memiliki peran yang lebih penting dibandingkan ketenangan pelabuhan dalam konteks desain pemecah gelombang. Meskipun ketenangan pelabuhan mendukung operasi bongkar muat dan keselamatan kapal, sirkulasi aliran yang baik berperan lebih krusial dalam menjaga kesehatan lingkungan laut dan infrastruktur pelabuhan (Ragheb et al., 2024). Sirkulasi aliran membantu mencegah pendangkalan, menjaga kualitas air, dan mendinginkan air laut.

Pemecah gelombang tiang pancang telah menjadi alternatif populer dari pemecah gelombang tipe gravitasi, terutama untuk mengatasi permasalahan abrasi pantai yang sering terjadi akibat konstruksi pemecah gelombang tipe gravitasi. Salah satu contohnya adalah *Curtain Pile Breakwater* (CPB) yang telah diterapkan di Pelabuhan Merak. Struktur berpori ini memungkinkan aliran sedimen alami dan meminimalisir gangguan terhadap ekosistem laut. Meskipun penelitian mengenai pemecah gelombang tiang pancang telah banyak dilakukan, masih

terdapat celah penelitian terkait dengan perilaku refleksi dan transmisi gelombang pada struktur ini. Penelitian-penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh (Abdullah et al., 2022); (Napitupulu et al., 2023); (Sathyanarayana et al., 2021); (Suvarna et al., 2021), telah mengkaji refleksi dan transmisi gelombang di sekitar tiang pancang. Namun, penelitian tersebut belum mempertimbangkan variasi parameter gelombang seperti tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman air.

Kajian literatur menunjukkan bahwa penelitian mengenai proses refleksi dan transmisi gelombang pada struktur pemecah gelombang telah mendapatkan perhatian yang cukup dari para peneliti. Penelitian-penelitian terdahulu, seperti (Hayashi et al., 2018), (Hutchinson & Raudkivi, 1985), (Mani & Jayakumar, 1995), (Rao & Rao, 2012), dan (Truitt & Herbich, 1987), telah memberikan kontribusi penting dalam memahami fenomena ini.

Di sisi lain, upaya untuk meningkatkan efisiensi pemecah gelombang tiang pancang telah dilakukan melalui berbagai konfigurasi, seperti susunan tiang pancang selang-seling (*staggered grid*) yang dipelajari oleh (Mani & Jayakumar, 1995) dan konsep pemecah gelombang berlubang dinding vertikal yang diteliti oleh (Gardner et al., 1987), (Isaacson et al., 1998), (Kriebel, 1992), (Rageh & Koraim, 2010), (Suh et al., 2006), dan (Suvarna et al., 2021).

Penelitian ini berfokus pada pengembangan model untuk memformulasikan proses refleksi dan transmisi gelombang pada susunan tiang pancang dua baris selang-seling. Model ini mempertimbangkan variasi parameter gelombang, seperti tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman air, serta dimensi tiang pancang, seperti diameter dan jarak antar tiang. Kinerja hidraulik pemecah gelombang tiang pancang dua baris selang-seling akan dievaluasi melalui eksperimen fisik dan investigasi teoritis. Hal ini penting mengingat belum ada penelitian yang secara khusus menyelidiki pengaruh variasi parameter gelombang dan dimensi tiang pancang terhadap proses refleksi dan transmisi gelombang pada susunan tiang pancang dua baris selang-seling.

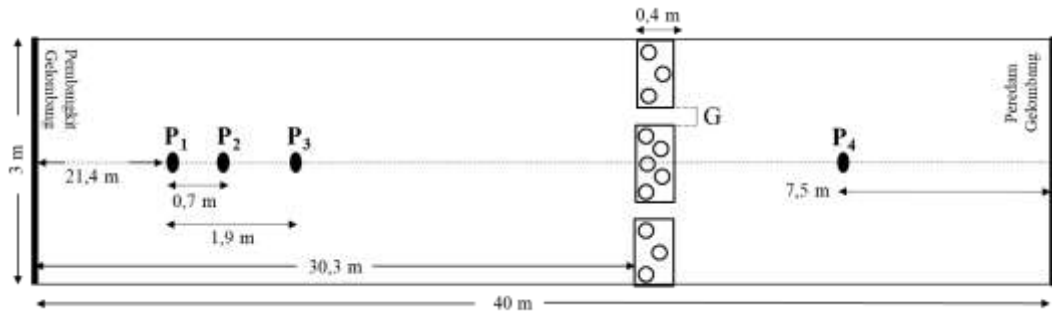
METODOLOGI

Penyiapan laboratorium fisik

Data elevasi muka air diperoleh dari laboratorium fisik di Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Buleleng, Bali. Kolam gelombang memiliki dimensi panjang 40 m, lebar 3 m, dan kedalaman 0,6 m (Gambar 2). Gelombang yang dibangkitkan pada percobaan ini

adalah gelombang reguler dengan pembangkit gelombang (sisi kiri *wave generator*) menggunakan segmen piston. Pembangkit gelombang dapat menghasilkan gelombang ke berbagai arah (*multi directional*). Namun, pada percobaan ini,

pembangkit gelombang digunakan untuk menghasilkan gelombang satu arah. Sebuah peredam (*absorb*) gelombang (sisi kanan *wave pool*) digunakan untuk menyerap gelombang agar tidak terjadi pemantulan balik dari dinding *wave pool*.



(a)



(b)

Gambar 1 (a) Skema model fisik kolam gelombang (*wave pool*) dan (b) kolam gelombang dan tiang pancang model fisik.

Pengukuran elevasi muka air menggunakan metode tiga *probe* P_1 , P_2 , dan P_3 yang diletakkan di depan struktur tiang digunakan untuk menghitung spektrum gelombang datang dan spektrum gelombang refleksi seperti yang disarankan oleh (Mansard & Funke, 1980). Mansard dan Funke menggunakan metode 3 titik *wave probe* dan menentukan jarak berdasarkan panjang gelombang. Jarak *wave probe* yang direkomendasikan adalah sebagai berikut :

$$X_{12} = L/10 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$L/6 < X_{13} < L/3 \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$X_{13} \neq L/5 \text{ dan } X_{13} \neq 3L/10 \quad \dots\dots\dots(3)$$

Dimana:

X_{12} : jarak P_1 dan P_2 (m)

X_{13} : jarak P_1 dan P_3 (m)

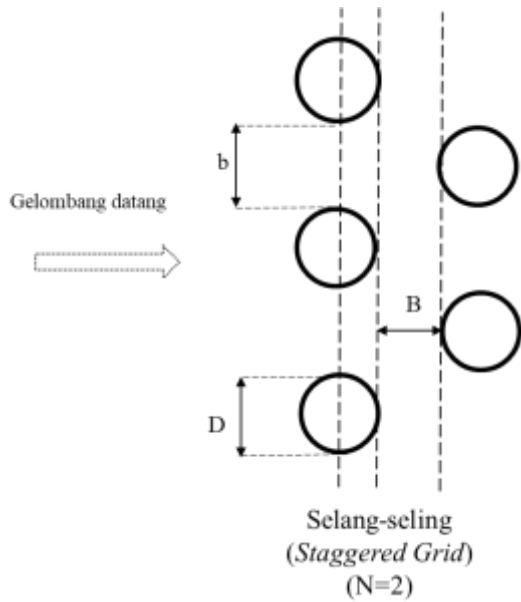
L : panjang gelombang (m)

P_4 yang ditempatkan di belakang tiang pemecah gelombang digunakan untuk menghitung spektrum gelombang transmisi. *Probe* mengukur elevasi permukaan dengan laju sampel (*sample rate*) 0,04 detik.

