

KAJIAN PERILAKU GELOMBANG AKIBAT ADANYA STRUKTUR TIANG PANCANG SILINDER MELALUI ANALISIS SPEKTRUM ENERGI

STUDY OF WAVE BEHAVIOR DUE TO CYLINDER PILE STRUCTURE THROUGH ENERGY SPECTRUM ANALYSIS

Gandhi Napitupulu¹, Totok Suprijo^{2*}, Faruq Khadami², Faizal Ade R. Abdullah^{2,3},
Hening L. A. Sesami⁴, Poerbandono⁵, Adi Prasetyo⁶, Juventus W. R. Ginting⁶ &
Eduardo M. Simanjuntak⁶

¹Department of Earth Sciences, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia

²Oceanography Research Group, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40116, Indonesia

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

⁴Department of Oceanography, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia

⁵Hydrography Research Group, Faculty of Earth Sciences and Technology, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40116, Indonesia

⁶Experimental Station for Coastal Engineering, The Ministry of Public Works and Housing Buleleng, Bali, 81116, Indonesia

Email: totok.suprijo@itb.ac.id

ABSTRACT

Breakwater structures are widely used for coastal protection from the blows of ocean waves that propagate to coastal areas. One of the breakwater innovations being developed is the pile structure. Piles are a replication of mangrove tree trunks that can reduce wave energy, so it is necessary to test their effectiveness in reducing wave energy. So the purpose of this study is to analyze the effectiveness of the pile structure by analyzing the wave behavior before and after colliding with the pile structure based on the wave theory division. Physical laboratory simulations have been carried out to obtain wave data that interacts with the pile structure. Furthermore, energy spectrum analysis is used to determine the energy spectrum of the incident wave, reflection and transmission of wave probe measurements in the form of time series data. Each energy spectrum is used to see the reflection and transmission capabilities of the pile structure from the reflection and transmission coefficients. The reflection and transmission coefficient values were estimated using a third degree polynomial equation resulting in $RMSE = 0.087$ and $RMSE = 0.051$ with the basic wave parameters being variable, namely wave height, wave period and water depth. The critical point of the polynomial equation shows the minimum reflection and transmission coefficient values when it is in the Cnoidal region and maximum when it is in the 2nd order Stokes region.

Keywords: *reflected wave, transmission wave, wave parameter, spectrum energy*

ABSTRAK

Struktur pemecah gelombang banyak dimanfaatkan untuk perlindungan pantai dari hantaman gelombang laut yang berpropagasi ke daerah pesisir pantai. Salah satu inovasi pemecah gelombang yang sedang dikembangkan yaitu struktur tiang pancang. Tiang pancang merupakan replikasi batang pohon bakau yang dapat meredam energi gelombang. Tujuan dalam penelitian ini untuk menganalisis efektivitas struktur tiang pancang dengan menganalisis perilaku gelombang sebelum dan sesudah bertabrakan dengan struktur tiang pancang berdasarkan pembagian teori gelombang. Simulasi laboratorium fisik telah dilakukan untuk mendapatkan data gelombang yang berinteraksi dengan struktur tiang pancang. Selanjutnya, dilakukan analisis spektrum energi untuk menentukan spektrum energi gelombang datang, refleksi dan transmisi dari pengukuran *wave probe* berupa data *time series*. Masing-masing spektrum energi digunakan untuk melihat kemampuan refleksi dan transmisi dari struktur tiang pancang dari koefisien refleksi dan transmisi. Nilai koefisien refleksi dan transmisi diestimasi dengan persamaan polinomial derajat tiga menghasilkan $RMSE = 0,087$ dan $RMSE = 0,051$ dengan variabel parameter dasar gelombang yaitu tinggi gelombang, periode gelombang dan kedalaman perairan. Titik kritis dari persamaan polinomial menunjukkan nilai koefisien refleksi dan transmisi minimum ketika berada pada daerah Cnoidal dan maksimum ketika berada pada daerah Stokes orde-2.

Kata kunci: gelombang refleksi, gelombang transmisi, parameter gelombang, spektrum energi

I. PENDAHULUAN

Pantai merupakan wilayah yang harus dilindungi keindahan alamnya dan bagian dari lingkungan kawasan pesisir yang dinamis dan selalu berubah. Proses perubahan yang terjadi di pantai merupakan akibat kombinasi berbagai gaya meliputi angin, pasang surut dan gelombang. Proses perubahan ini berupa sedimentasi, 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 kolom air dari gelombang (CERC, 1973).

Pilihan pemecah gelombang yang sesuai adalah salah satu aspek utama dari struktur pelindung pantai. Ada beberapa faktor yang memengaruhi pemilihan jenis pemecah gelombang seperti tinggi gelombang, periode gelombang, kedalaman air, kondisi pondasi tanah dasar laut, material yang tersedia di atau dekat lokasi, dan peralatan untuk konstruksi (Suh *et al.*, 2006). Perlindungan terhadap pantai berlumpur dibutuhkan untuk mencegah dan mengurangi kerusakan akibat gelombang laut dan pergerakan sedimen lepas pantai dengan menggunakan pemecah gelombang terapung atau pemecah gelombang tiang pancang, seperti Mani & Jayakumar (1995); Rao *et al.* (1999); Suh *et al.* (2011); Suvarna *et al.* (2020). Struktur tiang pancang merupakan replikasi batang bakau dalam mengurangi erosi. Percobaan laboratorium fisik oleh Abdullah *et al.* (2019) menyebutkan bahwa susunan pohon bakau sepanjang 3 m, energi gelombang mampu meredam energi gelombang hingga 64%.

Karakteristik transmisi gelombang melewati struktur tiang pancang telah dianalisis oleh beberapa peneliti, seperti Costello (1952); Wiegel (1960); Hayashi *et al.* (1966); Truitt & Herbich (1986); Herbich &

Douglas (1988); Herbich (1990); Suh *et al.* (2006); Zhu *et al.* (2015); Suvarna *et al.* (2020); Sathyanarayana *et al.* (2021) mengevaluasi pengaruh diameter tiang pancang, jarak antara tiang pancang, dan jumlah baris tiang pancang. Jarak tiang pancang berbanding terbalik dengan redaman gelombang, sedangkan diameter tiang pancang, jumlah baris tiang pancang dan kemiringan gelombang berbanding lurus. (Van Weele & Herbich, 1972) membuat variasi beberapa baris tiang, susunan tiang secara *staggered* menghasilkan redaman gelombang yang lebih baik dengan refleksi yang lebih sedikit daripada konfigurasi biasa.

Kakuno & Liu (1993) mempelajari dispersi gelombang melewati struktur tiang pancang satu baris mengembangkan metode teoritis memodelkan aliran di dekat tiang pancang. Truitt & Herbich (1986); El Serafy *et al.* (2014); Simanjuntak *et al.* (2019); Achiari *et al.* (2020); Abdullah *et al.* (2022) mempelajari refleksi dan transmisi gelombang di sekitar tiang pancang tanpa memperhatikan teori gelombang yang terbentuk dari variasi parameter dasar gelombang. Parameter dasar gelombang yaitu tinggi gelombang, periode gelombang dan kedalaman perairan. Truitt & Herbich (1986) menyarankan, dalam menganalisis transmisi gelombang perlu diperhatikan kemiringan gelombang atau periode gelombang. Dari literatur yang tersedia, seperti Truitt & Herbich (1986); El Serafy *et al.* (2014); Simanjuntak *et al.* (2019); Achiari *et al.* (2020); Abdullah *et al.* (2022) belum secara jelas memperhatikan teori gelombang dalam proses refleksi dan transmisi ketika melewati struktur tiang pancang.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku refleksi dan transmisi gelombang berdasarkan variasi parameter dasar gelombang menggunakan analisis spektrum yang memperhatikan batas teori gelombang berdasarkan variasi parameter dasar gelombang. Tipe tiang pancang yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan tiang pancang berbentuk

silinder. Variasi tinggi dan periode gelombang divariasikan untuk melihat transformasi gelombang sebelum dan setelah melewati struktur tiang pancang. Uji model fisik dilakukan di dalam kolam gelombang dua dimensi dengan gelombang yang dibangkitkan merupakan gelombang reguler. Hasil penelitian dapat dimanfaatkan untuk perencanaan peletakan struktur tiang pancang berdasarkan karakteristik gelombang datang yang berada di sekitar pantai sehingga menghasilkan transmisi dan refleksi gelombang yang minimum.

II. METODE PENELITIAN

2.1. Pengambilan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data elevasi gelombang secara *time series* diperoleh dari hasil percobaan laboratorium fisik dua dimensi milik Balai Pantai Buleleng Bali (Gambar 1). Elevasi gelombang akan tercatat melalui lima sensor *wave probe*, tiga sensor dipasang di depan struktur tiang pancang untuk melihat perilaku refleksi gelombang dan dua sensor di belakang sensor struktur tiang pancang untuk melihat perilaku transmisi gelombang.

Kolam simulasi yang digunakan dalam simulasi dengan panjang 40m, lebar 3m dan kedalaman 0,6m. Gelombang yang dibangkitkan merupakan tipe gelombang reguler satu dimensi. Tiang pancang yang digunakan berbentuk silinder berdiameter

(*D*) 0,12m terbuat dari semen.

