



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **DINAMIKA STRUKTUR LEPAS PANTAI** Dari Infrastruktur Energi Konvensional Hingga Energi Terbarukan

**Profesor Rildova**

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB  
6 Desember 2025



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**DINAMIKA STRUKTUR LEPAS PANTAI:  
DARI INFRASTRUKTUR ENERGI  
KONVENSIONAL HINGGA ENERGI  
TERBARUKAN**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**DINAMIKA STRUKTUR LEPAS PANTAI:  
DARI INFRASTRUKTUR ENERGI  
KONVENSIONAL HINGGA ENERGI  
TERBARUKAN**

**Prof. Rildova**

6 Desember 2025  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

***Dinamika Struktur Lepas Pantai: Dari Infrastruktur Energi Konvensional Hingga Energi Terbarukan***

Penulis : Prof. Rildova

Reviewer : Prof. Ricky Lukman Tawekal

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-838-6

e-ISBN : 978-623-297-839-3(PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

*In Harmonia Progressio*



# PRAKATA

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah Swt., atas rahmat dan karunia-Nya hingga saya diamanahi sebagai Guru Besar dalam bidang Dinamika Struktur Lepas Pantai, bidang ilmu yang saya minati sejak kuliah tingkat sarjana, dan semakin ditekuni sejak bertugas di Program Studi Teknik Kelautan Institut Teknologi Bandung. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar ITB atas kesempatan, bantuan, dan dukungan yang diberikan hingga saya dapat menyampaikan materi buku ini pada Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Dalam buku ini saya memperkenalkan aplikasi bidang ilmu Dinamika Struktur pada bangunan infrastruktur lepas pantai, khususnya infrastruktur yang terkait dengan energi konvensional migas hingga infrastruktur energi terbarukan seperti turbin angin lepas pantai dan panel surya terapung. Besar harapan saya agar buku ini dapat menambah wawasan para pembaca serta membangkitkan keingintahuan lebih lanjut untuk kemudian ikut berperan dalam pengembangan bidang ilmu Dinamika Struktur Lepas Pantai selanjutnya.

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam penyusunan hingga penyelesaian buku orasi ilmiah ini.

Bandung, 6 Desember 2025

Rildova



# SINOPSIS

Setiap struktur bangunan dapat dipastikan akan dikenai setidaknya salah satu jenis pembebanan dinamis selama masa layannya. Analisis respons struktur akibat beban dinamis, terutama akibat beban gempa, telah melahirkan standar perancangan bangunan yang membantu proses perancangan bangunan agar tidak perlu lagi melakukan analisis dinamis. Namun hal seperti ini belum diperoleh untuk pembebanan gelombang pada bangunan lepas pantai. Lebih jauh lagi, apabila diinginkan pengurangan atau pengendalian terhadap respons dinamis struktur, analisis Dinamika Struktur masih tetap diperlukan.

Buku ini diawali dengan pengenalan sekilas Dinamika Struktur dengan model mekanis dan model matematisnya. Kemudian dilanjutkan dengan pembahasan respons struktur sederhana akibat beban harmonis dan beban gempa yang berujung pada kurva faktor amplifikasi dinamis, spektrum respons gempa, dan spektrum desain yang diadopsi oleh standar perencanaan terhadap beban gempa.

Selanjutnya aplikasi Dinamika Struktur difokuskan pada infrastruktur lepas pantai, di mana selain beban gempa, terdapat beban gelombang yang umumnya lebih dominan dan berlangsung terus menerus. Tiga tipe bangunan yang dibahas adalah anjungan migas lepas pantai tipe jaket, turbin angin lepas pantai, dan panel surya terapung lepas pantai. Sejumlah upaya yang telah dilakukan untuk mengurangi atau mengendalikan respons masing-masing jenis struktur tersebut disajikan beserta gambaran umum mengenai hasil-hasil yang telah diperoleh. Sebagai penutup, disampaikan tantangan yang masih dihadapi untuk pengembangan penelitian selanjutnya di masa yang akan datang.



# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	vii
SINOPSIS .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xvii
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Dinamika Struktur.....	1
1.2 Struktur Lepas Pantai .....	14
2. PENGENDALIAN RESPONS ANJUNGAN MIGAS LEPAS PANTAI .....	23
2.1 <i>Tuned Mass Damper</i> (TMD) .....	25
2.2 <i>Tuned Liquid Damper</i> (TLD) .....	31
2.3 <i>Friction Damper</i> (FD).....	32
2.4 Pengangkatan Saat Instalasi dan Pembongkaran .....	34
3. INFRASTRUKTUR ENERGI TERBARUKAN .....	39
3.1 Turbin Angin Lepas Pantai .....	39
3.2 Panel Surya Terapung .....	42
4. PENGEMBANGAN LANJUTAN DINAMIKA STRUKTUR LEPAS PANTAI.....	45
5. PENUTUP.....	49
6. UCAPAN TERIMA KASIH .....	51
DAFTAR PUSTAKA .....	53
CURRICULUM VITAE .....	57



# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 1</b>	Ilustrasi struktur SDOF dan model mekanisnya. ....	2
<b>Gambar 2</b>	Respons getaran bebas tak teredam. ....	4
<b>Gambar 3</b>	Respons getaran bebas teredam. ....	5
<b>Gambar 4</b>	Ragam getar pertama (kiri) dan kedua (kanan) dari model bangunan geser 2DOF. ....	6
<b>Gambar 5</b>	Respons struktur SDOF akibat beban harmonis, dari atas ke bawah: respons <i>transient</i> , <i>steady-state</i> , dan respons total. ....	7
<b>Gambar 6</b>	Faktor amplifikasi dinamis sebagai fungsi dari rasio frekuensi dan rasio redaman [2]. ....	8
<b>Gambar 7</b>	Respons teredam struktur SDOF dalam kondisi resonansi: (a) <i>transient</i> , (b) <i>steady-state</i> , dan (c) total. [2] .....	9
<b>Gambar 8</b>	Percepatan, kecepatan, dan perpindahan tanah saat gempa Imperial Valley El Centro, 18 Mei 1940, komponen Utara-Selatan. [2] .....	11
<b>Gambar 9</b>	(a) Percepatan tanah, (b) Respons perpindahan beberapa struktur yang berbeda, (c) Grafik spektrum respons perpindahan [4]. ....	12
<b>Gambar 10</b>	Spektrum respons tripartit gempa El Centro 1940 untuk $\zeta = 0, 0.02, 0.05, 0.10$ dan $0.20$ [4] .....	13
<b>Gambar 11</b>	Spektrum gempa desain untuk wilayah kota Bandung untuk beberapa jenis tanah .....	13
<b>Gambar 12</b>	Berbagai tipe struktur anjungan lepas pantai [6] .....	14
<b>Gambar 13</b>	Spektrum gempa desain API RP 2A. [7] .....	15
<b>Gambar 14</b>	Contoh riwayat waktu gelombang. [8]. ....	16
<b>Gambar 15</b>	Spektrum Pierson Moskowitz dan beberapa spektrum Brettschneider [8]. ....	17
<b>Gambar 16</b>	Contoh spektrum input, fungsi transfer dan spektrum respons [8]. ....	19
<b>Gambar 17</b>	Derajat kebebasan struktur terapung .....	20
<b>Gambar 18</b>	Contoh RAO sebuah kapal tongkang. ....	20
<b>Gambar 19</b>	Ilustrasi anjungan lepas pantai tipe jaket. ....	23

<b>Gambar 20</b>	Skema penambahan TMD pada struktur anjungan lepas pantai tipe jaket [12].....	26
<b>Gambar 21</b>	Pengaruh (a) rasio frekuensi, (b) massa TMD, dan (c) koefisien redaman TMD, terhadap respons maksimum anjungan lepas pantai tipe jaket [10]. ....	27
<b>Gambar 22</b>	Ilustrasi anjungan lepas pantai tipe jaket 3 kaki, 4 kaki, dan 8 kaki. [12] .....	28
<b>Gambar 23</b>	Spektrum gelombang Pierson Moskowitz untuk kecepatan angin 12.9 m/detik .....	29
<b>Gambar 24</b>	Spektrum respons tiga struktur anjungan lepas pantai dengan dan tanpa TMD, (a) anjungan <i>flare</i> 3 kaki, (b) anjungan sumur minyak 4 kaki, dan (c) anjungan proses 8 kaki [12].....	29
<b>Gambar 25</b>	Skema pemasangan TLCD pada struktur anjungan lepas pantai tipe jaket [10].....	31
<b>Gambar 25</b>	Skema FD dan pemasangannya pada struktur jaket [10] .....	33
<b>Gambar 26</b>	Skema peredam VED (kiri) dan SMA (kanan) [10].....	33
<b>Gambar 27</b>	Skema pengangkatan struktur jaket saat (a) sepenuhnya di dalam air, (b) sebagian di air dan udara, dan (c) sepenuhnya di udara [24]. ....	34
<b>Gambar 28</b>	Ilustrasi skema simulasi dinamis pengangkatan struktur jaket [24] .....	35
<b>Gambar 29</b>	Nilai faktor amplifikasi untuk berbagai periode gelombang [24].....	36
<b>Gambar 30</b>	Pengangkatan di udara dengan penambahan tali penambat beban ke kapal [24]. ....	37
<b>Gambar 31</b>	Nilai faktor amplifikasi setelah penambahan <i>rigging line</i> [24]. ....	37
<b>Gambar 32</b>	Skema dan dimensi turbin angin lepas pantai dasar berkapasitas 5 MW dari NREL [28]. ....	40
<b>Gambar 33</b>	Skema sejumlah struktur pendukung turbin angin lepas pantai [29] .....	41
<b>Gambar 34</b>	Denah skema satu modul panel surya terapung lepas pantai [32]. ....	42
<b>Gambar 35</b>	Skema (a) modul panel surya terapung, (b) sistem struktur rangka bidang pendukung, dan (c) sistem tambatnya [32].....	43

<b>Gambar 36</b>	Contoh sistem panel surya terapung kelas 1 [33]. .....	43
<b>Gambar 37</b>	Contoh sistem panel surya terapung kelas 2 [33]. .....	44
<b>Gambar 38</b>	Contoh sistem panel surya terapung kelas 3 [33]. .....	44
<b>Gambar 39</b>	Peta jalan penelitian pada Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai, FTSL, ITB.....	46



# DAFTAR TABEL

<b>Tabel 1</b>	Respons dinamis struktur dengan dan tanpa TMD [12] .....	30
<b>Tabel 2</b>	Nilai Faktor Amplifikasi Dinamis Berdasarkan DNV-ST-N001 [23]	35



# 1. PENDAHULUAN

## 1.1 Dinamika Struktur

Dinamika struktur merupakan pengembangan dari analisis struktur yang terkait dengan penentuan respons struktur saat dikenai beban dinamis, yaitu beban yang nilainya berubah terhadap waktu. Dari sudut pandang dinamika struktur, analisis struktur yang hanya mempertimbangkan beban statis dapat dianggap sebagai suatu kasus khusus dari beban dinamis. Akan tetapi beban statis dan dinamis biasanya dipisahkan untuk mengevaluasi respons struktur akibat masing-masing beban tersebut, lalu kemudian dijumlahkan untuk mendapatkan respons totalnya [1].