Skala model fisik adalah 1:10 dan 72 skenario eksperimen dilakukan berdasarkan variasi parameter gelombang dan susunan tiang pancang (Tabel 1). Susunan tiang pancang dalam dua baris secara selang-seling (*staggered*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Tabel 1 Variasi parameter tiang pancang dan gelombang.

No.	Variabel	Simbol	Jumlah variasi	Variasi
1	Jarak antar tiang pancang (kolom) / Diameter	B/D	3	0,1; 0,5; 1
2	Jarak antar tiang pancang (baris) / Diameter	b/D	2	0,5; 1
3	Kedalaman air kolam gelombang	d	1	60 cm
4	Tinggi gelombang	H_i	2	20;15 cm
5	Jumlah baris tiang pancang	N	1	2
6	Celah antara kelompok tiang pancang	G	3	33; 50; 58,1 cm
7	Periode gelombang	T_i	2	2; 3 s



Gambar 2 Sketsa struktur tiang pancang.

Pengukuran spektrum gelombang yang datang, refleksi, dan transmisi

Pengukuran spektrum gelombang datang dan gelombang refleksi digunakan dengan menerapkan metode yang diformulasikan oleh (Mansard & Funke, 1980). Asumsi yang mendasari analisis refleksi pada kondisi laut yang tidak beraturan adalah bahwa gelombang dapat dihitung sebagai superposisi linier dari sejumlah komponen diskrit yang tak terhingga dari gelombang dengan frekuensi, amplitudo, dan fase yang tetap.

Rekaman elevasi muka air dari probe pertama adalah penjumlahan diskrit yang dinyatakan dalam bentuk deret Fourier pada persamaan 4.

$$\eta_p(t) = \sum_{k=1}^{N_f} A_{p,k} \cdot \exp\left(\frac{2\pi kt}{T} + \alpha_{p,k}\right) \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

- $A_{p,k}$: koefisien Fourier untuk frekuensi
- $k/T, T$: periode gelombang (s)
- $\alpha_{p,k}$: fase relatif terhadap waktu awal perekaman
- N_f : frekuensi maksimum.

Penerapan transformasi Fourier diskrit pada persamaan 4 akan menghasilkan persamaan 5.

$$B_{p,k} = A_{p,k} \cdot \exp(i\alpha_{p,k}), k = 1, \dots, N_f \quad (5)$$

Dimana:

- $A_{p,k}$: koefisien Fourier
- $\alpha_{p,k}$: fase.

Persamaan 6 dalam bentuk persegi panjang sebagai berikut:

$$B_{p,k} = [A_{p,k} \cdot \cos(\alpha_{p,k}) + i \cdot A_{p,k} \cdot \sin(\alpha_{p,k})], k = 1, \dots, N_f \quad \dots\dots\dots(6)$$

Jarak antara probe diketahui dan telah ditetapkan bahwa komponen frekuensi individu dalam gelombang komposit bergerak dengan kecepatan tetap, sehingga untuk menghitung hubungan fase antara penjalaran gelombang yang diamati oleh masing-masing probe, persamaan gelombang monokromatik secara umum dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta_p(x, t) = \sum_{k=1}^{N_f} C_k \cdot \exp\left[-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi x}{L_k} + \theta_k\right] \dots\dots\dots(7)$$

Dimana:

- θ_k : fase gelombang
- $2\pi/L_k$: bilangan gelombang (m^{-1})
- $2\pi k/T$: frekuensi gelombang ($rad\ s^{-1}$)
- p : posisi probe (m)
- L_k : panjang gelombang dengan frekuensi k/T

Menyelesaikan solusi persamaan linier dari bentuk spektrum probe 1, 2, dan 3 untuk mendapatkan solusi spektrum gelombang datang dan refleksi ($Z_{I,k}$ dan $Z_{R,k}$) sebagai berikut:

$$Z_{I,k} = \frac{1}{D_k} (B_{1,k}(R1 + i \cdot Q1) + B_{2,k}(R2 + i \cdot Q2) + B_{3,k}(R3 + i \cdot Q3)) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$Z_{R,k} = \frac{1}{D_k} (B_{1,k}(R1 - i \cdot Q1) + B_{2,k}(R2 - i \cdot Q2) + B_{3,k}(R3 - i \cdot Q3)) \quad \dots\dots\dots(9)$$

Dimana:

- $D_k = 2(\sin^2(\beta_k) + \sin^2(\gamma_k) + \sin^2(\gamma_k - \beta_k))$
- $R1_k = \sin^2(\beta_k) + \sin^2(\gamma_k)$
- $Q1_k = \sin(\beta_k) \cos(\gamma_k) + \sin(\gamma_k) \cos(\beta_k)$
- $R2_k = \sin(\gamma_k) \sin(\gamma_k - \beta_k)$
- $Q2_k = \sin(\gamma_k) \cos(\gamma_k - \beta_k) - 2 \sin(\beta_k)$
- $R3_k = -\sin(\beta_k) \sin(\gamma_k - \beta_k)$
- $Q3_k = \sin(\beta_k) \cos(\gamma_k - \beta_k) - 2 \sin(\gamma_k)$

Nilai β_k dan γ_k diketahui dari jarak probe. $Z_{I,k}$ dan $Z_{R,k}$: spektrum kerapatan variansi untuk gelombang datang dan gelombang refleksi. Analisis spektrum (domain frekuensi) sangat baik untuk mengklasifikasikan kombinasi gelombang laut yang kompleks. Spektrum kerapatan energi dari rekaman probe diperoleh dengan menghitung nilai *auto spectra density*. Spektrum kerapatan gelombang transmisi yang diperoleh dari rekaman

probe, yang ditempatkan di belakang pemecah gelombang tiang, adalah P_4 .

Koefisien refleksi dihitung dengan menggunakan persamaan 10 sebagai berikut:

$$K_R = \left\{ \frac{\int_0^\infty S_R(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_I(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

Koefisien transmisi dihitung dengan menggunakan persamaan 11 sebagai berikut:

$$K_T = \left\{ \frac{\int_0^\infty S_T(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_I(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(11)$$

Dimana:

S_I : spektrum gelombang yang datang

S_R : refleksi

S_T : transmisi

Menggunakan prinsip kekekalan energi sebagai berikut:

$$\int_0^\infty S_I(\omega) d\omega = \int_0^\infty S_R(\omega) d\omega + \int_0^\infty S_T(\omega) d\omega + \int_0^\infty S_D(\omega) d\omega \dots\dots\dots(12)$$

Diperoleh hubungan sebagai berikut:

$$K_R^2 + K_T^2 + K_D^2 = 1 \dots\dots\dots(13)$$

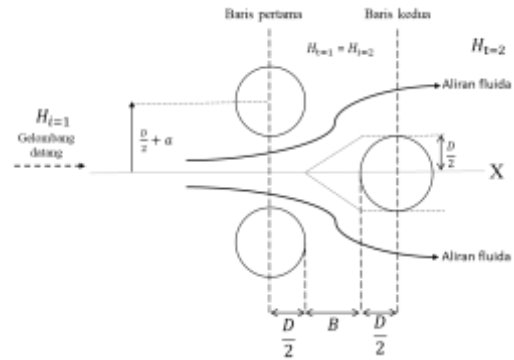
Dimana:

K_D : koefisien disipasi

Koefisien disipasi menunjukkan rasio energi yang diredam oleh tiang pancang dengan energi gelombang yang datang.

