

Kajian Analitik dan Eksperimental Frekuensi Sistem Struktur *Braced Monopod* Anjungan Lepas Pantai

Adi Rizaldi

Alumni Program Magister (S2) Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: adirizaldi@gmail.com

Amrinsyah Nasution

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan/ - Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesa No. 10 Bandung 40132, E-mail: amrinsyah@si.itb.ac.id

Abstrak

Anjungan lepas pantai (offshore platform) dengan sistem struktur *braced monopod* menerima beban layan dan beban lingkungan gelombang, arus, angin, dan gempa. Beban gelombang merupakan beban lingkungan yang berpengaruh pada anjungan lepas pantai (offshore platform). Oleh karena itu, perlu dievaluasi sensitivitas tanggap anjungan lepas pantai (offshore platform) tersebut pada tingkat kenyamanan layan sistem struktur. Dilakukan kajian eksperimental di laboratorium pada sistem struktur portal ruang tiga kaki satu lantai dengan pembebanan *impact* (*impulse*) untuk melihat pengaruh peredam eksternal (*Tuned Mass Damper* (*TMD*) *spons* dan kabel peredam *dashpot*) dalam mereduksi tanggap (*perpindahan* dan *percepatan*), *frekuensi natural*, dan *damping ratio* sistem struktur. Hasil eksperimen menunjukkan redaman eksternal (*TMD spons* dan kabel peredam *dashpot*) cukup efektif meningkatkan nilai *damping ratio*, mereduksi tanggap struktur (*perpindahan* dan *percepatan*), namun kurang efektif mereduksi *frekuensi alami* struktur. *Frekuensi* yang relatif sama dibandingkan terhadap *frekuensi sistem* tanpa redaman eksternal memperlihatkan tidak signifikan tambahan kekakuan sistem oleh peredam eksternal.

Kata-kata Kunci : *Anjungan lepas pantai, Braced monopod, TMD Spons, Kabel peredam dashpot, Beban impact (impulse), Frekuensi, Natural, Damping ratio, Kenyamanan layan.*

Abstract

Braced monopod offshore structures are usually subjected to service and environmental loads such as current, wind, and earthquake. Wave is the environmental load that has dominant effect to offshore structures. Therefore, evaluation of responsiveness of offshore structures must be done in level of comfort serviceability. Experimental study has been done in laboratory to 3D model of one story frame structure with three legs. The dynamic external load was impact load to observe effect of external damper (tuned mass damper (TMD)-sponge and dashpot cable damper) to obtain responses (displacement and acceleration), natural frequencies, and damping ratios of structural system. Experimental results showed that external damper (tuned mass damper (TMD)-sponge and dashpot cable damper) are quite effective to increase damping ratio and to reduce responses (displacement/acceleration) of structures. They were less effective to reduce natural frequencies of the structures. The frequency from experimental study of which structure without external damper compared to structure with external damper added, are not significant in differences; showed that added stiffness on structures by external damper is insignificance.

Keywords : *Offshore platform, Braced monopod, TMD Sponge, Dashpot cable damper, Impact (impulsive) load, Natural frequency, Damping ratio, Comfort serviceability.*

1. Pendahuluan

Anjungan lepas pantai (*offshore platform*) adalah sistem struktur yang digunakan di perairan Indonesia bagi eksploitasi minyak dan gas bumi. Konstruksi anjungan lepas pantai dengan topologi GBM (*Guidance Braced Monopod*) banyak digunakan di Indonesia pada laut dangkal. Merancang suatu anjungan lepas pantai (*offshore platform*) harus memenuhi kriteria yang disyaratkan oleh standar/peraturan mengenai desain anjungan lepas pantai (*offshore platform*). Evaluasi

integritas sistem struktur dan elemennya dilakukan dari analisis dan desain sistem struktur, yaitu apakah tegangan pada penampang kritis tidak melebihi tegangan izin dan terpenuhinya kekakuan sistem struktur (AISC-ASD, 9th Edition, 1989). Peraturan yang digunakan untuk *assessment* sistem struktur adalah API RP 2A, 21st Edition (WSD, 2000) dan Peraturan Baja Indonesia.

Oleh karena risiko dan tuntutan kegiatan eksplorasi dan eksploitasi minyak dan gas bumi di lepas pantai

yang tinggi maka kebutuhan akan anjungan lepas pantai (*offshore platform*) yang lebih efisien baik dari segi teknis maupun ekonomis sangat diperlukan. Anjungan lepas pantai (*offshore platform*) menerima beban layan dan beban lingkungan yang diantaranya gelombang, arus, angin dan lainnya (API RP 2A, 21st Edition (WSD), 2000). Beban gelombang merupakan beban lingkungan yang paling berpengaruh pada anjungan lepas pantai (*offshore platform*). Oleh karena itu, perlu dievaluasi sensitivitas tanggap anjungan lepas pantai (*offshore platform*) tersebut pada tingkat kenyamanan layan sistem struktur.

Evaluasi kenyamanan terhadap getaran dan analisis struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*) untuk beban maksimum dari pelaksanaan *snubbing unit* dilaksanakan berdasarkan efek gelombang pada anjungan lepas pantai (*offshore platform*) dengan topologi GBM (*Guardian Braced Monopod*). Dari analisis tanggap struktur dapat dievaluasi ketahanan struktur dari fungsi struktur dan kenyamanan.

Diperlukan desain sistem struktur bila frekuensi ketahanan struktur tidak cukup terpenuhi untuk ketidaknyamanan pengguna akibat terjadinya getaran yang berlebih pada lantai struktur. Dalam makalah ini akan diuraikan hasil kajian secara analitik dan hasil kajian secara eksperimental tanggap dinamik anjungan lepas pantai (*offshore platform*) dengan sistem struktur GBM (*Guardian Braced Monopod*) tanpa peredam getaran eksternal dan dengan peredam getaran eksternal.

2. Analisis Struktur Anjungan

2.1 Topologi struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*)

Dalam bidang teknik lepas pantai dikenal beragam topologi struktur anjungan lepas pantai. Secara garis besar dapat dikelompokkan sebagai (Subrata, 2005):

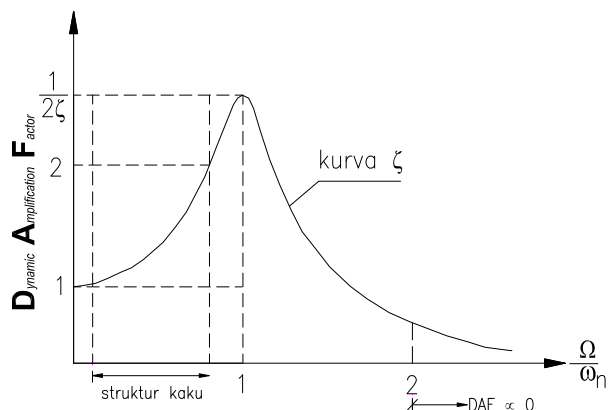
- Topologi struktur lepas pantai terpancang (*fixed offshore structure*) atau *pile-supported platform*, atau disebut juga *jacket steel platform*.
- Topologi *concrete gravity platform*
- Topologi *guyed tower platform*
- Topologi *compliant platform*.

Struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*) tipe tetap (*jacket*) termasuk dalam kategori topologi *fixed offshore structure*. Selain itu, dikenal juga struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*) minimum diantaranya dengan topologi sistem struktur GBM (*Guidance Braced Monopod*) (Subrata, 2005) yang banyak digunakan di perairan Indonesia.

2.2 Anjungan lepas pantai perairan dangkal (*offshore platform on shallow water*)

Dalam bidang teknik lepas pantai struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*) tipe tetap (*jacket*) termasuk kategori anjungan lepas pantai (*offshore platform*) untuk perairan dangkal (Subrata, 2005). Kategori berdasarkan pada bentuk, jenis material struktur maupun perilaku tanggapnya terhadap beban-beban lingkungan yang bekerja pada struktur anjungan tersebut. Anjungan yang banyak digunakan di sekitar perairan Indonesia adalah dari jenis *jacket steel platform*. Hal ini, dikarenakan tipe anjungan lepas pantai (*offshore platform*) ini sangat sesuai diaplikasikan untuk kedalaman sampai dengan 100 meter. Jenis anjungan lepas pantai ini pada umumnya berlokasi di perairan dangkal. Jenis anjungan lepas pantai ini jika digunakan pada perairan dalam (kedalaman lebih dari 500 meter) menjadi kurang efektif karena adanya kendala perilaku dinamis dari struktur dan ditinjau dari segi pertimbangan efektivitas biaya konstruksinya (Subrata, 2005). Struktur *jacket* bagi perairan dangkal (*shallow water*) memiliki nilai *damping ratio* kecil dan *Dynamic Amplification Factor* (DAF) mendekati satu, sehingga hal ini secara prinsip adalah rasio antara periode alami yang menunjukkan perilaku statis, di mana β adalah rasio periode alami struktur dan periode alami gaya gelombang.

Kurva DAF versus rasio frekuensi anjungan lepas pantai (*offshore platform*) pada **Gambar 1** menunjukkan hubungan rasio frekuensi angular gaya gelombang Ω terhadap frekuensi alami ω_n sistem struktur berderajat kebebasan satu; yang menjadi salah satu kriteria guna prediksi perilaku dinamisnya. Bila struktur *jacket* digunakan pada perairan yang semakin dalam, maka struktur anjungan menjadi semakin fleksibel (lentur) sehingga periode alami gerakannya semakin mendekati periode gelombang eksitasinya. Hal ini, menjadikan struktur anjungan lepas pantai (*offshore platform*) tersebut tidak berfungsi baik dari perilaku dinamikanya, karena rentan terhadap resonansi.



Gambar 1. Kurva DAF – rasio frekuensi

3. Tanggap Struktur SDOF Pembebanan Harmonik

3.1 Tanggap struktur tanpa redaman eksternal

Gambar 2 adalah sistem struktur sistem derajat kebebasan tunggal (SDOF) dengan gaya harmonic $P(t) = P \cdot \cos(\Omega t)$.

