

EVALUASI PENGUJIAN VIBRASI STRUKTUR (STUDI KASUS : DERMAGA DONGGALA)

Devlin Tedy¹, Wiryanto Dewobroto²

¹Mahasiswa Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jakarta

Email: *d_tedy@hotmail.com*

²Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pelita Harapan, Tangerang

Email: *wiryanto.dewobroto@uph.edu*

Masuk: 11-12-2018, revisi: 28-06-2019, diterima untuk diterbitkan: 13-08-2019

ABSTRAK

Setiap struktur memiliki perilaku dinamik berupa frekuensi alami yang dapat dicari dengan uji vibrasi di lapangan secara empiris dan analisis numerik. Frekuensi alami terdiri dari massa, kekakuan, dan arah (*mode shape*). Parameter-parameter tersebut menghasilkan banyak variasi model struktur. Model yang paling tepat dengan kondisi lapangan dapat dicari dengan bantuan hasil uji vibrasi yang berfungsi sebagai kalibrator. Dalam mencari frekuensi alami melalui uji vibrasi sangat tergantung pada teknologi seperti tipe sensor dan cara penempatannya yang digunakan untuk merekam getaran yang diberikan. Tipe sensor terdiri dari berbagai macam seperti *uniaxial*, *biaxial*, dan *triaxial*. Pada kasus uji vibrasi struktur dermaga Donggala menggunakan 6 buah sensor *accelerometer uniaxial*. Sensor dipasang dalam 3 tempat berbeda masing-masing tempat dalam arah *lateral* dan vertikal. Hasil pengujian dari pihak *surveyor* didalam mengevaluasi hasilnya hanya rata-rata tanpa memperhitungkan pengaruh arah. Hal ini yang akan dievaluasi pada penelitian ini. Evaluasi yang akan dilakukan adalah membandingkan hasil pengujian vibrasi dengan analisis numerik. Dari berbagai model analisis numerik dapat diketahui bahwa meskipun nilai frekuensi alaminya bervariasi tetapi masih didalam batas nilai tertentu. Dengan melihat apakah arah penempatan sensor dan arah tumbukan kapal, maka dapat diprediksi perilaku dinamik dermaga apakah translasi atau rotasi yang terjadi. Dengan demikian evaluasi yang digunakan oleh *surveyor* dengan melakukan rata-rata tanpa melihat arah adalah tidak tepat. Oleh sebab itu akan dilakukan evaluasi ulang mempelajari arah pemberian gaya, arah pemasangan dan penempatan sensor *accelerometer* serta perlu melakukan pengelompokan hasil pengujian vibrasi berdasarkan arah sensor. Setelah mempelajari model numerik dari dermaga dapat diketahui bahwa model numerik yang bertranslasi mempunyai kesesuaian dengan data tumbukan pada salah satu titik sensor yang dipasang. Pemodelan numerik yang mendekati nilai ini adalah sesuai dengan data perencanaan sebelumnya. Dari penelitian ini dapat diketahui bahwa pemahaman pengujian vibrasi perlu dilakukan pengelompokan sesuai arah penempatan sensor dan tidak dapat dilakukan rata-rata.

Kata Kunci: pengujian vibrasi; analisis numerik; frekuensi alami

ABSTRACT

Each structure has dynamic behavior in the form of natural frequencies that can be searched by vibration testing in the field empirically and numerical analysis. Natural frequency consists of mass, stiffness, and direction (shape mode). These parameters produce many variations of the structural model. The most appropriate model with field conditions can be sought with the help of vibration test results that function as a calibrator. In searching for natural frequencies through vibration testing it is very dependent on technology such as the type of sensor and the way it is used to record the vibrations given. Sensor types consist of various types such as uniaxial, biaxial, and triaxial. In the case of vibration test the Donggala pier structure uses 6 uniaxial accelerometer sensors. Sensors are installed in 3 different places each in lateral and vertical directions. Test results from the surveyor in evaluating the results are only average without taking into account the influence of direction. This will be evaluated in this study. The evaluation will be done is to compare the results of vibration testing with numerical analysis. From various numerical analysis models, it can be seen that although the natural frequency values vary, they are still within certain limits. By looking at the direction of the placement of the sensor and the direction of the collision of the ship, it can be predicted the dynamic behavior of the pier whether translation or rotation is happening. Thus the evaluation used by the surveyors by averaging without looking at directions is incorrect. Therefore a re-evaluation will be conducted to study the direction of the force, the direction of the placement and placement of the accelerometer sensor and the need to group the results of vibration testing based on the sensor direction. After studying the numerical model from the dock, it can be seen that the numerical model that translates has conformity to the collision data at one of the installed sensor points. Numerical modeling which is close to this value is in accordance with previous planning data. From this research it can be seen that the understanding of vibration testing needs to be grouped according to the direction of the sensor placement and cannot be carried out on average.

