



## BEBAN GELOMBANG PADA TIANG PANCANG PENAHAN PONTON YANG DILETAKAN DI DEPAN DINDING VERTIKAL

### WAVES LOAD ACTING ON PILES OF PILE GUIDED PONTOON PLACED ON THE FRONT OF VERTICAL WALL

Irham Adrie Hakiki<sup>1)</sup> Vilda Ariviana<sup>1)</sup> Ika Nur Afifah<sup>1)</sup> Leo Eliasta Sembiring<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Balai Penelitian dan Pengembangan Pantai, Kementerian PUPR, Jl. Gilimanuk - Singaraja  
KM.122, Musi, Gerokgak, Musi, Gerokgak, Kabupaten Buleleng, Bali

\*Corresponden author: [adriehakiki@pu.go.id](mailto:adriehakiki@pu.go.id)

Diterima: 28 Juli 2019; Direvisi: 2 Desember 2019 ; Disetujui: 23 Desember 2019

#### ABSTRACT

*Experimental Station for Coastal developed a pilot project of modular concrete floating structure that served as a quay at Kalibaru in North Jakarta. The structure guided by piles and placed in front of Jakarta Coastal Dyke which is a vertical wall structure. From evaluating the structure performance, it is found that the strength of the pile is an important factor for service life of the structure. To provide this, a physical model test of the floating pontoon module guided by piles was conducted at the Laboratory of Balai Litbang Pantai. The model used to determine the behavior of the structure and loads that must be hold by the pile as a seakeeping mechanism. It is done by measuring force acting on piles that caused by pontoon impact by using load cells. The pontoon loaded by regular and irregular waves. From the tests result, the recorded forces has an impuls pattern which have maximum value of 112.67 N. The load that occurs on the pile was not spread evenly on the four piles that hold the floating module. The discrepancy are around 2 – 40%. The forces acting on piles depends on the ponton distance to the vertical wall. The forces increases along with the increases of relative distances of structure to vertical wall to the wavelength. The presence of vertical vall caused this increase because it amplify the waves acting on the structure. The amplification effect are the greatest when the structure distance from the wall is the multiplication factor of halves of wavelength.*

**Keywords :** physical model test, pontoon, floating quay, pile guide, impact force

#### ABSTRAK

*Balai Litbang Pantai melakukan penerapan terbatas struktur apung modular ponton beton untuk difungsikan sebagai dermaga di Kalibaru Jakarta Utara dengan penjagaan posisi menggunakan tiang pancang. Struktur apung diletakkan di depan Tanggul Pengaman Pantai Jakarta yang berupa suatu dinding vertikal. Dari hasil evaluasi kinerja struktur didapat bahwa kekuatan tiang pancang merupakan faktor yang penting bagi masa layan struktur. Untuk mengetahui pengaruh perilaku struktur dan efeknya terhadap pembebanan pada tiang pancang yang menjaga posisinya, dilakukan uji model fisik ponton apung dengan penjagaan tiang pancang. Pengujian dilakukan di Laboratorium Balai Litbang Pantai pada saluran gelombang dengan mengukur gaya akibat benturan modul apung pada tiang pancang dengan menggunakan load cell pada gelombang reguler dan ireguler. Dari hasil uji, didapat bahwa beban yang terjadi pada tiang pancang memiliki pola – pola impuls dengan beban maksimum sebesar 112.67 N. Beban yang terjadi pada tiang pancang tidak tersebar secara merata ke empat tiang yang menahan posisi modul apung dengan perbedaan ketimpangan sekitar 2 – 40%. Besarnya gaya sangat dipengaruhi oleh jarak dari struktur ke dinding vertikal dengan kecenderungan meningkat seiring bertambahnya jarak relatif posisi struktur dari dinding terhadap panjang gelombang. Keberadaan dinding vertikal menyebabkan terjadinya peningkatan gaya karena menyebabkan amplifikasi gelombang, dengan efek terbesar terjadi saat posisi struktur terhadap dinding terletak pada jarak yang merupakan faktor kelipatan ½ dari panjang gelombang.*

**Kata kunci:** uji model fisik, ponton, dermaga apung, tiang pemandu, beban impact

## PENDAHULUAN

Ketertarikan terhadap konstruksi apung semakin meningkat seiring dengan semakin sulit dan mahalnya lahan di darat untuk dikembangkan (Watanabe et al, 2004). Selain itu penggunaan teknologi apung juga memiliki dampak yang baik dari sisi lingkungan, dan juga lebih ekonomis setelah melewati batas kedalaman tertentu (Biesheuvel, 2013). Para peneliti banyak mengeluarkan konsep berbagai macam infrastruktur seperti dermaga, pemecah gelombang, hotel, bandara, jembatan, dan struktur lainnya dalam beberapa dekade ini (Wang dan Tay 2011).

Balai Litbang Pantai merupakan salah satu instansi melakukan kegiatan penelitian di bidang teknologi apung dan melakukan penerapan terbatas struktur apung modular ponton beton untuk difungsikan sebagai dermaga di Kalibaru Jakarta Utara. Dermaga apung modular yang diterapkan oleh Balai Litbang Pantai adalah dermaga apung dengan material beton yang ditempatkan di depan tanggul pantai pengaman Jakarta yang merupakan sebuah dinding vertikal. Modul dermaga beton memiliki ukuran panjang 10 m x 4 m x 1,6 m yang bila ditenggelamkan ke air laut memiliki *draft* 1 m dan tinggi jagaan (*freeboard*) 0,6 m. Modul terapung ini didesain untuk dapat mengakomodir beban berat di atasnya sebesar 250 kg/m<sup>2</sup>, dan dalam kondisi desain tersebut masih memberikan tinggi jagaan sebesar 0,4 m. Dermaga dibuat dengan merangkai modul-modul apung dan menjaga posisinya dengan tiang pancang. Tiap modul dijaga dengan 4 tiang pancang. Dengan ditahan tiang pancang, pergerakan dermaga hanya diperbolehkan untuk pergerakan naik turun saja agar dapat beradaptasi dengan fluktuasi naik turun muka air. Penggunaan ponton modular ini dimaksudkan untuk mempercepat pelaksanaan pekerjaan karena dapat dilakukan konstruksi secara paralel dan mereduksi gaya yang perlu ditahan oleh ponton akibat gelombang dengan menyediakan titik - titik penyaluran gaya pada sambungannya (Balai Litbang Pantai, 2017).

Dermaga apung modular memiliki beberapa keunggulan yaitu proses konstruksinya yang lebih cepat karena dapat dipabrikasi di darat, adaptif terhadap fluktuasi muka air sehingga dapat mempertahankan level lantai dermaga dengan kapal, tidak terpengaruh daya dukung tanah yang rendah karena pondasi utamanya adalah air (Sasoko, Ghofur, & Wijanarko, 2012). Beberapa material yang biasa digunakan untuk konstruksi dermaga apung adalah baja, beton, dan *High-density polyethylene* (HDPE), aplikasi dari material tersebut telah digunakan pada Pelabuhan Hercule,

Monaco dan RIBS yang dikembangkan US *Army Engineer Research and Development Center* (Fousert, 2006). Keunggulan beton dari material lainnya adalah lebih murah dan awet dari baja jika digunakan di lingkungan laut dan lebih kaku dari HDPE sehingga lebih nyaman digunakan karena tidak banyak mengalami deformasi akibat gelombang.

Berdasarkan evaluasi penerapan struktur di lapangan, struktur dermaga mengalami kerusakan yang dimulai dari patahnya tiang pancang terlebih dahulu pada posisi di sekitar elevasi dasar laut. Akibatnya, modul kehilangan fungsi penjagaan sehingga bergerak semakin tidak beraturan dan berbenturan satu sama lain mengakibatkan rusaknya komponen-komponen struktur lainnya dan juga modul itu sendiri. Diduga beban yang mengenai tiang tidak terdistribusi secara merata pada seluruh sistem tiang sehingga berakibat pada kerusakan sistem rangkaian struktur dermaga. Kondisi tersebut diperparah dengan lokasi struktur yang berada di depan dinding vertikal, sehingga sangat memungkinkan untuk terjadinya amplifikasi dan perubahan fase gelombang sehingga pergerakan modul apung semakin ireguler. Peristiwa tersebut menunjukkan bahwa tiang yang berfungsi sebagai sistem penjagaan struktur modular apung merupakan komponen yang sangat penting dan krusial dari sebuah keseluruhan sistem struktur terapung.