Dari persamaan gerak dinamik Newton II: $F = ma$,

$$P(t) - kx - c\dot{x} = m\ddot{x} \quad (1)$$

dengan redaman struktur tipe *viscous*: gaya redaman berlawanan, tetapi proporsional terhadap kecepatan

$$-c\dot{x}$$

Persamaan (1) disusun ulang menjadi:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = P_0 \cdot \cos(\Omega t) \quad (2)$$

maka **Persamaan (2)** ditulis:

$$\ddot{x} + 2\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{P_0 \cdot \cos(\Omega t)}{m} \quad (3)$$

Solusi umum **Persamaan (3)**:

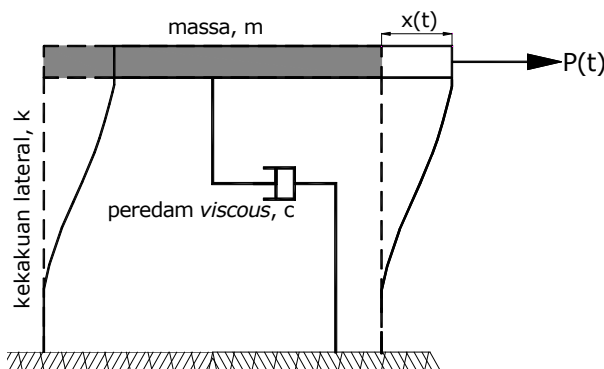
$$x(t) = e^{-\omega_n \zeta t} \{A \cdot \cos(\omega_D t) + B \cdot \sin(\omega_D t)\} + \frac{(P_0/k) \cdot \sin(\Omega t - \theta)}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (4)$$

3.2 Kasus getaran bebas

Untuk getaran bebas $P(t) = 0$ maka **Persamaan (1)** mengambil bentuk

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n \dot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (5)$$

Dengan mengambil solusi persamaan berbentuk $x(t) = A \cdot e^{pt}$. Dalam hal ini, nilai p akan ditentukan dan A suatu konstanta. Solusi perpindahan sebagai fungsi waktu $x(t)$ tergantung dari harga p pada persamaan karakteristiknya. Terdapat tiga kemungkinan harga p yang mendeskripsikan gerak tersebut, yaitu jika p adalah akar nyata, maka penyelesaiannya:

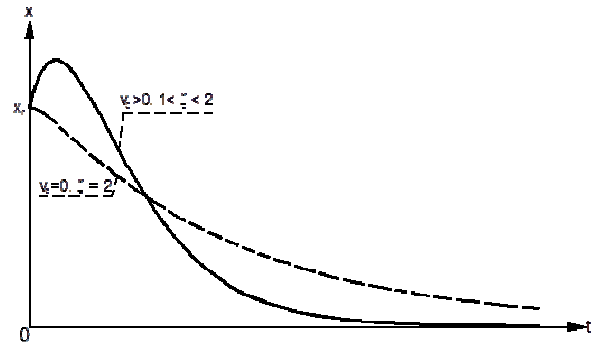


Gambar 2. Model mekanikal struktur DOF tunggal

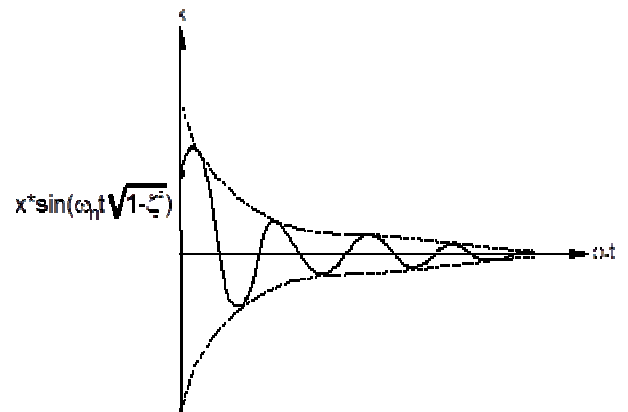
$$x = e^{-\zeta\omega_n t} \left[x_0 \cosh(\omega_n t \sqrt{\zeta^2 - 1}) + \frac{v_0 + \zeta\omega_n x_0}{\omega_n \sqrt{\zeta^2 - 1}} \sinh(\omega_n t \sqrt{\zeta^2 - 1}) \right] \quad (6)$$

Jika p akar *imaginary*, diperoleh:

$$x = e^{-\zeta\omega_n t} \left[x_0 \cos(\omega_n t \sqrt{1 - \zeta^2}) + \frac{v_0 + \zeta\omega_n x_0}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n t \sqrt{1 - \zeta^2}) \right] \quad (7)$$



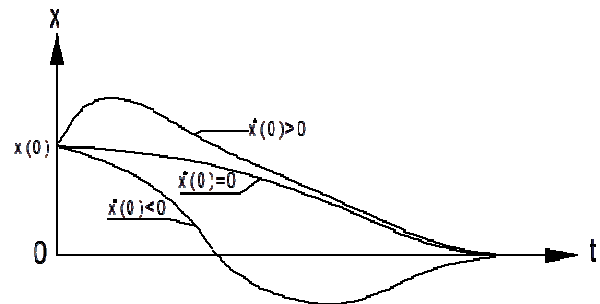
Gambar 3. Grafik fungsi $x(t)$ untuk $\zeta > 1$, gerakan aperiodik



Gambar 4. Grafik fungsi $x(t)$ untuk $z < 1$, osilasi teredam

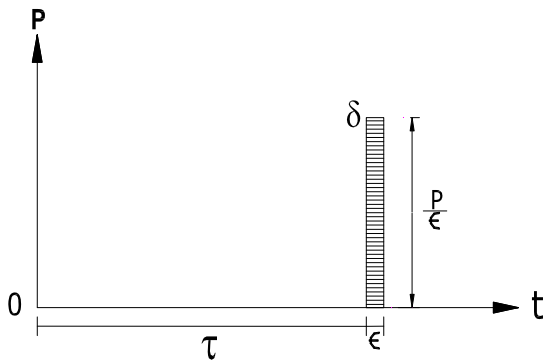
p akar kembar, maka solusinya:

$$x = x_0 \cdot e^{-\omega_n t} + (v_0 + \zeta\omega_n x_0) \cdot t \cdot e^{-\omega_n t} \quad (8)$$



Gambar 5. Grafik fungsi $x(t)$ untuk $z = 1$, gerakan teredam kritis; $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{m \cdot k}}$

3.3 Unit beban impuls 1 satuan (fungsi delta-dirac)



Gambar 6. Kurva 1 unit beban impuls

Untuk kasus beban yang bekerja untuk jangka waktu yang sangat pendek ($\hat{I} \rightarrow 0$), maka beban disebut sebagai beban impuls (Resmi, 2010). Jika impuls yang dihasilkan beban tersebut 1 unit satuan, maka beban tersebut disebut δ sebagai unit beban impuls 1 satuan atau fungsi Delta-Dirac yaitu $d(t - t)$ yang mempunyai sifat-sifat:

$$d(t - t) = 0 \text{ untuk } t \neq t \quad (9)$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t - \tau) dt = 1 \quad (10)$$

$$\int_0^{\infty} \delta(t - \tau).P(t)dt = P(\tau) \quad (11)$$

Dengan $0 < t < \infty$.

Menggunakan sifat-sifat persamaan di atas beban impuls $P(t)$ yang bekerja pada $t = t$ yang dihasilkan oleh impuls linear 1 satuan \hat{P} sembarang, besarnya dapat dinyatakan oleh :

$$P(t) = \hat{P} * \delta(t - \tau) \quad (12)$$

3.4 Tanggapan struktur akibat 1 unit beban impuls

Tanggapan sistem struktur dengan redaman terhadap gaya impuls diberikan oleh:

$$X(t) = \hat{P} * h(t) \quad (13)$$

dimana $h(t)$ dikatakan sebagai *impulse response function* (Chopra, 2001) dan dapat ditulis sebagai

$$h(t) = \frac{1}{m \cdot \omega_d} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \sin \omega_n t \quad (14)$$

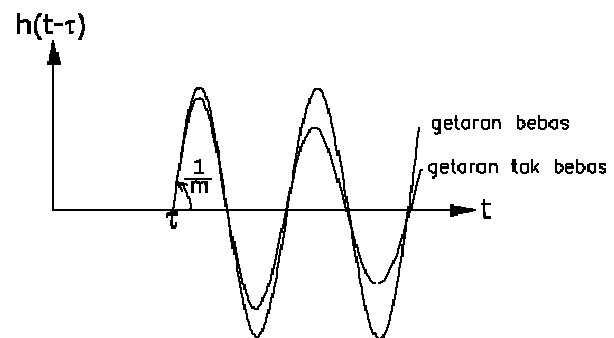
dengan ω_d frekuensi alami struktur teredam (Chopra, 2001). Jika gaya yang bekerja hanya pada waktu $t = \tau$, maka bentuk di atas dapat ditulis sebagai:

$$h(t-\tau) = \frac{1}{m \omega_d} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \sin \omega_d(t-\tau) \quad (15)$$

Tanggapan total struktur teredam diperoleh dengan melakukan integral **Persamaan 15**:

$$x(t) = \int_0^t F(\tau) \cdot h(t-\tau) dt \quad (16)$$

Integral **Persamaan (16)** di atas disebut integral *convolution* (Chopra, 2001). **Gambar 7** menunjukkan kurva tanggapan struktur tak teredam dan teredam akibat beban impuls 1 satuan:



Gambar 7. Tanggapan struktur akibat 1 unit beban impuls

Setelah 1 unit beban impuls berhenti ($t > t$), struktur akan bergerak bebas, dengan kecepatan awal akibat pengaruh 1 unit beban impuls tersebut = $1/m$, dan tidak ada perubahan perpindahan dalam interval waktu e , artinya $y(t+e) = y(t)$ dalam hal ini nilainya sama dengan nol (Resmi, B.M., 2010). Dengan demikian, tanggapan struktur setelah beban tersebut bekerja adalah:

1. Untuk struktur tak teredam (Chopra, 2001):

$$h(t - \tau) = \frac{1}{m \omega} \sin \{ \omega(t - \tau) \} \quad (17)$$

2. Untuk struktur teredam (Chopra, 2001):

$$h(t-\tau) = \frac{1}{m \omega_d} e^{-\xi \omega(t-\tau)} [\sin \{ \omega_d(t-\tau) \}] \quad (18)$$

4. Analisis Modal

Metode analisis modal merubah persamaan diferensial *couple* menjadi persamaan diferensial *uncouple* sistem derajat tunggal (*single degree of freedom*). Setelah diperoleh nilai eigen, yaitu frekuensi w_i dan vektor eigen $\{f\}_i$ -*modal shapes*, menggunakan aturan superposisi vektor eigen, persamaan vektor perpindahan adalah gabungan linear vektor-vektor Eigen (Chopra, 2001):

$$\{u(t)\} = \sum q_i(t) \{\phi\}_i = q_1(t) \{\phi\}_1 + \dots + q_n(t) \{\phi\}_n \quad (19)$$

Parameter $q_i(t)$ adalah fungsi waktu disebut koordinat normal atau koordinat digeneralisir. Menetapkan matrik modal $[A]$ sebagai

$$[A] = [\{f\}_1 \{f\}_2 \dots \dots \{f\}_n] \quad (20)$$

sebagai akumulasi semua vektor eigen, maka

$$\{u(t)\} = [A] \{q(t)\} \quad (21)$$

Kondisi orthogonalitas **Persamaan (20)** di atas adalah (Chopra, 2001):

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_j = 0, \quad i \neq j \quad (22)$$

$$\{\phi\}_i^T [M] \{\phi\}_i = m \neq 0 \quad (23)$$

Solusi nilai eigen (Chopra, 2001):

$$[K]\{\phi\} = \omega^2 [M]\{\phi\} \quad (24)$$

Mengalikan **Persamaan (24)** dengan $\{f\}^T$ dan menggunakan **Persamaan (23)**, diperoleh

$$\{\phi\}_i^T [K] \{\phi\}_i = \omega^2 m \quad (25)$$

Tetapi, $[\bar{M}] = [A]^T [M] [A]$, dan $[\bar{K}] = [A]^T [K] [A]$

adalah matrik diagonal dan matrik redaman [C] proporsional terhadap kekakuan/matrik massa yaitu:

$$[C] = a_1[M] + a_2[K] \quad (26)$$

sehingga $[\bar{C}]$ adalah juga matrik diagonal.

Dengan demikian, persamaannya menjadi persamaan *uncouple*, yaitu n persamaan *independent* yang dapat diselesaikan. Untuk persamaan ke-I

$$\ddot{q}_i + 2 \zeta_i * \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = \frac{\bar{Q}_i}{M_i} \quad (27)$$

yaitu persamaan sistem derajat tunggal (1 DOF). Solusi **Persamaan (27)**,

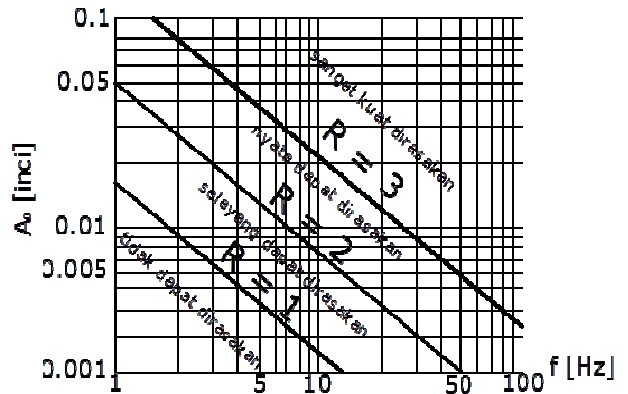
$$q_i(t) = e^{-\zeta_i \omega_i t} \left[q_0 \cos(\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}) + \frac{v_0 + \zeta_i \omega_i q_0}{\omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2}} \sin(\omega_i t \sqrt{1-\zeta_i^2}) \right] + \int_0^t \frac{Q(\tau) e^{-\zeta_i \omega_i (t-\tau)}}{M_i \omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2}} * \sin \left\{ \omega_i (t-\tau) \sqrt{1-\zeta_i^2} \right\} d\tau \quad (28)$$

$$q_{ist}(t) = \int_0^t \frac{Q(\tau) e^{-\zeta_i \omega_i (t-\tau)}}{M_i \omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2}} * \sin \left\{ \omega_i (t-\tau) \sqrt{1-\zeta_i^2} \right\} d\tau \quad (29)$$

Persamaan terakhir ini disebut integrasi *Duhamel* (Chopra, 2001), seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

4.1 Desain kenyamanan getaran

Desain dari keutuhan struktur sampai utilitas struktural dan kenyamanan menuntut pertimbangan selain hanya bagi keutuhan struktural. Faktor indeks kenyamanan 2 menjadi nilai persyaratan percepatan bagi batas kenyamanan.



Gambar 8. Indeks kenyamanan (R)

Bagi desain getaran lantai, *skala Reiher-Meister* getaran saat 'steady' dimodifikasi ke dalam skala Modifikasi Reiher-Meister, karena saat orang berjalan bukanlah kondisi saat 'steady'. Persamaan skala Modifikasi Reiher-Meister (Wiss dan Parmelee, 1974), (AISC, 2003), (Sean, M.H., 2007) adalah:

$$R = 5,08 * \left[\frac{f * A_0}{D^{0,217}} \right]^{0,265} \quad (30)$$

dengan:

f = frekuensi.

A₀ = amplitudo maksimum gerakan lantai akibat satu sentakan tunggal beban, (inci).

D = fraksi redaman kritis [%].

R merupakan indeks tingkat tanggap rata-rata :

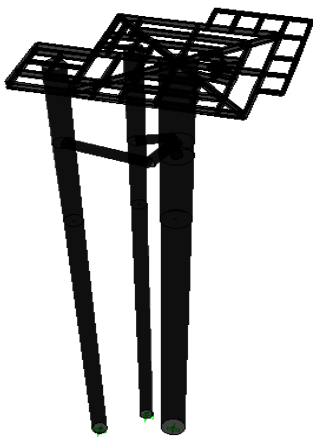
- ≤ 1, getaran tidak terasa,
- = 2, getaran jarang terasa,
- = 3, getaran nyata terasa,
- = 4, getaran sangat terasa
- = 5, getaran hebat

Bila dari analisis struktur anjungan **Gambar 9** diperoleh parameter sistem sebagaimana pada **Tabel 1**, maka dapat dihitung nilai R sebagai berikut.

Nilai R - Modifikasi Reiher-Meister adalah

$$R = 5,08 * \left[\frac{f * A_0}{D^{0,217}} \right]^{0,265} \quad \text{Dengan nilai amplitudo } A_0 =$$

2.45 mm (1 inci), D = 3,5%, dan f = 0,677, R = 3,78.



Gambar 9. Struktur anjungan

Tabel 1. Periode (T) dan Frekuensi (f) struktur anjungan

Mode	Periode T [detik]	Frekuensi f [siklus/detik]	w [rad/detik]	Nilai eigen [rad ² /detik ²]
1	1.478	0.677	4.252	18.078
2	1.043	0.959	6.026	36.316
3	0.303	3.303	20.755	430.780
4	0.246	4.064	25.537	652.130
5	0.164	6.113	38.410	1475.300
6	0.129	7.767	48.804	2381.800

Analisis periode T dan frekuensi f sistem struktur anjungan seperti pada Gambar 9 untuk 6 mode pada Tabel 1. Pada tingkat layanan struktur dengan R = 3,78, sistem berada pada zona tidak nyaman; getaran lantai sangat terasa. Dengan demikian diperlukan modifikasi sistem struktur. Alternatif perbaikan atau modifikasi dengan menggunakan peredam eksternal.

5. Analisis dan Evaluasi Tanggap Struktur dengan Perangkat Lunak

Studi kasus dan evaluasi tanggap struktur dengan perangkat lunak SAP-2000 meliputi:

- Pemodelan beban eksitasi dan parameter besaran struktur yang diinput dalam SAP-2000 disesuaikan dengan beban eksitasi dalam eksperimen.
- Dilakukan simulasi beban eksitasi yang bekerja pada struktur seperti beban akibat percepatan tanah dari gempa *El-Centro*.

6. Penelitian Eksperimental

Penelitian ini merupakan kajian eksperimental struktur portal open frame 3D ukuran 1,60 m * 1,695 m dan tinggi 2,575 m. Eksperimen dilakukan dengan memberikan gaya *impact* pada struktur. Eksperimen dilakukan di Laboratorium Struktur & Bahan, Jurusan Teknik Sipil – ITB. Dilakukan pengamatan dan

evaluasi perilaku kemampuan sistem peredam getaran eksternal struktur dalam meredam energi akibat eksitasi beban dinamik. Perilaku yang di evaluasi meliputi besaran rasio redaman ξ dari sistem peredam getaran eksternal. Sedangkan tahapan eksperimen secara garis besar terbagi atas empat 4 bagian yaitu:

6.1 Tahap 1: Pengujian pendahuluan untuk verifikasi alat ukur sensor yang digunakan.

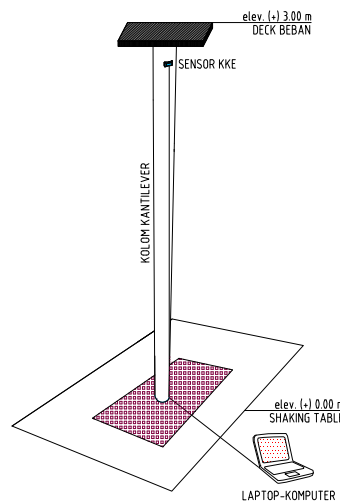
Sensor (*Accelerometer*) dipasang di atas kolom baja seperti pada Gambar 10. Kolom digetarkan dengan beban *impact*. Getaran kolom akan terekam sensor. Dari spektrum percepatan yang terekam, dianalisis dengan metode *Fast Fourier Transform (FFT)* untuk mendapat frekuensi getaran kolom. Hasil yang didapat dari eksperimen kemudian dibandingkan dengan perhitungan frekuensi getaran cara analitis. Dari perbandingan ini dapat disimpulkan akurasi sensor yang digunakan.