Berdasarkan pendefinisian beban dinamis yang bekerja pada struktur, analisis dinamika struktur dapat dibedakan menjadi analisis deterministik, jika variasi beban terhadap waktu diketahui sepenuhnya, dan analisis probabilistik jika beban dinamis bersifat acak. Untuk memahami perilaku dinamis struktur, umumnya analisis deterministik dilakukan terlebih dahulu dengan beban yang fungsinya diketahui, misalnya sinusoidal, dan respons yang dihasilkan berupa riwayat waktu perpindahan struktur. Di lain pihak, analisis probabilistik dengan beban acak hanya akan menghasilkan parameter statistik dari respons perpindahan struktur.

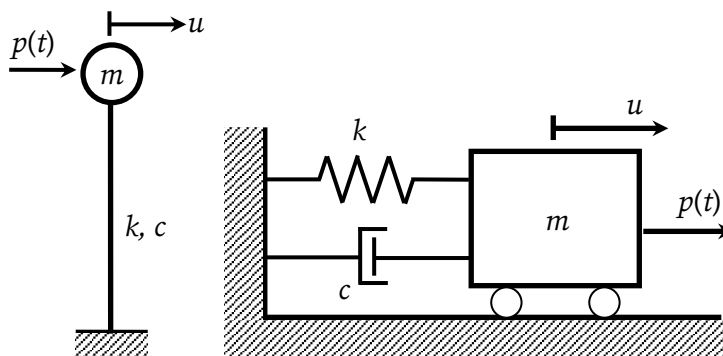
Respons struktur yang dikenai beban dinamis biasanya berupa osilasi, atau lebih umum disebut getaran atau vibrasi. Akibat beban dinamis, struktur akan bergetar di sekitar konfigurasi seimbangnya. Konfigurasi seimbang ini dapat berupa keseimbangan statis, seperti pada umumnya struktur sipil, atau di sekitar keseimbangan dinamis yang melibatkan pergerakan badan kaku (*rigid-body*), seperti halnya pada mobil atau pesawat terbang. Analisis respons dinamis struktur ini menjadi obyek utama dalam Dinamika Struktur [2].

Dalam situasi tertentu, respons dinamis struktur dapat berupa perpindahan yang besar atau tegangan yang tinggi pada elemen struktur. Hal seperti ini tentu tidak diinginkan terjadi, karena dapat mengakibatkan ketidaknyamanan, pengurangan efisiensi, aus, atau bahkan kegagalan sebagian atau seluruh sistem struktur. Oleh karena itu penting untuk menghilangkan atau setidaknya mengurangi dan mengendalikan getaran pada struktur [3]. Tentu sebelum dapat melakukan hal tersebut, karakteristik

dan perilaku dinamis dari masalah getaran yang terjadi perlu dipahami terlebih dahulu.

### 1.1.1 Model Mekanis dan Matematis

Berbeda dengan analisis statis di mana hubungan antara beban dan perpindahan hanya ditentukan oleh kekakuan struktur, pada analisis dinamis terdapat komponen gaya lain yang ikut berkontribusi terhadap respons struktur, yaitu gaya redaman yang sebanding dengan kecepatan dan gaya inersia yang sebanding dengan percepatan. Ketiga parameter struktur itu, massa  $m$ , koefisien redaman  $c$ , dan koefisien kekakuan  $k$ , bersama dengan beban dinamis  $p(t)$  yang bekerja dapat digambarkan dalam bentuk model massa terkumpul (*lumped mass*) dan model mekanis seperti diperlihatkan pada Gambar 1.



**Gambar 1** Ilustrasi struktur SDOF dan model mekanisnya.

Dari model mekanis pada Gambar 1, dapat diperoleh persamaan keseimbangan dinamis atau persamaan gerak yang berbentuk:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = p(t) \tag{1.1}$$

di mana  $u, \dot{u}$  dan  $\ddot{u}$  berturut-turut adalah perpindahan, kecepatan, dan percepatan yang dialami massa struktur. Dapat dilihat bahwa persamaan keseimbangan tidak lagi berbentuk persamaan aljabar biasa, namun merupakan persamaan diferensial biasa orde dua, yang perlu diselesaikan untuk memperoleh respons perpindahan  $u$ .

Model struktur yang digambarkan pada Gambar 1 merupakan struktur dengan satu derajat kebebasan (*Single Degree of Freedom - SDOF*), sistem struktur yang paling sederhana dalam dinamika struktur.

Untuk struktur yang lebih kompleks dengan banyak derajat kebebasan, atau MDOF (*Multiple Degree of Freedom*), persamaan gerak yang dihasilkan akan berbentuk:

$$[m]\{\ddot{u}\} + [c]\{\dot{u}\} + [k]\{u\} = \{p(t)\} \quad (1.2)$$

di mana koefisien massa, redaman, dan kekakuan akan berbentuk matriks dan persamaan gerak akan saling terkait (*coupled*) antara masing-masing derajat kebebasan.

Analisis getaran bebas, yaitu getaran yang tidak disebabkan oleh beban melainkan akibat perpindahan dan/atau kecepatan awal, struktur SDOF tanpa redaman menghasilkan respons osilasi periodik struktur:

$$u = A \cos \omega_n t + B \sin \omega_n t \quad (1.3)$$

atau dapat dituliskan dalam dua bentuk lain:

$$u = C_1 \sin(\omega_n t + \phi_1) \quad (1.4)$$

$$u = C_2 \cos(\omega_n t - \phi_2) \quad (1.5)$$

di mana  $A$  dan  $B$  merupakan konstanta yang ditentukan dari kondisi awal perpindahan dan kecepatan, dan

$$C_1 = \text{sign}(B) \sqrt{A^2 + B^2} \quad (1.6)$$

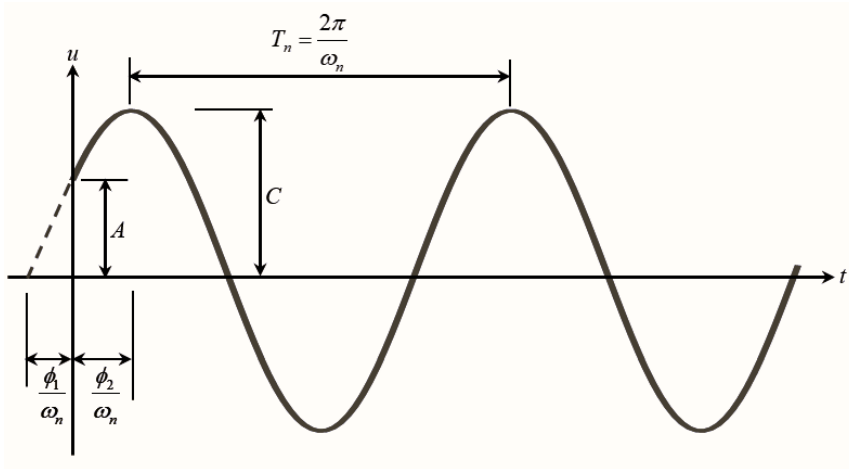
$$C_2 = \text{sign}(A) \sqrt{A^2 + B^2} \quad (1.7)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left( \frac{A}{B} \right) \quad (1.8)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left( \frac{B}{A} \right) \quad (1.9)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.10)$$

Gambar 2 memperlihatkan grafik respons getaran bebas tak teredam ini terhadap waktu. Terlihat bahwa struktur berosilasi di sekitar di sekitar posisi statisnya. Respons getaran ini akan berlangsung terus menerus karena belum memasukkan faktor redaman.



**Gambar 2** Respons getaran bebas tak teredam.

Analisis getaran bebas struktur SDOF tak teredam ini menghasilkan sebuah parameter dinamis yang khas bagi setiap struktur, yaitu frekuensi alami,  $\omega_n$ , di mana setiap struktur SDOF akan bergetar bebas dengan frekuensi alami masing-masing. Nilai frekuensi alami ini tergantung pada kekakuan dan massa dari struktur sebagaimana terlihat pada Persamaan (1.10).

Apabila getaran bebas terjadi pada struktur SDOF teredam, maka respons perpindahan yang dialami stuktur berbentuk:

$$u = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \tag{1.11}$$

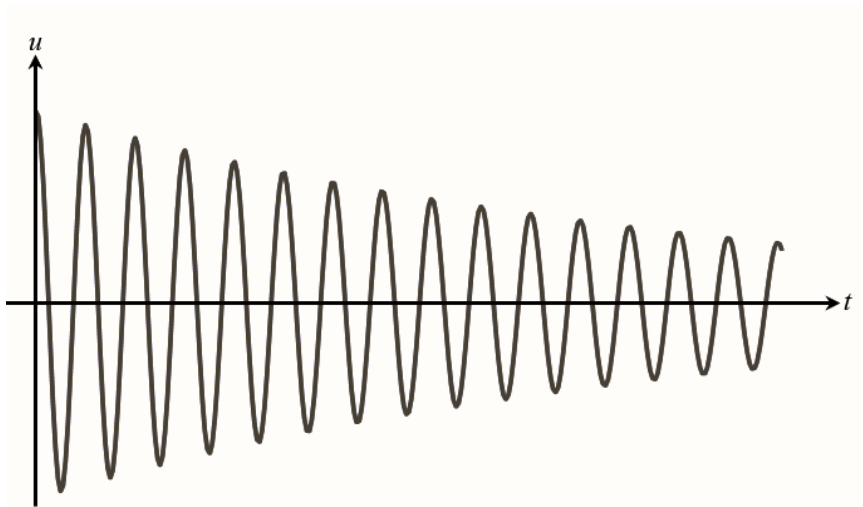
di mana  $A$  dan  $B$  adalah konstanta yang ditentukan dari kondisi awal,  $\zeta$  adalah rasio redaman kritis:

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \tag{1.12}$$

dan  $\omega_D$  adalah frekuensi alami teredam:

$$\omega_D = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \tag{1.13}$$

Contoh grafik getaran bebas teredam ini diperlihatkan pada Gambar 3.



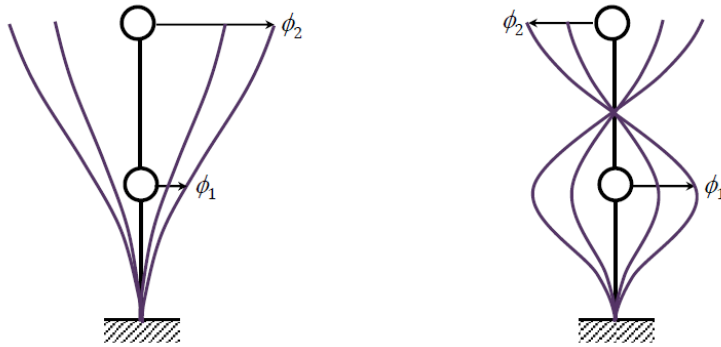
**Gambar 3** Respons getaran bebas teredam.

Dari Gambar 3 dapat dilihat bahwa amplitudo getaran bebas berkurang pada setiap siklus getaran dan akhirnya akan habis karena adanya faktor redaman struktur.

Analisis getaran bebas struktur MDOF menghasilkan problem nilai eigen berbentuk:

$$([k] - \omega_n^2 [m])\{\phi\} = \{0\} \quad (1.14)$$

di mana solusi nontrivial akan menghasilkan nilai eigen berupa kuadrat dari frekuensi alami dan vektor eigen  $\{\phi\}$  berupa ragam getar dari struktur. Dalam hal ini, getaran bebas struktur akan berupa kombinasi dari sejumlah frekuensi alami, masing-masing dengan ragam getar yang berbeda. Salah satu metode penyelesaian respons struktur MDOF adalah dengan metode analisis ragam, di mana sistem MDOF diuraikan (*decoupled*) menjadi sejumlah sistem SDOF yang mewakili masing-masing ragam getar struktur. Oleh karena itu, pemahaman perilaku sistem dinamis sederhana SDOF tetap menjadi penting meskipun struktur yang dianalisis memiliki banyak derajat kebebasan. Gambar 4 memperlihatkan contoh ragam getar model bangunan geser dengan dua derajat kebebasan.