Keywords: vibration testing; numerical analysis; natural frequency

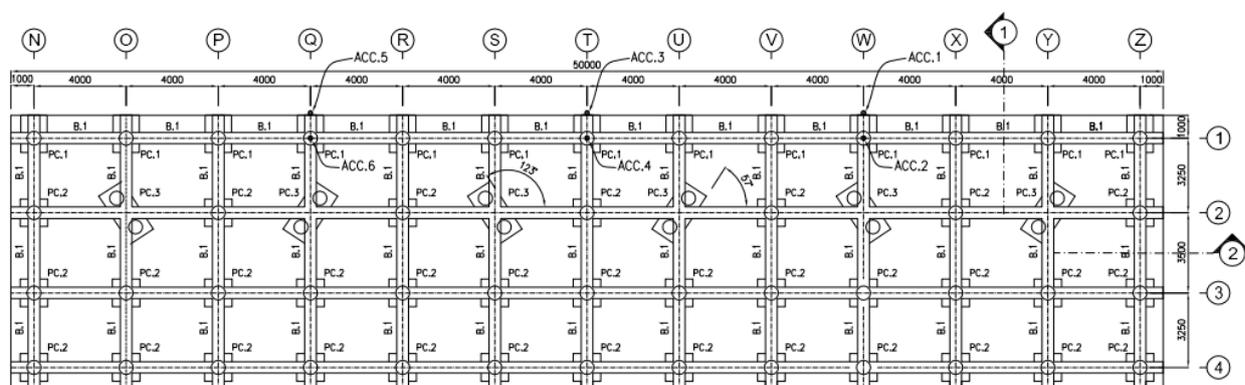


Gambar 3. Kapal Untuk Tumbukan Uji Vibrasi

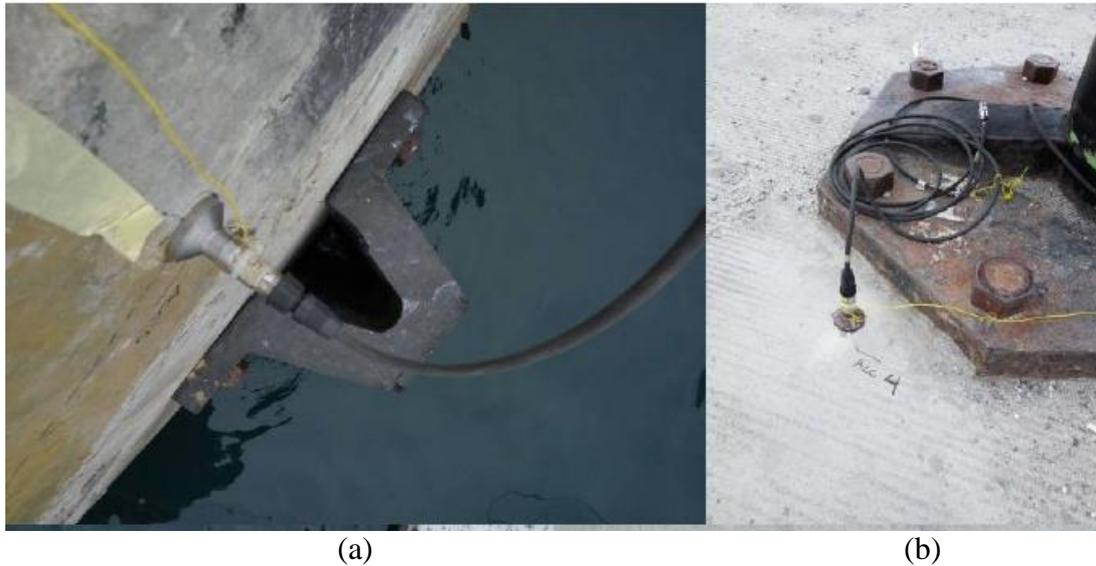
Tabel 1. Rangkuman Hasil Pengujian Vibrasi Struktur Dermaga (GSI 2016)