6.2 Tahap 2: Pengujian struktur tanpa peredam getaran eksternal

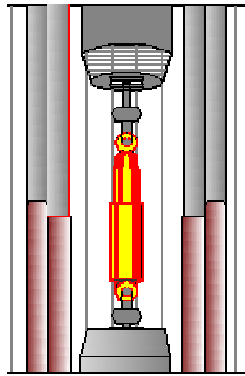
Struktur digetarkan dengan beban *impact*. Besar beban *impact* ditentukan dari rekaman sensor. Tanggap struktur berupa percepatan akan terekam oleh sensor. Data spektrum percepatan kemudian dianalisis dengan metode *Fast Fourier Transform (FFT)* untuk memperoleh frekuensi natural (f), *damping ratio* (ξ), dan tanggap struktur.

6.3 Tahap 3: Pengujian peredam getaran eksternal

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan nilai-nilai yang menunjukkan karakteristik alat peredam getaran eksternal. Pengujian dilakukan dengan pembebanan statik. hasil pengujian adalah penetapan koefisien redaman (C_d) dan konstanta pegas (k_d).



Gambar 10. Skema pengukuran frekuensi alami kolom

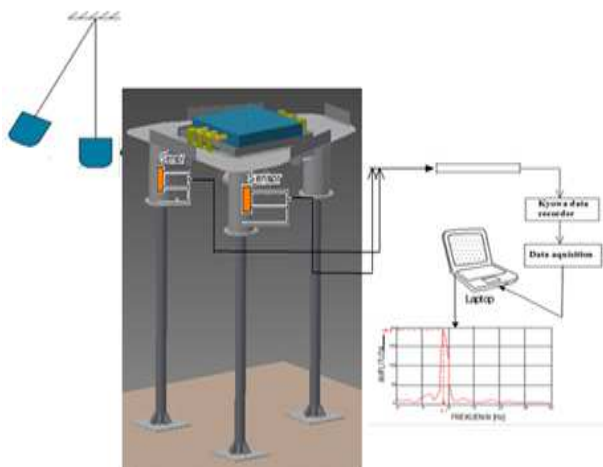


Gambar 11. Setting eksperimen pengukuran koefisien redaman shock absorber

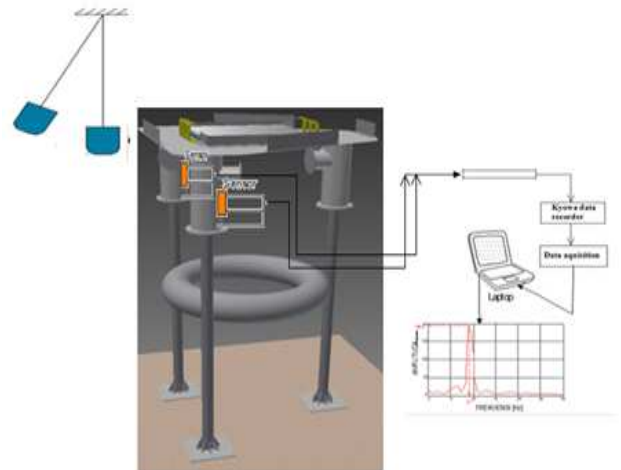
6.4 Tahap 4: Pengujian struktur portal dengan peredam getaran eksternal.

Struktur portal dipasang peredam getaran eksternal. Struktur diberibeban *impact*. *Transducer accelerometer* (sensor) akan menangkap sinyal getaran struktur yang selanjutnya dikirim ke *Kyowa data recorder* dan *CR-23X data logger*. Rekaman data ini kemudian diunduh ke peralatan *Multichannel Spectrum Analyzer (MSA) HP 3566A* yang mampu mengkonversi data dari domain waktu menjadi domain frekuensi dengan menggunakan *Fast Fourier Transform (FFT) algorithm*. Gambar 12, 13, 14 memperlihatkan persiapan pengujian getaran struktur portal dengan peredam yang dieksitasi beban tumbukan. Gambar 12 memperlihatkan pengujian getaran struktur portal dengan peredam *Tuned Mass Damper (TMD)* bahan absorber spons. Gambar 13 memperlihatkan pengujian getaran struktur portal dengan peredam *Air-Bag*. Gambar 14 memperlihatkan pengujian getaran struktur portal dengan peredam *Dashpot*.

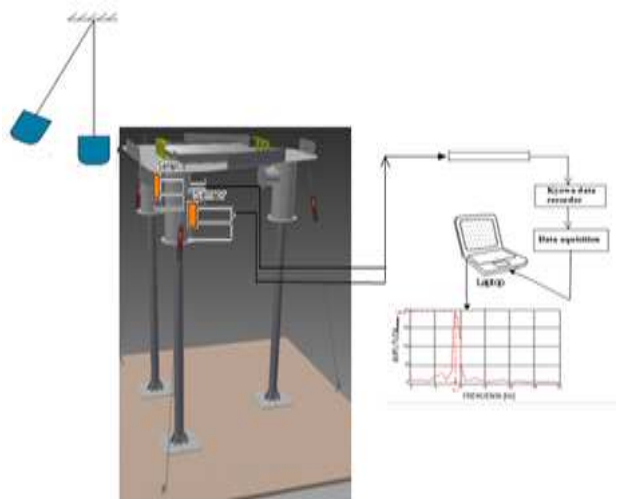
Skema pengujian digambarkan sebagai berikut:



Gambar 12. Portal dengan redaman eksternal (TMD) bahan absorber spons



Gambar 13. Portal dengan redaman eksternal 'air-bag'



Gambar 14. Portal dengan redaman eksternal peredam dashpot

7. Hasil dan Analisis Eksperimen

Beban *impact* (kejut) yang bekerja pada struktur portal berupa beban *impact* massa bandul.

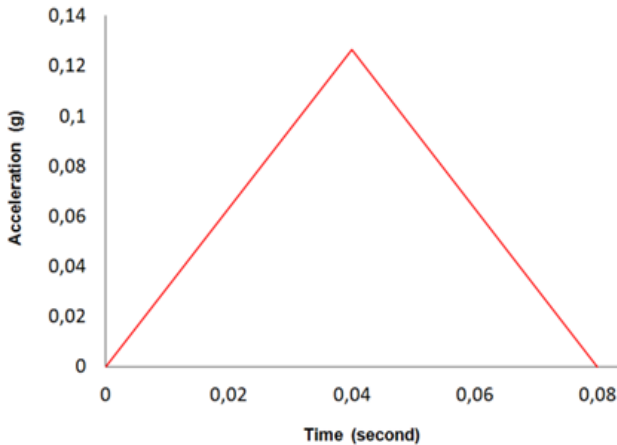
Data bandul/hammer:

- a. Berat bandul/hammer (W) = 40 kg.
- b. Tinggi jatuh bandul (h) = 50 cm.
- c. Kecepatan bandul pada waktu tepat menumbuk struktur .

$$v = \sqrt{2gh} = 3,13 \text{ m/s}$$

- d. Interval waktu (t) bandul pada waktu tepat menumbuk struktur adalah 0,08 detik (dari pengukuran sensor)

Gambar 15 memperlihatkan tanggap percepatan struktur portal selama interval waktu 0,08 detik yang dieksitasi beban *impact* massa bandul.



Gambar 15. Fungsi percepatan beban *impact*

Lama bandul pada waktu tepat menumbuk struktur ditentukan dari interval waktu saat terjadi perubahan percepatan untuk siklus pertama $\Delta t = 0,08$ detik. Besar gaya *impact* yang bekerja pada struktur :

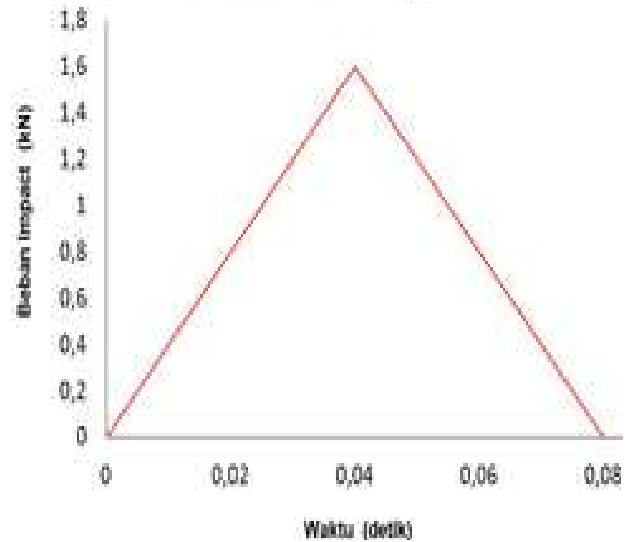
$$F(t) = \frac{W}{g} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{40.3,13}{9,81 \cdot 0,08} = 159,53 \text{ kg} = 1,595 \text{ kN}.$$

Gambar 16 memperlihatkan model pembebanan *impact* massa bandul pada struktur portal selama interval waktu 0,08 detik. Pembebanan *impact* diambil simetris dengan percepatan saat bandul/hammer tepat menumbuk struktur portal seperti dalam rekaman sensor Gambar 16.