**Gambar 4** Ragam getar pertama (kiri) dan kedua (kanan) dari model bangunan geser 2DOF.

### 1.1.2 Respons Terhadap Beban Harmonis

Beban deterministik yang umum digunakan untuk menggambarkan beban dinamis periodik adalah beban harmonis. Persamaan gerak struktur SDOF akibat beban harmonis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F \sin \Omega t \quad (1.15)$$

di mana  $F$  dan  $\Omega$  berturut-turut adalah amplitudo dan frekuensi beban harmonis.

Solusi persamaan gerak (1.15) terdiri atas komponen *transient* yang berbentuk:

$$u_t = e^{-\zeta\omega_n t} (A \cos \omega_D t + B \sin \omega_D t) \quad (1.16)$$

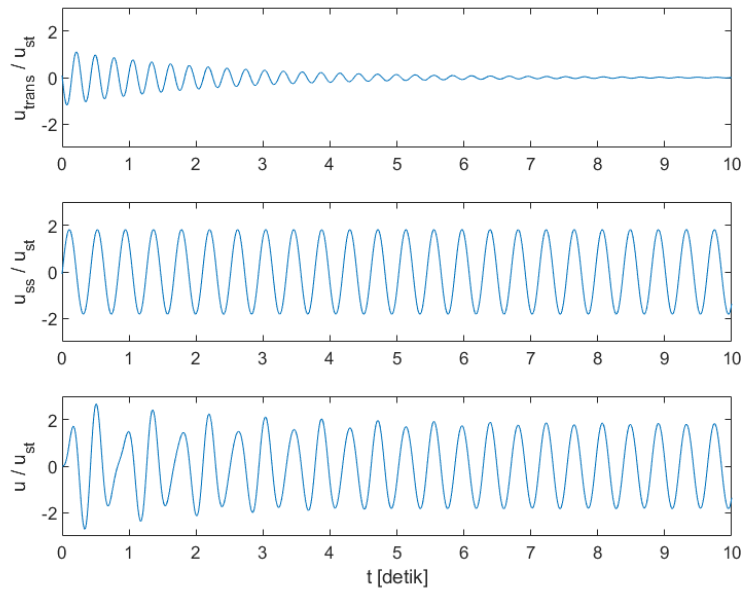
serta komponen *steady-state* yang berbentuk:

$$u_s = \frac{F}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \sin(\Omega t - \phi) \quad (1.17)$$

di mana  $\beta$  adalah rasio frekuensi beban harmonis terhadap frekuensi alami struktur:

$$\beta = \frac{\Omega}{\omega_n} \quad (1.18)$$

Gambar 5 memperlihatkan kedua komponen tersebut beserta respons total struktur.

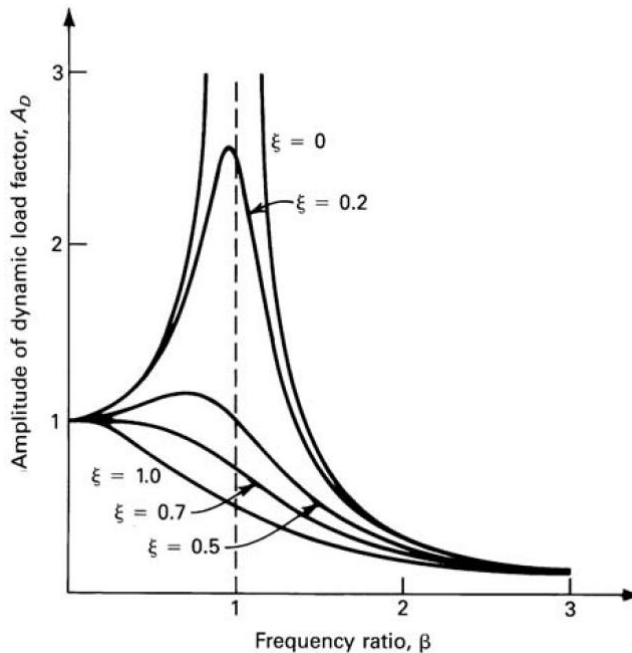


**Gambar 5** Respons struktur SDOF akibat beban harmonis, dari atas ke bawah: respons *transient*, *steady-state*, dan respons total

Respons *transient* (1.16) sama dengan respons getaran bebas teredam (1.11) dan akan berkurang hingga akhirnya hilang seiring dengan berjalannya waktu, sedangkan komponen *steady-state* (1.17) akan tetap ada selama beban harmonis masih bekerja. Faktor  $F/k$  pada Persamaan (1.17) adalah simpangan statis, atau perpindahan struktur akibat beban statis sebesar  $F$ . Faktor ketiga yang berupa sinus hanya mengalikan nilai perpindahan dengan faktor yang memiliki nilai antara  $-1$  dan  $1$ . Oleh karena itu, nilai maksimum perpindahan adalah besarnya perpindahan statis dikalikan dengan faktor amplifikasi dinamis:

$$D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2}} \quad (1.19)$$

Gambar 6 memperlihatkan grafik nilai faktor amplifikasi dinamis ini sebagai fungsi dari rasio frekuensi untuk berbagai nilai rasio redaman.

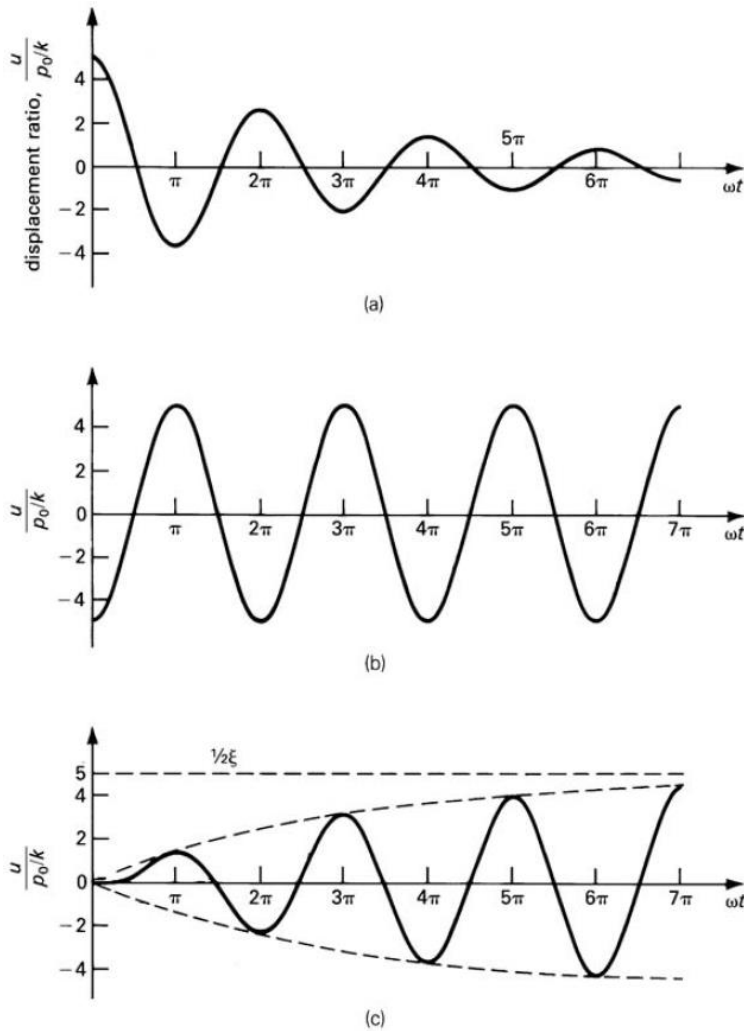


**Gambar 6** Faktor amplifikasi dinamis sebagai fungsi dari rasio frekuensi dan rasio redaman [2]

Struktur-struktur yang terpancang ke tanah umumnya berada di sisi kiri pada grafik faktor amplifikasi dinamis karena frekuensi alami struktur biasanya lebih besar daripada frekuensi beban sehingga rasio frekuensi bernilai kurang dari satu. Untuk struktur seperti ini, peningkatan kekakuan struktur akan mengurangi respons struktur terhadap beban dinamis. Sisi kanan pada grafik faktor amplifikasi dinamis mewakili struktur dengan frekuensi alami lebih rendah daripada frekuensi beban. Dalam hal ini massa struktur relatif lebih besar daripada kekakuannya sehingga frekuensi alami struktur relatif kecil. Struktur seperti ini biasanya adalah struktur terapan, di mana faktor amplifikasi dinamis relatif kecil sedangkan perpindahan struktur didominasi oleh perpindahan statis.

Daerah bagian tengah, pada kondisi frekuensi alami struktur hampir sama dengan frekuensi beban, faktor amplifikasi dinamis akan bernilai tinggi. Kondisi ini disebut resonansi. Kondisi ini sebaiknya dihindari, namun jika struktur terpaksa harus berada di bagian ini, satu-satunya cara untuk mengurangi respons perpindahan adalah dengan meningkatkan redaman apabila memungkinkan.

Gambar 7 memperlihatkan contoh respons struktur teredam yang mengalami resonansi.



**Gambar 7** Respons teredam struktur SDOF dalam kondisi resonansi: (a) *transient*, (b) *steady-state*, dan (c) total. [2]

Pada Gambar 7 terlihat bahwa nilai maksimum perpindahan *steady-state* adalah sebesar  $\frac{1}{2\xi}$  sehingga pengurangan perpindahan hanya dapat diperoleh dengan meningkatkan redaman.

Faktor amplifikasi dinamis di atas telah mewakili analisis dinamika struktur untuk struktur SDOF yang dikenai beban harmonis, sehingga analisis

struktur cukup dilakukan secara statis dan respons statis yang diperoleh dikalikan dengan faktor tersebut. Hal yang sama juga masih dapat digunakan pada struktur yang lebih besar yang perilakunya diprediksi mirip dengan struktur SDOF.

### 1.1.3 Respons Terhadap Beban Gempa

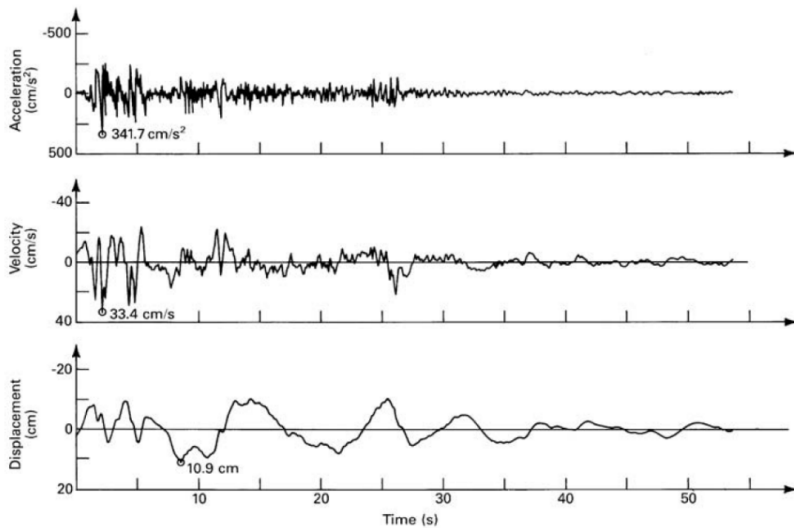
Beban dinamis lain yang umumnya diterima struktur selama masa layannya adalah beban gempa, khususnya di wilayah yang rawan gempa seperti halnya Indonesia. Saat gempa terjadi, tanah dasar bangunan mengalami percepatan, sehingga persamaan gerak struktur berbentuk:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g \quad (1.20)$$

di mana  $\ddot{u}_g$  adalah percepatan tanah akibat gempa. Memperhatikan Persamaan (1.1) dan (1.20), dapat disimpulkan bahwa beban gempa pada struktur SDOF ekuivalen dengan gaya yang diterima oleh massa struktur sebesar massa dikalikan dengan percepatan tanah.