No. Sensor	Frekuensi Alami	Frekuensi Alami	Frekuensi Alami
	(Tumbukan 1)	(Tumbukan 2)	(Tumbukan 3)
	(Hz)	(Hz)	(Hz)
<i>Acc 1</i>	0,98	0,98	1,7
<i>Acc 2</i>	0,73	1,5	1,5
<i>Acc 3</i>	0,98	0,98	0,98
<i>Acc 4</i>	1,7	1,7	0,98
<i>Acc 5</i>	1,2	0,98	0,98
<i>Acc 6</i>	1,5	0,98	0,98
Rata-rata	1,2	1,2	1,2

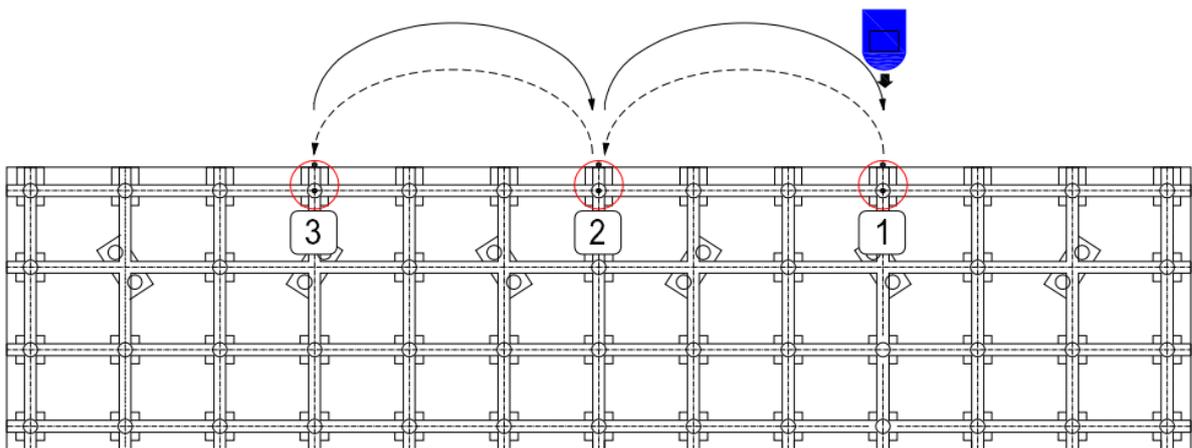
Tabel 1 adalah hasil laporan pengujian dimana nilainya ditentukan dengan rata-rata oleh *surveyor*. Padahal menurut penelitian Conte et al (2008) akselerasi dan getaran memiliki arah sehingga kurang tepat untuk merata-rata hasil akselerasi dengan arah yang berbeda. Untuk membuktikan bahwa rata-rata itu kurang tepat maka akan dilakukan evaluasi ulang penelitian ini.



Gambar 4. Lokasi Sensor Accelerometer Pada Denah Struktur Dermaga



Gambar 5. Pemasangan Sensor Accelerometer (a) Arah *Lateral* dan (b) Arah Lantai Dermaga



Gambar 6. Arah Tumbukan Kapal Dalam Uji Vibrasi

2. EVALUASI ULANG HASIL UJI VIBRASI STRUKTUR DERMAGA DONGGALA

Berdasarkan dari pernyataan Conte et all (2008), frekuensi alami terdiri mode getaran sebagai vektor pada bidang kompleks yang menunjukkan akselerasi dan getaran memiliki arah. Dalam proses pengujian vibrasi menggunakan kapal pada posisi dimana akibat tumbukan struktur dermaga mengalami deformasi berupa translasi *lateral*. Oleh sebab itu data-data hasil pengujian perlu dikelompokkan sesuai dengan arahnya. Hasil pengelompokan nilai frekuensi alami dari pengujian dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Sesuai dengan jenis sensor yang digunakan pada pengujian ini maka nilai frekuensi alami yang diambil hanya berdasarkan dari arah tumbukan kapal (*lateral*) dimana hasil tersebut terdiri dari *acc 1*, *acc 3*, dan *acc 5* yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Rangkuman Hasil Pengelompokan Sensor *Accelerometer* Pada Arah *Lateral* Dermaga

