

PERILAKU GETARAN PAKSA TEREDAM TABUNG TERBENAM MENGAMBANG (*SUBMERGED FLOATING TUBE/SFT*) YANG MENDAPAT GAYA GANGGUAN GELOMBANG

Jamiatul Akmal^{1*}, M. Yakuti Arsi¹, Thomas Wisudarma¹, Novri Tanti¹ dan Martinus¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Gedung H FT Jl. Sumantri Brojonegoro Gedong Meneng, Bandar Lampung 35145, Indonesia

*E-mail : jamiatulakmal@gmail.com

ABSTRAK

Pada struktur kemaritiman, struktur silinder (bentuk tubular) banyak dijumpai untuk berbagai aplikasi. Akhir-akhir ini, bentuk tubular mulai dikembangkan untuk diaplikasikan sebagai *submerged floating tunnel bridge* (SFTB), yaitu terowongan transportasi penyeberangan selat. Artikel ini menyajikan perilaku dinamik *submerged floating tube* (SFT), dengan pembahasan yang meliputi gaya aksi gelombang, faktor redaman dan respon amplitudo getaran teredam. Spesimen tabung ditempatkan terbenam secara horizontal pada sebuah kolam uji yang dilengkapi dengan seperangkat mesin pembangkit gelombang. Gaya gelombang dan pergerakan tabung masing-masing direkam dengan sensor *loadcell* dan *ultrasonic* yang ditempatkan pada batang kantilever sebagai pemegang (*holder*). Sinyal dari sensor-sensor tersebut diproses dengan *system acquisisi* data untuk direkam dan ditampilkan di layar monitor. Perilaku getaran tabung ditampilkan dalam grafik non-dimensional. Hasil penelitian menunjukkan bahwa gaya gelombang maksimum terjadi pada permukaan air dan makin mengecil pada posisi yang semakin dalam. Faktor redaman yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa variable; diameter tabung, massa jenis air dan koefisien redaman, serta kecepatan gelombang. Semakin besar diameter tabung mengakibatkan faktor redaman yang semakin kecil.

Kata Kunci : *Struktur Kelautan, Gaya Gelombang, Faktor Redaman, Respon Dinamik, Persamaan Empirik*

ABSTRACT

In maritime structures, cylindrical structures (tubular shape) are often found for various applications. Recently, the tubular shape has been developed to be applied for submerged floating tunnel bridge (SFTB) as a strait crossing transportation tunnel. This article presents the dynamic behavior of the submerged floating tube (SFT), with a discussion covering the wave action force, damping factor, and damped vibration amplitude response. The tube specimen is placed horizontally immersed in a test pool equipped with a set of wave generators. The wave force and the movement of the tube are recorded with loadcell and ultrasonic sensors, which are placed on the cantilever rod as a holder. Signals from these sensors are processed by a data acquisition system to be recorded and displayed on the monitor screen. The vibration behavior of the tube is shown in a non-dimensional graph. The results show that the maximum wave force occurs at the surface of the water and gets smaller at deeper positions. The damping factor that occurs is influenced by several variables; tube diameter, water density and damping coefficient, and wave speed. The larger the tube diameter, the smaller the damping factor.

Keywords : Marine Structures, Wave Force Action, Damping Factor, Dynamic Response, Empirical Equations

PENDAHULUAN

Sebagai negara kepulauan, Indonesia hendaklah menaruh perhatian besar kepada penguasaan teknologi kemaritiman. Dalam aplikasinya, struktur berbentuk silinder banyak ditemukan dalam struktur kemaritiman, misalnya pipa bawah laut, tiang-tiang penyangga struktur dan tali tambat

(*tethering*) pada Tension Leg Platform. Akhir-akhir ini juga berkembang penelitian tentang jembatan terowongan mengambang (*Submerged Floating Tunnel/SFT*) untuk jalur transportasi antar pulau (Hao et al., 2016). Artikel ini menyajikan perilaku dinamik SFT secara eksperimental dalam skala laboratorium. Pembahasan meliputi kajian gaya gangguan gelombang, faktor redaman air dan

respon amplitudo untuk berbagai variable pengujian.