Gambar 8 memperlihatkan contoh catatan percepatan tanah akibat gempa, dalam hal ini gempa Imperial Valley yang dicatat di El Centro, California, USA pada tahun 1940. Percepatan gempa El Centro ini cukup populer digunakan sebagai contoh beban gempa pada buku-buku Dinamika Struktur.

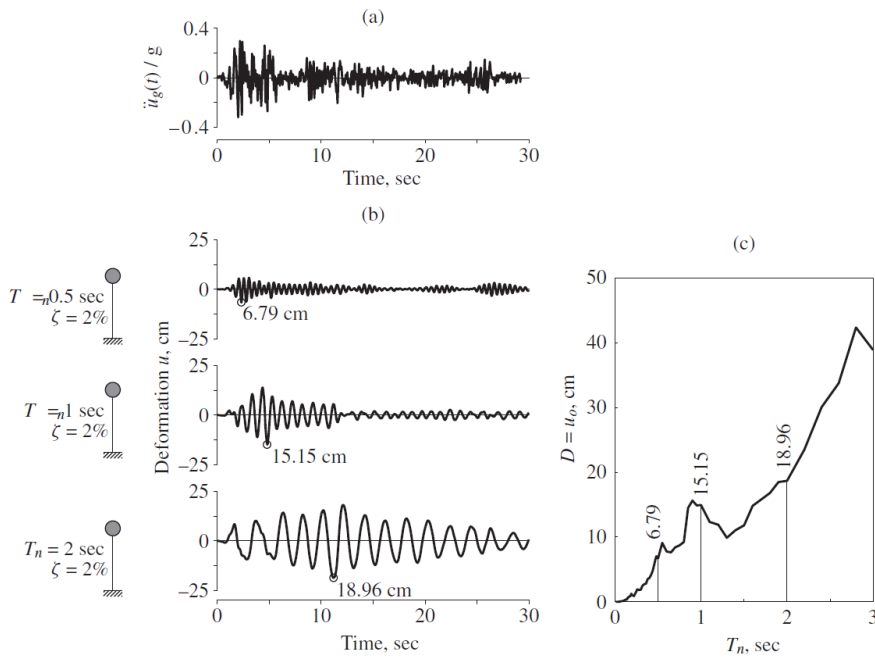
Dapat dilihat bahwa catatan percepatan gempa bersifat acak, tidak dapat diwakili oleh fungsi tertutup. Oleh karena itu, solusi persamaan gerak (1.20) hanya dapat diperoleh melalui penyelesaian numerik. Saat ini algoritma penyelesaian persamaan gerak secara numerik sudah cukup banyak yang tersedia dan bukan menjadi masalah dalam mendapatkan respons struktur terhadap gempa.



**Gambar 8** Percepatan, kecepatan, dan perpindahan tanah saat gempa Imperial Valley El Centro, 18 Mei 1940, komponen Utara-Selatan. [2]

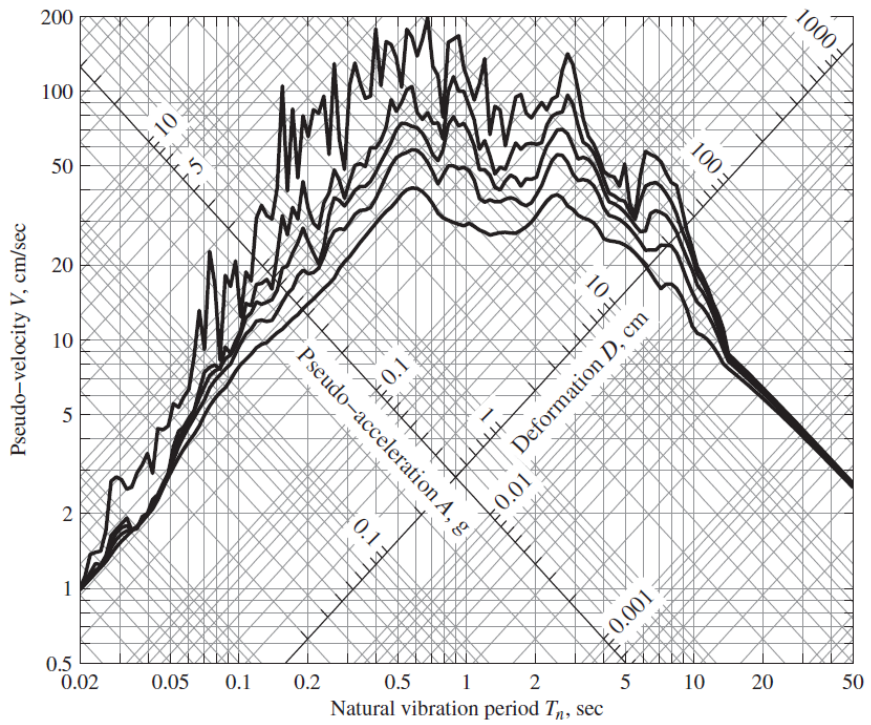
Konsep spektrum respons sering digunakan dalam menganalisis struktur yang dikenai beban gempa. Dalam hal ini grafik spektrum respons dapat dibuat untuk setiap percepatan gempa yang dikenakan kepada struktur. Spektrum respons menggambarkan nilai maksimum respons perpindahan, kecepatan, dan/atau percepatan untuk berbagai struktur SDOF dengan frekuensi alami atau periode alami yang berbeda-beda. Gambar 9 memperlihatkan skema pembuatan spektrum respons perpindahan untuk gempa El Centro 1940.

Gambar 10 memperlihatkan grafik spektrum respons gempa El Centro untuk beberapa nilai rasio redaman, di mana dalam satu grafik ketiga respons perpindahan, kecepatan, dan percepatan dapat dibaca sekaligus. Respons kecepatan dan percepatan pada grafik tripartit ini tidak sepenuhnya eksak, namun sedikit disesuaikan menjadi kecepatan dan percepatan semu (*pseudo-velocity* dan *pseudo-acceleration*), namun masih cukup akurat untuk struktur dengan rasio redaman kecil sebagaimana halnya bangunan sipil pada umumnya.

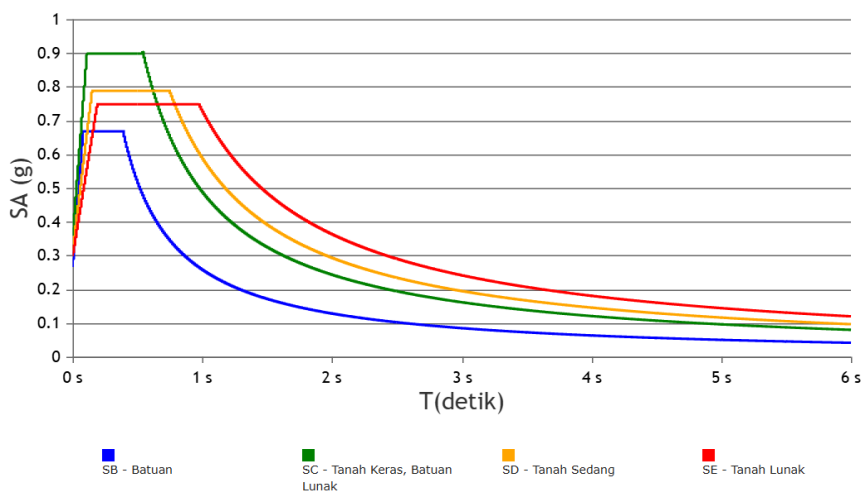


**Gambar 9** (a) Percepatan tanah, (b) Respons perpindahan beberapa struktur yang berbeda, (c) Grafik spektrum respons perpindahan [4]

Untuk keperluan perancangan struktur terhadap beban gempa, sejumlah spektrum respons yang mewakili kegempaan di suatu lokasi tertentu dapat digabungkan atau dirata-ratakan untuk memperoleh spektrum desain. Spektrum desain ini selanjutnya dijadikan sebagai beban gempa representatif dalam perancangan struktur melalui analisis ekuivalen statis, karena analisis Dinamika Struktur telah dilakukan dalam penyusunan spektrum respons tersebut. Standar perancangan bangunan terhadap beban gempa, misalnya SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non-Gedung [5], menyediakan cara membuat spektrum desain untuk setiap lokasi dan jenis tanah di Indonesia. Gambar 11 memperlihatkan contoh spektrum gempa desain untuk wilayah kota Bandung untuk berbagai jenis tanah.



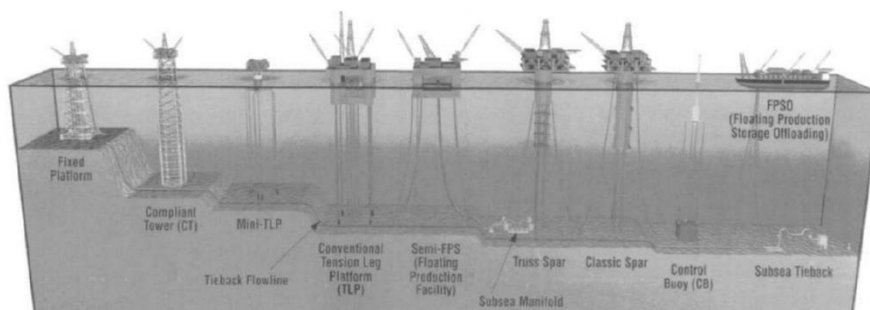
**Gambar 10** Spektrum respons tripartit gempa El Centro 1940 untuk  $\zeta = 0, 0.02, 0.05, 0.10$  dan  $0.20$  [4]



**Gambar 11** Spektrum gempa desain untuk wilayah kota Bandung untuk beberapa jenis tanah

## 1.2 Struktur Lepas Pantai

Struktur anjungan lepas pantai secara umum dapat dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan kekakuan struktur dan tumpuannya ke dasar laut, yaitu anjungan tipe tetap (*fixed platform*) yang terpancang ke dasar laut, anjungan *compliant* yang lebih fleksibel, dan anjungan terapung. Anjungan tipe tetap terdiri atas struktur jaket, struktur beton berbasis gravitasi, dan struktur *jack-up*. Anjungan *compliant* terdiri atas *guyed tower*, *articulated tower*, dan *tension leg platform* (TLP). Sedangkan anjungan terapung dapat berupa unit produksi terapung (FPU – *floating production unit*), sistem penyimpanan dan pembongkaran terapung (FSO – *floating storage and offloading*), atau sistem produksi, penyimpanan, dan pembongkaran terapung (FPSO – *floating production, storage and offloading*). Ilustrasi beberapa tipe anjungan lepas pantai beserta kedalaman laut relatif masing-masing diperlihatkan pada Gambar 12.