No. Sensor	Tumbukan Pada Titik 1	Tumbukan Pada Titik 2	Tumbukan Pada Titik 3	Keterangan
	Frekuensi Alami (Hz)	Frekuensi Alami (Hz)	Frekuensi Alami (Hz)	
<i>Acc 1</i>	0,98	0,98	1,7	<i>Lateral</i>
<i>Acc 3</i>	0,98	0,98	0,98	
<i>Acc 5</i>	1,2	0,98	0,98	
<i>Acc 2</i>	0,73	1,5	1,5	Vertikal
<i>Acc 4</i>	1,7	1,7	0,98	
<i>Acc 6</i>	1,5	0,98	0,98	

Hipotesis perilaku dinamik berdasarkan tumbukan kapal :

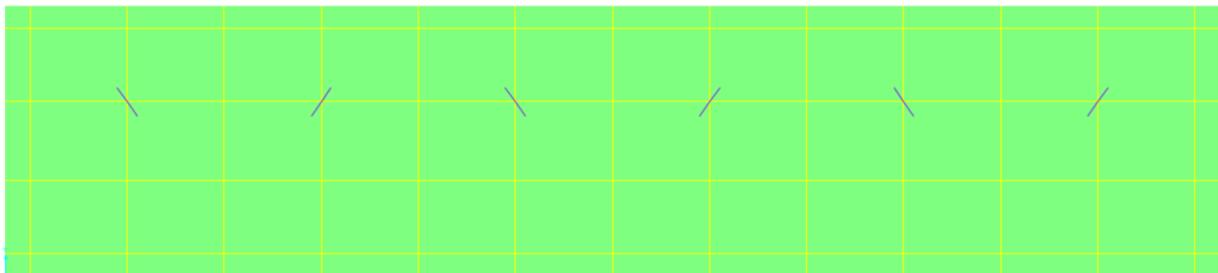
- Pada saat kapal menumbuk Titik 1 maka Titik 1 dan Titik 2 mengalami deformasi yang lebih besar dari Titik 3. Akibat perbedaan tersebut seakan-akan bangunan dermaga mengalami rotasi
- Pada saat kapal menumbuk Titik 2 maka Titik 1, Titik 2, dan Titik 3 mengalami deformasi yang sama karena tumbukan kapal dilakukan di tengah dermaga sehingga mengalami translasi.
- Pada saat kapal menumbuk Titik 3 maka Titik 2 dan Titik 3 mengalami deformasi yang besar dan menumbuk bangunan lain yaitu *trestle*. Oleh sebab itu maka Titik 1 mengalami deformasi yang lebih kecil.

3. STUDI PARAMETRIK ANALISIS NUMERIK DERMAGA DONGGALA

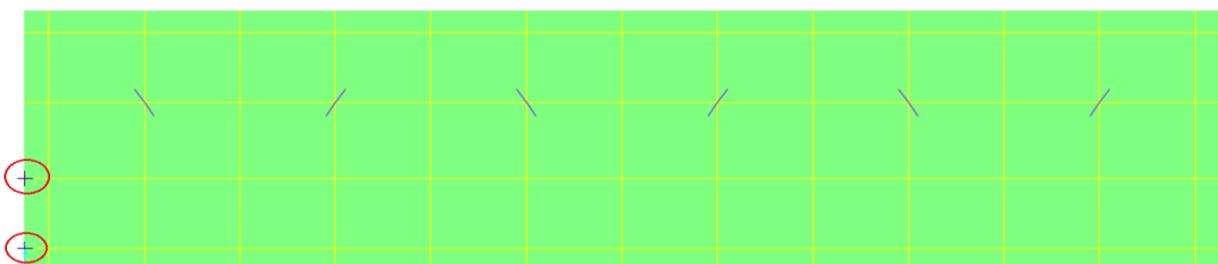
Dari uraian pada pembahasan pengujian vibrasi terkesan bahwa bangunan mengalami translasi dan rotasi. Untuk membuktikannya maka akan dilakukan analisis numerik. Dalam analisis numerik tersebut akan dimodelkan sebagai suatu struktur dermaga 1 segmen yang sederhana yang bagian atas adalah pelat dan bagian bawah adalah suatu sistem portal yang dapat dilihat dalam denah struktur sebelumnya pada Gambar 4. Konstruksi dermaga terdiri dari konstruksi lantai yang terdiri dari grid balok dan pelat yang berbentuk persegi berukuran 50 m x 12 m. Dari grid itu kemudian pada simpul grid didukung oleh tiang pancang baja dengan ukuran diameter luar 609,6 mm dan tebal 12 mm. Pelat lantai memiliki tebal 320 mm. Nilai modulus elastisitas untuk tiang pancang sebesar $E_s = 200.000$ MPa dan nilai mutu beton untuk penampang *pile cap*, balok, dan pelat lantai sebesar $f_c = 20,75$ MPa dengan $E_c = 21.409,519$ MPa.