Secara teoritik maupun numerik telah banyak dilakukan penelitian karakteristik gaya ombak pada SFT. Diperoleh hasil bahwa teori difraksi melalui metode elemen batas dapat digunakan untuk menghitung gaya ombak pada silinder besar, sedangkan gaya ombak pada silinder kecil dapat dihitung menggunakan persamaan Morison (Kunisu, 2010). Persamaan Morison dapat digunakan dengan baik untuk menghitung gaya horizontal akibat ombak reguler tanpa melibatkan pengaruh arus dan konfigurasi dengan kedalaman paling dalam dan sudut tambat minimum menghasilkan perpindahan dan akselerasi yang minimum (Drost, 2019).

Persamaan Morison merupakan persamaan semi-empiris, dimana gaya gangguan gelombang yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa parameter dan koefisien. Sarpkaya (2010) telah melakukan eksperimen guna mencari nilai koefisien tersebut untuk silinder sirkular pada aliran osilatori planar untuk amplitudo yang kecil dan berhasil mengetahui hubungan antara bilangan KC , C_D , dan instabilitas vortikal yang muncul. Bilangan KC adalah rasio gerakan gelombang terhadap diameter silinder, sedangkan C_D adalah koefisien drag yang nilainya dipengaruhi oleh bentuk penampang dan bilangan Reynold.

Beberapa peneliti lain juga telah melakukan kajian di bidang ini. Bocotti et al., (2013) melakukan dua eksperimen skala kecil untuk memprediksi persamaan Morison dengan beban aktual dan telah mengetahui bahwa persamaan ini efektif baik untuk silinder vertikal ataupun horizontal. Selanjutnya Bai et al., (2017) mempelajari interaksi diantara ombak-arus dengan silinder yang diletakkan secara horizontal, dengan penempatan silinder berada dekat dengan *free-surface*.

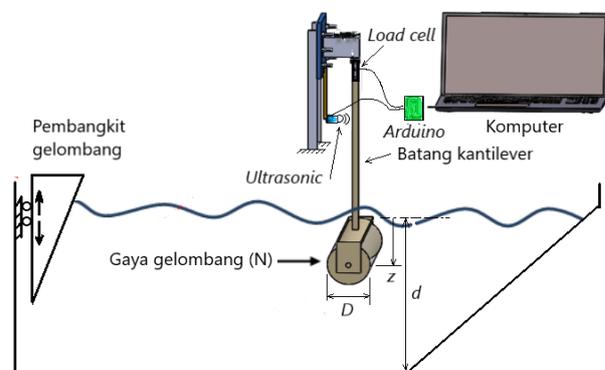
Di bidang aplikasi, Iyalla et al. (2011) melakukan perhitungan terhadap beban hidrodinamik untuk kasus jalur pipa yang berada didasar laut dengan memanfaatkan bilangan KC dan komponen persamaan Morison. Peneliti lainnya, Zan & Lin, (2020) telah melakukan studi numerik terhadap silinder yang dikenai oleh ombak *internal solitary* dan serta melakukan validasi dengan persamaan Morison. Selanjutnya Zhang et al. (2015) telah melakukan perhitungan komputasi dari beban ombak terhadap selang/pipa yang mengambang dengan model silinder setengah terbenam menggunakan persamaan Morison yang telah

dimodifikasi. Sampai tahap ini diketahui persamaan Morison valid untuk memprediksi gaya gangguan gelombang pada struktur tabung terbenam. Untuk mengetahui respon dinamik struktur SFT, dikaji juga factor redamannya akibat gaya hambat air. Salah satu metode untuk menentukan faktor redaman adalah dengan mengukur laju peluruhan osilasi bebas. Makin besar redamannya, makin besar pula laju peluruhannya (Thomson & Dahleh, 1997).

Meskipun demikian, perilaku dinamik pada SFT masih perlu diverifikasi secara eksperimental, yang sampai saat ini masih sedikit artikel yang membahasnya. Pada penelitian ini, dilakukan studi eksperimental terhadap SFT yang diuji pada sebuah kolam ombak. Spesimen yang terdiri dari tabung dengan diameter bervariasi dipasang pada kolam ombak pada posisi kedalaman yang bervariasi. Gerakan specimen dan gaya ombak disensor dan diproses dengan system acuisisi data. Dari hasil-hasil pengukuran, dihitung respon dinamik, diantaranya pengaruh kedalaman, factor redaman dan amplitudo dalam domain frekwensi. Grafik-grafik ditampilkan dalam bentuk non dimensional.