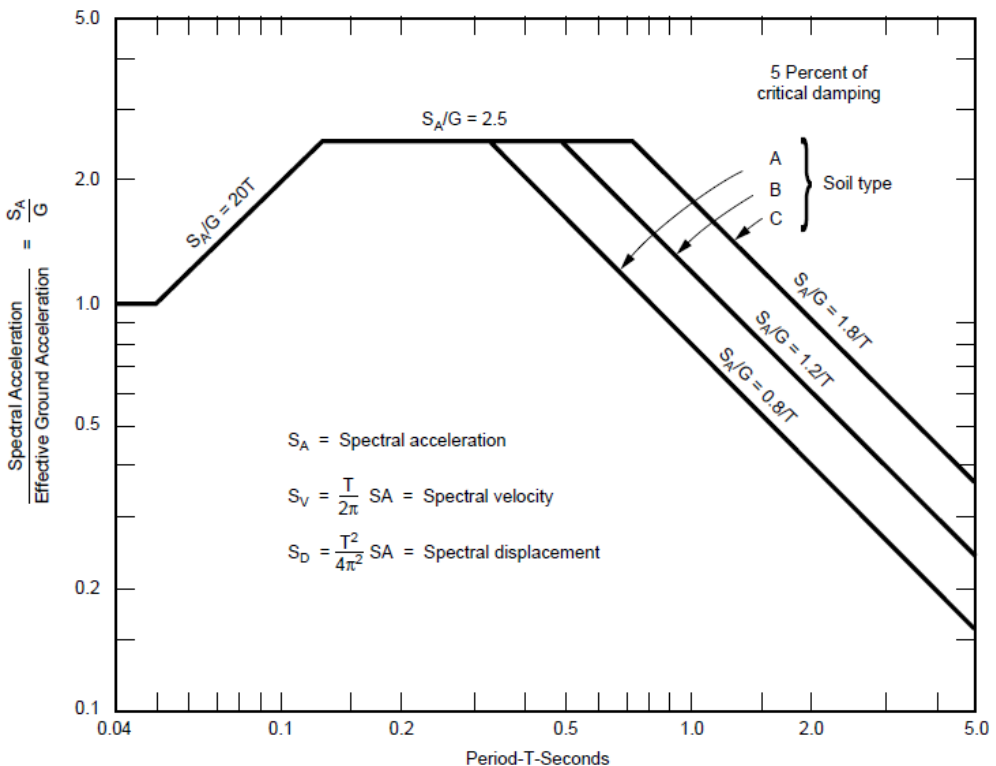
**Gambar 12** Berbagai tipe struktur anjungan lepas pantai [6]

Berbeda dengan struktur di darat, di mana beban dinamis dari lingkungan hanya berlangsung sesekali, struktur lepas pantai dikenai beban dinamis dari lingkungan yang dapat bekerja terus menerus seperti beban angin, arus, dan gelombang. Beban siklis terus menerus ini dapat mengakibatkan kegagalan *fatigue* pada sambungan elemen struktur tubular anjungan lepas pantai. Oleh karena itu diperlukan perencanaan umur layan sehingga akumulasi kerusakan yang mengakibatkan *fatigue* tidak terjadi selama umur layan bangunan.

### 1.2.1 Beban Gempa

Dalam hal perancangan terhadap beban gempa, standar API RP 2A [7] telah mengadopsi prinsip perancangan yang sama untuk anjungan lepas pantai dengan struktur di darat. Terdapat dua tingkatan gempa desain yang digunakan dalam perancangan anjungan lepas pantai, yaitu gempa moderat yang dapat terjadi selama umur layan bangunan dan gempa ekstrim yang kemungkinannya jarang terjadi. Struktur harus mampu menahan beban gempa moderat tanpa mengalami kerusakan, dan diizinkan mengalami kerusakan tetapi tidak boleh mengalami kegagalan atau keruntuhan akibat gempa ekstrim.

API RP 2A juga menyediakan spektrum gempa desain untuk perancangan anjungan lepas pantai terhadap beban gempa. Gambar 13 memperlihatkan spektrum gempa desain ini.



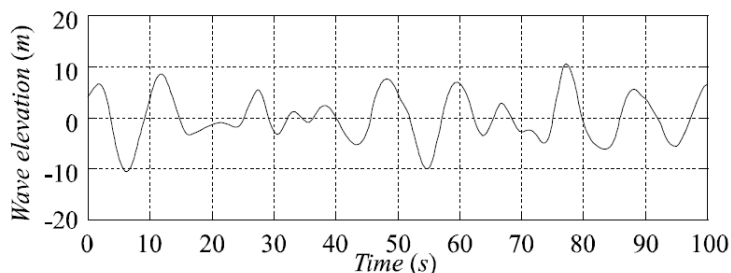
Gambar 13 Spektrum gempa desain API RP 2A. [7]

Untuk wilayah dengan aktivitas seismik rendah, dengan percepatan gempa horizontal kurang dari 0.05g, API RP 2A tidak mensyaratkan perlunya analisis struktur terhadap beban gempa karena perancangan struktur anjungan akan ditentukan oleh beban lingkungan.

Besarnya beban gelombang yang digunakan untuk merancang anjungan lepas pantai ditentukan oleh tinggi gelombang desain dan periodenya. Terdapat sejumlah formulasi perhitungan beban gelombang pada struktur yang umum digunakan, tergantung pada kedalaman perairan, tinggi gelombang, dan ukuran relatif elemen struktur. Dengan menggunakan beban desain tersebut dalam analisis statis struktur, elemen struktur dapat dirancang agar cukup kuat dan kaku. Namun untuk mendapatkan respons dinamis struktur, diperlukan parameter gelombang yang lain.

### 1.2.2 Beban Gelombang

Gelombang terjadi karena gangguan pada permukaan air laut, biasanya akibat angin, yang dibangkitkan pada area yang cukup jauh dari lokasi struktur. Seperti halnya beban gempa, beban gelombang bersifat acak dan nilainya bervariasi terhadap waktu. Beban gelombang pada struktur terjadi karena adanya kecepatan dan percepatan partikel saat gelombang terjadi yang berinteraksi dengan struktur. Gambar 14 memperlihatkan contoh riwayat waktu gelombang atau elevasi muka air di suatu lokasi tertentu.



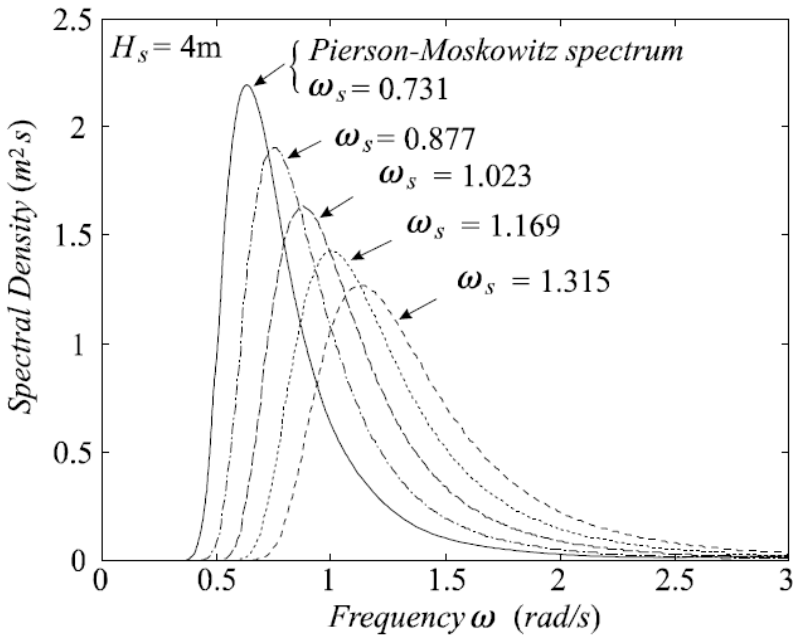
Gambar 14 Contoh riwayat waktu gelombang. [8]

Berbeda dengan catatan riwayat waktu percepatan gempa yang umumnya tersedia setelah gempa terjadi, riwayat waktu gelombang tidak selalu tersedia dan tidak umum digunakan dalam analisis dinamis. Gelombang biasanya direpresentasikan oleh spektrum gelombang, yang menggambarkan distribusi energi gelombang pada rentang frekuensi atau periode tertentu.

Sejumlah spektrum gelombang teoretis telah dikembangkan untuk menggambarkan kondisi gelombang di perairan tertentu. Beberapa spektrum yang cukup populer antara lain spektrum Pierson-Moskowitz yang umumnya diterapkan untuk gelombang di laut dalam dan terbangkitkan oleh angin lokal yang sudah *fully developed* (memiliki daerah bangkitan yang cukup luas), dan spektrum Bretschneider yang menggunakan dua parameter untuk mengakomodir laut dengan kondisi *nonfully developed*. Spektrum Pierson-Moskowitz berbentuk [8]:

$$S_{\eta\eta}(\omega) = \frac{8.1 \times 10^{-3} g}{\omega^5} \exp\left(-0.74 \left(\frac{g}{\omega u'}\right)^4\right) \quad (1.21)$$

di mana  $g$  adalah percepatan gravitasi dan  $u'$  adalah kecepatan angin pada ketinggian 19.5 m di atas permukaan laut. Contoh spektrum Pierson-Moskowitz dan beberapa spektrum Bretschneider untuk sejumlah frekuensi signifikan  $\omega_s$  yang berbeda.



**Gambar 15** Spektrum Pierson Moskowitz dan beberapa spektrum Brettschneider [8].

Untuk menggunakan spektrum gelombang pada analisis Dinamika Struktur, persamaan gerak (1.1) harus diubah atau ditransformasikan terlebih dahulu ke dalam domain frekuensi:

$$(-m\omega^2 + ic\omega + k)U(\omega) = F(\omega) \quad (1.22)$$

atau

$$U(\omega) = H_{UF}(\omega)F(\omega) \quad (1.23)$$

di mana

$$H_{UF}(\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + ic\omega} \quad (1.24)$$

$H_{UF}(\omega)$  adalah fungsi transfer yang mengubah beban menjadi repons perpindahan dalam domain frekuensi.

Hubungan antara spektrum gelombang yang mengenai struktur lepas pantai dengan spektrum respons perpindahan struktur dapat diperoleh dari:

$$S_{UU}(\omega) = |H_{U\eta}(\omega)|^2 S_{\eta\eta}(\omega) \quad (1.25)$$

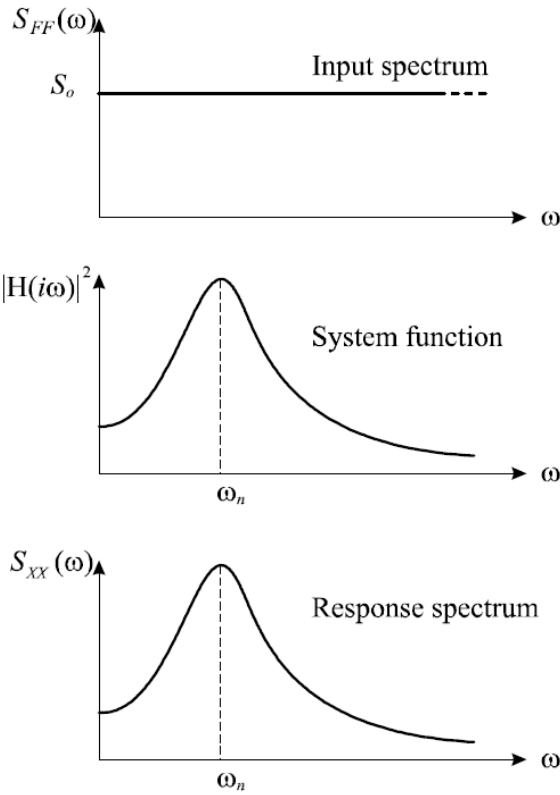
di mana

$$H_{U\eta}(\omega) = H_{UF}(\omega)H_{F\eta}(\omega) \quad (1.26)$$

merupakan fungsi transfer dari gelombang ke respons perpindahan struktur. Gambar 16 memperlihatkan ilustrasi spektrum input atau spektrum gaya, dalam hal ini spektrum *white noise*, fungsi transfer, serta hasil perkaliannya, yaitu spektrum respons.