Ukuran *pile cap* yang digunakan memiliki 3 ukuran yaitu dengan panjang x lebar masing-masing 1624 mm x 1200 mm untuk ukuran *pile cap* pertama (PC1) berada pada bagian depan dari dermaga, 1200 mm x 1200 mm untuk ukuran *pile cap* kedua (PC2) terletak dibagian tengah dan belakang dermaga dengan jumlah tiang 1 buah, dan 2500 mm x 1200 mm untuk ukuran *pile cap* ketiga (PC3) berada dibagian tengah dermaga dengan jumlah tiang 2 buah. Ketiga *pile cap* ini memiliki tebal yang sama yaitu 900 mm. Ukuran balok (B1) yang digunakan sebesar 500 mm x 800 mm dan tebal pelat lantai adalah 32 cm.

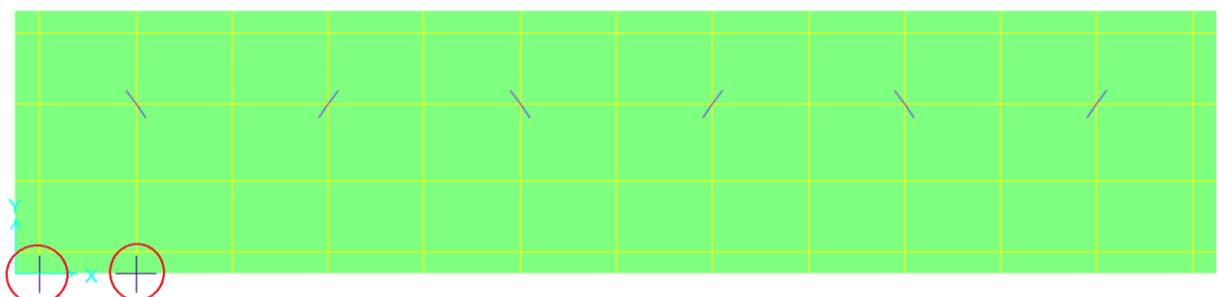
Setiap pemodelan struktur menghasilkan nilai frekuensi alami yang berbeda. Berdasarkan dari fisik bangunan yang sudah ada akan dibuat berbagai parametrik model yang diuji sebanyak 27. Dimana dalam 27 pemodelan itu ada 3 kelompok besar yaitu model A, B, dan C yang dapat dilihat pada Gambar 7 sampai Gambar 9. Pemodelan model A dilakukan dengan meninjau *mode shape* translasi. Pemodelan model B dan C akan meninjau *mode shape* rotasi. Pada model B dan C, beberapa titik dari struktur dermaga akan diberikan *restraint* karena struktur dermaga menabrak struktur lain yang dilatasi 50 mm saat pemberian beban dinamik tumbukkan kapal. Struktur lain tersebut adalah dermaga segmen 1 dan *trestle* yang dapat dilihat sebelumnya pada Gambar 2. Untuk model B akan diberikan *restraint* pada titik yang tertabrak dermaga segmen 1 dan untuk model C akan diberikan *restraint* pada titik yang tertabrak *trestle*. Dari tiap model masing-masing dilakukan parametrik lagi yaitu panjang tiang pancang sampai pada *virtual fixed point* (M1), komponen struktur balok kaku sekali dan deformasi *axial* tiang diabaikan (M2), memodelkan *spring lateral* pada tiang yang masuk kedalam tanah (M3), panjang tiang sampai panjang total dengan perletakan sendi (M4), panjang tiang sampai panjang total dengan perletakan jepit (M5). Rangkuman 27 pemodelan struktur dapat dilihat pada Tabel 5 sampai Tabel 7. Dari 27 model yang paling mendekati dengan hasil pengujian di lapangan ada 2 yaitu model A3 dan C3 yang dapat dilihat pada Gambar 10. Bentuk *mode shape* dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 7. Model A Pada Program *Finite Element*