Pengembangan formula K_R dan K_T untuk pemecah gelombang tiang pancang baris ganda

Persamaan yang dikembangkan oleh (Suh et al., 2011) dan (Suvarna et al., 2020) untuk data eksperimen yang ada saat ini telah diinvestigasi. Sebagai bagian dari penelitian ini, telah dilakukan pengembangan untuk mendapatkan solusi independen dengan memodifikasi parameter porositas ($r(x)$ dan ϵ) untuk susunan tiang pancang dua baris. Untuk proses transmisi, persamaan 14 dapat digunakan secara iteratif untuk memprediksi nilai transmisi gelombang untuk setiap baris pada susunan tiang pancang yang lebih banyak (Gambar 4).



Gambar 3 Transmisi gelombang pada dua baris struktur tiang pancang.

Persamaan untuk koefisien transmisi dari susunan tiang pancang dua baris sebagai:

$$K_{T=1} = \frac{H_{t=1}}{H_{i=1}} \dots\dots\dots(14)$$

$$H_{t=1} = H_{i=2} \dots\dots\dots(15)$$

$$K_{T=2} = \frac{H_{t=2}}{H_{i=2}} = \frac{H_{t=2}}{H_{i=1} * K_{T=1}} \dots\dots\dots(16)$$

Nilai $r(x)$ untuk rentang $0 \leq r(x) \leq 1$ sebagai

$$r(x) = 1 - \frac{\sqrt{R^2 - x^2}}{R + a} \dots\dots\dots(17)$$

dengan $R = \frac{D}{2}$

Integrasi $r(x)$ menjadi $r_{mt}(x)$ sebagai

$$r_{mt}(x) = r(x) - r(x) * G_1(x) * G_2(x) * e \dots\dots\dots(18)$$

dengan $G_1(x) = \frac{\left(\frac{D}{B}\right)^2 + \left(\frac{D}{b}\right)^{-4}}{\left(\frac{B}{6x}\right)^2 + \left(\frac{b}{6x}\right)^{-4}}$, $G_2(x) =$

$$\frac{1 - \frac{\sqrt{R^2 + x^2}}{a + R}}{\left(2 + \left(\frac{x}{B}\right)^2\right) \left(2 + \left(\frac{x}{b}\right)^2\right)}$$
, and $e = 2,7182$ (nilai epsilon).

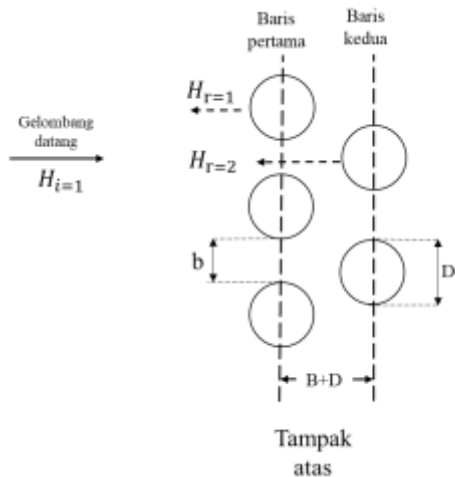
Perhitungan nilai integral ϵ menjadi:

$$\epsilon_{mt} = \frac{1}{D+B} \int_{-R}^{R+B} \frac{1}{r_{mt}(x)^2} dx \dots\dots\dots(19)$$

Untuk proses refleksi (Gambar 5), nilai ϵ akan dimodifikasi dengan mempertimbangkan jumlah baris tumpukan secara langsung sebagai:

$$r_{mr}(x) = r(x) - r(x) * G_1(x) * G_3(x) * e \dots\dots\dots(20)$$

dengan $G_3(x) = \frac{1 - \frac{\sqrt{R^2 + x^2}}{a + R}}{\left(\frac{1}{2} + \left(\frac{x}{B}\right)^2\right) \left(\frac{1}{2} + \left(\frac{x}{b}\right)^2\right)}$ dan $x = x \left(\frac{D}{D+B+D}\right)$.



Gambar 4 Pemantulan gelombang pada dua baris struktur tiang pancang.

Perhitungan nilai integral ϵ menjadi:

$$\epsilon_{mr} = \frac{1}{D+B+D} \int_{-R}^{R+B+D} \frac{1}{r_{mr}(x)^2} dx \dots\dots\dots(21)$$

dengan $x = x \left(\frac{D}{D+B+D} \right)$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

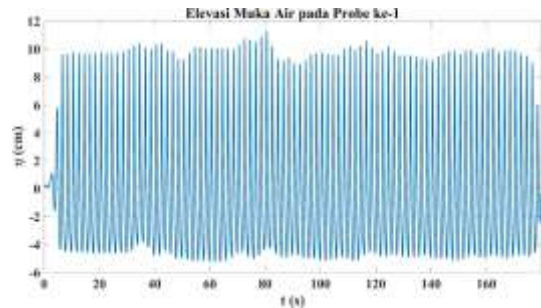
Keandalan Data

Eksperimen dilakukan selama 180 s dengan *sample rate* 0,04 s sehingga data yang terekam pada setiap *probe* sebanyak 4500 data. Skenario periode gelombang yaitu 2 s; 2,5 s; dan 3 s, sehingga jumlah gelombang yang terbentuk sekitar 90, 72, dan 60 gelombang. Jumlah gelombang yang akan dianalisis memenuhi rekomendasi minimal 10 gelombang, sehingga data model fisik dapat digunakan. Sebelum melakukan eksperimen, *probe* dan pembangkit gelombang dikalibrasi untuk kombinasi tinggi dan periode gelombang yang dipertimbangkan (Tabel 2)

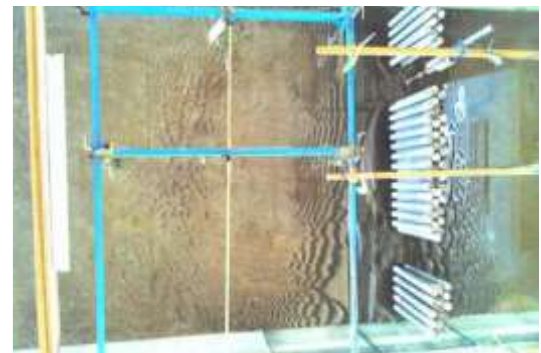
Tabel 2 Skenario kalibrasi pada model fisik.

No.	Skenario Kalibrasi	
	H_i (cm)	T (s)
1	15	2
2	15	2,5
3	15	3
4	20	2
5	20	2,5

Penentuan tinggi dan periode gelombang dalam simulasi model fisik tanpa pemecah gelombang digunakan untuk melihat kemampuan dari pembangkit gelombang dalam membentuk gelombang yang direkam oleh 7 *probe*. Rekaman masing-masing *probe* berupa *time series* elevasi muka air seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Metode *zero-up-crossing* dan spektrum digunakan untuk menentukan nilai tinggi dan periode gelombang.