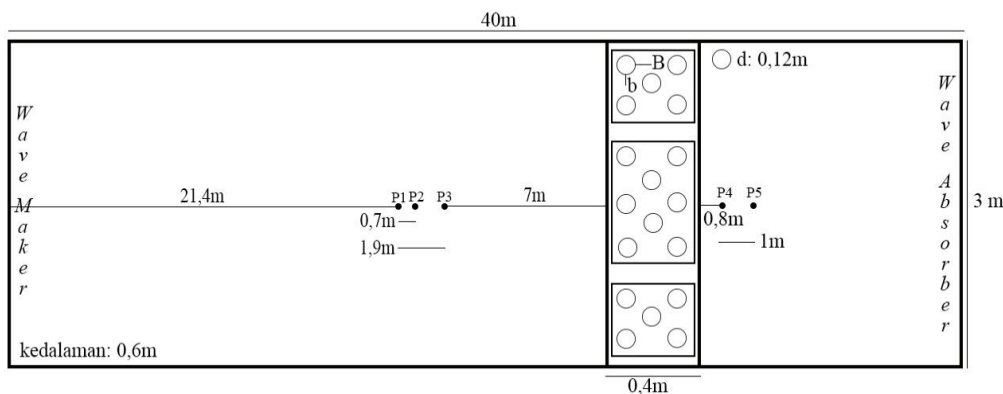
2.2. Skenario Model Fisik

Skenario tiang pancang menggunakan skala 1:10 berdasarkan pertimbangan skala pengujian. Melihat perubahan perilaku gelombang sebelum dan setelah melewati struktur tiang pancang, maka diperlukan kajian terkait desain struktur tiang pancang. Variasi parameter gelombang dan tiang pancang dapat dilihat pada Tabel 1 dengan total skenario sebanyak 36 skenario. Waktu untuk satu simulasi pengujian tiang pancang dilakukan selama 180s dengan *sample rate* 0,04s.

Tabel 1. Variasi parameter gelombang dan tiang pancang.

No	Parameter	Ukuran
1	<i>B/D</i>	0,5
2	<i>b/D</i>	0,5
3	<i>d</i>	0,6 m
4	<i>H_i</i>	0,2m ; 0,15m
5	<i>N</i>	2 ; 3
6	<i>G</i>	0,33m ; 0,5 m ; 0,581m
7	<i>T</i>	2s ; 2,5s ; 3s

Keterangan: *B/D*= jarak antar tiang pancang (kolom)/diameter, *b/D*= jarak antar tiang pancang (baris)/diameter, *d* = kedalaman kolam gelombang (m), *H_i* = tinggi gelombang datang (m), *T* = periode gelombang (s), *G*= jarak antar group tiang pancang, *N* = jumlah baris tiang pancang.



Gambar 1. Tampilan kolam simulasi gelombang.

2.3. Metode Pengolahan Data

2.3.1. Pemisahan Spektrum Gelombang Datang dan Gelombang Refleksi

Pemisahan spektrum gelombang datang dan gelombang refleksi dilakukan dengan mengaplikasikan metode Mansard & Funke (1980) menggunakan data sinyal gelombang yang dicatat melalui tiga *probe*. Sinyal gelombang yang direkam merupakan superposisi beberapa komponen gelombang yaitu gelombang datang, gelombang refleksi, beserta *noise*. Data sinyal gelombang yang direkam dalam *probe* dirumuskan dengan bentuk berikut:

$$\eta_1(x, t) = \sum_{k=1}^N C_{I,k} \cdot \exp\left[-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi X1}{L_k} + \theta_k\right] + \sum_{k=1}^N C_{R,k} \cdot \exp\left[-\frac{2\pi kt}{T} + \frac{2\pi(X1+2XR1)}{L_k} + \theta_k + \phi_k\right] + \Omega_1(t) \dots\dots\dots(1)$$

dengan $C_{I,k}$ adalah komponen gelombang datang, $C_{R,k}$ adalah komponen gelombang refleksi, T adalah periode gelombang, θ_k adalah fase gelombang, $\frac{2\pi}{L_k}$ adalah bilangan gelombang, $\frac{2\pi k}{T}$ adalah frekuensi gelombang, p adalah posisi *probe*, L_k adalah panjang gelombang dengan frekuensi k/T dan Ω_1 merupakan penjumlahan dari sinyal *noise*.

Metode Mansard & Funke (1980) menggunakan Transformasi Fourier untuk mengekstrak informasi gelombang dari sinyal gelombang menjadi spektrum kepadatan energi gelombang dengan bentuk berikut:

$$B_{1,k} = C_{I,k} \cdot \exp\left(i \cdot \frac{2\pi X1p}{L_k} + i\theta_k\right) + C_{R,k} \cdot \exp\left(i \frac{2\pi(X1+2XR1)}{L_k} + i(\theta_k + \phi_k)\right) + Y_{p,k} \cdot \exp(i \cdot \rho_{p,k}) \dots\dots\dots(2)$$

Nilai *noise* diperoleh dengan metode kuadrat terkecil dengan menggunakan turunan parsial sehingga tersisa komponen spektrum gelombang datang dan refleksi untuk meminimalkan *noise*. Nilai *noise* berada pada rentang 0-5% untuk satu kali proses refleksi (Lin & Huang, 2004). Metode Mansard & Funke (1980) menggunakan tiga *probe*, maka diperoleh tiga persamaan linear yang diselesaikan dengan metode Cramer, sehingga diperoleh spektrum kepadatan energi gelombang datang dan refleksi.

2.3.2. Menentukan Spektrum Gelombang Transmisi

Analisis spektrum dengan domain frekuensi baik untuk mengklasifikasikan kombinasi yang rumit dari gelombang laut. Spektrum kepadatan energi dari rekaman gelombang dapat diperoleh dari *auto-spectra density* (Massel, 2005). Analisis spektrum gelombang transmisi dapat ditentukan dengan menerapkan *auto-spectra density* dari pengukuran *probe* di belakang struktur tiang pancang yaitu *probe* lima.

2.3.3. Menentukan Koefisien Refleksi dan Transmisi

Refleksi gelombang terjadi ketika gelombang datang mengenai atau membentur suatu rintangan kemudian gelombang tersebut direfleksikan sebagian atau seluruhnya. Koefisien ini dapat diperoleh melalui spektrum gelombang datang dan gelombang refleksi yang melewati struktur tiang pancang. Menurut Massel (2005), menghitung koefisien refleksi sebagai berikut:

$$K_R = \left\{ \frac{\int_0^\infty S_R(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_I(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

Transmisi gelombang terjadi ketika gelombang datang melewati pemecah gelombang sebagian atau seluruhnya. Massel (2005), menghitung koefisien transmisi sebagai berikut:

$$K_T = \left\{ \frac{\int_0^\infty S_T(\omega) d\omega}{\int_0^\infty S_I(\omega) d\omega} \right\}^{1/2} \dots\dots\dots(4)$$

dengan S_I , S_R dan S_T merupakan spektrum energi gelombang datang, refleksi dan transmisi.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Kualitas Data Uji Laboratorium Fisik

Jenis perairan yang digunakan dalam uji model fisik digunakan merupakan jenis perairan transmisi berdasarkan perbandingan kedalaman kolam gelombang dan panjang gelombang, sehingga perumusan parameter gelombang menggunakan memperhitungkan persamaan dispersif gelombang. Data yang terkumpul sebanyak 36 dari 36 skenario berdasarkan variasi parameter gelombang (Tabel 1). Data pengukuran berupa data *time series* dengan *sampling rate* 0,04s selama 180s menghasilkan 4500 data sehingga diperlukan pemotongan data.

Data rekaman gelombang dari *probe* dilakukan pemotongan data untuk mendapatkan satu kali proses simulasi refleksi gelombang dan tidak memperhitungkan proses refleksi berulang dari struktur tiang pancang. Banyaknya data yang digunakan dapat dipotong dengan mengetahui kecepatan penjarangan gelombang berdasarkan perbedaan data untuk puncak yang sama dari pencatatan *probe* yang berbeda. Nilai kecepatan gelombang dapat dilihat pada Tabel 2.

Setelah dilakukan pemotongan data, dilakukan pengamatan data *time series* dan hasil *zero-up crossing* pada *probe-1* untuk setiap skenario dengan *threshold error* tinggi gelombang signifikan <15% untuk melihat kualitas dari data pengukuran (Smit *et al.*, 2021). Setelah dilakukan *zero-up crossing*, variasi parameter gelombang periode 2,5s untuk tinggi gelombang 0,2m dan 0,15m menghasilkan eror tinggi gelombang signifikan >20% pada *probe-1*. Eror yang

terbentuk kemungkinan dapat terjadi akibat resonansi.

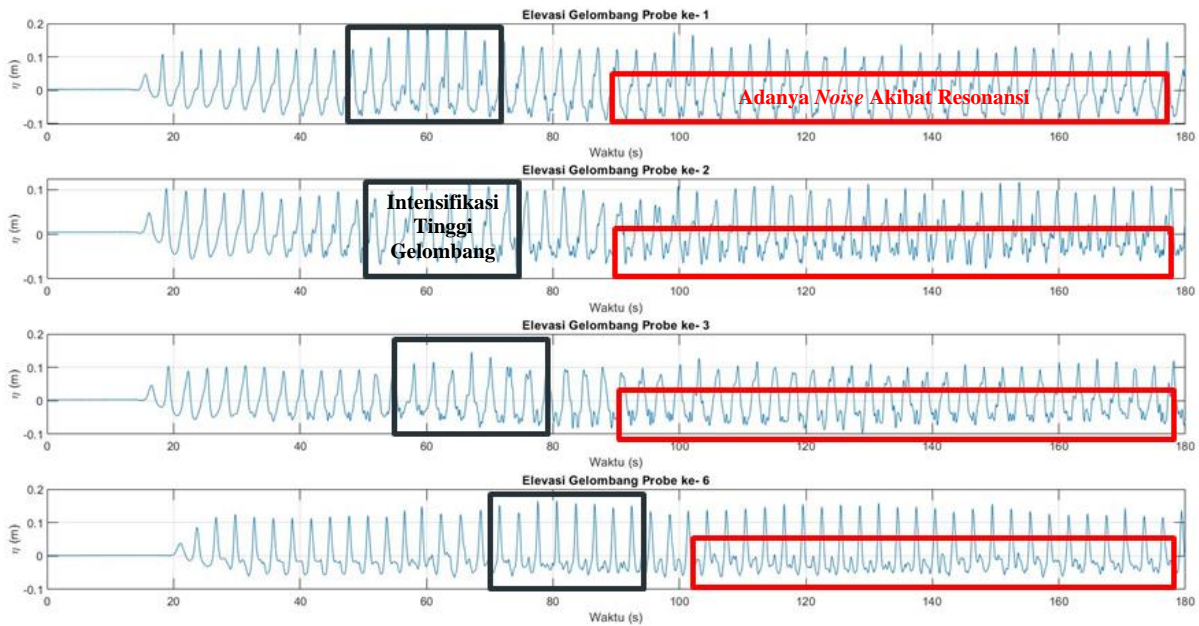
Tabel 2. Kecepatan gelombang untuk variasi parameter gelombang.