Gambar 8. Model B Program *Finite Element* (Lingkaran Merah adalah *Restraint*)



Gambar 9. Model C Program *Finite Element* (Lingkaran Merah adalah *Restraint*)

Tabel 3. Rangkuman Model A (*Mode Shape* Translasi)

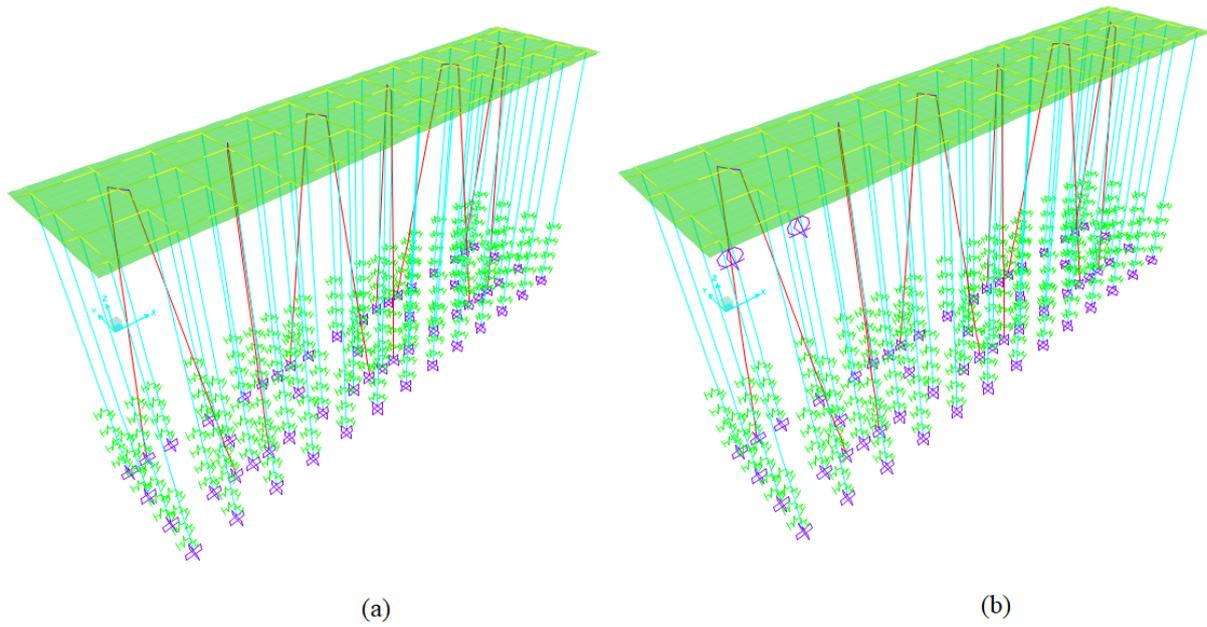
Notasi	Hasil f (Hz)	Parametrik Uji
A1	0,80783	M1
A2	5,44469	M1, M2
A3	0,90027	M1, M3
A4	5,58692	M1, M2, M3
A5	0,49096	M5
A6	0,7128	M3, M5
A7	4,06031	M2, M3, M5
A8	0,7128	M3, M4
A9	4,06031	M2, M3, M4

Tabel 4. Rangkuman Model B (*Mode Shape* Rotasi)