(a)



(b)

Gambar 5 Rekaman elevasi muka air dari pengukuran (a) probe 1 dan (b) tangkapan kamera pada skenario 1.

Galat tinggi gelombang pada *probe* 1, 2, dan 3 di depan struktur tiang pancang berada pada rentang 2-6%, sedangkan pada *probe* 6 di belakang struktur tiang pancang sekitar 10% (Tabel 3). Proses simulasi model fisik, terdapat peredam gelombang yang ditempatkan di sisi belakang kolam gelombang untuk meredam pemantulan berulang dari dinding kolam gelombang. Selisih tinggi gelombang rata-rata antara pada *probe* 1, 2, dan 3 (di depan struktur tiang pancang) dengan *probe* 4 (di belakang struktur tiang pancang) sekitar 5%. Hal ini menunjukkan bahwa peredam gelombang bekerja dengan baik, sehingga nilai prosentase pemantulan balik gelombang datang oleh dinding pada sisi kolam percobaan kurang dari 5%.

Tabel 3 Galat rata-rata tinggi dan periode gelombang pada proses kalibrasi.

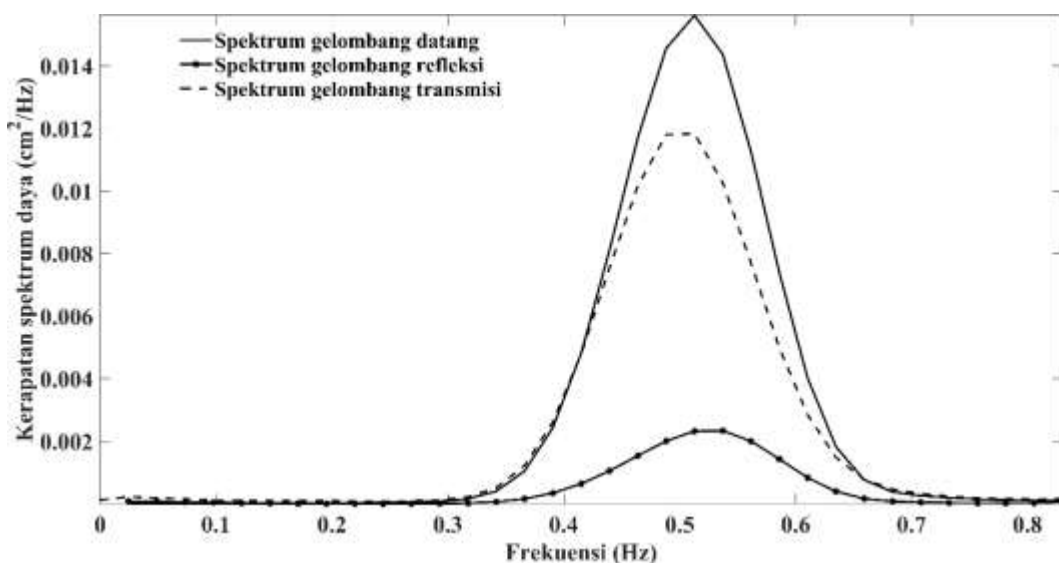
Galat Rata-rata Tinggi Gelombang (%)						
Probe	Skenario Percobaan Kalibrasi					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
1	-2,83	-5,21	-6,83	-6,12	-4,69	-5,13
2	-2,28	-7,19	-7,09	-5,24	-6,60	-5,68
3	-5,71	-6,01	-7,07	-8,74	-8,06	-7,12
4	-11,90	-4,09	-9,61	-12,40	-12,09	-10,02

Galat Rata-rata Periode Gelombang (%)						
Probe	Skenario Percobaan Kalibrasi					Rata-rata
	1	2	3	4	5	
1	0,05	0,21	-0,16	0,16	-0,02	0,05
2	0,02	0,01	-0,11	-0,16	-0,02	-0,05
3	0,05	0,21	-0,14	0,14	0,20	0,09
4	0,07	0,05	-1,93	0,05	-4,21	-1,19

Probe 1, 2, dan 3 yang berada di depan struktur tiang pancang memiliki galat periode gelombang dalam rentang 0-0,1%. Hal ini menunjukkan bahwa dalam penjalaran gelombang, periode gelombang tetap dan asumsi bahwa periode tidak berubah dapat diterima dalam penjalaran gelombang. Selain itu, nilai rata-rata dan median yang sama menunjukkan bahwa distribusi tinggi gelombang mengikuti distribusi normal. Sementara itu, probe 4 yang berada di belakang struktur tiang pancang memiliki galat periode gelombang kurang dari 2%,

Hasil Simulasi Model Fisik

Aplikasi metode Mansard dan Funke untuk P_1 , P_2 , dan P_3 yang ditempatkan di depan struktur tiang pancang untuk menentukan spektrum energi gelombang datang dan refleksi. Hasil penerapan metode Mansard-Funke pada skenario 1 ditunjukkan pada Gambar 7. Aplikasi analisis spektrum untuk P_4 yang ditempatkan di belakang struktur tiang pancang untuk menentukan spektrum energi gelombang transmisi.



Gambar 6 Spektrum gelombang yang datang, refleksi, dan transmisi.

Karakterisasi spektrum energi yang datang, refleksi, dan transmisi dapat menghasilkan beberapa parameter gelombang (Tabel 4). Energi gelombang setelah melewati pemecah gelombang

tiang berkurang 82%. Perubahan periode, panjang, dan kecepatan gelombang setelah melewati pemecah gelombang dapat diabaikan (<3% perubahan).

Tabel 4 Parameter gelombang dari spektrum gelombang yang datang, refleksi, dan transmisi.

Parameter Gelombang	Gelombang Datang	Gelombang Refleksi	Gelombang Transmisi
Energi gelombang (erg/cm ²)	23950,08	3787,22	19553,64
Tinggi gelombang (cm)	19,76	7,86	17,86
Periode gelombang (s)	1,96	1,95	2,00
Panjang gelombang (cm)	424,73	422,07	435,61
Kecepatan gelombang (cm/s)	217,09	216,83	218,12

Jumlah total skenario percobaan adalah 72 dan 2 data rusak, oleh karena itu jumlah total skenario yang dianalisis adalah 70 (Lampiran 1). Persentase kesalahan periode gelombang dari 70 skenario yang ditetapkan adalah <5% dengan rata-rata 2,28% dan deviasi standar 0,18% (mengikuti ambang batas yang ditetapkan dari proses kalibrasi). Periode gelombang transmisi dan refleksi yang dihasilkan adalah <5%. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa periode, panjang, dan kecepatan gelombang tetap dalam proses refleksi dan transmisi gelombang.