BAHAN DAN METODE

SFT dimodelkan dengan sebuah tabung berdiameter D dan panjang L . Spesimen tabung ditempatkan diujung batang kantilever yang memiliki kekakuan lateral k dengan posisi kedalaman z . Ombak dihasilkan dari sebuah pembangkit yang bergerak bolak-balik. Gerakan tabung dipantau dengan sensor ultrasonic untuk mengetahui amplitudo dan frekwensinya. **Gambar 1** memperlihatkan model SFT yang mendapat gaya gangguan gelombang.



Gambar 1. Model SFT yang mendapat gaya gangguan gelombang.

Gaya pada SFT

Gaya gangguan gelombang terhadap tabung SFT dapat dihitung dengan Persamaan Morison, sebagaimana yang terlihat pada Pers. (1) Zan & Lin, (2020).

$$F_t = \frac{1}{2} \rho C_D v^2 A \quad (1)$$

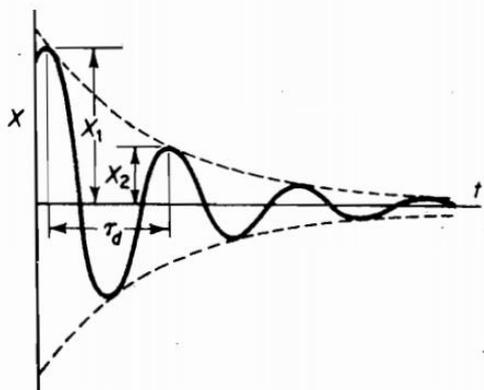
Dimana F_t adalah gaya gelombang terhadap tabung, ρ adalah massa jenis fluida, C_D adalah koefisien bentuk, v adalah kecepatan gerak relative antara tabung dan fluida dan A adalah proyeksi luas penampang tegak lurus terhadap tabung.

Faktor redaman

Faktor redaman diketahui dengan mengukur laju peluruhan osilasi, δ , sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 2**. Laju peluruhan osilasi δ ditulis pada Pers. (2) dan faktor redaman adalah seperti yang ditulis pada Pers. (3)

$$\delta = \ln \frac{x_1}{x_2} \quad (2)$$

$$\xi = \frac{2\pi\delta}{\sqrt{1-\delta^2}} \quad (3)$$

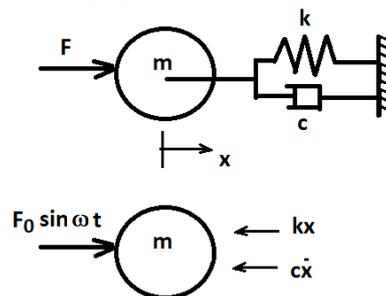


Gambar 2. Laju peluruhan osilasi yang diukur dengan pengurang logaritmik

Getaran teredam yang tereksitasi secara harmonik

Getaran yang tereksitasi secara harmonik atau getaran harmonik paksa ialah getaran yang terjadi ketika gerakan bolak-balik karena adanya gaya luar yang secara paksa menciptakan getaran pada sistem. **Gambar 3** menunjukkan diagram benda

bebas (DBB) dari sistem yang teredam dengan gangguan harmonik.



Gambar 3. Sistem yang teredam dengan gangguan harmonik

Persamaan diferensial geraknya ditemukan dari diagram benda bebas ditulis pada Pers. (4) (Thomson, W.T. and Dahleh, M. D., 1997).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (4)$$

Solusi untuk persamaan ini adalah seperti yang ditulis pada Pers. (5), di mana X adalah amplitudo osilasi dan ϕ adalah fase perpindahan sehubungan dengan gaya tarik.

$$x = X \sin (\omega t - \phi) \quad (5)$$

Amplitudo getarannya adalah seperti yang ditulis pada Pers. (6), dengan sudut fasa seperti yang ditulis pada Pers. (7).