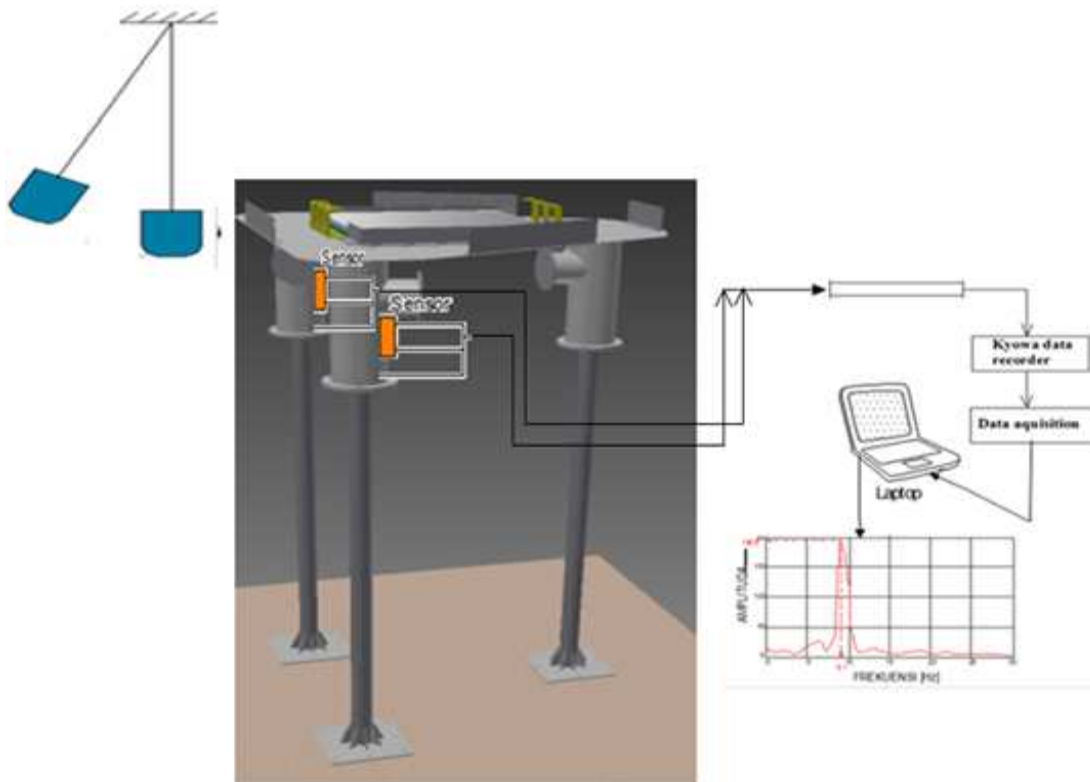
7.1 Tanggap struktur portal baja tanpa peredam eksternal

Tinjau sistem portal tanpa peredam eksternal Gambar 17 yang menerima beban *impact* $F(t)$.

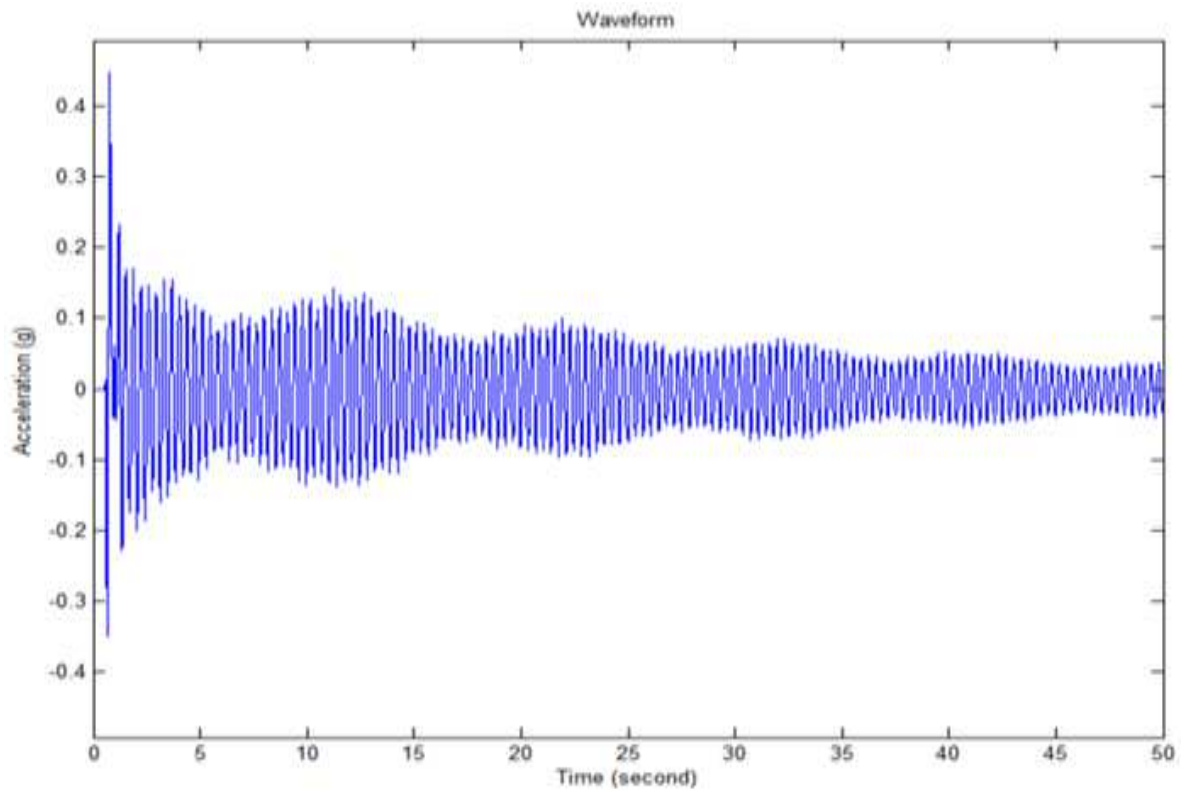
Gambar 18 memperlihatkan tanggap percepatan struktur dan spektrum *Fourier* akibat eksitasi beban *impact* berdasarkan rekaman data hasil eksperimen:



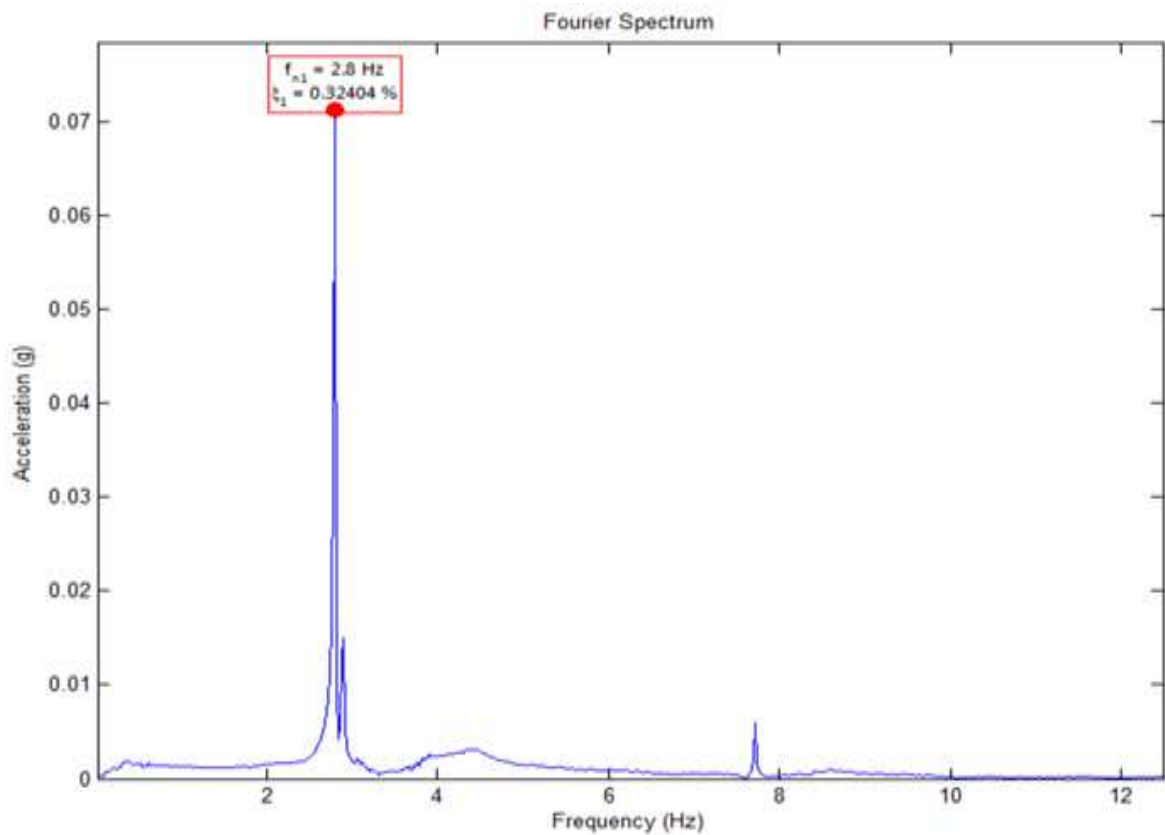
Gambar 16. Pemodelan beban *impact* $F(t)$