<i>T</i> (s)	<i>H_i</i> (m)	<i>Probe</i>	\bar{V} (m/s)
2	0,2	1 dan 3	1,953
		4 dan 5	2,083
	0,15	1 dan 3	1,940
		4 dan 5	2,083
2,5	0,2	1 dan 3	1,979
		4 dan 5	2,083
	0,15	1 dan 3	1,913
		4 dan 5	1,950
3	0,2	1 dan 3	1,994
		4 dan 5	2,083
	0,15	1 dan 3	1,900
		4 dan 5	2,083

Keterangan: H_i = tinggi gelombang datang (m), T = periode gelombang (s), \bar{V} = kecepatan rata-rata gelombang (m/s).

Resonansi dapat terjadi di basin (kolam gelombang) ketika periode alami dari struktur bangunan sama dengan ataupun kelipatan dari periode gelombang yang melewati kolam gelombang. Hasil perhitungan periode dan frekuensi alami dari struktur kolam gelombang tertutup berbentuk kotak dengan $L_K = 3m$ dan $d = 0,6 m$ pada Tabel 3. Periode dan frekuensi alami dari basin untuk nilai n dari satu sampai lima, terlihat periode alami struktur yaitu 2,47s mendekati periode gelombang 2,5s untuk percobaan variasi 3 dan 4. Terbukti terjadi adanya efek resonansi dari geometri basin yang memengaruhi nilai tinggi gelombang secara signifikan, dengan adanya resonansi gelombang dengan kelipatan frekuensi 0,4Hz dari 0,4Hz hingga 2Hz.

Efek resonansi memengaruhi nilai rekaman elevasi gelombang dari *wave probe* (Gambar 2) berupa intensifikasi tinggi gelombang, ditunjukkan kotak berwarna hitam dan terbentuknya gelombang kecil baru ditunjukkan kotak berwarna merah.



Gambar 2. Efek resonansi terhadap data *time series* elevasi gelombang.

Tabel 3. Periode dan frekuensi alami dari basin.

n	T_r	f_r
1	2,474	0,404
2	1,237	0,808
3	0,825	1,212
4	0,619	1,617
5	0,495	2,021

Keterangan: n = kelipatan resonansi, T_r = periode resonansi (s), f_r = frekuensi resonansi (Hz).

Efek resonansi ini dapat memengaruhi nilai tinggi gelombang dari gelombang rencana hingga 25%, sehingga dalam menentukan variasi parameter gelombang perlu memperhitungkan periode alami dari kolam gelombang.

3.2. Klasifikasi Gelombang

Variasi parameter gelombang sesuai skenario diperoleh tiga jenis gelombang yaitu teori gelombang Linier, Stokes orde ke-2 dan Cnoidal seperti ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 3. Gelombang linier yang terbentuk pada variasi nomor 2, 3, 4 dan 6, gelombang Stokes orde ke-2 pada

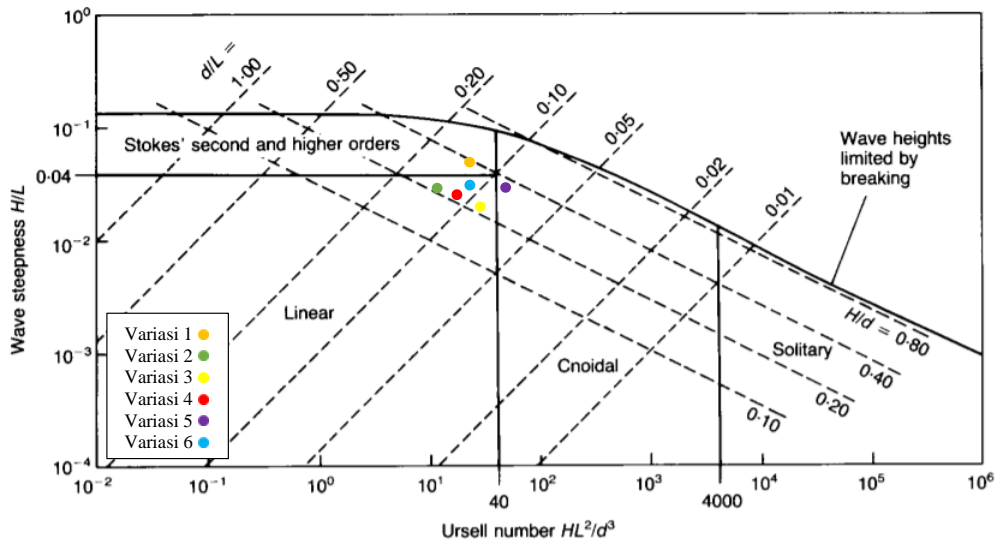
variasi nomor 1 dan gelombang Cnoidal pada variasi nomor 5. Variasi nomor 3 dan 4 tidak dapat digunakan untuk selanjutnya karena terjadinya resonansi.

Tabel 4. Teori gelombang berdasarkan parameter gelombang.

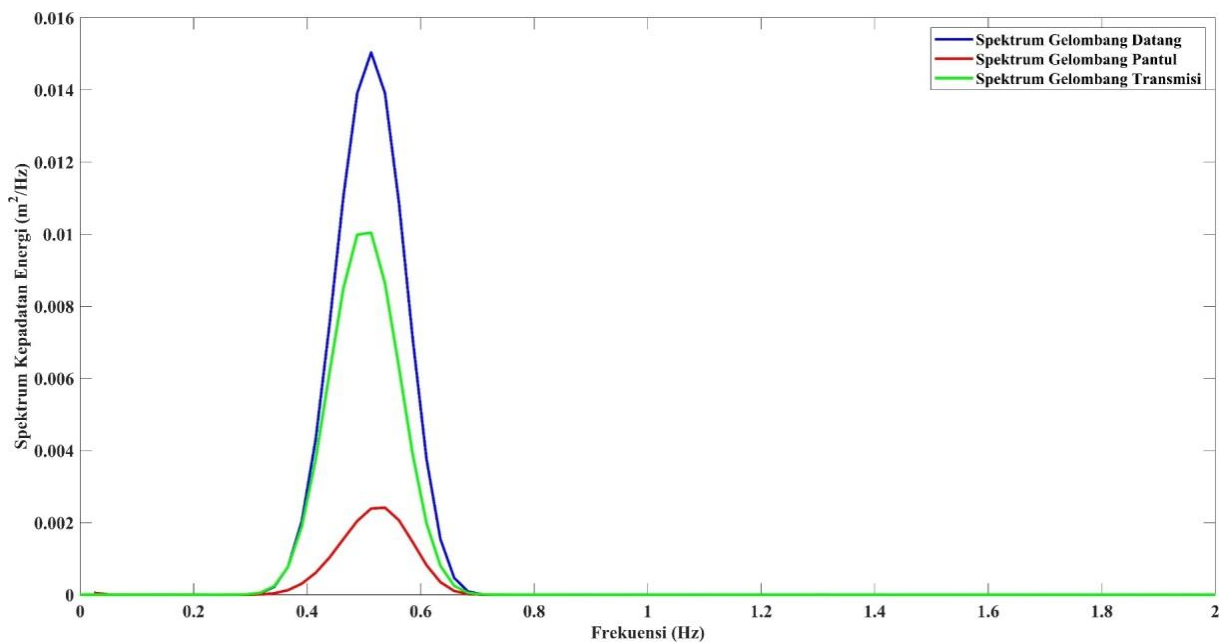
No	H_i	T	$\frac{H_i}{L}$	$\frac{H_i L^2}{h^3}$
1	0,2	2	0,046	17,603
2	0,15	2	0,034	13,202
3	0,2	2,5	0,035	29,770
4	0,15	2,5	0,026	22,328
5	0,2	3	0,029	44,712
6	0,15	3	0,022	33,534

3.3. Spektrum Gelombang Datang, Refleksi, dan Transmisi

Penerapan metode Mansard & Funke (1980) pada *probe* 1, 2 dan 3 yang berada di depan struktur tiang pancang digunakan untuk mengetahui perilaku refleksi gelombang. Analisis spektrum diterapkan pada *probe* lima untuk mengetahui perilaku transmisi gelombang setelah melewati struktur tiang pancang. Spektrum kepadatan energi gelombang datang, refleksi dan



Gambar 3. Jenis gelombang dari batasan validasi analitik teori gelombang (Modifikasi: Hedges & URSELL, 1995).



Gambar 4. Spektrum kepadatan energi gelombang datang dan refleksi dari *probe* 1,2, dan 3 dan spektrum kepadatan energi gelombang transmisi dari *probe* 5.

transmisi terlihat seperti Gambar 4. Puncak spektrum kepadatan energi gelombang datang mencapai $1,576 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{Hz}$, gelombang refleksi mencapai $2,682 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Hz}$ dan gelombang transmisi mencapai $1,137 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{Hz}$. Hal ini menunjukkan refleksi gelombang yang disebabkan struktur tiang pancang kecil dan adanya pengurangan energi gelombang setelah melewati struktur

tiang pancang.

Karakterisasi hasil spektrum kepadatan energi dapat memberikan informasi beberapa parameter gelombang (Tabel 5). Energi gelombang yang direfleksikan dan ditransmisikan oleh struktur tiang pancang sekitar 17% dan 74% dari energi gelombang datang. Tinggi gelombang yang direfleksikan dan

ditransmisikan oleh struktur tiang pancang sekitar 42% dan 86% dari tinggi gelombang datang. Periode gelombang, panjang gelombang, dan kecepatan gelombang yang direfleksikan oleh struktur tiang pancang mengalami perbedaan yang sangat kecil kurang dari 3%. Perbandingan tinggi gelombang refleksi dan transmisi terhadap gelombang datang dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan refleksi dan transmisi dari struktur tiang pancang.