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k-m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{c\omega}{k-m\omega^2} \quad (7)$$

Ekspresi Pers. (6) dan Pers. (7) dalam bentuk nondimensional dapat dilakukan dengan membagi pembilang dan penyebut masing-masing dengan k seperti yang ditulis pada Pers. (8) dan Pers. (9)

$$X = \frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1 - \frac{m\omega^2}{k})^2 + (\frac{c\omega}{k})^2}} \quad (8)$$

$$\tan \phi = \frac{\frac{c\omega}{k}}{1 - \frac{m\omega^2}{k}} \quad (9)$$

Persamaan ini dapat diekspresikan lebih lanjut dalam Pers. (10-13).

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} = \text{frekuensi alami} \quad (10)$$

$$c_c = 2m\omega_n = \text{redaman kritis} \quad (11)$$

$$\xi = \frac{c}{cc} = \text{faktor redaman} \quad (12)$$

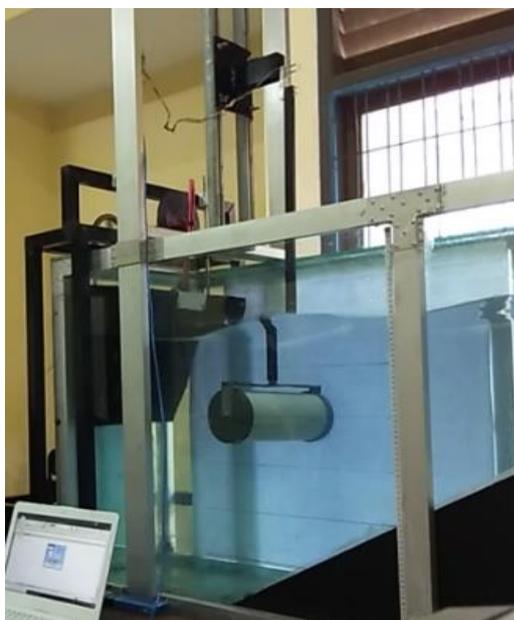
$$\frac{c\omega}{k} = \frac{c}{cc} \frac{cc\omega}{k} = 2\xi \frac{\omega}{\omega n} \quad (13)$$

Selanjutnya Persamaan nondimensional untuk Amplitudo menjadi Pers. (14) (Thomson, 1997).

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega n})^2]^2 + [2\xi(\frac{\omega}{\omega n})]^2}} \quad (14)$$

EKSPERIMENTAL

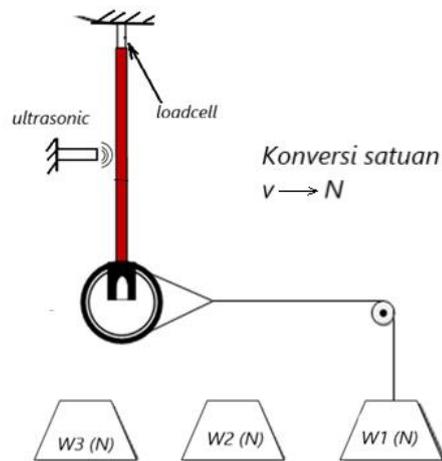
Percobaan eksperimen dilakukan pada kolam eksperimen dengan dimensi 2000x600x800 mm yang diisi air dengan ketinggian 60 cm. **Gambar 4** memperlihatkan alat-alat eksperimen yang dilakukan. Gaya gelombang diukur dengan *sensor strainage* yang dipasang pada balok kantilever. Sedangkan perpindahan diukur dengan sensor *ultrasonic*. Gaya dan perpindahan dari sensor masing-masing diproses secara data akuisisi yang terbaca di layar monitor.



Gambar 4. Peralatan Eksperimen

Gaya gelombang yang terbaca dalam satuan voltase selanjutnya dikalibrasi dengan gaya berat yang sudah terukur, untuk mengkonversi satuan voltase menjadi Newton. Gaya gelombang yang terbaca dianggap valid, jika massa balok dianggap memiliki massa yang jauh lebih kecil dari massa pipa. **Gambar 5** memperlihatkan metode kalibrasi gaya

gelombang dengan mengubah satuan sinyal dari volt (v) menjadi gaya (N).