Untuk proses dengan rata-rata nol, seperti halnya gelombang atau elevasi muka air laut, perhitungan di atas akan menghasilkan respons perpindahan yang juga memiliki rata-rata nol. Skala respons yang dihasilkan dapat dilihat dari nilai varians respons perpindahan:

$$\sigma_U^2 = \int_{-\infty}^{\infty} S_{UU}(\omega) d\omega \quad (1.27)$$

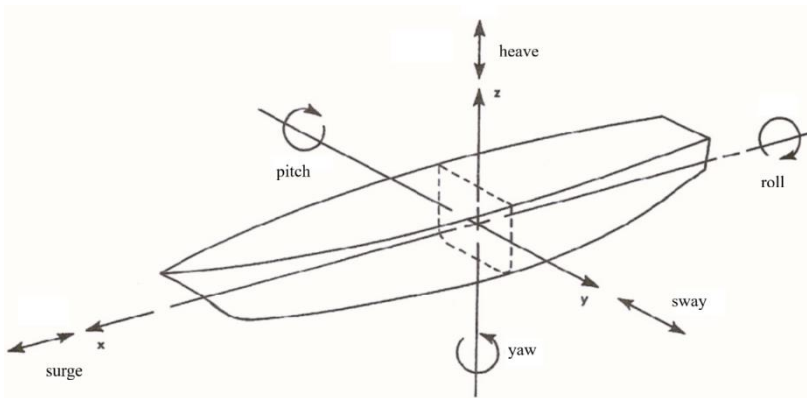


**Gambar 16** Contoh spektrum input, fungsi transfer dan spektrum respons [8].

Nilai probabilitas terlewatinya suatu nilai perpindahan tertentu kemudian dapat ditentukan dari nilai varians di atas.

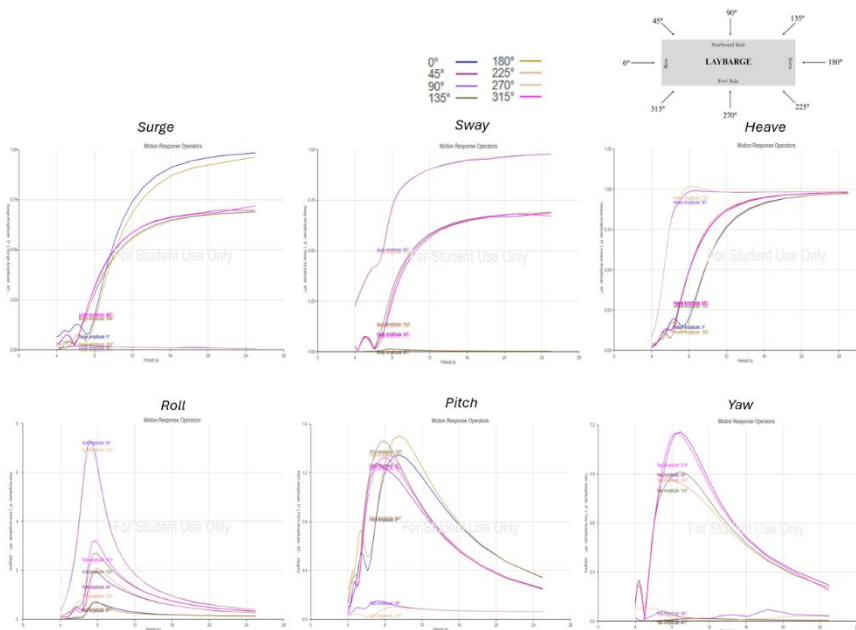
Struktur terapung memiliki perilaku yang berbeda saat menerima beban gelombang. Struktur tidak memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan beban gelombang, sehingga struktur akan mengikuti beban gelombang dan mengalami *rigid-body motion*. Oleh karena itu struktur terapung dirancang agar tetap stabil saat terkena gelombang dan sistem tambatnya cukup untuk menjaga posisi (*station-keeping*) struktur agar tidak berpindah terlalu jauh.

Sebuah struktur terapung sederhana memiliki enam derajat kebebasan, yaitu tiga translasi dan tiga rotasi, masing-masing satu translasi dan satu rotasi pada setiap sumbu. Gambar 17 memperlihatkan ilustrasi keenam derajat kebebasan struktur terapung.



**Gambar 17** Derajat kebebasan struktur terapung

Spektrum respons dinamis struktur terapung akibat gelombang dapat diperoleh dari perkalian spektrum gelombang dengan fungsi transfer. Untuk kapal dan struktur terapung lain, fungsi transfer ini lebih dikenal dengan istilah RAO (*response amplitude operator*). RAO didefinisikan sebagai amplitudo respons per satuan amplitudo gelombang. Gambar 18 memperlihatkan RAO suatu kapal tongkang terhadap gaya gelombang dari berbagai arah.



**Gambar 18** Contoh RAO sebuah kapal tongkang.

### 1.2.3 Perancangan Pra- dan Pascalayan

Proses perancangan struktur lepas pantai tidak hanya dilakukan untuk kondisi struktur yang sudah berdiri dan beroperasi di lokasinya di lepas pantai. Terdapat sejumlah kondisi struktur sebelum masa layan yang juga perlu dirancang dengan baik, dan beberapa di antaranya melibatkan beban dinamis dan analisis Dinamika Struktur. Tahapan proses yang harus dilalui struktur sebelum masa layannya adalah sebagai berikut:

- a. Fabrikasi,
- b. Pengangkatan atau peluncuran ke tongkang (*load out*),
- c. Transportasi,
- d. Pengangkatan atau peluncuran di lokasi (*launching*),
- e. Pengapungan (*floatation*)
- f. Peletakan pada lokasi (*upending*),
- g. Pemancangan, dan
- h. Instalasi.

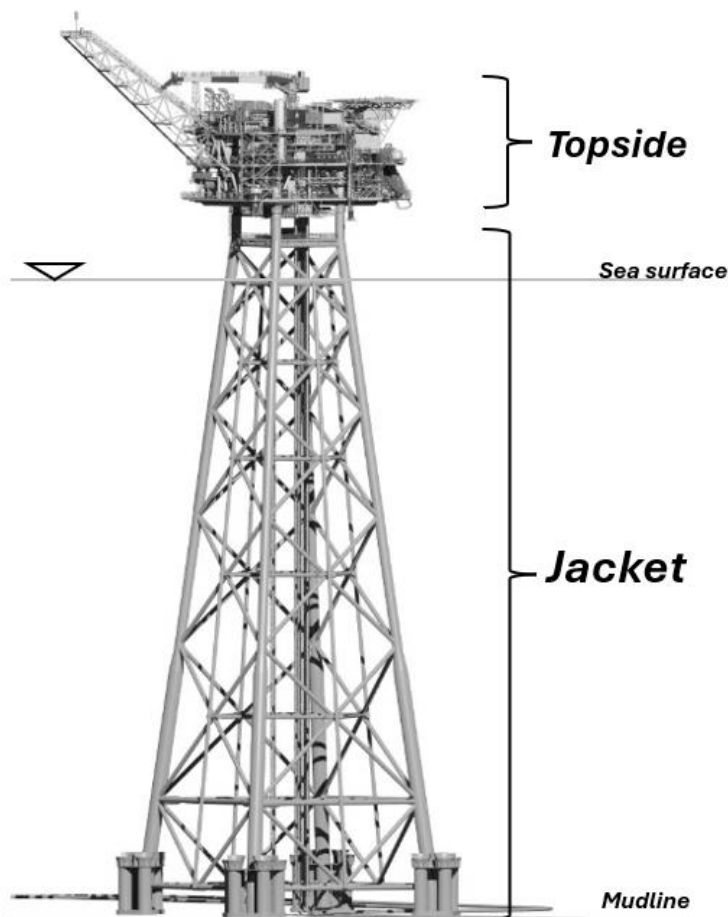
Di samping itu, untuk struktur yang akan mengakhiri masa layannya perlu pula dirancang proses pembongkarannya (*decommissioning*).

Fabrikasi dilaksanakan di darat pada lapangan fabrikasi yang relatif terlindung dari pengaruh lingkungan. Beban dinamis cukup dominan saat pengangkatan, baik di awal masa layan maupun di akhirnya, transportasi dari lokasi fabrikasi ke lokasi operasi, serta saat peluncuran dan instalasi di lokasi. Oleh karena itu, analisis dinamis berkontribusi secara signifikan pada setiap tahapan tersebut agar struktur dapat dirancang dengan baik dan memenuhi kriteria kekuatan, kekakuan dan kestabilan yang diinginkan.



## 2. PENGENDALIAN RESPONS ANJUNGAN MIGAS LEPAS PANTAI

Anjungan migas lepas pantai yang paling umum digunakan di Indonesia adalah anjungan tipe jaket. Struktur anjungan ini dibangun dari baja tubular, dapat ditopang tiga kaki, empat kaki, atau lebih, yang dipancangkan ke dasar laut. Struktur jenis ini dinilai ekonomis untuk beroperasi pada perairan dengan kedalaman yang relatif dangkal hingga 400 m [9]. Gambar 19 memperlihatkan ilustrasi struktur anjungan lepas pantai tipe jaket.



Gambar 19 Ilustrasi anjungan lepas pantai tipe jaket.

Struktur jaket terdiri atas struktur bawah yang disebut jaket, yang terdiri atas rangka elemen-elemen tubular untuk mendukung struktur atas (*topside*).

Kaki-kaki jaket sekaligus menjadi selongsong, atau jaket, bagi tiang pancang yang dipancang ke tanah di dasar laut. Struktur atas dapat terdiri atas satu atau beberapa lantai sesuai dengan fungsi anjungan. Umumnya terdapat lantai utama (*main deck*), di mana fungsi utama anjungan berlangsung, serta lantai bawah (*cellar* dan *subcellar deck*) sebagai tempat peralatan-peralatan pendukung. Kadang-kadang anjungan dilengkapi pula dengan landasan helikopter (*helideck*).

Karena terdiri atas elemen-elemen struktur yang relatif langsing, beban hidrodinamis pada anjungan tipe jaket ini didominasi oleh gaya *drag* dari gelombang. Beban gelombang yang bersifat dinamis ini dapat mengakibatkan getaran pada elemen struktur. Di samping itu, beban lingkungan yang bersifat siklis secara terus menerus dapat pula menyebabkan kegagalan fatigue pada struktur.