3.4. Pengaruh Variasi Parameter Gelombang Terhadap Refleksi dan Transmisi Gelombang

3.4.1. Pengaruh Gelombang Linier Terhadap Refleksi dan Transmisi Gelombang

Variasi parameter gelombang yang digunakan adalah nomor 1, 2, 5 dan 6. Gelombang linier merupakan variasi nomor 2 dan 6, gelombang Stokes orde-2 variasi nomor 1, dan gelombang Cnoidal variasi nomor 5. Nilai koefisien refleksi dan transmisi untuk gelombang linier ditunjukkan pada Gambar 5, diperoleh bahwa ketika kemiringan gelombang (H_i/L) datang meningkat maka nilai koefisien refleksi meningkat dan nilai koefisien transmisi menurun.

3.4.2. Pengaruh Variasi Parameter Gelombang Terhadap Refleksi Gelombang

Nilai koefisien refleksi dibandingkan dengan $\frac{H_i}{L}$ untuk melihat pengaruh kemiringan gelombang terhadap koefisien refleksi yang diperoleh dari variasi

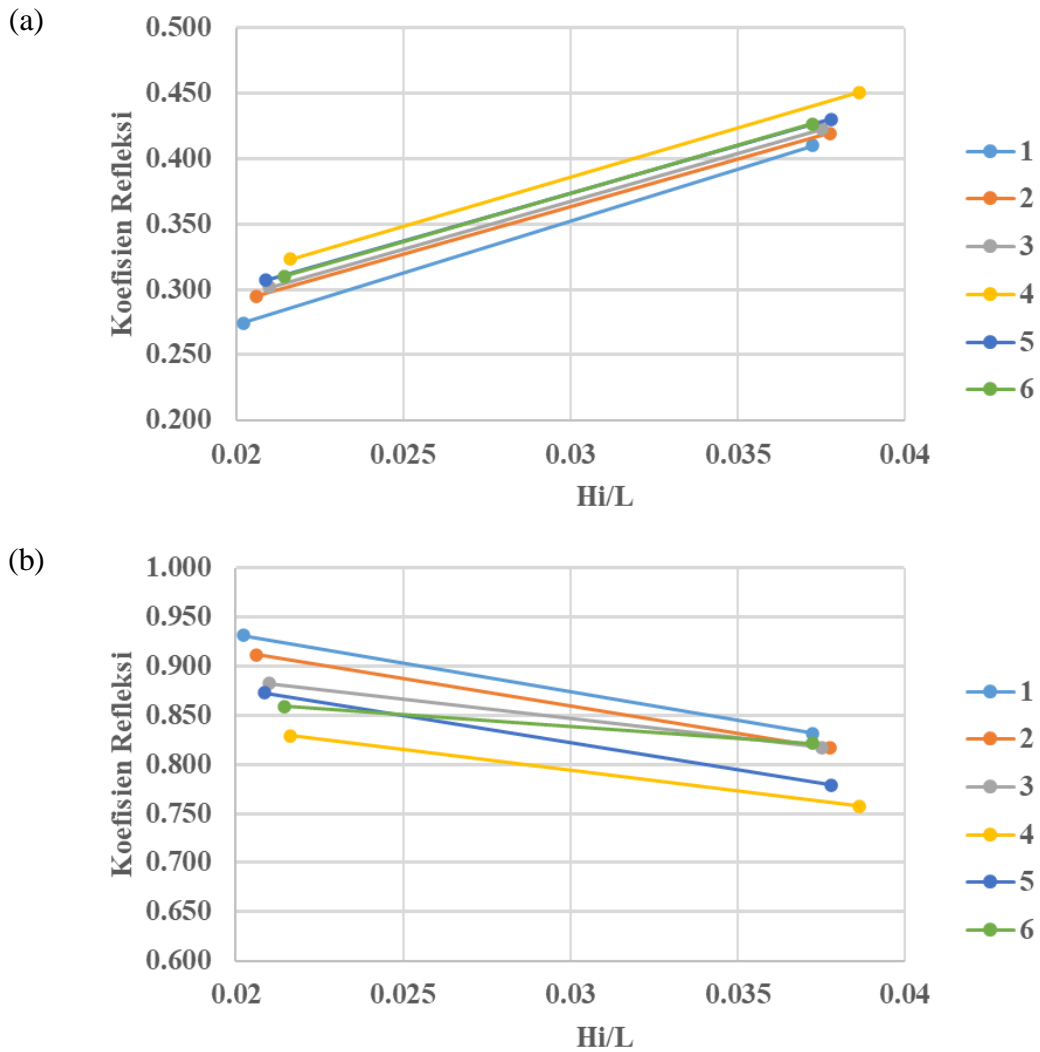
parameter gelombang. Hasil nilai koefisien refleksi dapat dilihat pada Gambar 6, koefisien refleksi meningkat dengan bertambahnya kemiringan gelombang ($0,020 \leq \frac{H_i}{L} \leq 0,045$). Pendekatan nilai koefisien refleksi berdasarkan nilai kemiringan gelombang dapat didekati dengan polinomial derajat tiga dengan nilai $RMSE = 0,0167$ dan $R^2 = 0,939$ sebagai berikut:

$$K_R = -3,732 \times 10^4 \left(\frac{H_i}{L}\right)^3 + 3,627 \times 10^3 \left(\frac{H_i}{L}\right)^2 - 1,066 \times 10^2 \frac{H_i}{L} + 1,283 \dots\dots\dots (5)$$

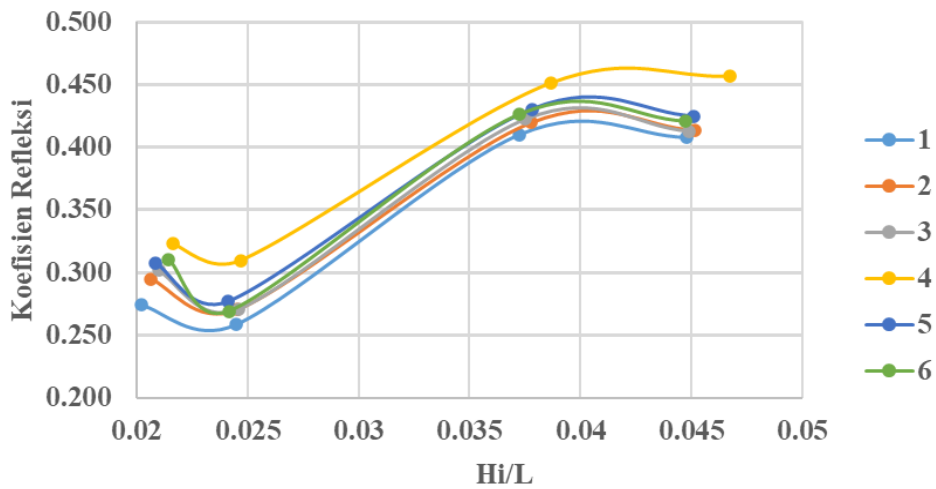
Titik kritis pada persamaan 5 dari persamaan polinomial derajat tiga untuk koefisien refleksi dapat dilihat pada Gambar 7. Terdapat dua titik kritis yaitu pada $\frac{H_i}{L} = 0,022$ dan $\frac{H_i}{L} = 0,042$ yang merupakan titik belok untuk nilai minimum dan nilai maksimum koefisien refleksi. Terlihat nilai minimum koefisien refleksi berada pada daerah gelombang Cnoidal, dengan batas minimum kemiringan gelombang untuk gelombang Cnoidal yaitu $\frac{H_i}{L} = 0,022$. Nilai maksimum koefisien refleksi ketika $\frac{H_i}{L} = 0,042$ yang berada pada daerah gelombang Stokes orde ke-2. Sehingga dapat dikatakan dalam penjalaran gelombang, nilai koefisien refleksi terjadi minimum dan maksimum ketika gelombang tersebut dalam batasan teori gelombang Cnoidal dan gelombang Stokes orde ke-2.

Tabel 5. Karakterisasi parameter gelombang datang dan transmisi.

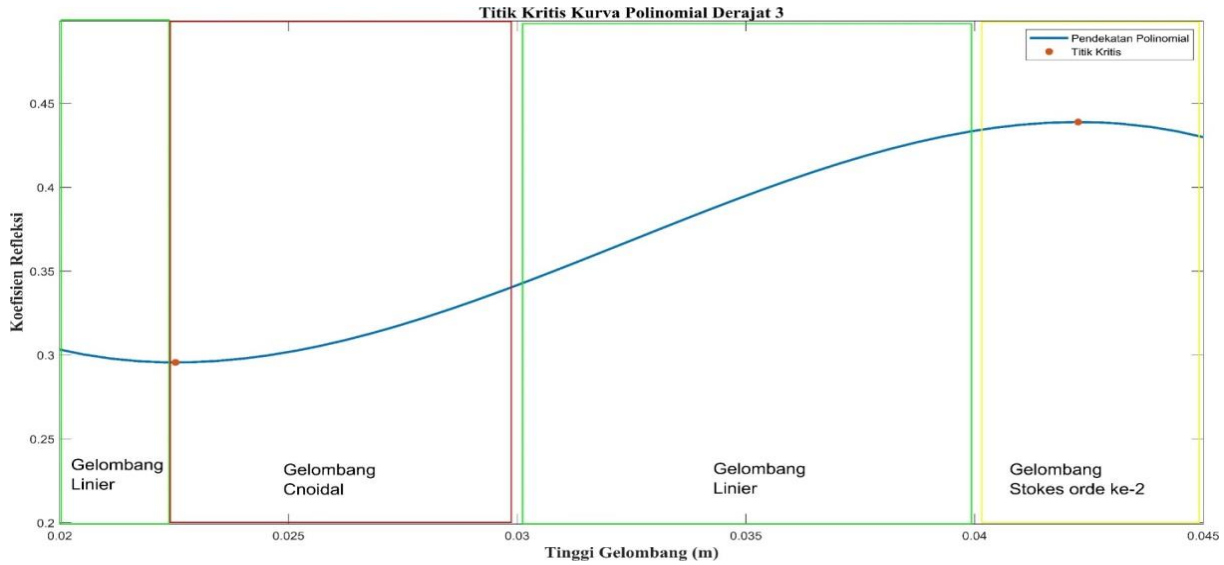
Parameter Gelombang	Gelombang Datang	Gelombang Refleksi	Gelombang Transmisi
Energi Gelombang (J/m)	23,803	4,184	17,682
Tinggi Signifikan (m)	0,197	0,083	0,170
Periode Signifikan (s)	1,953	1,921	1,972
Panjang Gelombang (m)	4,235	4,147	4,285
Kecepatan Gelombang (m/s)	2,170	2,161	2,174



Gambar 5. Hubungan koefisien refleksi (a) dan transmisi (b) terhadap kemiringan gelombang untuk gelombang linier.