Gambar 5. Metode kalibrasi gaya gelombang

Parameter-parameter ombak yang terukur dapat dilihat pada **Tabel 1**, sedangkan parameter specimen tabung diperlihatkan pada **Tabel 2**.

Tabel 1. Parameter Gelombang

Parameter	Nilai	Satuan
Amplitudo (<i>H</i>)	0,35	m
Periode (<i>Error!</i> <i>Reference source not found.</i>)	0,588	detik
Frekwensi (<i>f</i>)	1,7	Hz
Panjang (λ)	0,6	m
Kedalaman air (<i>d</i>)	0,6	m

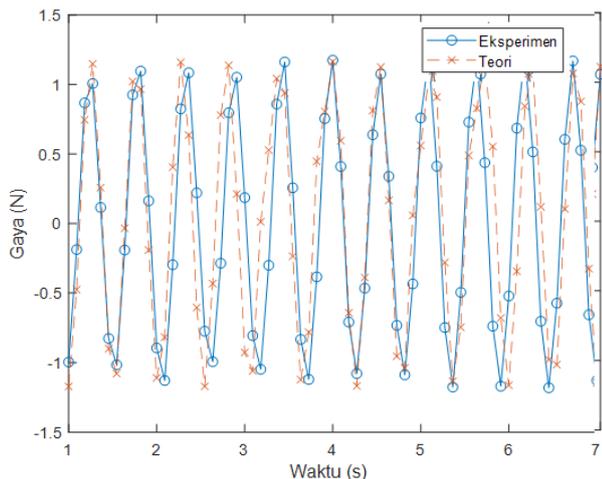
Tabel 2. Parameter Spesimen Tabung

Parameter	Nilai	Rasio
Panjang, <i>L</i> <i>Error!</i> <i>Reference source not found.</i> , (mm)	500	
Diameter, <i>D</i> inci (mm)	1 (25,4)	<i>D/L</i> =0,051
	1,5 (38,1)	<i>D/L</i> =0,076
	2 (50,8)	<i>D/L</i> =0,102
	3 (76,2)	<i>D/L</i> =0,152
Kedalaman air, <i>d</i> , (mm)	600	
	100	<i>z/d</i> =1/6
Kedalaman spesimen, <i>z</i> (mm)	200	<i>z/d</i> =2/6
	300	<i>z/d</i> =3/6

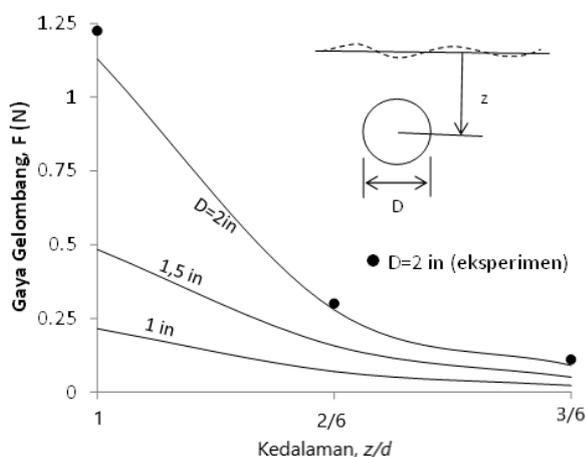
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gaya gangguan gelombang

Gaya gelombang pada setiap sampel diukur tiga kali pengulangan dan diambil rata – rata amplitudonya. **Gambar 6** memperlihatkan rekaman salah satu contoh rekaman gaya gelombang terhadap waktu. Amplitudo gaya gelombang disajikan pada berbagai variasi diameter dan kedalaman (z/d), sebagaimana yang ditampilkan pada **Gambar 7**.