Dikarenakan pentingnya komponen struktur penjagaan dari sebuah sistem struktur terapung, terutama pada sistem tiang pancang yang menahan beban dan menjaga posisi struktur, perlu dilakukan studi yang lebih mendalam tentang analisis dinamik dari dermaga apung. Kegagalan pada sistem penjagaan posisi dermaga apung pernah terjadi di Sande, Vestfold, Norwegia. Analisis kegagalan pada struktur tersebut dilakukan dengan menggunakan model numerik, namun ditemukan bahwa analisis dengan model numerik kurang akurat karena masih banyaknya simplifikasi yang digunakan pada model (Børkja, 2015). Oleh karena itu penelitian ini dilakukan dalam bentuk uji model fisik dengan lokasi uji model dilaksanakan di laboratorium Balai Litbang Pantai. Pengujian dengan model fisik dipilih karena dapat meminimalkan asumsi yang tidak diketahui untuk observasi dan analisis fenomena interaksi gelombang dan benda apung. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh perilaku struktur akibat gelombang dan interaksinya terhadap tiang pancang yang menjaga posisinya. Secara khusus pada tulisan ini dibahas pengujian gaya *impact* pada tiang pancang yang menahan modul apung akibat pergerakan dari modul apung yang dieksitasi gelombang. Penelitian ini juga akan

menguji pengaruh adanya dinding vertikal di dekat struktur untuk memahami pola amplifikasi yang terjadi.

**METODOLOGI**

**Formulasi Model**

Dermaga apung modular dengan penjagaan tiang pancang terdiri dari beberapa komponen penyusun yaitu modul apung sebagai lantai dermaga, tiang pancang sebagai penjaga posisi modul apung, dan *pile guide* sebagai penghubung modul apung ke tiang pancang yang berfungsi untuk membatasi pergerakan dan menyalurkan beban dari modul apung ke tiang pancang. Dengan sistem struktur tersebut, dermaga apung masih dapat bergerak dalam 6 derajat kebebasan namun pergerakan tersebut terbatas oleh ruang gerak yang tersisa antara diameter dalam *pile guide* dengan diameter luar tiang pancang. Pergerakan utama struktur terjadi pada modul apung yang disebabkan oleh gaya hidrodinamik. Hubungan pergerakan struktur dengan gaya penggerakannya dapat dinyatakan dalam persamaan gerak yang secara matematis dituliskan sebagai berikut.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

- F : gaya hidrodinamik
- M : massa
- C : redaman (*damping*)
- K : kekakuan (*stiffness*)
- X,  $\dot{X}$ ,  $\ddot{X}$  : simpangan, kecepatan, percepatan

Gaya hidrodinamik pada benda apung merupakan gaya yang bekerja pada permukaan benda saat terjadi interaksi gelombang dengan benda apung. Gaya hidrodinamik ini didapatkan dari potensial kecepatan aliran di sekitar struktur dan terdiri dari gaya radiasi dan gaya eksitasi yang dapat dikategorikan menjadi gaya Froude-Krylov dan gaya difraksi (Sawaragi, 1995). Sehingga gaya total hidrodinamik dinyatakan sebagai berikut.

$$F = F_{\text{radiation}} + F_{\text{Froude-Krylov}} + F_{\text{difraksi}} \dots\dots\dots(2)$$

Gaya hidrodinamik ini sangat bergantung pada ukuran relatif benda apung terhadap gelombang. Pada benda berukuran relatif kecil ( $L/D < 0.2$ ), gaya radiasi dan gaya difraksi diasumsikan tidak memiliki pengaruh (Isaacson, 1979). Sehingga gaya yang bekerja hanya gaya Froude-Krylov yang dapat disebut sebagai gaya eksitasi. Namun pada benda berukuran kecil fenomena pemisahan aliran memiliki pengaruh yang besar pada gaya eksitasi, sehingga gaya eksitasi dipengaruhi oleh gaya drag dan gaya inersia.

Pergerakan modul pada 6 derajat kebebasan sangat dipengaruhi oleh arah datangnya gelombang, sehingga pada saat gelombang bekerja pada posisi tegak lurus dengan modul apung pergerakan yang terjadi dapat disederhanakan dengan hanya memantau 3 arah saja, yaitu *sway*, *heave*, dan *roll*. Namun pergerakan ini dibatasi oleh *pile guide*, akibatnya pergerakan modul akibat gaya hidrodinamik dipaksa untuk berhenti dengan tiba – tiba karena *pile guide* yang menjaga posisi modul membentur tiang pancang. Ketika benda yang bergerak lalu berhenti maka akan terjadi perubahan energi kinetik pada benda tersebut. Besarnya energi kinetik sama dengan energi translasi yang bekerja pada modul apung saat masih dapat bergerak sampai berhenti karena gerakannya dibatasi oleh *pile guide*. Hubungan perubahan energi tersebut dinyatakan sebagai berikut.

$$E_{\text{kinetik}} = E_{\text{translasi}} \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = F.s \dots\dots\dots(4)$$

Besarnya energi translasi ini akan ditentukan dari hubungan gaya hidrodinamik dengan karakteristik hidrodinamik dari modul apung yang dinyatakan pada persamaan (1) dan (2). Kemudian ketika modul apung berhenti sesaat akibat terjadinya kontak antara *pile guide* dan modul apung, pada proses ini terjadi perubahan momentum pada modul apung. Reaksi dari perubahan momentum tersebut adalah impuls pada bidang kontak. Impuls ini terjadi dalam waktu yang sangat singkat sehingga beban yang terjadi pada saat kontak tersebut adalah gaya *impact*. Fenomena tersebut dinyatakan sebagai berikut.

$$F_{\text{im}} \cdot \Delta t = m \cdot v_1 - m \cdot v_0 \dots\dots\dots(5)$$

dimana:

- $F_{\text{im}}$  : gaya *impact* [kg m/s<sup>2</sup>]
- $\Delta t$  : waktu kontak saat tumbukan [s]
- m : massa [kg]
- $v_1$  : kecepatan benda saat terjadi kontak = 0
- $v_0$  : kecepatan benda sesaat sebelum berhenti (didapat dari pers. (4)) [m/s]

Dari hubungan (4) dan (5) dapat dinyatakan bahwa ruang gerak antara *pile guide* dan tiang pancang yang semakin besar akan menyebabkan gaya *impact* yang semakin besar.

Gaya *impact* ini merupakan gaya yang ditransferkan dari interaksi benda apung dengan gelombang ke sistem tiang pancang. Dalam lingkup kekuatan tiang pancang yang menjaga posisi modul apung, posisi tiang yang merupakan

tiang vertikal akan menahan beban tersebut sebagai momen. Lengan momennya berupa jarak dari posisi kontak *pile guide* dengan tiang pancang ke titik jepit tiang pancang di tanah. Secara sederhana momen dinyatakan pada persamaan 6.

$$M = F_{im} \cdot l \dots \dots \dots (6)$$

dimana:

$l$  : lengan momen [m]

Berdasarkan penjabaran tersebut dapat dirangkumkan menjadi formulasi fenomena pembebanan yang terjadi. Formulasi kejadiannya adalah gelombang mengeksitasi benda apung sehingga benda apung akan bergerak dan memiliki momentum. Dengan terbatasnya ruang gerak maka momentum pada benda apung akan dipindahkan saat terjadi benturan, yang pada kasus ini adalah tiang penjaga posisinya. Momentum pada tiang ditransformasikan menjadi besarnya gaya bekerja yang bergantung dengan lamanya waktu kontak. Dengan diketahuinya titik jepit tiang, momen berdasarkan gaya tersebut dapat diketahui. Momen ini menjadi parameter yang menentukan pemilihan material dan dimensi tiang yang menentukan kapasitasnya dalam menahan beban ponton akibat gelombang.

Untuk dapat mengukur fenomena yang terjadi berdasarkan formulasi tersebut dan menganalisis hubungan gelombang dan gaya pada tiang penahan posisi benda apung, parameter yang menjadi variabel uji dan perlu diukur adalah gelombang yang mengeksitasi benda apung (diukur dengan *wave probe*), pergerakan yang terjadi pada benda apung (diukur dengan *accelerometer*), gaya yang ditransferkan benda apung ke tiang (diukur dengan *load cell*), dan momen yang terjadi pada tiang (diukur dengan *strain gauge*).

Keberadaan dinding vertikal akan menyebabkan terjadinya amplifikasi gelombang karena dapat menyebabkan fenomena *standing waves*. Oleh karena itu dalam uji model fisik ini dihipotesiskan bahwa gaya akan semakin besar jika struktur berada semakin dekat dengan dinding vertikal. Sehingga faktor jarak dinding terhadap struktur juga menjadi variabel bebas dalam uji ini.