Gambar 6. Hubungan kemiringan gelombang terhadap koefisien refleksi.



Gambar 7. Titik kritis polinomial derajat tiga untuk koefisien refleksi.

Persamaan 5 merupakan persamaan empiris nilai koefisien refleksi dari hasil pengolahan data dengan parameter independen yaitu kemiringan gelombang. Modifikasi persamaan 5 untuk menghasilkan parameter independen parameter gelombang yaitu tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman perairan. Penentuan panjang gelombang dengan memodifikasi pendekatan Eckart (1952). Pendekatan nilai koefisien refleksi berdasarkan parameter gelombang dijelaskan oleh persamaan 6 menghasilkan $RMSE = 0,087$ sebagai berikut:

$$K_R = -9,805 \times 10^3 \left(\frac{H_i}{RT^2} \right)^3 + 1,488 \times 10^3 \left(\frac{H_i}{RT^2} \right)^2 - 6,827 \times 10^1 \frac{H_i}{RT^2} + 1,283 \dots\dots\dots(6)$$

dengan R merupakan faktor koreksi sebagai berikut:

$$R = \sqrt{\tanh \left(\frac{d}{g} \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 \right)} \dots\dots\dots(7)$$

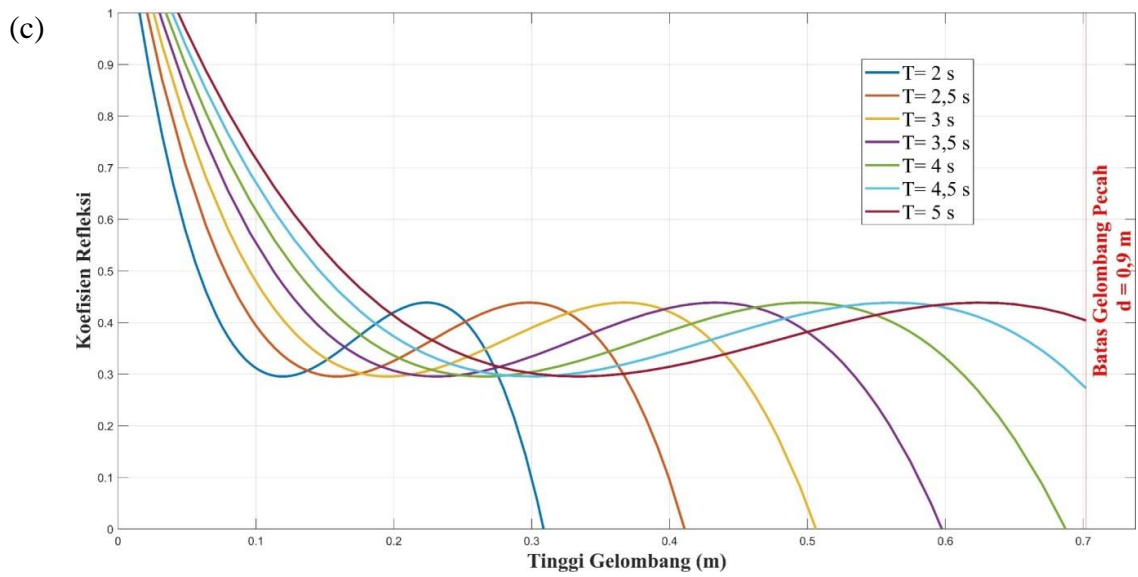
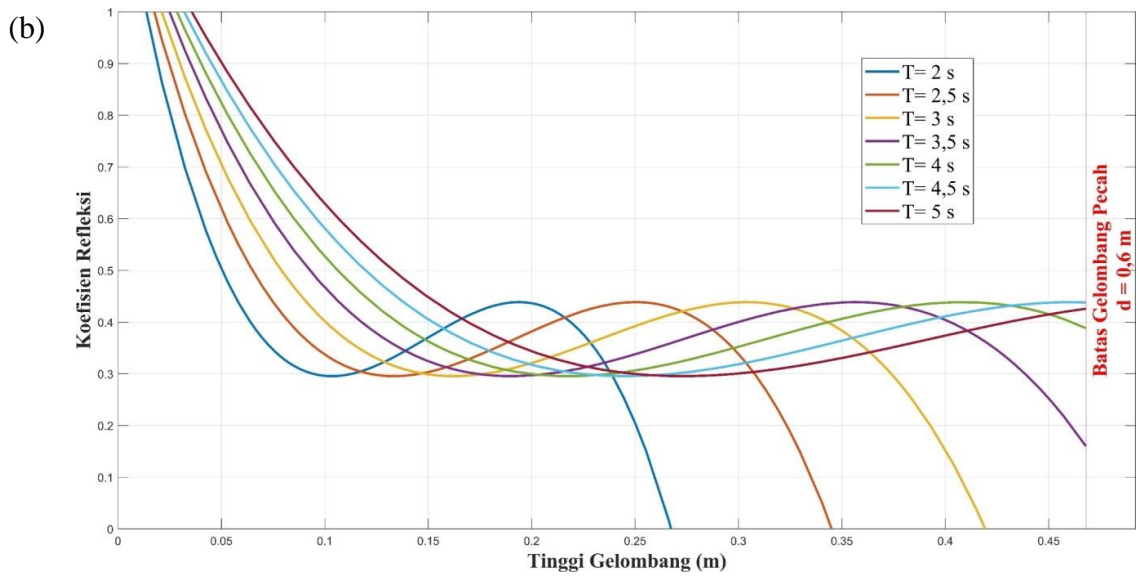
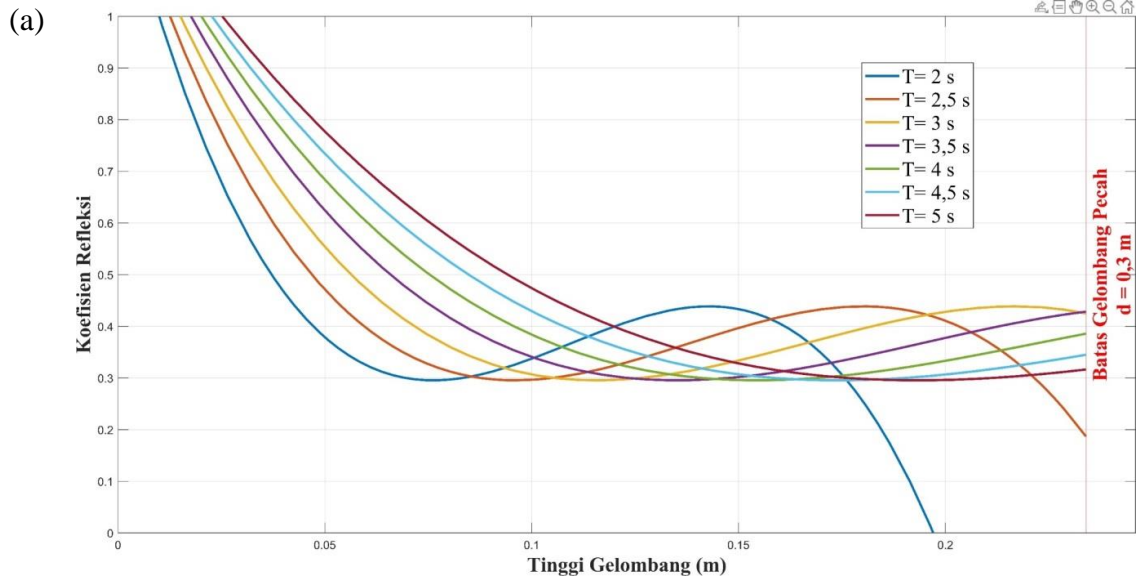
Faktor koreksi R berada pada rentang nilai

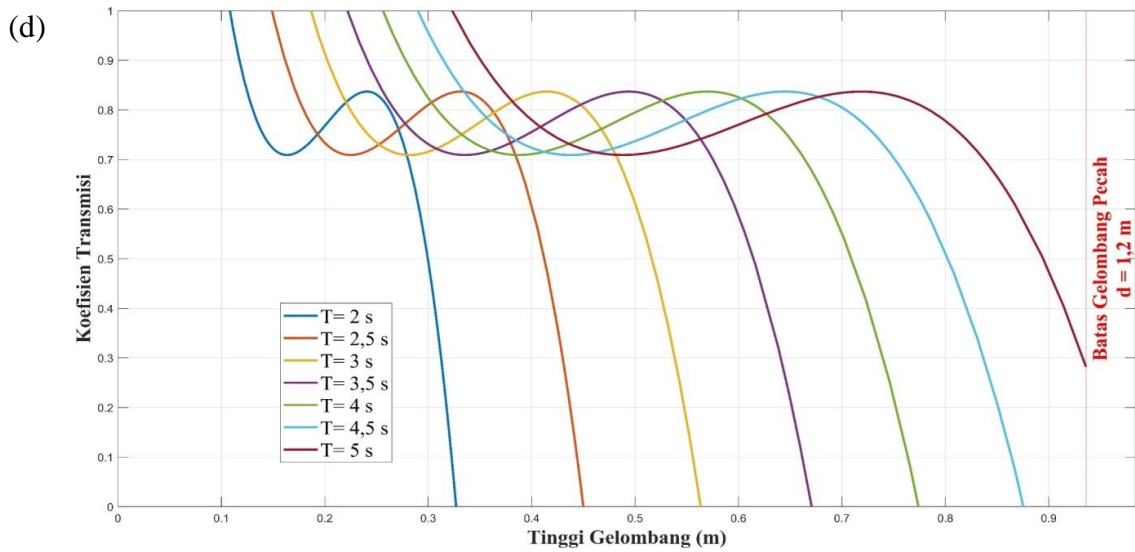
$0 < R < 1$ yang dipengaruhi oleh nilai kedalaman perairan dan periode gelombang.