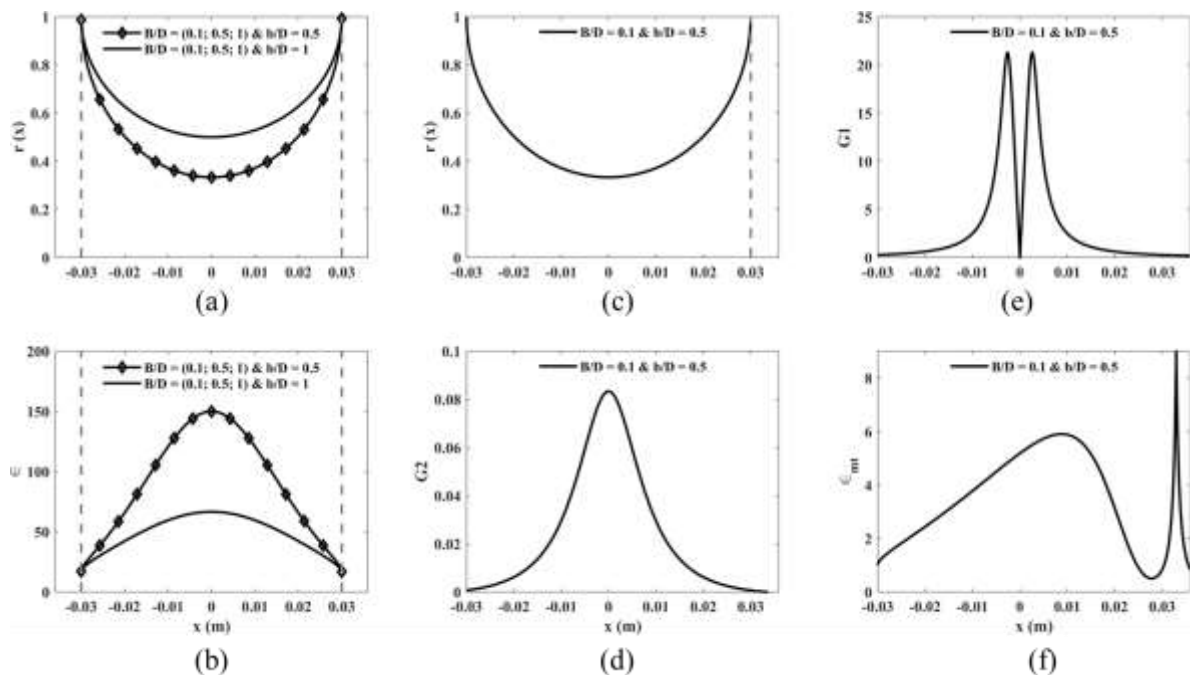
Validasi persamaan semiempiris modifikasi untuk koefisien transmisi

Persamaan semiempiris yang diusulkan oleh (Suvarna et al., 2020) memberikan prediksi yang lebih akurat dibandingkan dengan (Chiang, 1992); (Kriebel, 1992); (Suh et al., 2011) untuk nilai K_T dan K_R pada kasus pemecah gelombang tiang pancang satu baris. Oleh karena itu, solusi semiempiris yang diusulkan oleh (Suvarna et al., 2020) telah

dikembangkan untuk memprediksi koefisien refleksi dan transmisi pemecah gelombang yang dilewati gelombang monokromatik untuk susunan tiang pancang dua baris.

Modifikasi dilakukan untuk memprediksi nilai K_R dan K_T untuk dua tiang pancang yang tersusun secara selang-seling. Hasil dari analisis signifikansi bahwa variabel G tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai koefisien refleksi dan transmisi. Oleh karena itu, dalam mengembangkan rumus koefisien refleksi dan transmisi perlu mempertimbangkan variabel B/D , b/D , dan N .

Dalam proses transmisi, persamaan 14 diterapkan dua kali pada perhitungan K_T untuk pemecah gelombang tiang pancang dua baris. Gelombang yang transmisi dari baris pertama menjadi gelombang datang untuk baris kedua, dan proses ini diulangi untuk baris berikutnya (Gambar 8). Dengan demikian, persamaan 14 dapat digunakan secara iteratif untuk memprediksi nilai transmisi gelombang untuk setiap baris pada susunan tiang pancang yang lebih banyak.



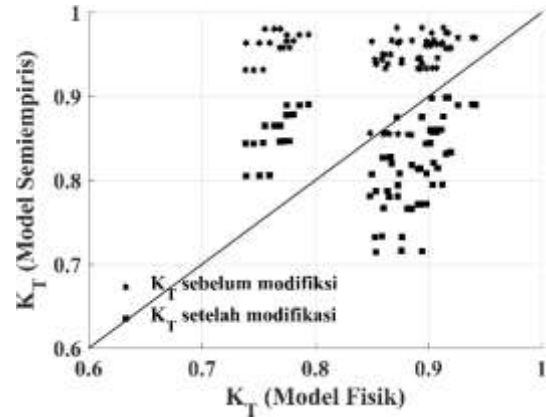
Gambar 7 Visualisasi rumus (a) r dan (b) ϵ . Visualisasi (c) r , (d) G_1 , (e) G_2 , (f) ϵ_{mt} untuk $B/D = 0,1$; $b/D = 0,5$.

Persamaan untuk koefisien transmisi dari susunan tiang pancang dua baris seperti persamaan 16. Nilai porositas spasial (ϵ) akan ditambahkan dengan faktor jarak antara pemecah gelombang tiang pertama dan kedua (Gambar 8). Nilai ϵ berbanding terbalik dengan (x) ($\epsilon \sim \frac{1}{r(x)^2}$). Nilai maksimum dari $r(x)$ adalah di mana $x = \{-R, R\}$ (Gambar 8), hal ini dikarenakan perhitungan pada ujung tiang menghasilkan nilai porositas spasial yang minimum. Nilai minimum $r(x)$ ketika diamati pada titik 0 maka nilai $\epsilon = a/A$ sama dengan nilai porositas.

Nilai $r(x)$ bergantung pada dimensi tiang pemecah gelombang, yaitu b/D (Gambar 8). Jika b/D menurun, maka nilai porositas meningkat. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan semakin dekatnya jarak tiang pancang pada bidang sagital, fluida mengalir lebih cepat melalui tiang pancang (distribusi porositas spasial lebih runcing). Pengaruh B/D terhadap nilai $r(x)$ pada persamaan 17 tidak dipertimbangkan karena susunan tiang pancang hanya satu baris. Jika tiang pancang disusun dalam dua baris dan disusun secara selang-seling, maka ada penghalang dari baris kedua dalam proses transmisi. Integrasi $r(x)$ menjadi r_{mt} (x) untuk perhitungan ϵ_{mt} yang mempertimbangkan pengaruh B/D .

Menambahkan suku $G_1(x) * G_2(x)$ akibat struktur tiang pancang baris kedua (sebelum mengenai tiang pancang kedua ($x = D + B$)). Perhitungan nilai integral ϵ_{mt} juga mengubah batas integral sesuai dengan batas perhitungan x . Suku G_1 menunjukkan formulasi untuk dimensi tiang pancang, yang berisi tiga parameter dimensi tiang pancang: b , B , dan D (Gambar 8). Suku G_2 menunjukkan perumusan pengaruh jarak tiang pancang. Jika posisi tiang pancang baris kedua semakin jauh, maka nilai G_2 semakin kecil (pengaruh tiang pancang baris kedua semakin kecil).