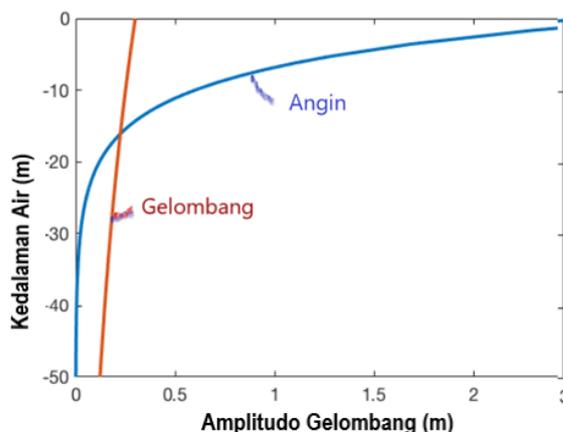
Gambar 6. Rekaman gaya gengguan gelombang



Gambar 7. Grafik gaya gelombang pada berbagai kedalaman z

Terlihat bahwa semakin besar diameter tabung semakin besar pula gaya gelombang yang ditimbulkan. Hasil ini sesuai dengan Persamaan Morison sebagaimana yang ditulis pada Pers. (1). Kedalaman posisi tabung juga mempengaruhi gaya gelombang, dimana semakin dalam posisi tabung semakin kecil gaya gelombang yang ditimbulkan.

Hal ini bisa dijelaskan karena amplitude gelombang juga semakin kecil dengan bertambahnya posisi kedalaman, sebagaimana yang terlihat pada **Gambar 8**.



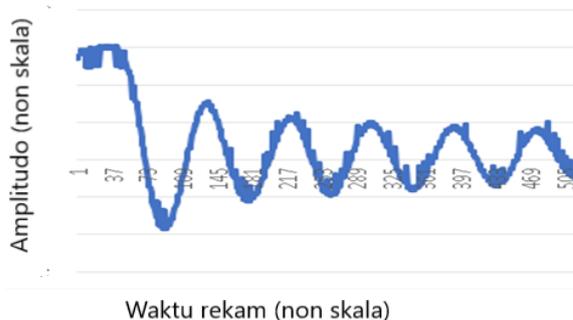
Gambar 8. Profil Amplitudo horizontal yang disebabkan ombak dan laut (Schack, M. H., 2017)

Faktor Redaman

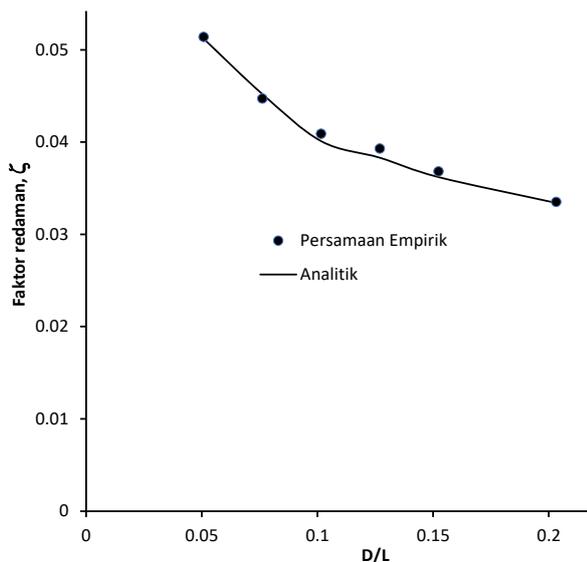
Gambar 9 memperlihatkan grafik simpangan getaran eksperimen. Jika didefinisikan persamaan empirik untuk faktor redaman merupakan fungsi dari beberapa variable seperti yang ditulis pada Pers. (15), maka dengan menggunakan *buckingham π theorem* diperoleh persamaan empiriknya seperti yang diperlihatkan pada Pers. (16). Grafik faktor redaman dalam skala non dimensional dapat dilihat pada **Gambar 10**.

$$f(C_c \rho v D L C_d) \tag{15}$$

$$\xi = \frac{C}{\rho D v L} C_d \tag{16}$$



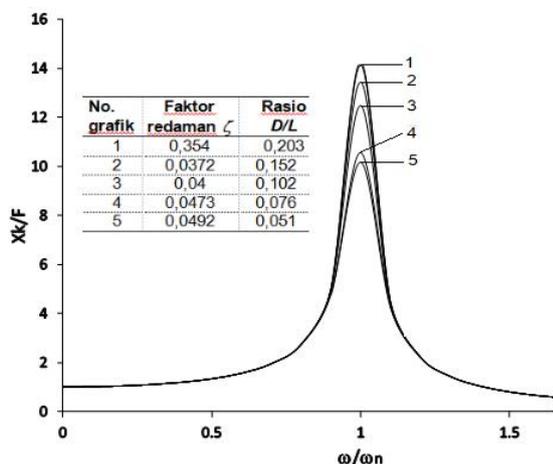
Gambar 9. Grafik *displacement* diameter 4 inchi