Gambar 17. Struktur portal baja tanpa peredam eksternal

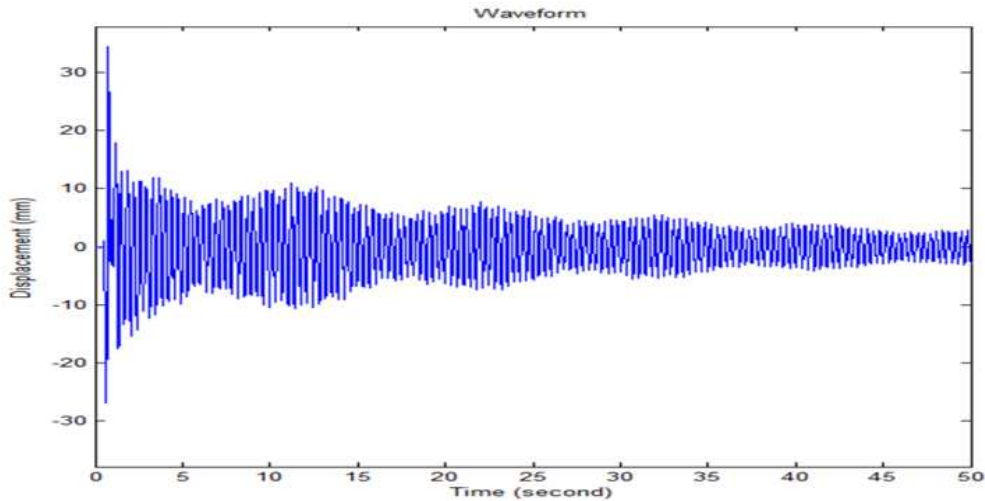


a. Percepatan struktur terhadap waktu

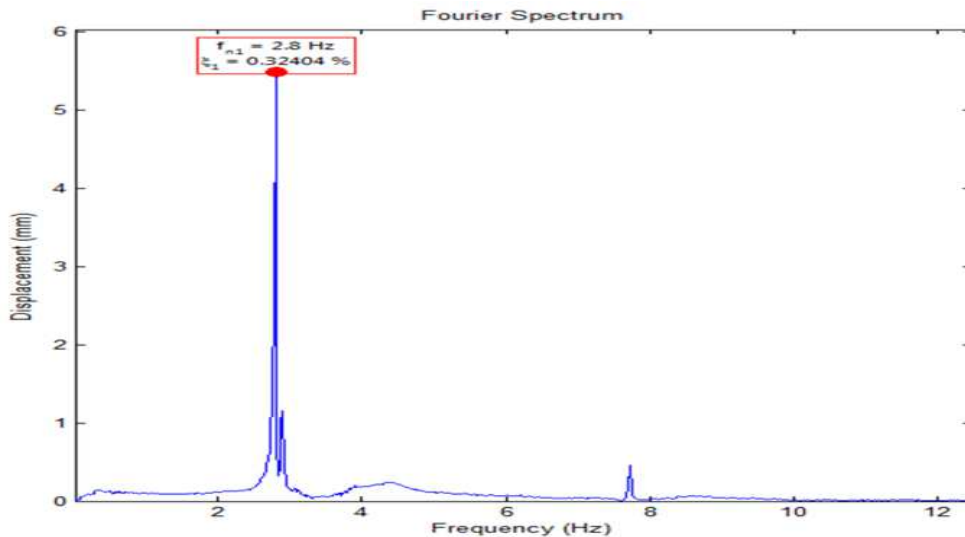


b. Frekuensi f_{n1} dan rasio ξ_1 redaman

Gambar 18. Rekaman perpindahan sensor satu sumbu, frekuensi dan rasio redaman (tanpa peredam eksternal)



a. Perpindahan struktur terhadap waktu



b. Nilai frekuensi f_{n1} dan rasio ξ_1 redaman

Gambar 19. Rekaman perpindahan sensor satu sumbu, frekuensi dan rasio redaman (struktur tanpa peredam eksternal)

Gambar 19 memperlihatkan tanggap percepatan struktur dan spektrum *Fourier* akibat eksitasi beban *impact* berdasarkan rekaman data hasil eksperimen:

Hasil analisis *Fast Fourier Transform* data percepatan, diperoleh frekuensi *natural* struktur gerak arah sumbu-x adalah $f = 2,8$ Hz, dan *damping ratio*: $\xi = 0,324$ %. Tanggap perpindahan akibat beban *impact* dievaluasi dengan analisis modal dan integral *Duhamel*.

Dari hasil analisis *Fast Fourier Transform* data perpindahan di atas, diperoleh frekuensi *natural* struktur gerak arah sumbu-x adalah $f = 2,8$ Hz, dan *damping ratio*: $\xi = 0,324$ %. Tidak ada perbedaan *damping ratio* (ξ) antara hasil *Fast Fourier Transform* data percepatan dan perpindahan. Dari hasil analisis *Fast Fourier Transform* (FFT) terlihat bahwa frekuensi *natural*

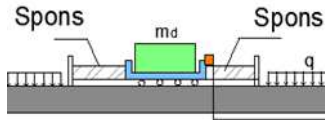
struktur yang dievaluasi berdasarkan data percepatan dari rekaman sensor (data *recording*), maupun berdasarkan tanggap perpindahan yang diperoleh melalui analisis modal dan integral *Duhamel* akibat beban *impact*, keduanya mempunyai nilai yang *sama*. Nilai-nilai frekuensi *natural* (f) dan *damping ratio* struktur (ξ) tanpa peredam eksternal yang diukur oleh kedua sensor dalam tiga kali pengambilan diberikan pada **Tabel 2** berikut:

Tabel 2. Damping Ratio (ξ) dan Frekuensi (f)

Pengambilan	Sensor	
	Frekuensi (Hz)	Damping ratio (%)
1	2,8	0,285
2	2,8	0,324
3	2,8	0,312
Rata-rata	2,8	0,307

7.2 Tanggapan struktur portal baja dengan peredam eksternal

7.2.1 Tuned mass damper bahan shock absorber spons



Gambar 20. Tuned Mass Damper (TMD) bahan absorber spons

Gambar 20 memperlihatkan sistem peredam getaran dengan topologi Tuned Mass Damper (TMD) bahan absorber spons yang digunakan untuk eksperimen portal baja dengan peredam eksternal.

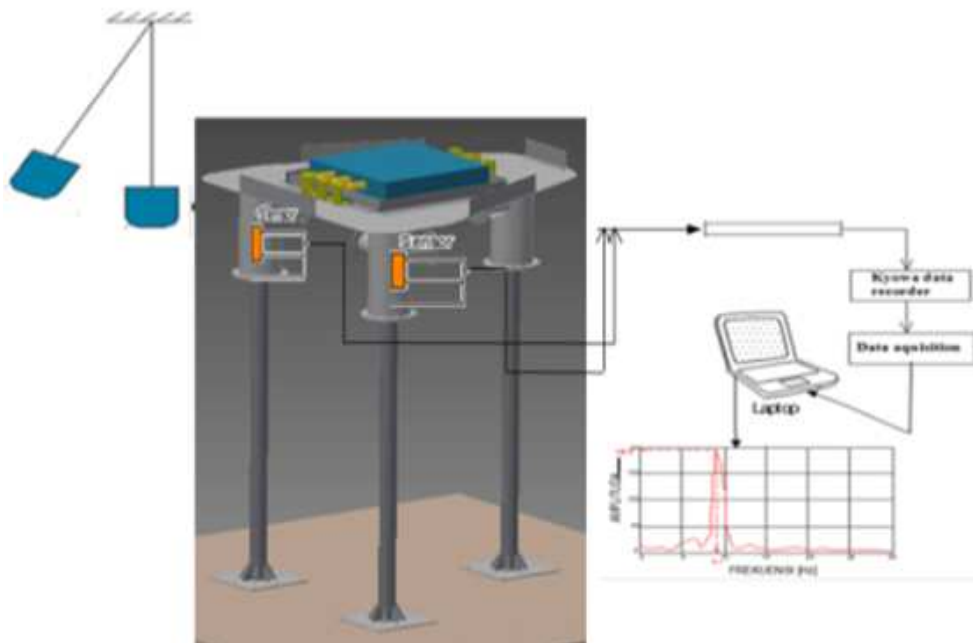
Data massa tambahan:

$$W = 196,48 \text{ kg-detik}^2/\text{m}.$$

$$W_d = 44,00 \text{ kg-detik}^2/\text{m}.$$

$$\mu = 22,39 \text{ \%}.$$

Gambar 21 memperlihatkan portal baja dengan peredam getaran dengan topologi Tuned Mass Damper (TMD) bahan absorber spons yang dieksitasi beban impact.



Gambar 21. Struktur portal baja dengan peredam eksternal (TMD) spons

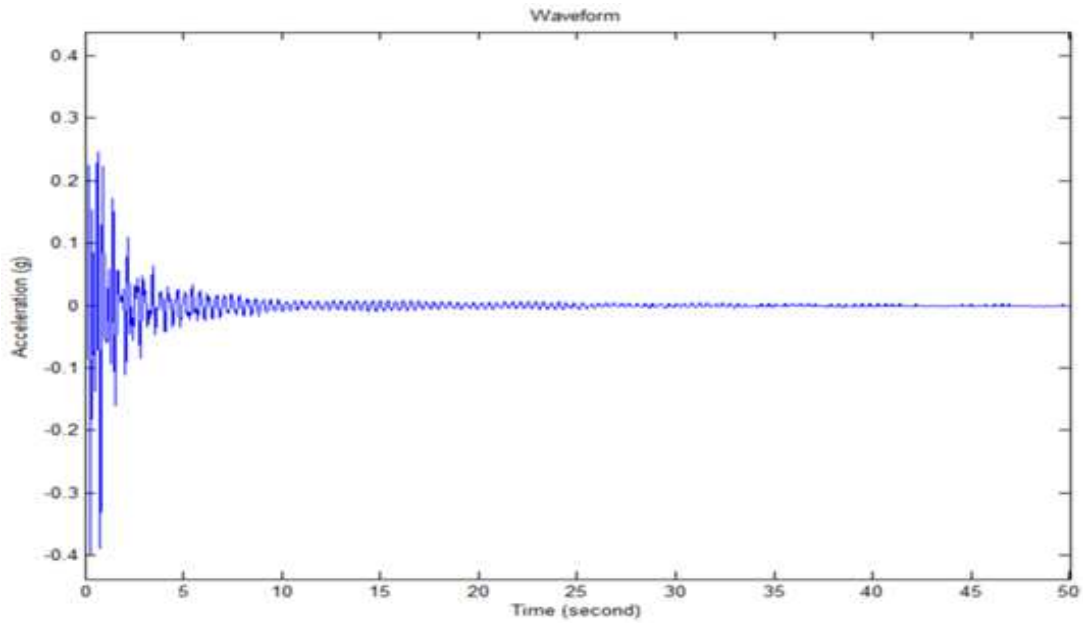
Tabel 3. Perbandingan damping ratio (ξ) dan frekuensi (f) dua sistem struktur