Dalam lingkup naskah ini pembahasan difokuskan pada gaya yang terjadi pada tiang penahan ponton dermaga akibat gelombang sehingga variabel yang dianalisis hanya elevasi muka air hasil ukur *wave probe* dan gaya pada tiang akibat tumbukan ponton yang diukur *load cell*.

### Skematisasi Model

Model dibuat dalam skala laboratorium terhadap prototip dermaga apung modul beton yang diterapkan di Kalibaru, Jakarta dengan skala 1:20 (disesuaikan dengan kemampuan fasilitas laboratorium) dan mengikuti syarat kemiripan nilai Froude (Wolters, 2011). Kesamaan nilai Froude akan membuat gaya-gaya akibat gravitasi terskalakan dengan baik.

Komponen benda uji terdiri dari modul apung, tiang pancang, dan *pile guide* (Gambar 1) dengan penskalaan terhadap prototip disajikan pada Tabel 1. Modul apung dan *pile guide* dibuat dengan 3D *printing* dengan material filament plastik PLA (*Polylactic acid*) yang memiliki berat jenis 1,24 g/cm<sup>3</sup> dan memiliki kapasitas tarik 65 Mpa. Penggunaan teknologi 3D *printing* memungkinkan untuk membuat benda uji yang lebih akurat dan presisi sehingga dapat membuat benda uji modular dalam skala yang kecil namun dengan tingkat ketelitian yang tinggi.

Modul apung diskalakan terhadap prototip lapangan, sedangkan tiang pancang dan *pile guide* dibuat secara skematis sebagai variabel bebas dengan mempertahankan ruang antara diameter tiang pancang dan diameter dalam *pile guide* memiliki jarak yang sama antara model dan prototip. Hal ini dilakukan karena beban pada tiang dipengaruhi oleh dimensi ponton karena akan memberikan kontribusi pada massa yang menumbuk tiang pancang, sedangkan tiang pancang adalah bidang yang menerima kontak sehingga dimensi tiang tidak akan mempengaruhi beban yang menumbuk ke tiang. Kemudian model ditempatkan di depan dinding vertikal untuk mendapatkan efek amplifikasi gelombang akibat keberadaan dinding tegak.



Gambar 1 Benda Uji Skala 1:20

### Skenario Uji

Parameter gelombang dan muka air menjadi faktor utama yang dipertimbangkan untuk penentuan skenario uji. Kedalaman air memberikan pengaruh perbedaan kinematika

gelombang dan juga jarak titik tangkap gaya ke titik jepit tiang (lengan momen). Maka pada penentuan muka air ini dilakukan peninjauan terhadap lokasi studi (Kalibaru, Jakarta Utara) untuk membandingkan pengaruh momen pada saat pasang dan surut. Dari faktor tersebut pada lokasi studi didapatkan bahwa kontribusi lengan momen lebih besar dari pada kinematika gelombang terhadap besaran momen sehingga pada pengujian digunakan muka air kondisi pasang.

**Tabel 1** Penskalaan Benda Uji

Parameter	Skala	Ukuran Prototip [m]	Ukuran Model [cm]
Panjang Modul	1:20	10	50
Lebar Moduk	1:20	4	20
Tinggi Modul	1:20	1,6	8
Draft Modul	1:20	1	5
Diameter Tiang	-	-	3,3
Diameter dalam <i>Pile Guide</i>	-	-	3,8
Jarak antara Diameter tiang dan Diameter dalam <i>Pile Guide</i>	1:20	0,1	0,5

Parameter uji gelombang ditentukan berdasarkan kejadian gelombang yang terjadi di wilayah studi yang masih dapat merambat sampai posisi struktur berada tanpa terjadi gelombang pecah. Maka dari itu gelombang dengan periode kecil yang diutamakan untuk diuji. Selain itu pada periode gelombang yang lebih kecil, gelombang yang mampu merambat ke lokasi struktur tanpa pecah juga lebih tinggi.

Berdasarkan formulasi tersebut, skenario akhir yang diujikan disajikan pada Tabel 2 dengan jumlah pengujian adalah 84 simulasi (tujuh skenario gelombang dengan tiga penempatan struktur berbeda dan tiap skenario gelombang diujikan dua kali) dan masing – masing uji memiliki durasi sepanjang 500 kejadian gelombang. Pengujian dilakukan di saluran gelombang (*flume*) dengan mesin pembangkit gelombang (*wave generator*) untuk membangkitkan gelombang satu arah (*single directional*) dan pada ujung saluran dekat dengan lokasi penempatan struktur, dibuat dinding vertikal. Pengujian dilakukan untuk tipe gelombang reguler dan ireguler dengan spektrum JONSWAP untuk mengetahui pola perilaku pembebanan dari struktur. Spektrum JONSWAP dipilih karena perairan di Indonesia memiliki keserupaan distribusi energi dengan spektrum JONSWAP.

**Pengumpulan Data**

1. Pengukuran Muka Air dan Kecepatan Orbital Gelombang

Pengukuran muka air dilakukan dengan instrumen *wave probe*. Pada pengujian ini digunakan 8 unit *wave probe* produk HR Wallingford dengan nomor seri instrument EQ-009 R4. Pengukuran muka air dilakukan untuk analisis gelombang pada struktur. Pengambilan data dilakukan dengan frekuensi sampling 25 Hz, dengan penempatan instrumen di sepanjang saluran gelombang sedemikian sehingga dapat dilakukan analisa pemisahan gelombang datang dan gelombang refleksi mengikuti (Mansard dan Funke, 1980).

**Tabel 2** Skenario Pengujian

Orientasi Struktur	Jenis Gelombang	Tinggi Gelombang (cm)	Periode Gelombang (detik)	Muka air (cm)
Beam	Reguler; Ireguler	4,5	1,1	15
		6,9	1,1	
		8	1,1	
		4,5	1,3	
		6,9	1,3	
		4,5	1,8	
		2,6	2,2	

Pemisahan tersebut dilakukan dengan menganalisis kejadian gelombang dalam domain frekuensi dan memisahkan komponen gelombang datang dan gelombang refleksi (Goda dan Suzuki, 1976; Mansard dan Funke, 1980; Suh, Park, dan Park, 2001; Suryanto, 2006; Zelt dan Skjelbreia, 1992). Pada pengujian ini digunakan 6 *wave probe* dalam analisis refleksi untuk memperkecil kemungkinan terjadinya *singularity* dalam proses separasi (Zelt dan Skjelbreia, 1992).

Pengukuran kecepatan orbital gelombang (arah kecepatan u, v, dan w) yang bekerja pada modul dilakukan dengan menggunakan 1 unit *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV). ADV yang digunakan untuk akuisisi data pada pengujian ini ini adalah 16-MHz MicroADV dari SonTek.

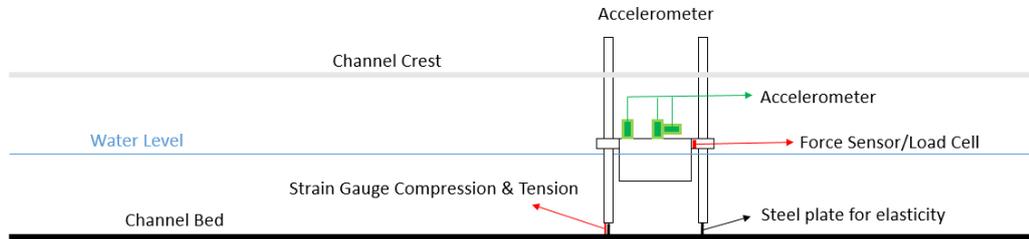
Penempatan *Wave Probe*, dan *ADV* ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4. Posisi pemasangan *wave probe* juga berubah relatif terhadap posisi struktur yang berbeda-beda. Instrumen struktur terletak pada 3 posisi yaitu skenario Modul A (jarak 250 cm dari dinding vertikal), skenario Modul B (jarak 150 cm dari dinding vertikal) dan skenario Modul C (jarak 50 cm dari dinding vertikal).