Penggambaran persamaan 6 menjadi lebih umum dibandingkan persamaan 5 karena memuat parameter dasar gelombang yaitu periode gelombang, tinggi gelombang dan kedalaman perairan. Contoh visualisasi penggambaran persamaan 6 seperti Gambar 8, nilai koefisien refleksi berdasarkan variasi periode gelombang dari 2s sampai 5s yang ditandai dengan masing-masing warna berbeda untuk kedalaman perairan 0,3m, 0,6m, 0,9m, dan 1,2m. Hasil penggambaran ini bermanfaat dalam penempatan struktur tiang pancang untuk menghasilkan nilai koefisien refleksi yang minimum.

3.4.3. Pengaruh Variasi Parameter Gelombang Terhadap Transmisi Gelombang

Plot nilai koefisien transmisi terhadap kemiringan gelombang dapat dilihat pada Gambar 9, nilai koefisien transmisi dari 0,950 - 0,700 menurun dengan peningkatan kemiringan gelombang pada rentang 0,200 - 0,026 dan koefisien transmisi dari 0,700 - 0,850 meningkat dengan peningkatan kemiringan gelombang pada rentang 0,026 - 0,045. Hasil pengolahan bersesuaian dengan hasil





Gambar 8. Pendekatan nilai koefisien refleksi berdasarkan variasi periode gelombang untuk kedalaman perairan (a) 0,3m, (b) 0,6m, (c) 0,9m, dan (d) 1,2m.

penelitian yang dilakukan El Serafy *et al.* (2014) dan Achiari *et al.* (2020) yaitu koefisien transmisi dari 0,950 - 0,550 menurun dengan peningkatan kemiringan gelombang pada rentang 0,012 - 0,025, sehingga ada perkembangan kajian transmisi gelombang dibandingkan hasil penelitian terlebih dahulu.

Pendekatan nilai koefisien transmisi berdasarkan nilai kemiringan gelombang dapat didekati dengan polinomial derajat tiga dengan nilai $RMSE = 0,024$ dan $R^2 = 0,879$ sebagai berikut:

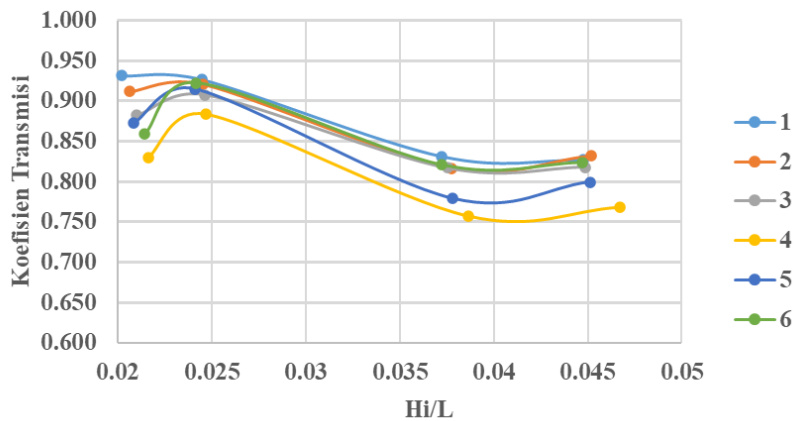
$$K_T = -1,035 \times 10^5 \left(\frac{H_i}{L}\right)^3 + 1,099 \times 10^4 \left(\frac{H_i}{L}\right)^2 - 3,748 \times 10^2 \frac{H_i}{L} + 4,863 \dots\dots\dots(8)$$

Titik kritis pada persamaan 8 dari persamaan polinomial derajat tiga untuk koefisien transmisi dapat dilihat pada Gambar 10. Terdapat dua titik kritis kemiringan gelombang yaitu **0,028** dan **0,042**. Nilai minimum koefisien transmisi berada pada daerah gelombang Cnoidal, dengan batas minimum kemiringan gelombang untuk gelombang Cnoidal yaitu

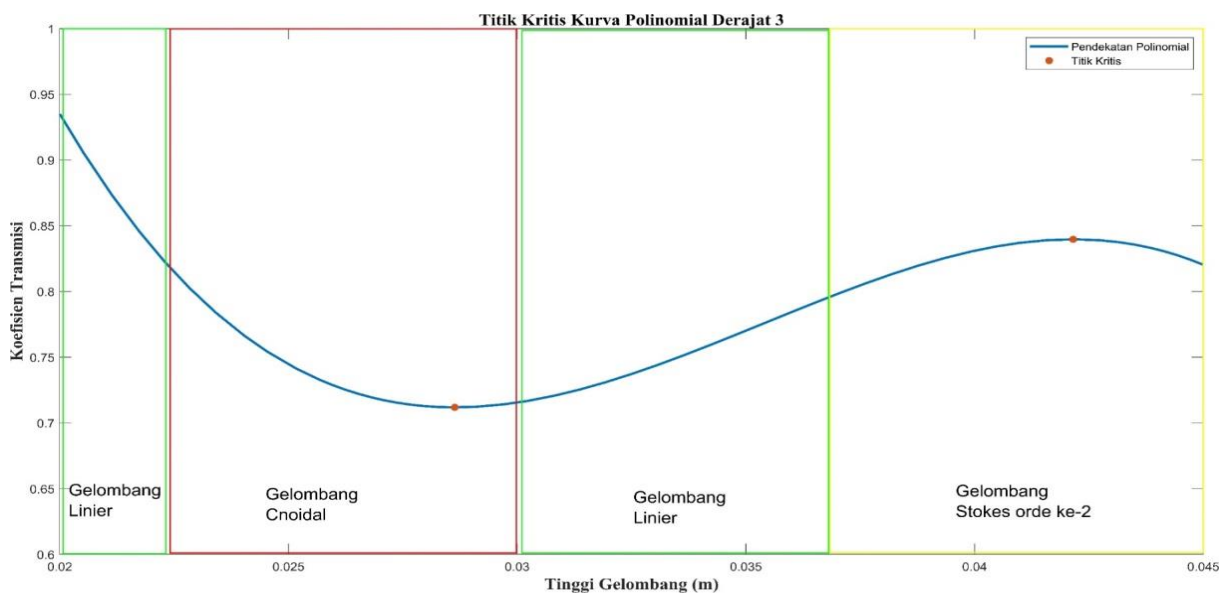
$\frac{H_i}{L} = 0,022$. Nilai maksimum koefisien transmisi ketika $\frac{H_i}{L} = 0,042$ berada pada daerah gelombang Stokes orde ke-2. Dalam penjalaran gelombang, nilai koefisien transmisi terjadi minimum dan maksimum ketika gelombang tersebut dalam batasan teori gelombang Cnoidal dan gelombang Stokes orde ke-2. Hasil ini sangat berguna untuk daerah peletakan struktur tiang pancang, yaitu struktur tiang pancang tidak diletakkan pada daerah gelombang berjenis Stokes orde ke-2.

Modifikasi persamaan 8 dengan parameter independen kemiringan gelombang menjadi tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman perairan. Penentuan panjang gelombang dengan memodifikasi pendekatan Eckart (1952). Hasil modifikasi nilai koefisien transmisi dijelaskan oleh persamaan 9 menghasilkan $RMSE = 0,051$ sebagai berikut:

$$K_T = -2,719 \times 10^4 \left(\frac{H_i}{RT^2}\right)^3 + 4,508 \times 10^4 \left(\frac{H_i}{RT^2}\right)^2 - 2,401 \times 10^2 \frac{H_i}{RT^2} + 4,863 \dots\dots\dots(9)$$



Gambar 9. Hubungan kemiringan gelombang terhadap koefisien transmisi.