Sistem struktur tanpa TMD		Sistem struktur dengan TMD	
Frekuensi f [Hertz]	Damping ratio ξ [%]	Frekuensi f [Hertz]	Damping ratio ξ [%]
2,80	0,307	3,94	4,143

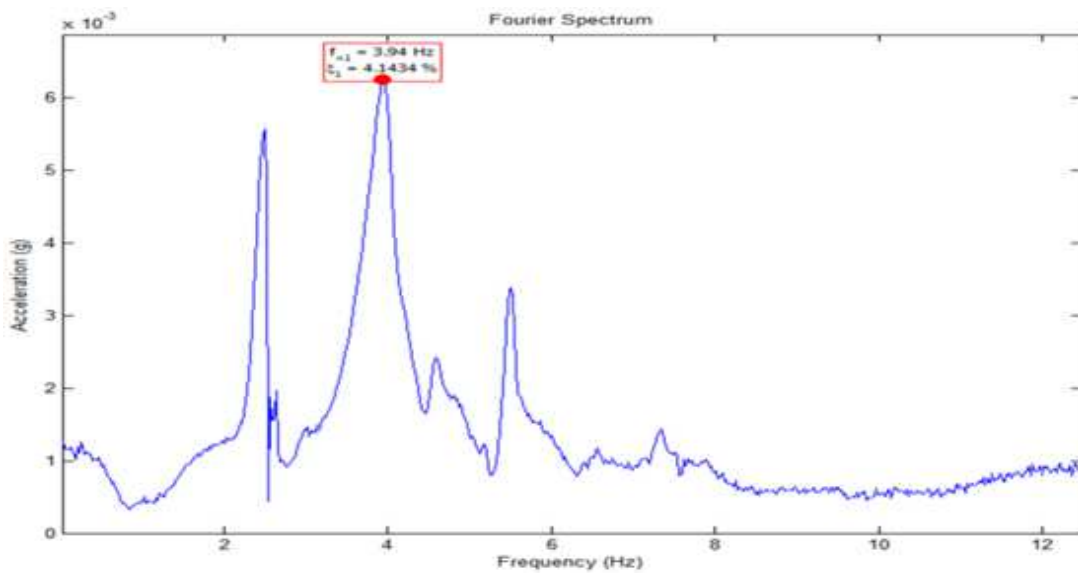
Gambar 22 memperlihatkan hasil rekaman tanggap percepatan struktur dengan peredam eksternal TMD bahan absorber spons dan Gambar 23 memperlihatkan hasil FFT spektrum percepatan.

Dari hasil Fast Fourier Transform (FFT) diperoleh nilai frekuensi natural struktur $f = 3,94 \text{ Hz}$ dan damping ratio $\xi = 4,143 \text{ \%}$. Damping ratio struktur dengan TMD 13 kali dari damping ratio $\xi = 0,307 \text{ \%}$ sistem struktur tanpa TMD. Kenaikan 39,3 % nilai frekuensi natural antara sistem struktur. Dengan demikian, sistem mekanikal struktur mempunyai konfigurasi yang sama untuk analisis (tidak ada kontribusi kekakuan pada sistem). Tanggapan perpindahan struktur dengan peredam eksternal dievaluasi dengan cara integrasi numerik fungsi percepatan dari data rekaman sensor, integrasi dilakukan dengan cara step by step dengan bantuan program MATLAB. Hasilnya secara simultan dengan tanggapan struktur tanpa peredam eksternal adalah sesuai pada Gambar 24.

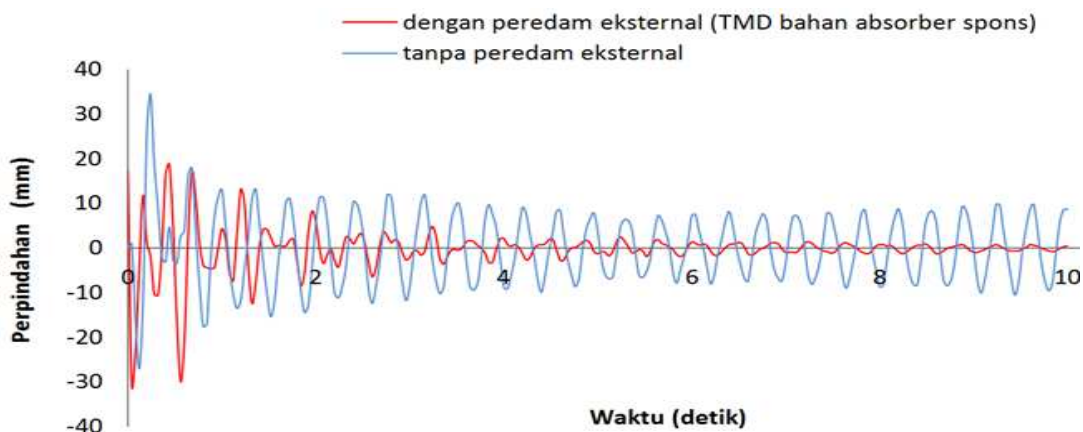
Dari Gambar 24 terlihat topologi sistem peredam eksternal TMD spons cukup efektif mereduksi perpindahan struktur portal. Dalam waktu relatif singkat (6 detik), amplitudo getaran gerak massa struktur portal sudah menghilang.



Gambar 22. Tanggap percepatan struktur dengan TMD spons



Gambar 23. Hasil Fast Fourier Transform (FFT) spektrum percepatan



Gambar 24. Perpindahan translasi lantai hasil rekaman sensor, tanpa peredam dan dengan TMD spons ($0 < t < 10$ detik)

7.3 Tanggap struktur portal baja dengan peredam eksternal (kabel peredam *dashpot*)

7.3.1 Kabel peredam *dashpot*

Gambar 25 memperlihatkan sistem peredam getaran dengan topologi *Kabel Peredam Dashpot* yang digunakan untuk eksperimen portal baja dengan peredam eksternal dan **Gambar 26** memperlihatkan portal baja dengan peredam getaran dengan topologi *Kabel Peredam Dashpot* yang dieksitasi beban *impact*.

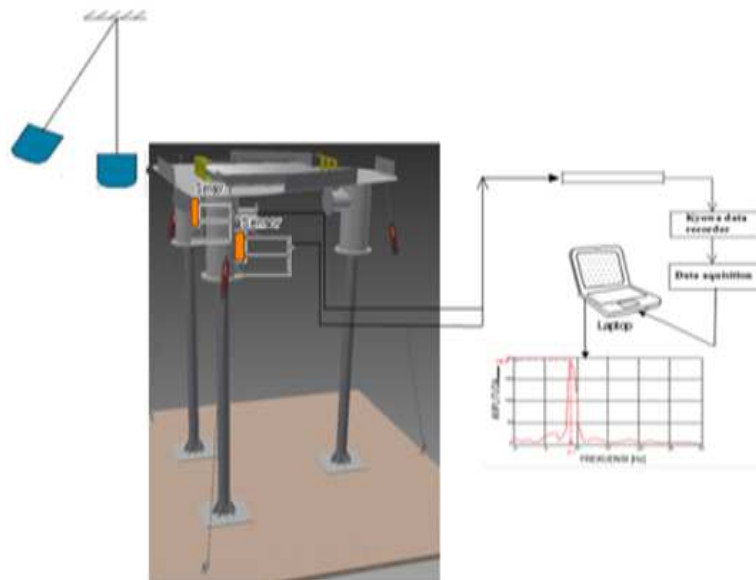
Gambar 27 memperlihatkan hasil rekaman tanggap percepatan struktur dengan peredam eksternal Kabel Peredam Dashpot dan **Gambar 28** memperlihatkan hasil FFT spektrum percepatan.



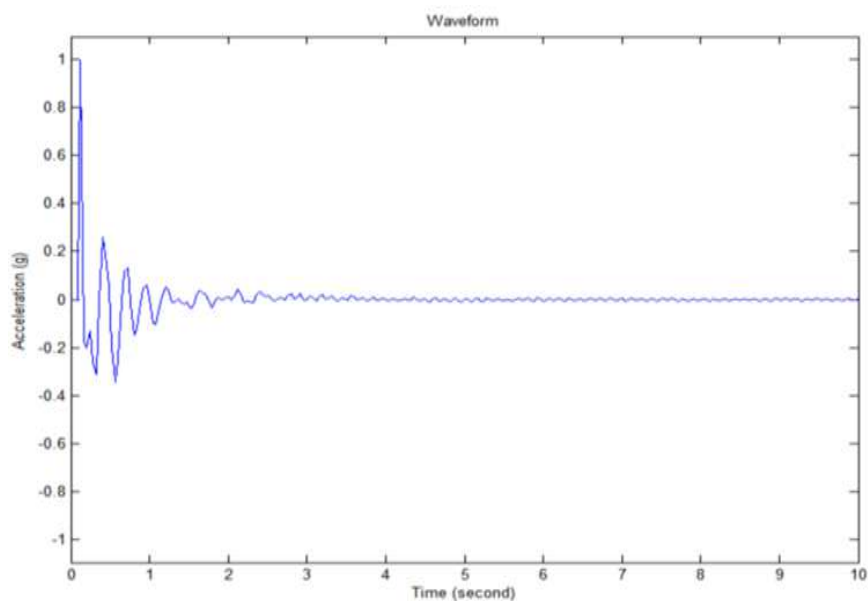
Data struktur:
 $W = 196,48 \text{ kg-detik}^2/\text{m}$

Data property *dashpot*:
 $k_{dashpot} = 15,48 \text{ kN-detik}/\text{m}$.
 (3 kabel peredam)