2. Pengukuran Gaya

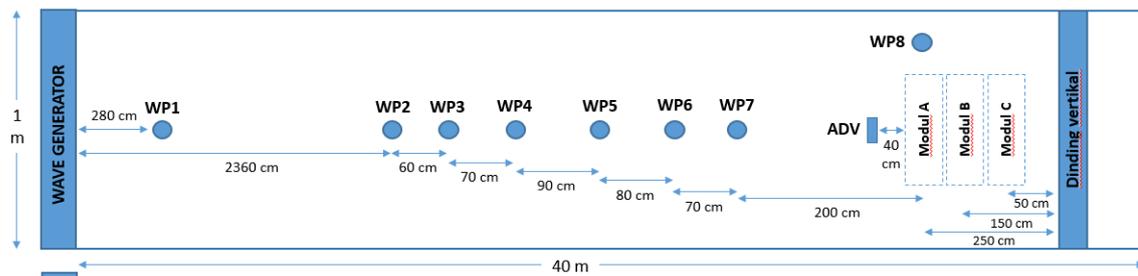
Pengukuran gaya dengan *load cell* dilakukan pada bidang kontak modul apung dan tiang pancang untuk mengukur gaya tumbuk dari modul

ke tiang. Sebanyak 2 unit *load cell* digunakan untuk menghitung gaya hantam modul apung pada tiang pancang. *Load cell* yang digunakan adalah produk Kyowa tipe LCN-A-500N-P. *Load cell* tersebut hanya dapat digunakan untuk mengukur gaya tekan. Pengukuran dilakukan dengan frekuensi sampling 2 kHz. *Load cell* dipasangkan pada pile guide yang menempel pada modul, sehingga posisi

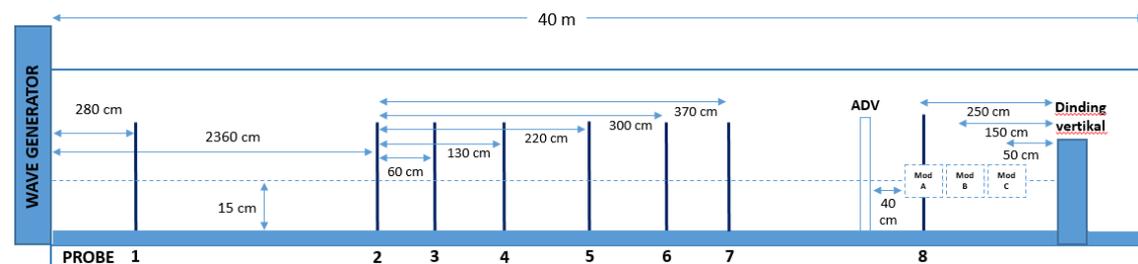
bidang kontak *load cell* dengan tiang akan selalu berubah – ubah tergantung dengan posisi modul. Pada 1 skenario gelombang dilakukan dua kali pengujian dengan memindahkan posisi *load cell*, sehingga dapat diukur beban tekan pada empat tiang yang menahan modul apung. Penempatan *load cell* ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2 Penempatan Instrumen pada Struktur



Gambar 3 Penempatan Instrumen pada Air (Tampak Atas)



Gambar 4 Penempatan Instrumen pada Air (Tampak Samping)

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Gelombang Datang

Analisis refleksi gelombang untuk separasi gelombang datang dan gelombang pantul perlu dilakukan karena keberadaan dinding vertikal di model uji menyebabkan data muka air yang terukur terpolusi dengan gelombang yang dipantulkan dinding, sehingga data muka air yang terukur tidak menggambarkan kondisi gelombang datang yang bekerja membebani struktur.

Separasi gelombang datang dan gelombang pantul dilakukan dengan menggunakan enam *wave probe* dengan penomoran WP2 – WP7. Hasil

separasi berupa spektrum gelombang datang ( $H_{s\_In}$ ) dan gelombang pantul ( $H_{s\_Re}$ ) yang kemudian digunakan untuk menghitung parameter gelombang pada domain frekuensi (Tabel 3) dan koefisien refleksi (Gambar 5) dengan membangkitkan spektrum gelombang pantul dengan spektrum gelombang datang.

Sebelum dilakukan analisis refleksi gelombang, dilakukan kalibrasi untuk gelombang yang dibangkitkan mesin agar sesuai dengan gelombang target sesuai Tabel 2. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan bacaan pada *wave probe* 1 (WP1) dengan target gelombang uji. Kalibrasi dilakukan dengan durasi yang lebih pendek (pembangkitan

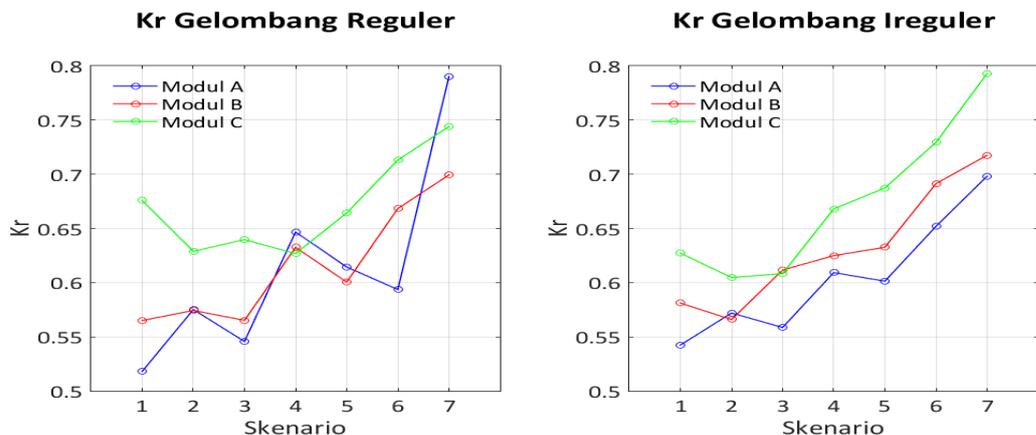
20 gelombang) untuk meminimalkan efek refleksi. Perambatan gelombang di sepanjang saluran gelombang mengakibatkan gelombang mengalami perubahan energi karena berinteraksi dengan dinding dan dasar saluran, baik dalam bentuk shoaling maupun disipasi energi akibat friksi dengan dinding – dinding saluran.

Keberadaan dinding vertikal memberikan pengaruh yang cukup besar pada bacaan muka air. Refleksi yang terjadi rata – rata lebih besar dari 50% gelombang datang untuk semua skenarionya, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Berdasarkan tiga skenario posisi struktur yang berbeda, Modul C yang terletak paling dekat dengan struktur mendapat pengaruh gelombang refleksi yang lebih besar dibanding posisi lainnya. Selain itu koefisien refleksi cenderung meningkat

seiring dengan membesarnya periode gelombang. Posisi modul mempengaruhi peningkatan nilai koefisien refleksi dihipotesiskan terjadi akibat interaksi gelombang pantul terhadap benda apung. Pembangkitan gelombang akibat pergerakan benda apung yang biasa disebut radiasi gelombang, sangat bergantung dengan bilangan gelombang yang mengeksitasinya (Yang, Zhang, dan Li, 2017). Keberadaan dinding vertikal memungkinkan terjadinya *standing waves*, dengan amplifikasi pada tinggi gelombang meningkat jika posisi struktur semakin dekat dengan posisi dinding (Goda dan Suzuki, 1976; Ishida, 1972; Mansard dan Funke, 1980). Maka posisi struktur yang semakin dekat dengan dinding vertikal akan menyebabkan struktur mengalami eksitasi dari gelombang pantul yang semakin besar dan akan menghasilkan gelombang radiasi yang semakin besar.

**Tabel 3** Resume analisis refleksi gelombang

Skenario Gelombang			1	2	3	4	5	6	7
Target WP1 (cm)			4,5	6,9	8	4,5	6,9	4,5	2,6
Hs_In	Reg	Modul A	5,55	5,76	6,19	5,30	6,78	5,77	3,80
		Modul B	5,49	6,60	6,16	5,49	7,01	5,72	4,15
		Modul C	5,26	6,70	6,62	5,60	7,04	5,61	4,16
	Ireg	Modul A	4,04	4,89	5,20	4,04	5,23	4,22	2,73
		Modul B	4,20	5,13	5,24	4,16	5,36	4,27	2,92
		Modul C	4,20	5,15	5,40	4,15	5,36	4,36	2,80
Hs_Re	Reg	Modul A	2,88	3,32	3,38	3,43	4,17	3,43	3,01
		Modul B	3,10	3,79	3,48	3,47	4,21	3,82	2,90
		Modul C	3,55	4,20	4,23	3,51	4,68	4,00	3,10
	Ireg	Modul A	2,19	2,80	2,90	2,46	3,15	2,75	1,90
		Modul B	2,44	2,90	3,21	2,60	3,39	2,95	2,10
		Modul C	2,63	3,11	3,28	2,77	3,69	3,18	2,22
Kr	Reg	Modul A	0,52	0,58	0,55	0,65	0,61	0,59	0,79
		Modul B	0,56	0,57	0,57	0,63	0,60	0,67	0,70
		Modul C	0,68	0,63	0,64	0,63	0,66	0,71	0,74
	Ireg	Modul A	0,54	0,57	0,56	0,61	0,60	0,65	0,70
		Modul B	0,58	0,57	0,61	0,62	0,63	0,69	0,72
		Modul C	0,63	0,60	0,61	0,67	0,69	0,73	0,79



**Gambar 5** Koefisien refleksi gelombang

Kemudian meninjau parameter spektrum gelombang (Tabel 3), didapatkan bahwa tinggi gelombang datang banyak mengalami perubahan dari posisi kontrol di WP1. Pola perubahan tersebut tidak konsisten antara pengujian dalam skenario gelombang reguler dan ireguler. Pada skenario gelombang reguler, skenario gelombang dengan bacaan WP1 > 4.5 cm mengalami kehilangan tinggi gelombang, sedangkan untuk skenario lainnya mengalami kenaikan tinggi gelombang. Pada skenario gelombang ireguler didapatkan bahwa pada gelombang dengan bacaan WP1 > 2.6 cm mengalami kehilangan tinggi gelombang sedangkan pada skenario 7 dengan target tinggi 2,6 cm terjadi kenaikan tinggi gelombang.