Modifikasi ϵ menjadi ϵ_{mt} untuk perhitungan K_T pada susunan tiang pancang dua baris telah dilakukan. Perbandingan perhitungan K_T dari hasil model fisik dengan model semi empiris sebelum modifikasi (Suvarna et al., 2020) dan setelah modifikasi. Nilai K_T dengan model semiempiris setelah modifikasi lebih mendekati nilai model fisik. Nilai K_T model semiempiris sebelum modifikasi cenderung *overestimate* (nilai estimasi lebih tinggi dari nilai aktual) dibandingkan dengan nilai K_R model fisik. Perhitungan K_T pada susunan tiang pancang dua baris telah dilakukan. Nilai K_T dengan model semiempiris setelah modifikasi lebih mendekati nilai model fisik (Gambar 9).

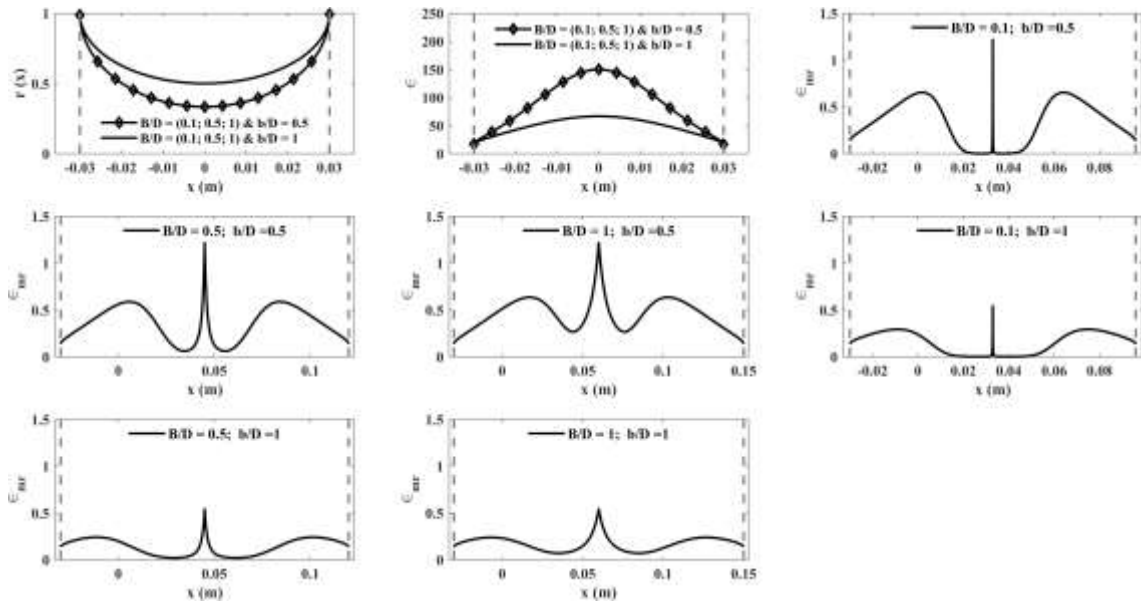


Gambar 8 Perbandingan nilai K_T antara model fisik dan model semiempiris untuk susunan tiang pancang dua baris.

Validasi persamaan semiempiris modifikasi untuk koefisien refleksi

Modifikasi koefisien refleksi dilakukan pada struktur tiang pancang dua baris (Gambar 10). Nilai ϵ akan dimodifikasi dengan mempertimbangkan jumlah baris tiang secara langsung, sehingga ditambahkan faktor akibat tiang pancang baris kedua. Penambahan suku $G_1(x) * G_3(x)$ akibat struktur tiang pancang baris kedua (setelah melewati tiang pancang baris kedua ($x = D + B + D$)). Perhitungan nilai integral ϵ juga mengubah batas integral sesuai dengan batas perhitungan x , sehingga dalam perhitungan K_R menjadi persamaan 21.

Suku G_3 menunjukkan perumusan pengaruh jarak tiang pancang pada jarak $x = D + B + D$. Jika posisi tiang pancang baris kedua semakin jauh, nilai G_3 semakin kecil, maka pengaruh tiang pancang baris kedua semakin kecil (Gambar 10). Integrasi ϵ_{mr} pada persamaan 21 menunjukkan proses distribusi porositas spasial dari susunan tiang pancang dua baris. Nilai ϵ_{mr} maksimum pada saat $x = \{0, R + B/2, 2R + B\}$, yang mengindikasikan pengamatan pada titik pusat tiang pancang dengan nilai porositas maksimum (aliran fluida maksimum). Nilai maksimum di sekitar $x = R + B/2$ disebabkan oleh terhalangnya susunan tiang pancang kedua. Nilai ϵ_{mr} minimum ketika diamati di sekitar $x = \{R, R, R + B, 3R + B\}$, yang mengindikasikan pengamatan di titik ujung tiang pancang dengan nilai porositas minimum (aliran fluida minimum). Visualisasi persamaan 21 untuk variasi B/D dan b/D dapat dilihat pada Gambar 10, distribusi porositas secara spasial dipengaruhi oleh B/D dan b/D . Modifikasi ϵ_{mr} menunjukkan proses aliran fluida (porositas) pada susunan tiang pancang dua baris konsisten dengan susunan satu baris.



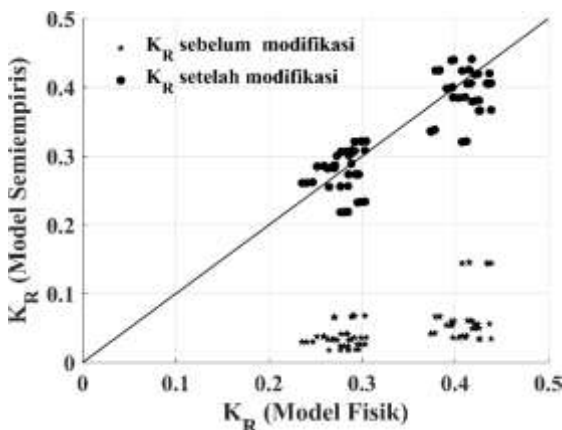
Gambar 9 Visualisasi persamaan spasial porositas dalam proses refleksi.

Modifikasi ϵ menjadi ϵ_{mr} untuk perhitungan K_R (Gambar 11) pada susunan tiang pancang dua baris telah dilakukan. Perbandingan perhitungan K_R dari hasil model fisik dengan model semiempiris sebelum modifikasi (Suvarna et al., 2020) dan setelah modifikasi. Nilai K_R estimasi dari model semiempiris sebelum modifikasi cenderung *underestimate* (nilai estimasi lebih rendah dari nilai aktual) dibandingkan dengan nilai K_R model fisik. Estimasi K_R sebelum modifikasi *overestimate* karena belum memperhatikan pengaruh dari tiang pancang baris kedua. Sehingga, estimasi K_R model semiempiris setelah modifikasi lebih mendekati nilai model fisik.

$RMSE = 0,160$ dan peningkatan $R^2 = 0,184$. Oleh karena itu, modifikasi yang dilakukan penting untuk mendapatkan estimasi nilai K_T dan K_R yang lebih akurat. Formulasi koefisien refleksi dan transmisi yang dikembangkan dapat digunakan untuk penempatan struktur tiang pancang yang mempertimbangkan parameter gelombang (H , T , dan d) dan dimensi tiang pancang (B , b , dan D).

Tabel 5 Kemampuan estimasi K_T dan K_R dari model semiempiris.