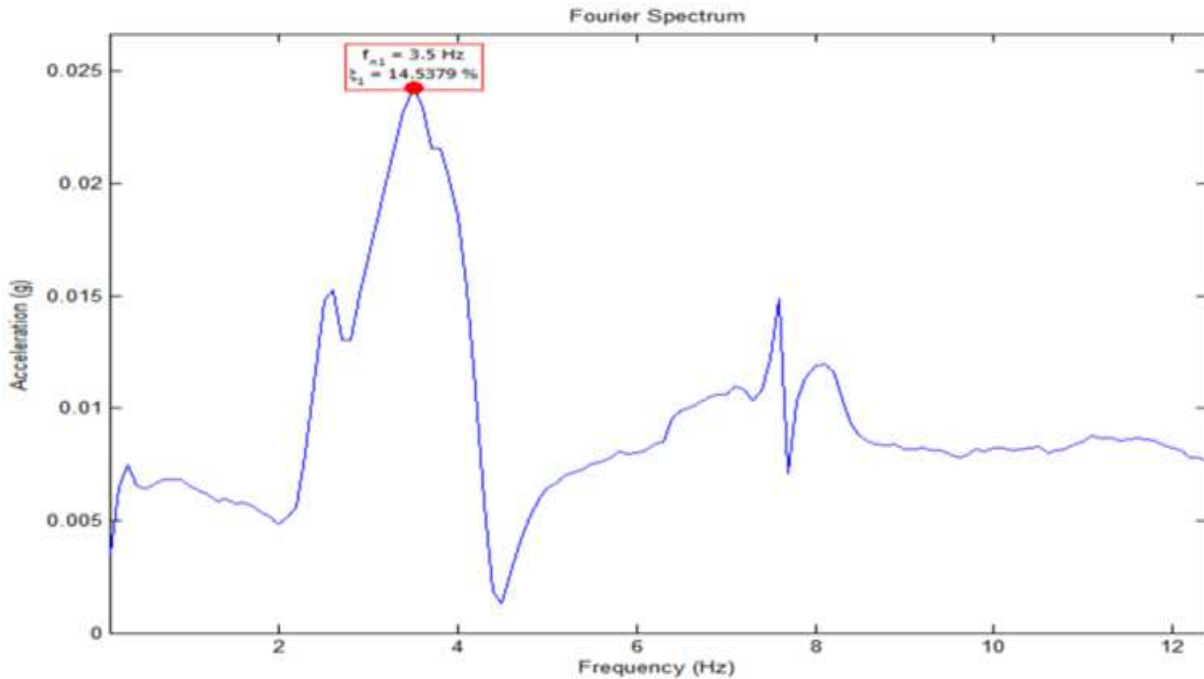
Gambar 25. Kabel peredam dashpot



Gambar 26. Struktur portal baja dengan peredam eksternal (kabel peredam *dashpot*)



Gambar 27. Tanggap percepatan struktur dengan kabel peredam *dashpot*



Gambar 28. Hasil Fast Fourier Transform (FFT) spektrum percepatan

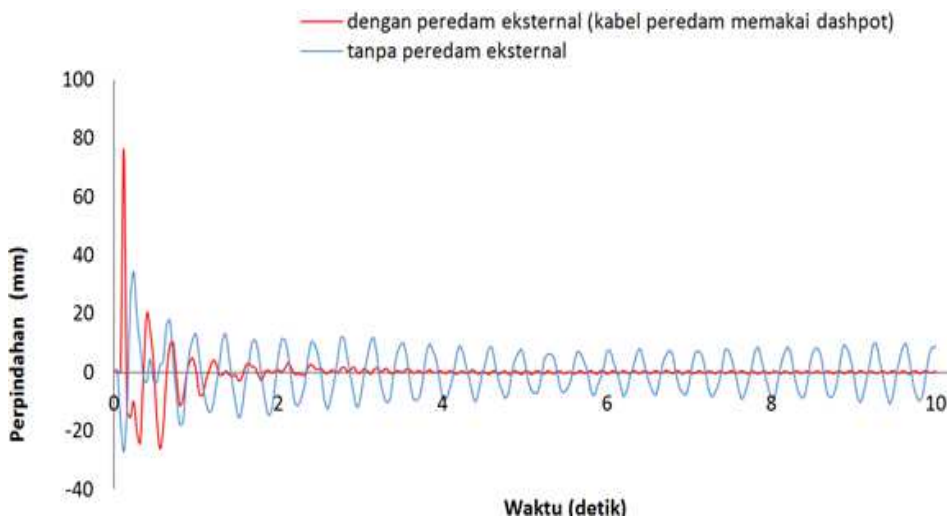
Tabel 4. Damping Ratio (ξ) dan Frekuensi (f) dua sistem struktur (studi kasus kabel peredam dashpot)

Sistem struktur tanpa kabel peredam dashpot		Sistem struktur dengan kabel peredam dashpot	
Frekuensi	Damping ratio	Frekuensi	Damping ratio
f [Hertz]	ξ [%]	f [Hertz]	ξ [%]
2,80	0,307	3,50	14,538

Dari hasil Fast Fourier Transform (FFT) diperoleh nilai frekuensi natural struktur $f = 3,50$ Hz dan damping ratio $\xi = 14,538$ %. Damping ratio struktur dengan TMD 45 kali dari damping ratio $\xi = 0,307$ % sistem struktur tanpa TMD. Terjadi kenaikan frekuensi natural antara sistem struktur sebesar 25 %. Dengan

demikian, sistem mekanikal struktur mempunyai konfigurasi yang sama untuk analisis (tidak ada kontribusi kekakuan pada sistem). Tanggap perpindahan struktur dengan peredam eksternal dievaluasi dengan cara integrasi numerik fungsi percepatan dari data rekaman sensor, integrasi dilakukan dengan cara *step by step* dengan bantuan program MATLAB. Hasilnya secara simultan dengan tanggap struktur tanpa peredam eksternal dinyatakan sebagai berikut (Gambar 29).

Dari grafik Gambar 29 terlihat bahwa topologi sistem peredam eksternal kabel peredam dashpot sangat efektif mereduksi perpindahan struktur portal. Dalam waktu relatif singkat (2 detik), amplitudo getaran gerak massa struktur portal sudah menghilang.



Gambar 29. Perpindahan translasi lantai hasil rekaman sensor, tanpa peredam dan dengan kabel

Tabel 5. *Damping Ratio* (ξ) dan Frekuensi (f) dua sistem struktur (studi komparasi dua sistem peredam eksternal)

Struktur portal uji	<i>Damping ratio</i> (ξ) (%)	Frekuensi (f) (Hz)
a. Tanpa peredam eksternal	0,307	2,80
b. Dengan TMD bahan <i>absorber spons</i>	4,143	3,94
c. Dengan kabel peredam <i>dashpot</i>	14,538	3,50

8. Kesimpulan

Dari studi eksperimental dan analitis tanggap struktur dengan dua topologi peredam eksternal akibat beban *impact*, dapat disimpulkan bahwa:

1. Dari kedua jenis peredam eksternal yang dipasang pada sistem struktur yang cukup baik dalam mereduksi tanggap struktur adalah dengan menggunakan kabel peredam dashpot. Untuk kasus struktur dengan TMD spons dan tanpa peredam eksternal terdapat perbedaan rasio redaman sebesar 3,836%. Untuk kasus struktur dengan kabel peredam dashpot dan tanpa peredam eksternal terdapat perbedaan rasio redaman sebesar 14,231%. Nilai ini cukup besar dibandingkan dengan rasio redaman sistem struktur tanpa redaman eksternal (0,307 %).
2. Dari hasil perhitungan analitik yang dibandingkan dengan hasil studi eksperimental dan hasil SAP-2000 terdapat perbedaan frekuensi natural yang cukup kecil. Untuk hasil studi eksperimental didapat frekuensi natural sebesar 2,8 Hz (perbedaan frekuensi sebesar 0,95 Hz dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik). Untuk hasil dari SAP-2000 didapat frekuensi natural sebesar 3,18 Hz (perbedaan frekuensi sebesar 0,57 Hz dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik).
3. Perbedaan hasil studi eksperimental dan hasil dari SAP-2000, kemungkinan disebabkan karena pada studi eksperimental kondisi perletakan struktur utama sangat sulit untuk mencapai jepit sempurna seperti pada anggapan pada software SAP-2000.
4. Dari perhitungan analitik dan analisis menggunakan SAP-2000 untuk mengetahui tingkat kenyamanan (R) layan struktur didapat bahwa sistem struktur telah memenuhi tingkat kenyamanan layan struktur ($R < 2$). Untuk kasus mode pertama didapat nilai R sebesar 0,75. Untuk kasus mode ke-12 didapat nilai R sebesar 1,48. Nilai ini menunjukkan sistem struktur masih memenuhi persyaratan kenyamanan layan.

Daftar Pustaka

- API RP 2A, 21st Edition (WSD), 2000, *Recommended Practice for Planning, Designing, and Construction Fixed Offshore Platform*, Washington DC: American Petroleum Institute, July 1.
- AISC, Publication. No. D811 (10M797), 2003, *Steel Design Guide Series, Floor Vibrations Due to Human Activity*, Chicago, Illinois.: American Institute of Steel Construction, AISC.
- AISC, 9th Edition, 1989, *Manual of Steel Construction, Allowable Stress Design (ASD)*, New York: American Institute of Steel Construction, AISC.
- Chopra, A.K., 2001, *Dynamics of Structures : Theory and Applications to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Resmi, B.M., 2010, *Modul 5 Kuliah Rekayasa Gempa: Respon Struktur SDOF Akibat Beban Umum*. Program Studi Teknik Sipil, FTSP. Universitas Mercu Buana, pp. 1 -4.
- Subrata, K. Chakrabarti, 2005, *Handbook of Offshore Engineering, Vol.1*, Illinois: Elsevier.
- Sean, M.H., 2007, *Control of Human Induced Floor Vibrations*, M.Eng Thesis, Massachusetts Institute of Technology (MIT), pp. 27 – 28.
- Wiss, J.F., Parmelee, R.A., 1974, Human Perception of Transient Vibrations, *Journal of The Structural Division*, Vol. 100, No. ST4, ASCE, pp. 773-787.