Kejadian tersebut diasumsikan terjadi akibat interaksi gelombang pada kondisi perairan yang sangat dangkal. Kombinasi antara tinggi dan periode gelombang yang menjadi input pengujian merupakan kondisi yang mendekati batasan terjadinya gelombang pecah untuk pengujian di kedalaman air 15 cm. Keberadaan struktur apung dan dinding vertikal membuat interaksi gelombang menjadi semakin kompleks karena memungkinkan terjadinya refleksi gelombang dan radiasi gelombang. Ketika fenomena tersebut terjadi pada fasa yang sama kenaikan muka air sangat mungkin terjadi, tetapi kenaikan muka air akibat gelombang ini dibatasi oleh kedalaman muka air sehingga saat terjadi secara tiba – tiba gelombang tidak dapat mempertahankan bentuknya dan pecah. Pecahnya gelombang tersebut mempengaruhi grup gelombang yang bersamaan berpropagasi (Müller, Garrett, dan Osborne, 2012), sehingga menyebabkan hilangnya energi gelombang. Namun pada kondisi dimana gelombang masih mampu mempertahankan bentuk serta kecuramannya secara alami, maka akan terjadi kenaikan tinggi gelombang/amplifikasi yang signifikan.

Efek amplifikasi sebelum gelombang pecah tersebut lebih banyak teridentifikasi untuk skenario gelombang reguler, hal ini diperkirakan karena gelombang reguler hanya memiliki satu komponen harmonik sehingga potensi terjadinya resonansi dengan gelombang pantul dan gelombang radiasi lebih besar.

Akibat kejadian tersebut tinggi gelombang datang memiliki perbedaan yang cukup jauh

dengan gelombang target kalibrasi dengan gelombang datang ( $H_s$ \_In) terbesar diperoleh dari skenario 2 ( $H = 6,9$  cm,  $T = 1,1$  s) dan 5 ( $H = 6,9$  cm dan  $T = 1,3$  s) untuk gelombang reguler dan skenario 3 ( $H = 8$  cm,  $T = 1,1$  s) dan 5 ( $H = 6,9$  cm dan  $T = 1,3$  s) untuk gelombang ireguler (Tabel 3).

Sebagai contoh perbedaan hasil analisis dalam mengolah data perambatan gelombang yang terjadi pada saluran dengan memfaktorkan refleksi, ditampilkan perambatan gelombang yang terjadi pada saluran pada

Gambar 6 dan parameternya pada Tabel 4.

**Tabel 4** Parameter statistik gelombang untuk skenario uji gelombang ireguler dengan target pembangkitan  $H_s = 8$  cm dan  $T_p = 1,1$  cm

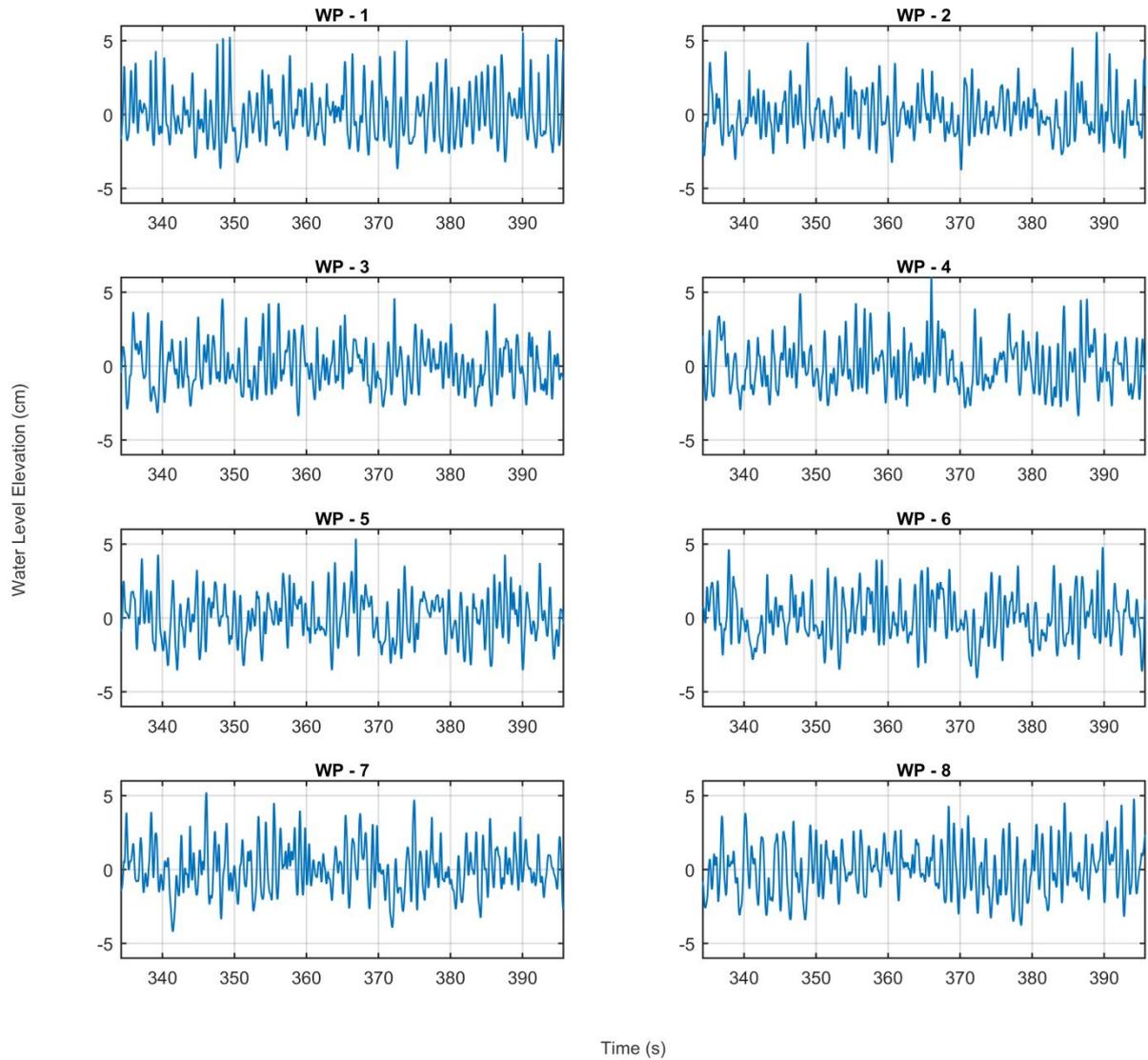
Nomor Wave Probe	$H_s$ (cm)	$T_{mean}$ (s)
WP1	6,78	1,00
WP2	5,77	1,02
WP3	5,64	1,01
WP4	6,03	1,00
WP5	5,80	1,01
WP6	6,10	0,98
WP7	5,88	0,99
WP8	6,28	0,98

Dengan durasi uji yang panjang, bacaan pada WP1 yang menjadi titik kontrol target kalibrasi menjadi terpolusi oleh gelombang refleksi, sehingga bacaan pada WP1 saat uji model berbeda dengan saat kalibrasi. Analisis refleksi menghasilkan parameter gelombang pada posisi WP2. Parameter tanpa analisis reflesi menunjukkan nilai yang lebih besar karena data telah terpolusi gelombang refleksi.