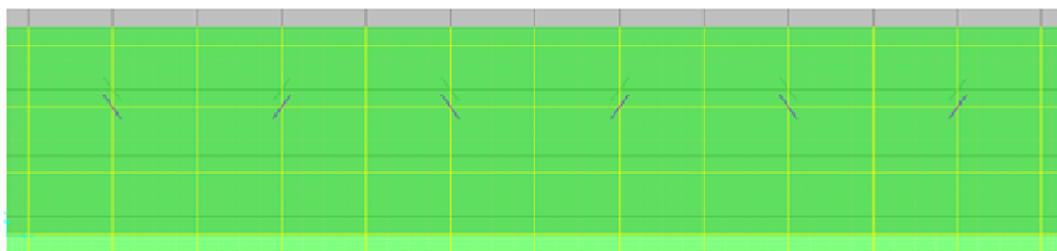
Notasi	Hasil f (Hz)	Parametrik Uji
B1	1,67824	M1
B2	9,36327	M1, M2
B3	1,75835	M1, M3
B4	9,01967	M1, M2, M3
B5	1,52961	M5
B6	1,68886	M3, M5
B7	8,80309	M2, M3, M5
B8	1,6807	M3, M4
B9	8,80238	M2, M3, M4

Tabel 5. Rangkuman Model C (*Mode Shape* Rotasi)

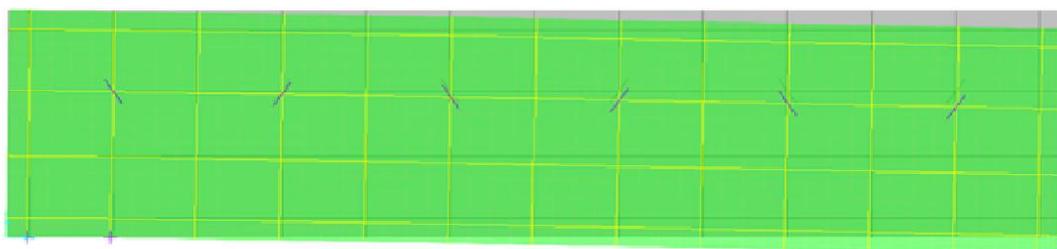
Notasi	Hasil f (Hz)	Parametrik Uji
C1	1,28704	M1
C2	5,87221	M1, M2
C3	1,36649	M1, M3
C4	6,0238	M1, M2, M3
C5	1,0979	M5
C6	1,25776	M3, M5
C7	4,73633	M2, M3, M5
C8	1,2539	M3, M4
C9	4,73541	M2, M3, M4



Gambar 10. Model A3 (a) dan C3 (b) Struktur Dermaga Pada Program *Finite Element*



(a) $T = 1.11078$ detik; $f = 0.90027$ Hz



(b) $T = 0.73180$ detik; $f = 1.36649$ Hz

Gambar 11. *Mode Shape* Translasi (a) Pada Model A3 dan *Mode Shape* Rotasi Pada Model C3
(b)

4. KALIBRASI MODEL ANALISIS NUMERIK TERHADAP UJI VIBRASI

Setelah dilakukan studi analisis numerik dari struktur dermaga dengan mengasumsikan berbagai macam variasi pemodelan, didapatkan bahwa dari 27 model hanya 2 yang mendekati hasil uji vibrasi. Meskipun demikian nilai dari 25 model yang lain menghasilkan batas nilai ragam getar (*mode shape*) yang berupa translasi dan rotasi. Dimana dari hasil berbagai pemodelan menghasilkan nilai frekuensi alami yang berkisar 0,49096 Hz sampai 5,58692 Hz untuk ragam getar translasi. Sedangkan untuk ragam getar rotasi menghasilkan nilai frekuensi alami yang berkisar 1,09790 Hz sampai 9,36327 Hz. Hasil tersebut dirangkum pada Tabel 7 dan Gambar 9.

Tabel 6. Rangkuman Hasil Studi Pemodelan Numerik Pada Struktur Dermaga

Ragam Getar	Frekuensi Alami (Hz)	
	Batas Bawah	Batas Atas
Translasi	0,49096	5,58692
Rotasi	1,09790	9,36327

Pemodelan numerik yang mendekati hasil tumbukkan *lateral* pada titik 2 pengujian vibrasi (0,98 Hz) adalah sesuai dengan data perencanaan sebelumnya yaitu pada model A3 yang menghasilkan nilai frekuensi alami sebesar 0,90027 Hz. Dari analisis numerik menunjukkan bahwa data hasil pengujian tidak dapat dilakukan rata-rata karena hasil rata-rata menunjukkan nilai 1,2 Hz.