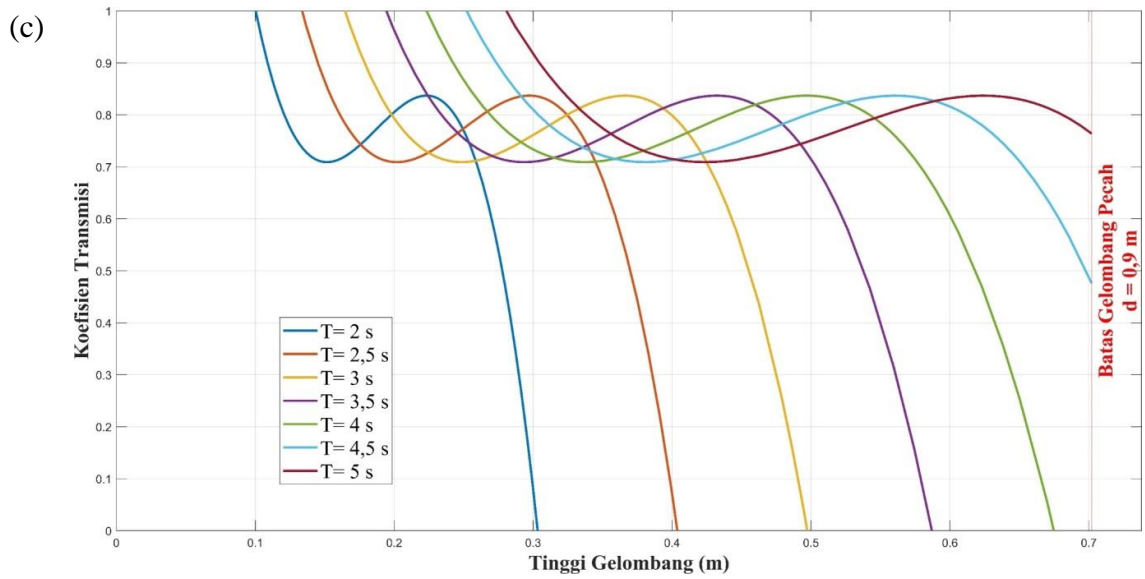
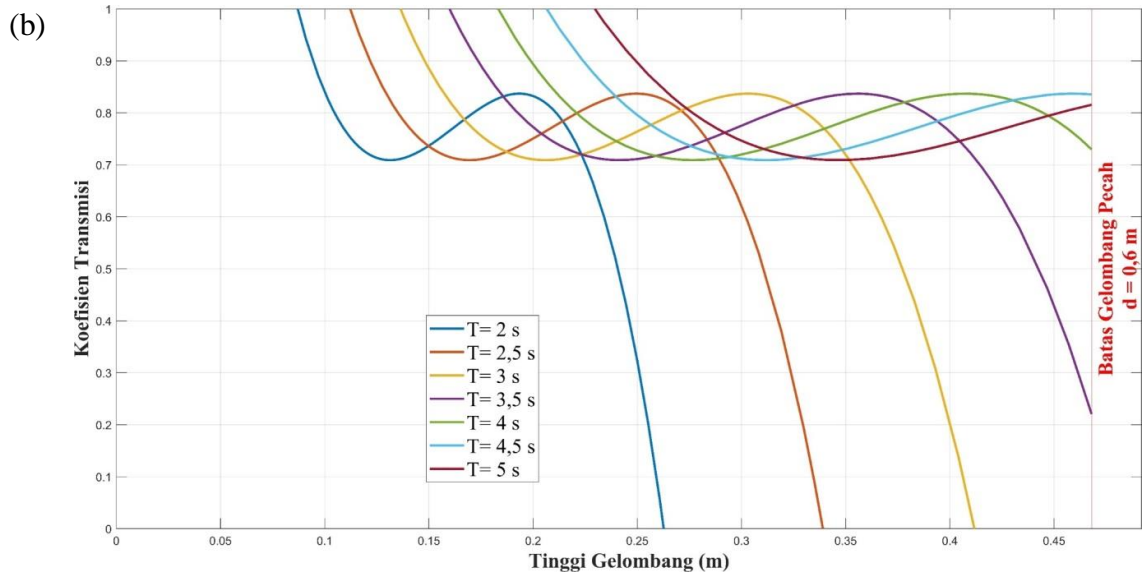
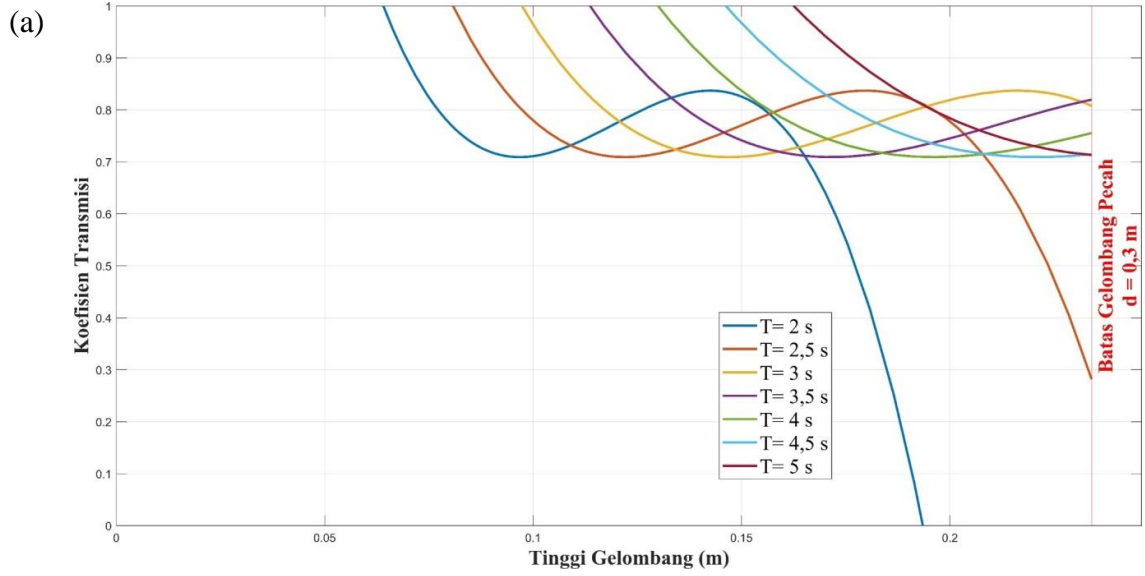
Gambar 10. Titik kritis polinomial derajat tiga untuk koefisien transmisi.

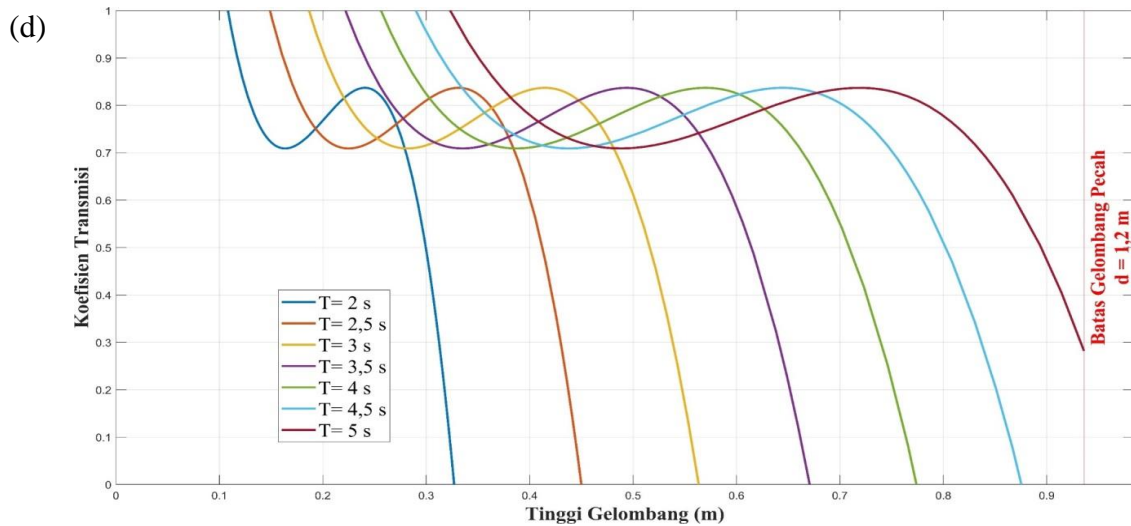
Penggambaran persamaan 9 menjadi lebih umum dibandingkan persamaan 8 karena memuat parameter dasar gelombang yaitu periode gelombang, tinggi gelombang dan kedalaman perairan. Contoh visualisasi penggambaran persamaan 9 seperti Gambar 11, nilai koefisien transmisi berdasarkan variasi periode gelombang dari 2s sampai 5s yang ditandai dengan masing-masing warna berbeda untuk kedalaman perairan 0,3m, 0,6m, 0,9m dan 1,2m. Hasil penggambaran ini bermanfaat dalam penempatan struktur tiang pancang untuk menghasilkan nilai koefisien transmisi yang minimum.

3.5. Studi Kasus Pemanfaatan Persamaan Koefisien Refleksi dan Transmisi Berdasarkan Parameter Gelombang

Nilai koefisien refleksi dibandingkan dengan $\frac{H_i}{L}$ untuk melihat pengaruh kemiringan gelombang terhadap koefisien refleksi yang diperoleh dari variasi parameter gelombang. Pendekatan nilai koefisien refleksi dan transmisi yang ditunjukkan oleh persamaan 8 dan 9 dapat dimanfaatkan dalam menentukan peletakan struktur tiang pancang untuk menghasilkan nilai koefisien transmisi dan nilai koefisien

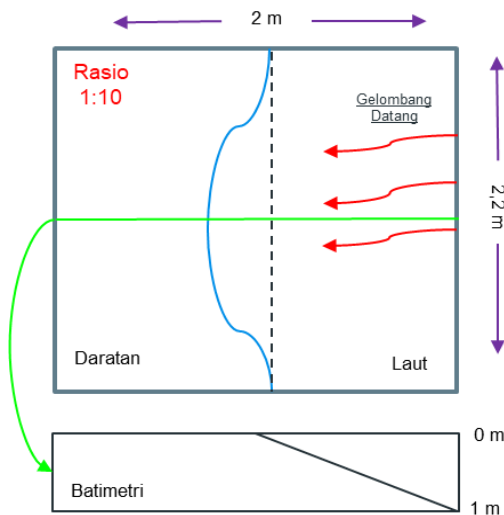
Kajian perilaku gelombang akibat adanya struktur tiang . . .





Gambar 11. Pendekatan nilai koefisien transmisi berdasarkan variasi periode gelombang untuk kedalaman perairan (a) 0,3m, (b) 0,6m, (c) 0,9m, dan (d) 1,2m.

refleksi minimum. Sketsa disuatu pesisir pantai ditunjukkan oleh Gambar 12 dengan rasio 1:10, terjadi erosi sehingga terjadi kemunduran garis pantai yang ditandai garis warna biru. Diperlukan struktur tiang pancang untuk meminimalisir erosi yang terjadi.