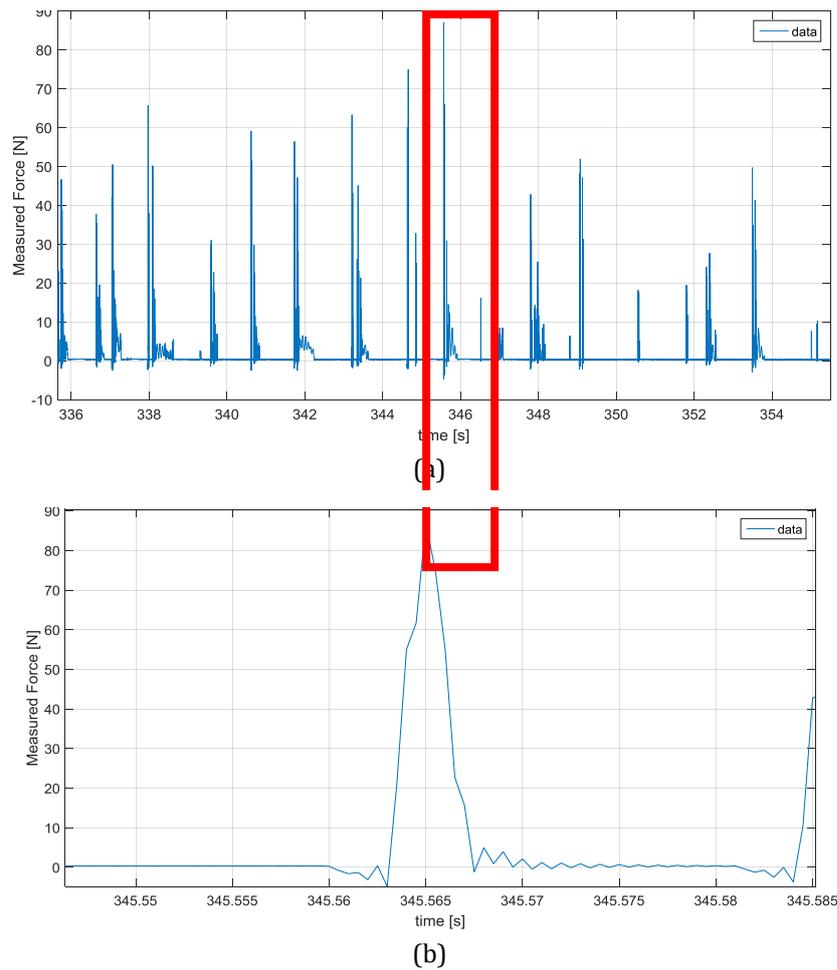
**Beban Impact**

Dari hasil pengukuran dengan menggunakan *load cell* diketahui bahwa beban dari modul yang terukur memiliki pola kelompok – kelompok impuls yang terjadi dalam durasi yang sangat singkat (Gambar 7). Akibat pola kejadian tersebut, gaya yang terjadi pada tiang yang menahan modul apung yang terjadi dalam waktu yang singkat, didefinisikan sebagai gaya *impact* (Wienke dan Oumeraci, 2005).

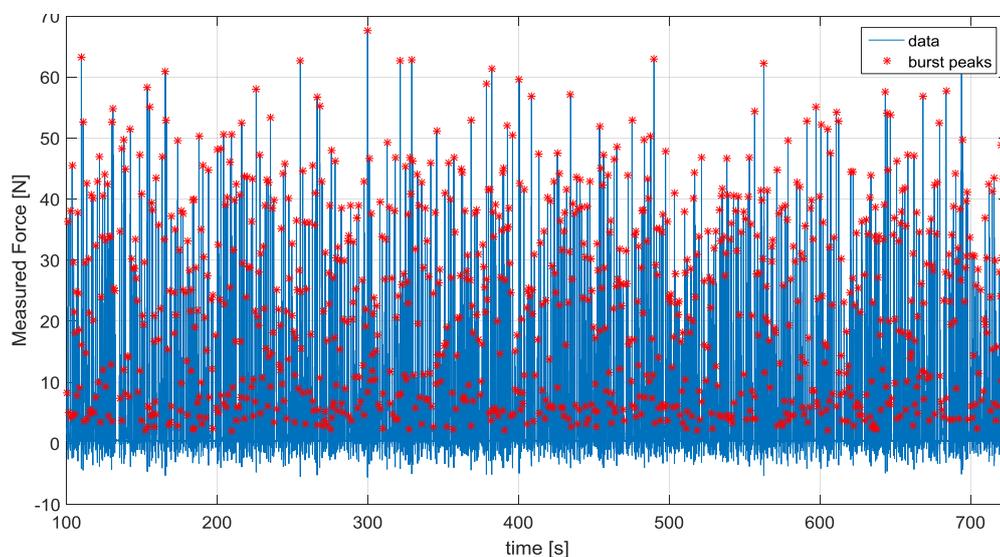
**Skenario Gelombang Ireguler**  
**Hs = 8 cm; Tp = 1.1 s**



**Gambar 6** Cuplikan hasil ukur seri waktu muka air untuk tiap *wave probe* dari salah satu skenario uji gelombang ireguler pada rentang waktu yang sama untuk menunjukkan proses transformasi gelombang

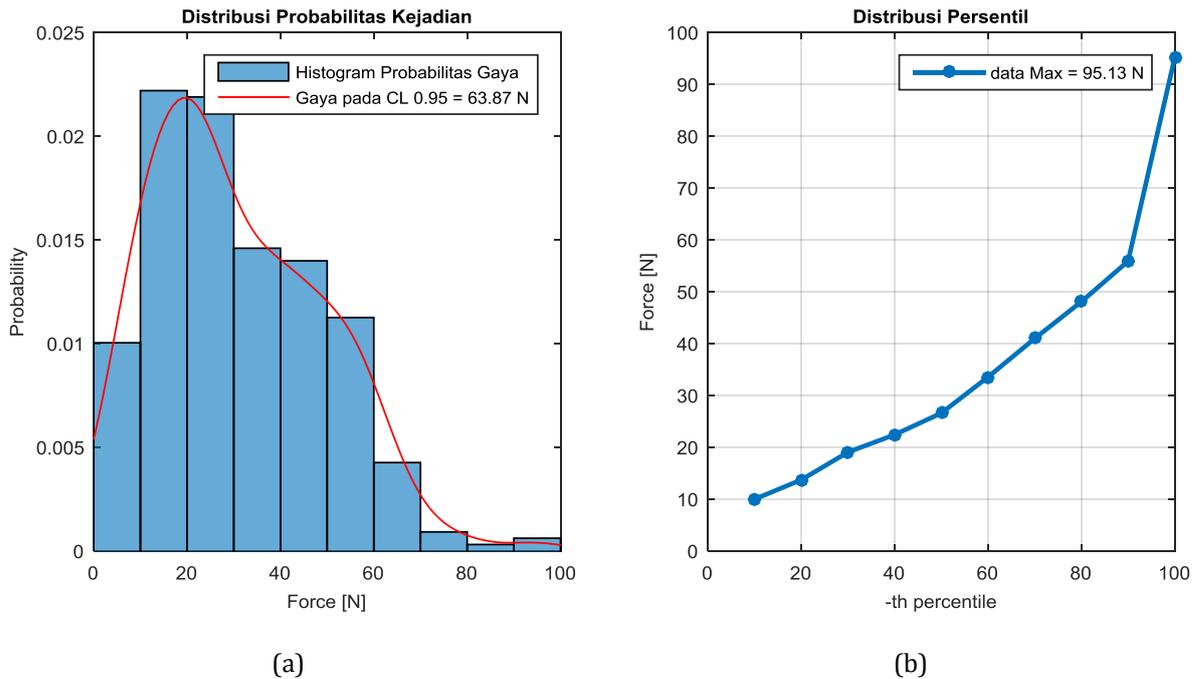


**Gambar 7** Cuplikan pola gaya yang terukur pada *load cell* pada salah satu skenario uji sebagai contoh tipikal data *load cell* yang terekam; (a) Seri waktu pengukuran gaya; (b) Perbesaran untuk kejadian impuls yang terjadi pada seri waktu gaya.