Pada struktur lepas pantai yang dirancang dengan baik, kemungkinan terjadinya kegagalan struktural yang berakibat fatal sebenarnya cukup kecil. Namun akibat beban lingkungan yang bekerja terus menerus ini, struktur lepas pantai dapat mengalami getaran struktural yang selanjutnya dapat menyebabkan hal-hal yang tidak diinginkan, seperti ketidaknyamanan para pekerja yang akhirnya dapat mengurangi produktivitas, atau aus pada bearing, longgarnya sambungan baut, dan masalah sejenis yang dapat meningkatkan biaya pemeliharaan struktur. Apabila kerusakan terjadi pada jalur pipa atau tangki penyimpanan, pengaruh terhadap lingkungan akan jauh lebih besar daripada pengaruh terhadap struktur [10]. Oleh karena itu, sangatlah penting dilakukan upaya untuk mengurangi respons dinamis struktur ini, karena pengurangan respons getaran struktur sebesar 15% saja sudah dapat meningkatkan umur layan struktur hingga hampir dua kalinya. [11].

Upaya pengendalian respons dinamis struktur secara umum dapat dibagi menjadi metode pengendalian pasif, semi aktif, atau aktif. Metode pengendalian pasif mengandalkan sepenuhnya pada karakteristik elemen pengendali dalam mendisipasi energi atau mengubah perilaku dinamis struktur tanpa memerlukan tenaga eksternal. Sistem pengendalian semi aktif memanfaatkan gerakan struktur untuk memberikan gaya kendali yang mengubah respons dinamis struktur dengan menggunakan sedikit daya eksternal. Sistem pengendali aktif melibatkan sepenuhnya sensor dan

aktuator yang memerlukan tenaga eksternal untuk menghasilkan kondisi dinamis yang diinginkan.

Metode pengendalian respons yang diusulkan untuk struktur lepas pantai mengikuti penelitian-penelitian sejenis untuk struktur di darat yang telah berjalan sebelumnya. Namun kondisi lingkungan yang berbeda secara signifikan menyulitkan penggunaan kendali aktif dan semi aktif pada struktur lepas pantai. Kondisi lingkungan yang lebih keras dapat mengganggu fungsi sensor dan perangkat elektronik lainnya, di samping perlunya daya eksternal yang belum tertentu tersedia di lokasi struktur lepas pantai yang jauh dari daratan. Metode pengendalian pasif jauh lebih sederhana dari sisi peralatan dan biaya implementasi. Oleh karena itu, penelitian pengendalian pasif getaran struktur lepas pantai lebih berkembang daripada pengendalian aktif dan semi aktif.

Pengendalian pasif melibatkan penambahan komponen pengendali pada struktur yang mengubah perilaku dinamis struktur menjadi lebih baik, atau komponen yang menghabiskan sebagian besar energi yang merusak dari beban lingkungan sehingga tidak mengganggu elemen struktur lainnya. Beberapa teknik atau komponen pengendali tersebut adalah *tuned mass damper* (TMD), *tuned liquid damper* (TLD), *friction damper* (FD), *fluid viscous damper* (FVD), *viscoelastic damper* (VED), *metallic damper* (MD), dan peredam dengan *inerters*.

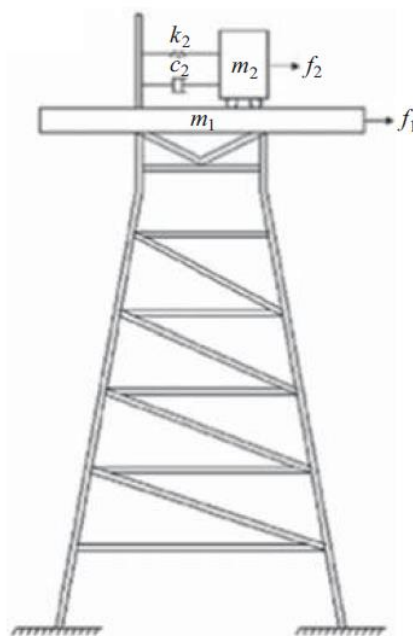
## **2.1 Tuned Mass Damper (TMD)**

TMD berbentuk sebuah massa tambahan yang dipasang pada struktur bersama dengan elemen pegas dan peredam dengan nilai kekakuan dan redaman tertentu. Nilai parameter massa, kekakuan pegas, dan redaman dari TMD ini ditentukan (*tuned*) sedemikian rupa sehingga respons dinamis struktur menjadi lebih baik setelah digabungkan dengan TMD.

Penggunaan TMD sudah cukup populer pada bangunan tinggi di darat untuk mereduksi respons struktur akibat beban gempa atau beban angin. Pada bangunan tinggi tersebut, TMD dapat ditempatkan di lantai yang mengalami perpindahan dinamis paling besar, atau di sekitar lantai tersebut yang memungkinkan penempatan TMD. Pada anjungan lepas pantai, TMD harus ditempatkan pada struktur atas (*topside*), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 20.

Pada prinsipnya TMD yang dipasang pada bangunan akan melawan getaran struktur dengan cara bergetar sendiri dengan fasa yang berbeda dari getaran struktur. Dengan kata lain, sebagian besar getaran akibat beban dinamis diambil oleh TMD sehingga getaran pada struktur menjadi lebih kecil daripada saat TMD belum dipasang. Agar kinerja TMD efektif, frekuensi alami TMD dibuat sama atau mendekati frekuensi alami struktur.

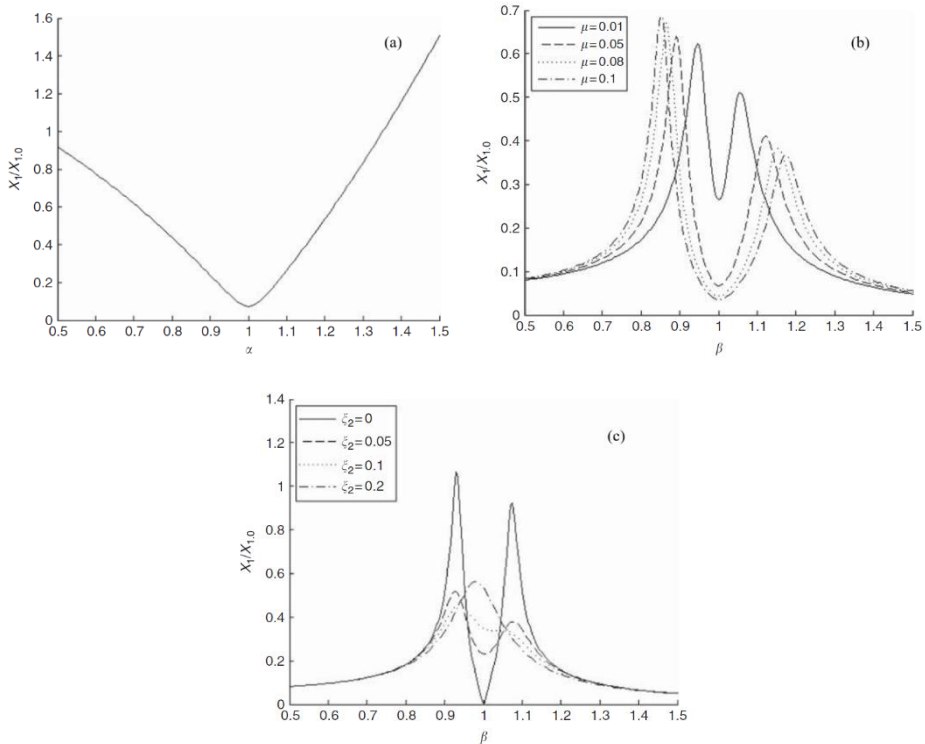
Zahra, dkk. [12] menyajikan proses pemilihan karakteristik TMD yang cocok untuk anjungan lepas pantai tipe jaket dan kemudian menggunakan hasilnya pada tiga anjungan yang berbeda yang dikenai beban gelombang acak pada perairan sedalam 111 m.



**Gambar 20** Skema penambahan TMD pada struktur anjungan lepas pantai tipe jaket [12]

Frekuensi alami TMD yang sama dengan frekuensi alami struktur menghasilkan pengurangan respons yang paling besar seperti diperlihatkan pada Gambar 21(a). Pemilihan massa TMD lebih ditentukan oleh kapasitas struktur untuk menerima massa tambahan. Gambar 21(b) menunjukkan bahwa TMD dengan massa yang lebih besar menghasilkan reduksi respons yang lebih besar pula. Namun efisiensi TMD dalam mereduksi respons struktur berkurang dengan meningkatnya massa TMD. Dengan kata lain, pengaruh penambahan massa yang lebih besar lagi hanya sedikit mengurangi

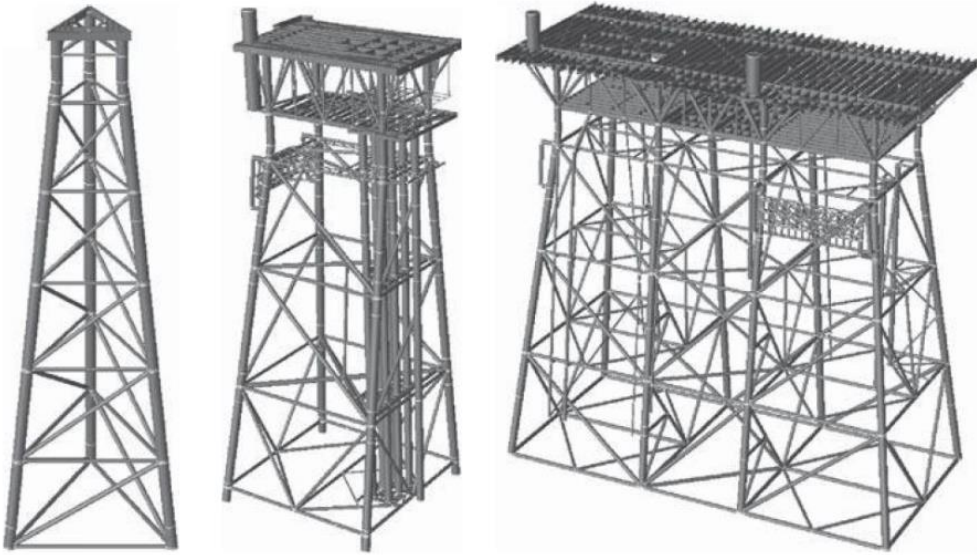
respons struktur. Lebih jauh lagi, penempatan massa yang besar akan menjadi tantangan tersendiri pada anjungan lepas pantai yang umumnya sudah dipenuhi dengan peralatan di penting di setiap lantainya dan hanya sedikit ruang kosong yang tersedia. Oleh karena itu disimpulkan pemilihan massa TMD harus disesuaikan dengan ketersediaan tempat dan umumnya dengan rasio massa sekitar 10% reduksi respons struktur yang dihasilkan sudah cukup signifikan.



**Gambar 21** Pengaruh (a) rasio frekuensi, (b) massa TMD, dan (c) koefisien redaman TMD, terhadap respons maksimum anjungan lepas pantai tipe jaket [10].