Gambar 12. Sketsa pesisir pantai untuk meletakkan struktur tiang pancang

Tinggi gelombang signifikan yang berada di sekitar pesisir yaitu 0,15 m dengan periode 2 s. Dalam menentukan peletakan struktur tiang pancang agar mendapatkan

nilai transmisi dan refleksi minimum dapat memanfaatkan persamaan 8, persamaan 9, Gambar 8, dan Gambar 11. Pendekatan nilai koefisien refleksi dan koefisien transmisi untuk masing-masing kedalaman ditunjukkan oleh Tabel 4.17 dari kedalaman 0,25 m hingga 0,6 m. Terlihat nilai koefisien transmisi maksimum ketika struktur tiang pancang diletakkan pada kedalaman perairan 0,35 m dengan koefisien transmisi sekitar 0,84 dan nilai koefisien transmisi minimum ketika struktur diletakkan pada kedalaman 0,25 dengan koefisien transmisi sekitar 0,73. Posisi peletakan struktur tiang pancang optimum pada kedalaman perairan 0,25 m dengan koefisien transmisi 0,7303 dan koefisien refleksi 0,3885.

Tabel 6. Pendekatan nilai koefisien refleksi dan transmisi untuk masing-masing kedalaman

d (m)	K_T	K_R
0,25	0,7303	0,3885
0,30	0,8256	0,4334
0,35	0,8355	0,4377
0,40	0,8179	0,4274
0,45	0,7938	0,4125
0,50	0,7709	0,3972
0,55	0,7517	0,3829
0,60	0,7368	0,3703

IV. KESIMPULAN

Variasi parameter gelombang (tinggi, periode, dan kemiringan gelombang) yang dilakukan pada model fisik diperoleh tiga jenis gelombang yaitu gelombang linier, Stokes orde-2, dan Cnoidal. Pengaruh kemiringan gelombang terhadap koefisien refleksi dan transmisi diestimasi dengan persamaan polinomial derajat tiga. Nilai koefisien refleksi dan transmisi minimum ketika jenis gelombang Cnoidal, sehingga penempatan struktur tiang pancang diletakkan ketika jenis gelombang Cnoidal. Koefisien refleksi dapat diestimasi berdasarkan parameter gelombang lebih sederhana yaitu tinggi gelombang, periode gelombang dan kedalaman perairan dengan persamaan 6 dengan faktor koreksi R pada persamaan 7 menghasilkan RMSE = 0,087. Koefisien transmisi diestimasi dengan persamaan 9 menghasilkan RMSE = 0,051. Sehingga, persamaan 7 dan 9 dapat digunakan untuk estimasi nilai koefisien refleksi dan transmisi berdasarkan tinggi gelombang, periode gelombang, dan kedalaman perairan dengan rasio 1:10.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM (Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat) ITB yang telah mendanai penelitian ini melalui skema Program Penelitian Pengabdian kepada Masyarakat dan Inovasi (P2MI) ITB tahun 2020. Selanjutnya, penulis juga menyampaikan terima kasih kepada pengelola Balai Teknik Pantai Kementerian PUPR Bali atas dukungan data laboratorium fisik.

DAFTAR PUSTAKA

Abdullah, F.A.R., S. Husrin, & H. Bachtiar. 2019. Experimental data analysis of wave attenuation in mangroves. *In Journal of Physics: Conference*

Series, 1245(1): 012095. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1245/1/012095>

Abdullah, F.A.R., T. Suprijo, H. Diastomo, & G. Napitupulu. 2022. Numerical Modelling of Wave Attenuation in Pile Breakwater. *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1047(1): 012029. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1047/1/012029>

Achiari, H., A.L. Ahmad, & D.M. Sulaiman. 2020. Analisis refleksi dan transmisi gelombang pada pemecah gelombang tiang pancang. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 12(3): 723-737. <https://doi.org/10.29244/jitkt.v12i3.27591>

Coastal Engineering Research Center (CERC). 1973. *Shore Protection Manual*, (Vol. 1). US Army Coastal Engineering Research Center. 250-256.

Costello, R.D. 1952. Damping of water waves by vertical circular cylinders. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 33(4): 513-519. <https://doi.org/10.1029/TR033i004p00513>

Eckart, C. 1952. The propagation of gravity waves from deep to shallow water. *In Proceedings of NBS Semicentennial Symposium on Gravity Waves Held at the NBS on June*, 521: 18-20.

El Serafy, S.Y., Y.E. Mostafa, Y.M. EL Saie, & C.F. Gad. 2015. Investigating the energy dissipation capability of solid piles breakwater., *International Journal of Sciences: Basic and Applied Research (IJSBAR)*, 24(2): 1-13.

Hayashi, T., M. Hattori, T. Kano & M. Shirai. 1966. Hydraulic research on the closely spaced pile breakwater. *Coastal Engineering in Japan*, 9(1): 107-117.

- <https://doi.org/10.1080/05785634.1966.11924676>
- Hedges, T.S. & URSEL. 1995. Regions of validity of analytical wave theories. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 112(2): 111-114. <https://doi.org/10.1680/iwtme.1995.27656>
- Herbich, J.B. & B. Douglas. 1988. Wave transmission through a double-row pile breakwater. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(21): 165-165. <https://doi.org/10.9753/icce.v21.165>
- Herbich, J.B. 1990. Extent of contaminated marine sediments and cleanup methodology. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(22): 2894-2907. <https://doi.org/10.9753/icce.v22.%25p>
- Kakuno, S. & P.L.F. Liu. 1993. Scattering of water waves by vertical cylinders. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 119(3): 302-322. <https://doi.org/10.9753/icce.v23.%25p>
- Lin, C.Y. & C.J. Huang. 2004. Decomposition of incident and reflected higher harmonic waves using four wave gauges. *Coastal engineering*, 51(5-6), 395-406. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.04.004>
- Mani, J.S. & S. Jayakumar. 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. & E.R. Funke. 1980. The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method. *Coastal Engineering Proceedings* (17:): 8-8. <https://doi.org/10.9753/icce.v17.8>
- Massel, S.R. 2005. *Ocean surface waves: their physics and prediction*, 11: 270-290. <https://doi.org/10.1142/2285>
- Rao, S., Rao, N.B.S. & V.S. Sathyanarayana. 1999. Laboratory investigation on wave transmission through two rows of perforated hollow piles. *Ocean engineering*, 26(7): 675-699. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(98\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(98)00021-3)
- Sathyanarayana, A.H., P.S. Suvarna, P. Umesh, & K.G. Shirlal. 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>
- Smit, P.B., I.A. Houghton, K. Jordanova, T. Portwood, E. Shapiro, D. Clark, M. Sosa, & T.T. Janssen. 2021. Assimilation of significant wave height from distributed ocean wave sensors. *Ocean Modelling*, 159, p.101738. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2020.101738>
- Simanjuntak, E.M., L. Eliasta, J.W. Ginting, & I.A.I.D.R. Putra. 2019. Modelling Wave Dissipation on Pile Breakwater Using Xbeach. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 10(1): 1-14. <https://doi.org/10.32679/JTH.V10I1.605>
- Suh, K.D., C.H. Ji & B.H. Kim. 2011. Closed-form solutions for wave reflection and transmission by vertical slotted barrier. *Coastal Engineering*, 8(12): 1089-1096. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.06.001>
- Suh, K.D., S. Shin, & D. Cox. 2006. Hydrodynamic characteristics of pile-supported vertical wall breakwaters. *American Society of Civil Engineers*, 132(2): 83-96. <https://doi.org/10.1177/14750902211031353>

- Suvarna, P.S., A.H. Sathyanarayana, P. Umesh, & K.G. Shirlal. 2020. Laboratory investigation on hydraulic performance of enlarged pile head breakwater. *Ocean Engineering*, 217: 107989. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107989>
- Truitt, C.L. & J.B. Herbich. 1986. Transmission of random waves through pile breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 20: 169-169. <https://doi.org/10.9753/icce.v20.169>
- Van Weele, B.J. & J.B. Herbich. 1972. Wave reflection and transmission for pile arrays. *Coastal Engineering Proceedings*, (13): 106-106. <https://doi.org/10.9753/icce.v13.106>
- Wiegel, R.L. 1960. Transmission of waves past a rigid vertical thin barrier. *Journal of the Waterways and harbors division*, 86(1): 1-12. <https://doi.org/10.1061/JWHEAU.0000153>
- Zhu, X., Y. Cao, J. Zhang, J., E.W. Plummer, & J. Guo. 2015. Classification of charge density waves based on their nature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(8): 2367-2371. <https://doi.org/10.1073/pnas.1424791112>
- Submitted* : 13 August 2022
Reviewed : 11 January 2022
Accepted : 18 April 2023

FIGURE AND TABLE TITLES

- Figure 1.* Wave simulation pool view.
- Figure 2.* The effect of resonance on the wave elevation time series data.
- Figure 3.* Wave type of wave theory analytical validation constraints.
- Figure 4.* Energy density spectrum incoming waves, reflections, and transmission.
- Figure 5.* Reflection coefficient relationship (top) and transmission (bottom) to the slope of the wave for linear waves.
- Figure 6.* Wave Steepness relationship to reflection coefficient.
- Figure 7.* The critical point of the degree polynomial three for the reflection coefficient.
- Figure 8.* Coefficient value approach transmission based on variation wave period for water depth 0.3m, 0.6m, 0.9m, and 1.2m.
- Figure 9.* Wave Steepness relationship to transmission coefficient.
- Figure 10.* The critical point of the degree polynomial three for the transmission coefficient.
- Figure 11.* Coefficient value approach transmission based on variation wave period for water depth 0.3m, 0.6m, 0.9m, and 1.2m.
- Figure 12.* Shoreline sketch for laying the pile structure
- Table 1.* Variation of wave parameters and pile.
- Table 2.* Wave speed for variation wave parameters.
- Table 3.* The natural period and frequency of basin.
- Table 4.* Wave theory is based on wave parameters.
- Table 5.* Characterization of incident and transmission wave parameters.
- Table 6.* Approximate reflection and transmission coefficient values for each depth