**Gambar 8** Contoh identifikasi puncak impuls yang digunakan untuk analisis dari tiap kelompok impuls pada kejadian gelombang dari hasil ukur *load cell* salah satu skenario uji

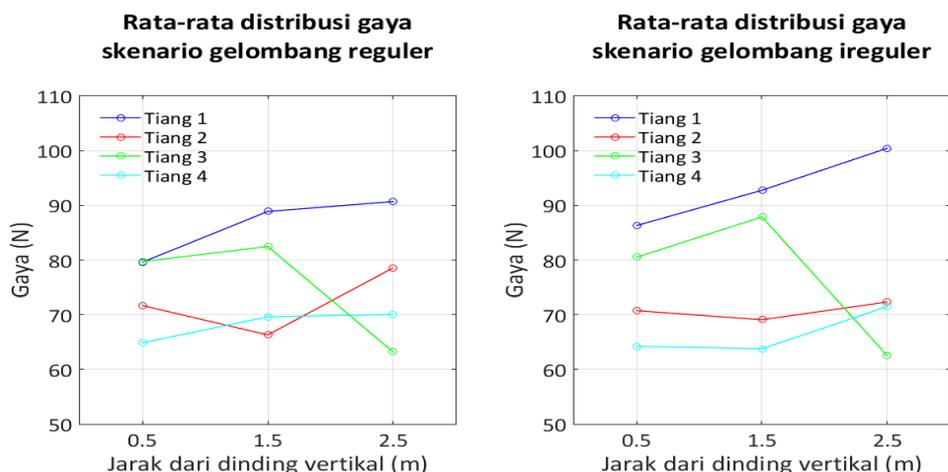
**Pola Distribusi Gaya Pada Tiang**



**Gambar 9** Contoh pola distribusi gaya pada satu tiang dari salah satu skenario uji. Puncak – puncak impuls yang telah teridentifikasi dikelompokkan berdasarkan distribusi kejadiannya untuk kemudian dianalisis menggunakan metode yang sesuai jenis distribusinya. (a) Distribusi berdasarkan probabilitas kejadiannya yang didekati dengan fungsi distribusi Kernel, nilai representatif yang digunakan untuk analisis pada pola distribusi ini adalah nilai kejadian pada tingkat signifikansi 0,95. (b) Distribusi berdasarkan persentil data untuk menunjukkan rentang konsentrasi persebaran data pengukuran, nilai representatif untuk analisis pada pola distribusi ini adalah nilai persentil ke-100.

**Tabel 5** Gaya 100-th Percentile untuk masing-masing tiang

Skenario		Modul A				Modul B				Modul C			
		T1 [N]	T2 [N]	T3 [N]	T4 [N]	T1 [N]	T2 [N]	T3 [N]	T4 [N]	T1 [N]	T2 [N]	T3 [N]	T4 [N]
Reguler	1	75,2	89,2	60,5	74,1	88,0	72,7	73,9	68,6	76,1	66,4	75,7	49,4
	2	88,6	72,1	70,9	72,2	93,9	67,3	86,3	83,0	85,5	77,2	75,3	60,0
	3	94,1	88,0	64,5	85,3	95,1	70,2	82,0	61,6	68,2	71,6	78,5	71,2
	4	108,3	78,5	59,6	71,0	84,1	56,4	90,2	76,0	91,1	73,8	91,2	73,7
	5	91,0	81,2	64,6	75,9	104,2	68,3	85,0	68,3	82,6	74,9	97,9	70,7
	6	105,5	82,6	67,5	69,8	89,0	67,5	88,1	79,9	90,1	71,0	71,8	68,0
	7	72,1	58,3	54,9	42,1	67,8	62,0	71,7	50,0	64,0	66,9	67,6	61,1
Ireguler	1	106,8	67,8	60,4	68,1	101,5	69,5	89,4	73,3	89,0	67,1	78,0	64,0
	2	110,0	75,1	76,8	72,9	97,8	78,9	100,0	66,1	97,3	79,3	85,4	75,8
	3	99,0	93,4	73,7	75,0	93,2	73,7	98,0	68,6	86,4	85,4	87,1	67,6
	4	97,3	66,5	58,1	70,5	86,8	69,7	81,7	63,9	89,4	74,4	76,0	61,3
	5	108,8	80,5	68,4	79,8	106,2	76,4	99,0	71,7	93,7	77,6	92,6	71,8
	6	112,7	68,0	56,7	70,9	82,8	65,3	78,8	61,1	89,8	62,9	76,8	63,0
	7	68,5	55,0	43,5	63,3	81,0	50,2	68,3	41,7	58,6	48,5	67,8	46,1



**Gambar 10** Rata-rata Distribusi Gaya 100-th Percentile untuk tiap tiang

Kejadian dari kelompok – kelompok impuls yang terukur, memiliki jarak kejadian dengan kisaran rentang satu periode gelombang. Untuk satu kejadian gelombang terekam beberapa beberapa kejadian impuls dengan durasi kejadian yang sangat singkat (sekitar 5 ms). *Load cell* yang digunakan hanya mampu untuk menahan tekan. Maka kejadian yang terukur tersebut menyatakan bahwa dalam satu kejadian gelombang dapat terjadi lebih dari satu kontak antara modul apung dengan tiang yang menjaga posisinya yang merupakan beban tekan pada tiang. Untuk tiap kelompok kejadian terjadi satu nilai puncak yang lebih besar dari nilai lain di sekitarnya.

Untuk keperluan analisis, identifikasi beban yang terjadi disederhanakan dengan hanya mengidentifikasi satu nilai puncak impuls untuk satu kejadian gelombang serta membuang data – data bernilai kecil agar analisis lebih konservatif. Contoh identifikasi puncak ditunjukkan pada Gambar 8. Data kemudian dikelompokkan dengan cara analisis statistika untuk mengetahui distribusi kejadian puncaknya.

Distribusi kejadian puncak ditinjau dengan metode probabilitas dan persentil gambar 9. Metode probabilitas digunakan untuk analisis data secara stokastik dan metode persentil digunakan untuk analisis data secara deterministik. Dari proses analisis yang dilakukan ini, pada akhirnya lebih dipilih penggunaan metode deterministik yang lebih konservatif akibat perbedaan nilai gaya yang cukup signifikan.

Dengan pengelompokan persentil tersebut, nilai persentil ke-100 yang teridentifikasi diekivalensikan terhadap nilai maksimum yang terjadi dalam seri waktu tersebut. Hasil pengukuran maksimum pada sensor load cell ditunjukkan pada tabel 5.

Berdasarkan hasil pengujian tersebut, gaya terbesar didapat dari skenario modul A (jarak struktur ke tembok = 2.5 meter) untuk skenario gelombang reguler maupun ireguler. Beban terbesar yang terekam untuk skenario gelombang reguler adalah 108.3 N dan untuk skenario gelombang ireguler adalah 112.7 N. Besar gaya yang dipikul oleh tiang nomor 1 (T1) cenderung lebih besar dibandingkan besar gaya yang dipikul tiang yang lain. Hal tersebut menunjukkan bahwa gaya tidak tertransfer secara merata pada sistem tiang, akibatnya ada tiang yang lebih dominan dalam menahan pergerakan modul.

Untuk identifikasi kecenderungan distribusi beban yang dipikul tiap tiang serta pengaruh penempatan struktur terhadap beban, disajikan beban maksimum rata – rata dari keseluruhan skenario gelombang untuk tiap tiang dan dibandingkan terhadap jarak struktur dari dinding vertikal gambar 10. Distribusi beban disajikan untuk skenario gelombang reguler dan ireguler.

Beban terdistribusi tidak merata pada tiang dengan variasi antar tiang berkisar 2 – 4 0%. Pada sisi yang sama. Beban terkonsentrasi pada salah satu tiang dengan perbedaan sekitar 20%. Pada sisi yang bersebrangan, ketimpangan distribusi terbesar terjadi pada tiang yang lebih dominan menahan beban. Kemudian terdapat kecenderungan peningkatan beban seiring dengan bertambahnya jarak struktur dari tembok.

Faktor yang dapat menyebabkan tidak meratanya transfer gaya pada masing-masing tiang diperkirakan merupakan akibat dari pola pergerakan modul saat terkena gelombang yang berbeda-beda untuk tiap sisinya karena pengaruh ruang gerak yang masih cukup besar (5 mm) sehingga ada tiang yang akan menahan beban terlebih dahulu. Keberadaan ruang gerak tersebut menyebabkan modul apung masih dapat bergerak

dalam 6 derajat kebebasan, sehingga saat terjadi pergerakan – pergerakan rotasi, posisi modul memungkinkan untuk membuat modul akan mengalami kontak sempurna dengan suatu tiang namun kontak sempurna tersebut tidak terjadi untuk tiang lainnya. Selain itu faktor yang dapat berpengaruh juga adalah faktor presisi dalam benda uji dan pemasangannya. Diameter dalam dari *pile guide* yang tidak seragam dapat membuat modul tertahan dominan pada satu tiang, selain itu posisi pemasangan tiang yang tidak terpusat pada *centroid* diameter dalam *pile guide* juga dapat menyebabkan transfer gaya tidak merata.