Model Semiempiris	RMSE	R ²
Sebelum modifikasi	0,226	0,747
Setelah Modifikasi	0,066	0,931



Gambar 10 Perbandingan nilai K_R antara model fisik dan model semiempiris untuk susunan tiang pancang dua baris.

Estimasi nilai K_T dan K_R dengan menggunakan model semiempiris pada susunan tiang pancang dua baris sebelum dan sesudah modifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 5, menghasilkan penurunan

KESIMPULAN

Studi eksperimental yang dilakukan pada pemecah gelombang tiang pancang menunjukkan bahwa ada parameter gelombang yang tetap dan berubah setelah proses refleksi dan transmisi. Parameter gelombang yang dianggap tetap (<5% perubahan) setelah pemantulan dan transmisi gelombang adalah periode gelombang, panjang gelombang, dan kecepatan gelombang. Sementara itu, tinggi gelombang (energi) akan berkurang setelah pemantulan dan transmisi. Interaksi parameter gelombang (H/L) dengan dimensi tiang pancang (B/D , b/D , dan G) mempengaruhi perubahan koefisien refleksi, transmisi, dan disipasi gelombang. Pengembangan parameter variasi porositas spasial telah dilakukan berdasarkan grid staggered dua baris. Estimasi K_T diperoleh dengan menghitung nilai ϵ_{mt} yang diperoleh dari nilai integral $r(x)$ yang dimodifikasi menjadi $r_{mt}(x)$ sehingga mengandung tiga dimensi tiang, yaitu B , b , dan D . Modifikasi terhadap ϵ_{mr} juga dilakukan

untuk estimasi K_R pada susunan tiang pancang dua baris. Kemampuan estimasi K_R dan K_T dari model semiempiris setelah modifikasi lebih akurat ($R^2 = 0,931$ dan $RMSE = 0,066$). Oleh karena itu, solusi semiempiris yang diusulkan dapat digunakan untuk memprediksi nilai koefisien K_R dan K_T yang terpapar gelombang monokromatik.

Hasil estimasi model semiempiris menunjukkan bahwa tinggi gelombang transmisi yang melewati pemecah gelombang tiang pancang selang-seling lebih rendah dibandingkan tinggi gelombang transmisi yang melewati tiang pancang satu baris. Hal ini menunjukkan bahwa formasi selang-seling meningkatkan efektifitas pemecah gelombang dalam mengurangi tinggi gelombang transmisi. Sebaliknya, tinggi gelombang refleksi dari pemecah gelombang tiang pancang dengan susunan selang-seling lebih besar daripada yang dihasilkan oleh susunan satu baris.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, F. A. R., Suprijo, T., Diastomo, H., & Napitupulu, G. (2022). Numerical Modelling of Wave Attenuation in Pile Breakwater. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1047(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1047/1/012029>
- Angnuureng, B. D., Adade, R., Chuku, E. O., Dzantor, S., Brempong, E. K., & Mattah, P. A. D. (2023). Effects of coastal protection structures in controlling erosion and livelihoods. *Heliyon*, 9(10). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20633>
- Gardner, J. D., Townend, I. H., & Fleming, C. A. (1987). Design Of A Slotted Vertical Screen Breakwater. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 3, 1881–1893. <https://doi.org/10.1061/9780872626003.138>
- Hayashi, T., Hattori, M., & Shirai, M. (2018). Closely Spaced Pile Breakwater as a Protection Structure Against Beach Erosion. *077*, 11(1), 149–160. <https://doi.org/10.1080/05785634.1968.11924077>
- Hutchinson, P. S., & Raudkivi, A. J. (1985). Case History of a Spaced Pile Breakwater At Half Moon Bay Marina, Auckland, New Zealand. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 3, 2530–2535. <https://doi.org/10.1061/9780872624382.170>
- Isaacson, M., Baldwin, J., & Bhat, S. (1998). Wave Propagation Past a Pile-Restrained Floating Breakwater. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 8(04). <https://dx.doi.org/>
- Kriebel, D. L. (1992). Nonlinear wave interaction with a vertical circular cylinder. Part II: Wave run-up. *Ocean Engineering*, 19(1), 75–99. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(92\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0029-8018(92)90048-9)
- Mani, J. S., & Jayakumar, S. (1995). Wave Transmission by Suspended Pipe Breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 121(6), 335–338. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1995\)121:6\(335\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1995)121:6(335))
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least squares Method. *Int. Conf. on Coastal Engineering (ICCE), 1980, Sydney*. <https://doi.org/10.1061/9780872622647.008>
- Napitupulu, G., Suprijo, T., Khadami, F., Abdullah, F. A. R., Sesami, H., Poerbandono, Prasetyo, A., Ginting, J., & Simanjuntak, E. (2023). Kajian Perilaku Gelombang Akibat Adanya Struktur Tiang Pancang Silinder Melalui Analisis Spektrum Energi. *Jurnal Ilmu Dan Teknologi Kelautan Tropis*, 15(1), 13–30. <https://doi.org/10.29244/JITKT.V15I1.42612>
- Rageh, O. S., & Koraim, A. S. (2010). Hydraulic performance of vertical walls with horizontal slots used as breakwater. *Coastal Engineering*, 57(8), 745–756. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.03.005>
- Rao, S., & Rao, N. B. S. (2012). Laboratory Investigation on Wave Transmission Through Suspended Perforated Pipes. *ISH Journal of Hydraulic Engineering*, 7(1), 23–32. <https://doi.org/10.1080/09715010.2001.10514686>
- Ragheb, R. A., Ehab, M., Mohamed, H., Fahmy, R., Sami, M., Bassily, M., & Mohamed, M. (2024). Waterfront development through a lens of sustainable smart agenda: Breathing life into El-Anfoushy touristic promenade. *J. Urban Dev. Manag*, 3(1), 43–73. <https://doi.org/10.56578/judm030104>
- Rui, S., Zhang, H., Xu, H., Zha, X., Xu, M., & Shen, K. (2024). Seabed structures and foundations related to deep-sea resource development: a review based on design and research. *Deep Underground Science and Engineering*, 3(2), 131–148. <https://doi.org/10.1002/dug2.12042>
- Saengsupavanich, C., Ariffin, E. H., Yun, L. S., & Pereira, D. A. (2022). Environmental impact of submerged and emerged breakwaters. *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12626>
- Sathyanarayana, A. H., Suvarna, P. S., Umesh, P., & Shirlal, K. G. (2021). Performance characteristics of a conical pile head breakwater: An experimental study. *Ocean Engineering*, 235, 109395.