Gambar 12. Nilai Batas Atas Dan Batas Bawah Frekuensi Alami Struktur Dermaga

5. KESIMPULAN

Hasil uji vibrasi struktur Dermaga Donggala yang ada terdiri dari berbagai nilai frekuensi alami. Untuk memilah frekuensi alami yang tepat ternyata tidak sederhana. Dari berbagai hasil analisis secara numerik dapat dipahami bahwa setiap frekuensi alami adalah hasil dari berbagai pemodelan. Dari analisis yang telah dilakukan dapat dipahami bahwa frekuensi alami memiliki arah (*mode shape*) dan rentang nilai tertentu sesuai dengan pemodelannya dimana tentu saja harus dicocokkan antara perilaku fisik sesuai pemodelan yang telah dilakukan. Dari hasil analisis secara numerik maka dapat disimpulkan :

- Berdasarkan hasil evaluasi arah tumbukan kapal, strategi yang digunakan oleh *surveyor* dengan melakukan rata-rata tidak tepat karena untuk mempelajari data hasil pengujian vibrasi perlu mempelajari arah pemberian gaya, arah pemasangan dan penempatan sensor *accelerometer* serta perlu melakukan pengelompokan hasil pengujian vibrasi berdasarkan arah sensor sehingga sesuai dengan model analisis numerik.
- Analisis numerik sangat membantu untuk memahami konstruksi secara keseluruhan sehingga dapat menentukan perilaku dari bangunan yang berkesesuaian dengan hasil uji vibrasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdeljaber, O., Younis, A., Avci, O., Catbas, N., Gul, M., Celik, O., and Zhang, H. (2016) “*Dynamic Testing of a Laboratory Stadium Structure.*” Geotechnical and Structural Engineering Congress, ASCE, DOI: 10.1061/9780784479742.147
- Avci, O. (2012) “*Retrofitting Steel Joist Supported Footbridges for Improved Vibration Response.*” Structures Congress, ASCE, DOI: 10.1061/9780784412367.041
- Avci, O. (2015) “*Modal Parameter Variations due to Joist Bottom Chord Extension Installation on Laboratory Footbridges.*” Journal of Performance Construction Facilities, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000635
- Avci, O., and Davis, B. (2015) “*A Study on Effective Mass of One Way Joist Supported System.*” Structures Congress, ASCE, DOI: 10.1061/9780784479117.073
- Brownjohn, JMW., Reynders, E., and Roeck, G de. (2010) “*Dynamic Testing of Constructed Facilities.*” Structures Congress, ASCE, DOI: 10.1061/41130(369)53
- Conte, J. P., He, Xianfei., Moaveni, B., Masri, SF., Caffrey, J P., Wahbeh, M., Tasbihgoo, F., Whang, D H., and Elgamal, A. (2008) “*Dynamic Testing of Alfred Zampa Memorial Bridge.*” Journal of Structural Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:6(1006)
- Davis, B., and Avci, O. (2015) “*Simplified Vibration Serviceability Evaluation of Slender Monumental Stairs.*” Journal of Structural Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001256
- Jeary, A. P., Winant, T., and Bunyan, J. (2015) “*Some Aspects of the Measurement of Vibration Intensity for the Assessment of Building Structures.*” Forensic Engineering 7th Congress Performance of the Built Environment
- Morassi, A., and Tonon, S. (2008) “*Dynamic Testing for Structural Identification of a Bridge.*” Journal of Bridge Engineering, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:6(573)
- Setareh, M. (2010) “*Vibration Serviceability of a Building Floor Structure. I: Dynamic Testing and Computer Modeling.*” Journal of Performance of Constructed Facilities, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000134
- Setareh, M., and Gan, S. (2018) “*Vibration Testing, Analysis, and Human-Structure Interaction Studies of a Slender Footbridge.*” Journal of Performance Construction Facilities, DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.000121
- PT Graha Survei Indonesia, (2016) “*Laporan Pemeriksaan Assessment dan Dynamic Test Dermaga Donggala Provinsi Sulawesi Tengah.*” Karawaci, Banten.