Posisi struktur mempengaruhi gaya yang terukur dengan kecenderungan gaya meningkat seiring bertambahnya jarak. Hasil ini bertolak belakang dengan hipotesis awal yang menyatakan bahwa posisi struktur yang semakin dekat dengan dinding akan menghasilkan gaya yang lebih besar akibat adanya amplifikasi gelombang. Namun kejadian tersebut dapat masih dapat dijelaskan dengan fenomena *standing waves*. Selain menyebabkan amplifikasi gelombang, *standing waves* akan menyebabkan gelombang beresilasi dengan posisi *nodes* dan *anti nodes* yang konstan (Taylor, 1953). Akibatnya posisi relatif struktur terhadap panjang gelombang akan berperan dalam besarnya pergerakan yang terjadi pada struktur dan pada akhirnya akan memperbesar gaya yang terukur.

Dengan meninjau jarak terhadap panjang gelombang, diketahui bahwa rata – rata panjang gelombang untuk skenario modul A dan B semakin mendekati  $n/2$  dari panjang gelombang dengan  $n$  adalah bilangan bulat. Posisi struktur dengan jarak yang mendekati kelipatan  $n/2$  panjang gelombang terkena gaya lebih besar akibat posisi struktur lebih dekat dengan puncak amplitudo gelombang yang telah teramplifikasi efek *standing waves* akibat keberadaan dinding vertikal.

## KESIMPULAN

Dermaga apung modular yang diterapkan oleh Balai Litbang Pantai merupakan ponton apung yang dijaga posisinya oleh tiang pancang. Jenis struktur yang demikian membuat beban utama akan ditahan oleh tiang pancang. Beban utama pada tiang diberikan oleh modul apung yang tereksitasi gelombang. Pergerakan modul apung dibatasi oleh ruang antara *pile guide* yang berfungsi memegang tiang dan diameter luar tiang pancang. Keberadaan ruang gerak tersebut membuat modul apung memiliki energi kinetik saat bergerak dan ketika menumbuk tiang pancang energi tersebut akan tersalurkan pada tiang pancang dalam bentuk gaya *impact*. Hal ini dibuktikan dari hasil pengukuran

yang menunjukkan bahwa hasil tumbukan dari modul apung ke tiang berupa kelompok – kelompok impuls yang terjadi dalam waktu sangat singkat. Kejadian antar kelompok – kelompok impuls tersebut memiliki kemiripan dengan periode gelombang, sehingga disimpulkan bahwa kejadian tersebut adalah beban *impact* yang dihasilkan akibat modul yang dieksitasi oleh gelombang.

Gaya *impact* terbesar yang terukur dalam pengujian ini dengan *pile guide* yang memiliki ruang gerak sebesar 5 mm adalah 112.7 N pada skenario gelombang ireguler. Gaya tersebut tidak terdistribusi secara merata ke tiang pancang yang menahan posisi modul apung. Ini dapat diakibatkan oleh pergerakan modul yang masih dapat bergerak dalam enam derajat kebebasan sehingga memungkinkan terjadinya pergerakan yang tidak seragam untuk tiap sisi modul. Pergerakan yang tidak seragam tersebut menyebabkan modul apung tidak terkontak secara sempurna pada suatu waktu yang sama untuk tiap titik yang menahan pergerakannya. Saat ketimpangan ini terjadi perbedaan beban terbesar dan terkecil yang ditahan tiang dapat mencapai 40%. Sedangkan beban maksimum yang terjadi pada satu tiang pancang dapat mencapai dua kali beban modul yang ditahannya.

Keberadaan dinding vertikal sangat mempengaruhi perilaku struktur karena dinding vertikal menyebabkan refleksi gelombang yang besar. Kemudian karakteristik dari gelombang yang bertemu dinding vertikal akan menyebabkan terjadinya *standing wave*. Ketika terjadi *standing waves* maka akan terjadi amplifikasi amplitudo gelombang. Efek amplifikasi tersebut lebih besar pengaruhnya saat struktur ditempatkan mendekati kelipatan  $1/2$  dari panjang gelombang.

Maka dalam perencanaan ponton apung yang dijaga posisinya dengan tiang pancang perlu diperhatikan kekuatan tiang pancang yang menahannya agar dapat menahan beban modul terfaktor serta posisi penempatan struktur tersebut jika diletakkan di depan dinding vertikal.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Tulisan ini merupakan bagian dari hasil penelitian Balai Litbang Pantai tentang Kajian Struktur Apung dalam rangka evaluasi kinerja penerapan dermaga apung di Kalibaru, DKI Jakarta. Penelitian didanai oleh DIPA Balai Litbang Pantai TA 2018. Terima kasih kami ucapkan kepada tim pelaksana dan tim program sehingga penelitian ini dapat terlaksana.

## DAFTAR PUSTAKA

- Balai Litbang Pantai. (2017). *Dermaga Apung dengan Beton Modular*. Bandung: Puslitbang Sumber Daya Air.
- Biesheuvel, A. C. (2013). *Effectiveness of Floating Breakwaters Wave* (Master Thesis). Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Børkja, J. L. B. (2015). *Dynamic Analysis of Floating Dock Structures* (PhD Thesis). Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Fousert, M. W. (2006). *Floating Breakwater Theoretical Study of a Dynamic Wave Attenuating System* (PhD Thesis). Delft University of Technology, Delft, Netherlands.
- Goda, Y., & Suzuki, T. (1976). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *Coastal Engineering Proceedings*, 15, 47–47. <https://doi.org/10.9753/icce.v15.47>
- Isaacson, M. (1979). Wave-induced forces in the diffraction regime. Dalam T. L. Shaw (Ed.), *Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinders*. Bristol, UK: Pitman Publishing Ltd.
- Ishida, A. (1972). Transformation of Power Spectra of Wind-Generated Waves Caused by Reflection. *Coastal Engineering in Japan*, 15(1), 25–33. <https://doi.org/10.1080/05785634.1972.11924143>
- Mansard, E. P. D., & Funke, E. R. (1980). The Measurement of Incident and Reflected Spectra Using a Least Squares Method. *Coastal Engineering Proceedings*, 17, 154–172. <https://doi.org/10.1061/9780872622647.008>
- Müller, P., Garrett, C., & Osborne, A. (2012). Rogue Waves. *Oceanography*, 18(3), 66–75. <https://doi.org/10.5670/oceanog.2005.30>
- Sasoko, P., Ghofur, A., & Wijanarko, B. (2012). Uji Hidrodinamika Desain Dermaga Apung Modular Sebagai Teknologi Alternatif Dalam Membangun Dermaga Perintis Di Indonesia Bagian Timur. *Wave: Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 6(1), 21–25. <https://doi.org/10.29122/jurnalwave.v6i1.3483>
- Sawaragi, T. (1995). Wave Interactions with Structures and Hydrodynamic Forces. Dalam *Coastal Engineering – Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions* (hlm. 67–149).
- Suh, K. D., Park, W. S., & Park, B. S. (2001). Separation of incident and reflected waves in wave-current flumes. *Coastal Engineering*, 43(3–4), 149–159. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00011-4)
- Suryanto, A. (2006). Estimation of incident and reflected waves in random wave experiments. *J. Indones. Math. Soc. (MIHMI)*, 12(2), 141 – 153.
- Taylor, G. (1953). An experimental study of standing waves. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 218(1132), 44–59. <https://doi.org/10.1098/rspa.1953.0086>
- Wang, C. M., & Tay, Z. Y. (2011). Very large floating structures: Applications, research and development. *Procedia Engineering*, 14, 62–72. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.007>
- Watanabe, E., Wang, C. M., Utsunomiya, T., & Moan, T. (2004). *Very Large Floating Structures: Applications, Analysis and Design* (CORE Report No. 2004–02). Singapore: Centre for Offshore Research and Engineering National University of Singapore.
- Wienke, J., & Oumeraci, H. (2005). Breaking wave impact force on a vertical and inclined slender pile—Theoretical and large-scale model investigations. *Coastal Engineering*, 52(5), 435–462. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.12.008>
- Wolters, G. (2011). Breakwaters. Dalam L. E. Frostick, S. J. McLelland, T. G. Mercer, S. J. McLelland, & T. G. Mercer (Ed.), *Users Guide to Physical Modelling and Experimentation: Experience of the HYDRALAB Network*. <https://doi.org/10.1201/b11335>
- Yang, X. yan, Zhang, H. sheng, & Li, H. tao. (2017). Wave radiation and diffraction by a floating rectangular structure with an opening at its bottom in oblique seas. *Journal of Hydrodynamics*, 29(6), 1054–1066. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60819-3](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60819-3)
- Zelt, J. A., & Skjelbreia, J. E. (1992). Using an arbitrary number of wave gauges. *Coastal Engineering Proceedings*, 23, 777 – 789. New York, USA: American Society of Civil Engineers.