- <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.109395>
- Suh, K. D., Ji, C. H., & Kim, B. H. (2011). Closed-form solutions for wave reflection and transmission by vertical slotted barrier. *Coastal Engineering*, 58(12), 1089–1096. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2011.06.001>
- Suh, K.-D., Shin, S., & Cox, D. T. (2006). Hydrodynamic Characteristics of Pile-Supported Vertical Wall Breakwaters. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 132(2), 83–96. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2006\)132:2\(83\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2006)132:2(83))
- Suvarna, P. S., Sathyanarayana, A. H., Umesh, P., & Shirlal, K. G. (2021). Hydraulic performance of perforated enlarged pile head breakwaters through laboratory investigation. *Ocean Engineering*, 241, 110089. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2021.110089>
- Truitt, C. L., & Herbich, J. B. (1987). TRANSMISSION OF RANDOM WAVES THROUGH PILE BREAKWATERS. *Proceedings of the Coastal Engineering Conference*, 3, 2303–2313. <https://doi.org/10.1061/9780872626003.169>
- Ye, H., Fan, Y., Bai, W., & Jiang, C. (2024). Experimental study of coupling response characteristics of offshore monopiles, seabed, and waves in various sea conditions. *Scientific Reports*, 14(1), 28560. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-79858-2>

*Transformasi Gelombang Akibat Pemecah Gelombang Tiang Pancang Dua Baris Selang-Seling
(Totok Suprijo, Gandhi Napitupulu, Juventus Welly Ginting, Eduardo Simanjuntak)*

LAMPIRAN

Lampiran 1. Nilai tinggi gelombang datang, refleksi, dan transmisi pada percobaan model fisik.

No.	$\frac{B}{D}$	$\frac{b}{D}$	G(cm)	H (cm)	T (s)	H_i	H_r	H_t	K_r	K_t
1	0,1	0,5	33	20	2	19,76	7,86	17,86	0,40	0,90
2	0,1	0,5	33	15	2	16,09	6,87	14,07	0,43	0,87
3	0,1	0,5	33	20	3	18,41	5,15	14,52	0,28	0,79
4	0,1	0,5	33	15	3	14,56	3,90	13,84	0,27	0,95
5	0,1	0,5	50	20	2	19,74	7,85	18,20	0,40	0,92
6	0,1	0,5	50	15	2	16,08	6,84	14,45	0,43	0,90
7	0,1	0,5	50	20	3	18,33	5,07	14,68	0,28	0,80
8	0,1	0,5	50	15	3	14,43	3,84	13,57	0,27	0,94
9	0,1	0,5	58,1	20	2	19,86	8,16	17,34	0,41	0,87
10	0,1	0,5	58,1	15	2	16,14	7,08	13,72	0,44	0,85
11	0,1	0,5	58,1	20	3	18,33	5,15	14,21	0,28	0,78
12	0,1	0,5	58,1	15	3	14,55	4,01	13,58	0,28	0,93
13	0,5	0,5	58,1	20	2	19,45	7,96	17,33	0,41	0,89
14	0,5	0,5	58,1	15	2	15,84	6,88	13,83	0,43	0,87
15	0,5	0,5	58,1	20	3	18,09	5,04	14,31	0,28	0,79
16	0,5	0,5	58,1	15	3	14,23	3,73	13,55	0,26	0,95
17	0,5	0,5	50	20	2	19,56	8,12	17,24	0,42	0,88
18	0,5	0,5	50	15	2	15,94	6,99	13,79	0,44	0,87
19	0,5	0,5	50	20	3	18,21	5,11	14,21	0,28	0,78
20	0,5	0,5	50	15	3	14,26	3,79	13,63	0,27	0,96
21	0,5	0,5	33	20	2	19,52	7,96	16,79	0,41	0,86
22	0,5	0,5	33	15	2	15,84	6,90	13,44	0,44	0,85
23	0,5	0,5	33	20	3	18,23	5,34	14,02	0,29	0,77
24	0,5	0,5	33	15	3	14,37	3,99	13,32	0,28	0,93
25	1	0,5	33	20	2	19,54	8,16	16,68	0,42	0,85
26	1	0,5	33	15	2	15,79	6,90	13,46	0,44	0,85
27	1	0,5	33	20	3	18,08	5,30	13,90	0,29	0,77
28	1	0,5	33	15	3	14,14	3,89	13,16	0,28	0,93
29	1	0,5	50	20	2	19,26	7,63	16,88	0,40	0,88
30	1	0,5	50	15	2	15,60	6,58	13,40	0,42	0,86
31	1	0,5	50	20	3	18,04	5,22	14,13	0,29	0,78
32	1	0,5	50	15	3	14,61	4,12	13,96	0,28	0,96
33	1	0,5	58,1	20	2	19,34	7,71	17,29	0,40	0,89
34	1	0,5	58,1	15	2	15,75	6,69	13,80	0,42	0,88
35	1	0,5	58,1	20	3	18,03	5,05	14,32	0,28	0,79
36	1	0,5	58,1	15	3	14,18	3,75	13,57	0,26	0,96
37	0,1	1	33	20	2	18,84	7,13	17,24	0,38	0,92
38	0,1	1	33	15	2	15,13	6,24	13,58	0,41	0,90
39	0,1	1	33	20	3	18,19	5,51	14,57	0,30	0,80
40	0,1	1	33	15	3	14,08	3,84	13,65	0,27	0,97
41	0,1	1	50	20	2	18,57	6,96	17,24	0,37	0,93
42	0,1	1	50	15	2	15,03	6,13	13,56	0,41	0,90
43	0,1	1	50	20	3	18,09	5,41	14,71	0,30	0,81

No.	$\frac{B}{D}$	$\frac{b}{D}$	G(cm)	H (cm)	T (s)	H_i	H_r	H_t	K_r	K_t
44	0,1	1	50	15	3	13,91	3,70	13,61	0,27	0,98
45	0,1	1	58,1	20	2	18,40	6,90	17,09	0,37	0,93
47	0,1	1	58,1	20	3	18,38	5,36	14,79	0,29	0,80
48	0,1	1	58,1	15	3	13,82	3,64	13,65	0,26	0,99
49	0,5	1	33	20	2	19,36	7,69	17,24	0,40	0,89
50	0,5	1	33	15	2	15,39	6,50	13,26	0,42	0,86
51	0,5	1	33	20	3	18,06	4,74	14,47	0,26	0,80
52	0,5	1	33	15	3	14,13	3,49	13,44	0,25	0,95
53	0,5	1	50	20	2	19,10	7,56	17,05	0,40	0,89
54	0,5	1	50	15	2	15,37	6,54	13,21	0,43	0,86
55	0,5	1	50	20	3	18,20	5,02	14,72	0,28	0,81
56	0,5	1	50	15	3	14,07	3,49	13,69	0,25	0,97
57	0,5	1	58,1	20	2	18,98	7,42	17,23	0,39	0,91
58	0,5	1	58,1	15	2	15,22	6,37	13,19	0,42	0,87
59	0,5	1	58,1	20	3	18,12	4,76	14,50	0,26	0,80
60	0,5	1	58,1	15	3	14,17	3,42	13,44	0,24	0,95
61	1	1	33	20	2	19,00	7,28	16,93	0,38	0,89
62	1	1	33	15	2	15,14	6,32	12,93	0,42	0,85
63	1	1	33	20	3	18,01	4,97	14,57	0,28	0,81
64	1	1	33	15	3	14,14	3,63	13,28	0,26	0,94
65	1	1	50	20	2	18,96	7,27	16,93	0,38	0,89
66	1	1	50	15	2	15,05	6,22	13,00	0,41	0,86
67	1	1	50	20	3	18,01	4,97	14,57	0,28	0,81
68	1	1	50	15	3	14,15	3,66	13,30	0,26	0,94
69	1	1	58,1	20	2	18,85	7,14	16,93	0,38	0,90
70	1	1	58,1	15	2	14,10	3,57	13,14	0,25	0,93