Gambar 10. Grafik faktor redaman secara empirik dan analitik

Respon dinamik tabung

Respon dinamik tabung ditampilkan dalam bentuk amplitudo non dimensional, seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 11**. Dari hasil eksperimen didapatkan bahwa, semakin besar diameter suatu tabung, maka semakin kecil faktor redaman yang dihasilkan. Dan semakin besar tabung semakin besar juga rasio frekuensi.



Gambar 11. Amplitudo non dimensional

KESIMPULAN

Pada artikel ini telah diinvestigasi gaya gangguan gelombang terhadap tabung terbenam mengambang (*submerged floating tube/SFT*) secara eksperimental dan didapatkan konsistensi hasil dengan teori yang telah dikembangkan pada Persamaan Morison. Gaya gelombang maksimum

terjadi pada permukaan air, dan semakin mengecil pada posisi yang semakin dalam. Redaman akibat hambatan air juga telah diinvestigasi dan hasilnya disajikan dalam bentuk persamaan empirik. Faktor redaman yang terjadi dipengaruhi oleh beberapa variable; diameter tabung, massa jenis air dan koefisien redaman, serta kecepatan gelombang. Semakin besar diameter tabung mengakibatkan faktor redaman yang semakin kecil. Berdasarkan gaya dan faktor redaman yang diperoleh selanjutnya dilakukan analisis perilaku dinamik SFT dan disimpulkan bahwa faktor redaman yang semakin besar dapat menurunkan amplitude getarannya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Universitas Lampung atas pembiayaan penelitian ini melalui skema DIPA, dengan nomor kontrak: 3953/UN26.15/LK.03/2021, tanggal 1 Juli 2021.

DAFTAR PUSTAKA

Bai, J. Ma, N. & Gu, X., 2017. *Study of interaction between wave-current and the horizontal cylinder located near the free surface*. Applied Ocean Research, 67, pp.44–58.

Boccotti, P. Arena, F. Fiamma, V. & Romolo, A., 2013. *Two small-scale field experiments on the effectiveness of Morison’s equation*. Ocean Engineering, 57, pp.141–149

Drost, L. (2019). *The Submerged Floating Tunnel: An experimental study on the hydrodynamics and kinematics of a submerged rectangular cylinder in a wave-current environment* [Delft University of Technology]. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:91a1c1bf-474b-4952-9485-c53f2fe353f0>

Hao, D., Qinxi, L., Shuping, J., & Ke, L., 2016. Enlightenment to floating tunnel of existing typical submerged tunnel, 2nd International Symposium on Submerged Floating Tunnels and Underwater Tunnel Structures, Procedia Engineering, 166, pp. 355 – 361

Iyalla, I. Hossain, M. Andrawus, J., 2011. *Calculating Hydrodynamic Loads on Pipelines and Risers: Practical Alternative*

to Morison's Equation. *Advanced Materials Research*, 367, pp. 431–438.

Kunisu, H. (2010). Evaluation of wave force acting on submerged floating tunnels. *Procedia Engineering*, 4, pp. 99–105.

Sarpkaya, T. (2010). *Wave forces on offshore structures*. Cambridge university press.

Schack, M. H., (2017). Dynamic Load Effects on a Submerged Floating Tube Bridge with emphasis on Vortex-induced Vibrations, a master thesis, Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology

Thomson, W.T. and Dahleh, M. D., 1997. *Theory of Vibration with Applications*, 5th edition, Prentice Hall

Zan, X., & Lin, Z., 2020. *On the applicability of Morison equation to force estimation induced by internal solitary wave on circular cylinder*. *Ocean Engineering*, 198, 106966.

Zhang, S., Chen, C., Zhang, Q., Zhang, D., & Zhang, F., 2015. *Wave Loads Computation for Offshore Floating Hose Based on Partially Immersed Cylinder Model of Improved Morison Formula*. *The Open Petroleum Engineering Journal*, 8(1), pp.130-137.