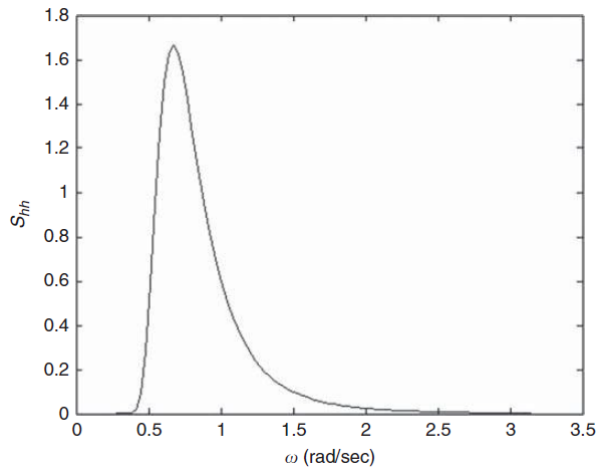
Gambar 21(c) dimaksudkan untuk menunjukkan pengaruh rasio redaman TMD terhadap reduksi respons struktur. Nilai redaman optimum diperoleh saat perubahan puncak kurva dari dua puncak menjadi satu puncak. Nilai redaman ini berbeda untuk setiap struktur dan harus dicari dengan mengubah-ubah nilai redaman hingga diperoleh respons minimum pada saat dua puncak spektrum berdekatan sebagaimana teori klasik puncak yang sama (*equal peak theory*) yang diusulkan oleh den Hartog [13].

Selanjutnya, TMD dengan rasio massa 10% serta rasio redaman optimum dipasang pada tiga anjungan lepas pantai yang berbeda, yaitu anjungan *flare* tiga kaki, anjungan sumur minyak empat kaki, anjungan proses delapan kaki. Ilustrasi ketiga anjungan ini diperlihatkan pada Gambar 22. Ketiga struktur dianggap berada pada perairan dengan kedalaman 111 m dan dikenakan gelombang acak mengikuti spektrum Pierson-Moskowitz dengan parameter kecepatan angin 12.9 m/detik seperti diperlihatkan pada Gambar 23.

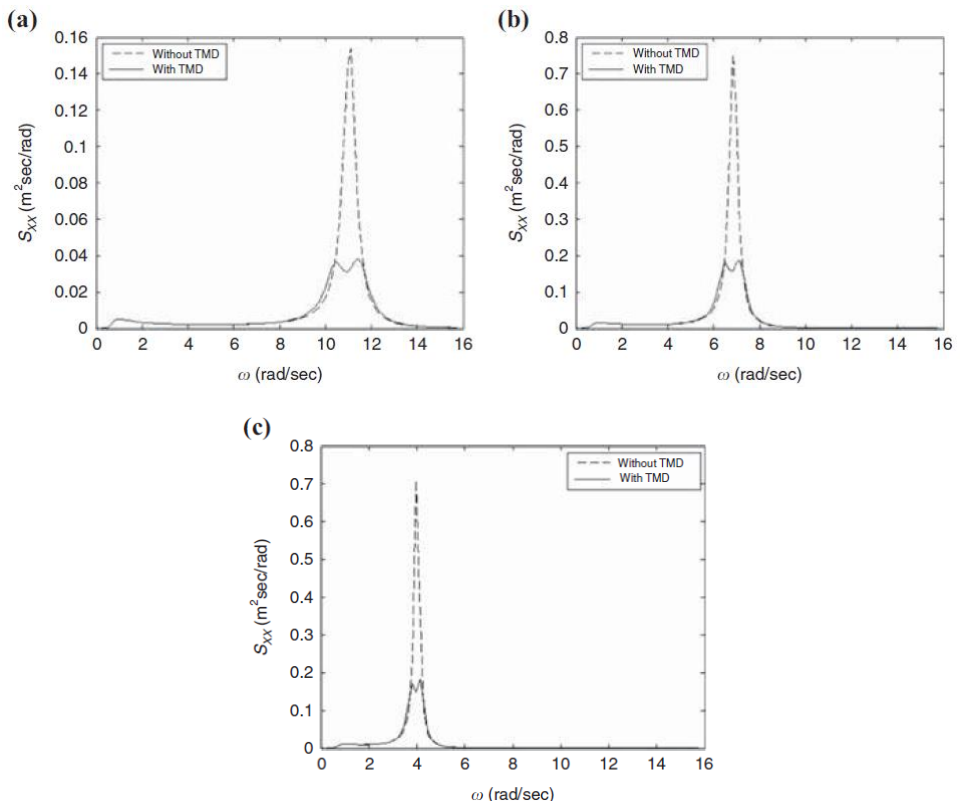


**Gambar 22** Ilustrasi anjungan lepas pantai tipe jaket 3 kaki, 4 kaki, dan 8 kaki. [12]

Hasil spektrum respons perpindahan ketiga struktur dengan dan tanpa TMD disajikan pada Gambar 24. Penurunan respons perpindahan terlihat jelas terjadi pada ketiga struktur. Karena perpindahan bersifat acak dengan rata-rata nol, maka besarnya akar dari rata-rata perpindahan kuadrat (*rms – root mean square*) dijadikan sebagai parameter reduksi respons struktur. Perbandingan respons *rms* masing-masing struktur dengan dan tanpa TMD disajikan pada Tabel 1. Terlihat bahwa untuk studi kasus ini, keberadaan TMD dapat mereduksi respons perpindahan sebesar 20% dari perpindahan struktur tanpa TMD.



**Gambar 23** Spektrum gelombang Pierson Moskowitz untuk kecepatan angin 12.9 m/detik



**Gambar 24** Spektrum respons tiga struktur anjungan lepas pantai dengan dan tanpa TMD, (a) anjungan flare 3 kaki, (b) anjungan sumur minyak 4 kaki, dan (c) anjungan proses 8 kaki [12].

**Tabel 1** Respons dinamis struktur dengan dan tanpa TMD [12]

	Respons RMS [m]		
	Struktur 1 (3 kaki)	Struktur 2 (4 kaki)	Struktur 3 (8 kaki)
Tanpa TMD	0.420	0.735	0.544
Dengan TMD	0.337	0.588	0.432
Reduksi Respons	19.7 %	20.0 %	20.7 %

Golafshani dan Gholizad [14] saat melakukan penelitian penggunaan peredam tipe FD (*friction damper*) pada struktur anjungan lepas pantai menyajikan perbandingan kinerja FD dengan TMD dan menyimpulkan bahwa peredam tipe FD lebih efisien daripada TMD untuk anjungan tipe jaket. Namun diberikan catatan bahwa kinerja TMD sangat tergantung dari karakteristik dinamis struktur anjungan dan lebih cocok untuk struktur yang lebih fleksibel.

Ma, dkk. [15] meneliti kinerja TMD yang dipasang pada anjungan lepas pantai dan dikenai beban gelombang. Studi kasusnya menghasilkan reduksi respons perpindahan sebesar 34% dan reduksi respons percepatan sebesar 53%. Sharma dkk. [16] menggunakan TMD untuk mengendalikan respons anjungan lepas pantai terhadap beban gempa dan beban es. Penelitian ini juga mengkaji serangkaian lokasi penempatan TMD untuk mendapatkan hasil yang optimum.

Lin, dkk. [17] menggunakan beberapa TMD (atau MTMD – *multiple TMD*) yang dioptimasi untuk mengurangi respons struktur jaket akibat beban gempa dan es. Reduksi respons percepatan yang dihasilkan sebesar 32% pada kasus beban es dan 41% pada kasus beban gempa dengan penempatan TMD pada lantai paling atas serta di landasan helikopter (*helideck*).

Jafarabad, dkk. [18] menggabungkan penggunaan FD dengan TMD pada anjungan tipe jaket yang dikenai beban gempa dan beban gelombang. Hasil yang diperoleh menunjukkan sistem gabungan ini lebih efektif dengan kontribusi FD lebih besar daripada TMD.

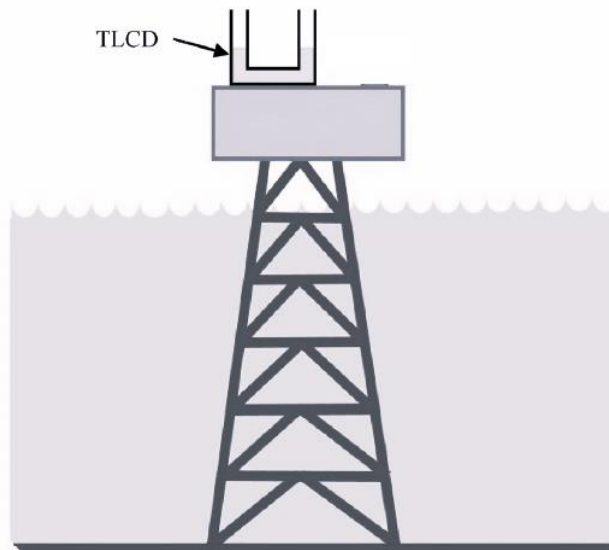
Meskipun pemasangan TMD pada struktur di darat umumnya telah menunjukkan keberhasilan dan keefektifannya, pemasangan TMD pada anjungan lepas pantai masih memiliki sejumlah tantangan. Masih diperlukan penelitian lanjutan terkait penempatan TMD pada ruang yang terbatas,

pengaruh suara atau gangguan getaran lain selama anjungan beroperasi, durabilitas TMD terhadap kondisi lingkungan laut, hingga aspek pemeliharaan TMD selama bangunan beroperasi [19].

## 2.2 Tuned Liquid Damper (TLD)

Pada dasarnya TLD bekerja dengan prinsip yang mirip dengan TMD. Dalam hal ini, sistem pegas, redaman, dan massa digantikan oleh cairan, biasanya air, yang berada di dalam tabung atau di dalam suatu kontainer. Berbeda dengan TMD, TLD tidak memerlukan redaman eksternal.

Berdasarkan tempat cairan peredamnya, TLD dapat dibagi menjadi *Tuned Sloshing Damper* (TSD) dan *Tuned Liquid Column Damper* (TLCD). Pada TSD cairan ditempatkan di dalam kontainer sehingga menghasilkan gerak *sloshing* saat dikenai beban dinamis. Pada *Tuned Liquid Column Damper* (TLCD), cairan ditempatkan di dalam kolom atau tabung berbentuk U. TLCD mendisipasi energi saat cairan melewati orifis yang dipasang pada bagian horizontal dari tabung U tersebut. Gambar 25 memperlihatkan skema pemasangan TLCD pada anjungan lepas pantai tipe jaket.



**Gambar 25** Skema pemasangan TLCD pada struktur anjungan lepas pantai tipe jaket [10]

Seperti halnya TMD, gerakan cairan pada di dalam kontainer atau tabung dirancang agar memiliki frekuensi yang sama dengan frekuensi alami atau frekuensi paling dominan struktur.

Chen, dkk. [20] melakukan kajian analitis dan eksperimental penggunaan TSD untuk mengurangi respons struktur jaket akibat beban es. Reduksi respons percepatan dan perpindahan yang dihasilkan melebihi 30%. Jin dkk. [21] juga melakukan kajian numerik dan eksperimental menggunakan TSD yang memanfaatkan tangki silinder berisi minyak pada anjungan lepas pantai yang dikenai beban gempa. Hasil yang diperoleh menunjukkan reduksi respons perpindahan antara 2% hingga 29% dan reduksi respons percepatan antara 5% hingga 51%. Nilai reduksi yang kecil terjadi saat frekuensi *sloshing* tidak mendekati frekuensi alami model anjungan.

Chenaghrou, dkk. [22] membandingkan kinerja TLCD dan TMD dalam mereduksi respons anjungan lepas pantai terhadap beban gempa. Hasilnya menunjukkan bahwa TLCD bekerja lebih baik dengan reduksi perpindahan sekitar 38%, dua kali lebih tinggi daripada reduksi perpindahan struktur dengan TMD.

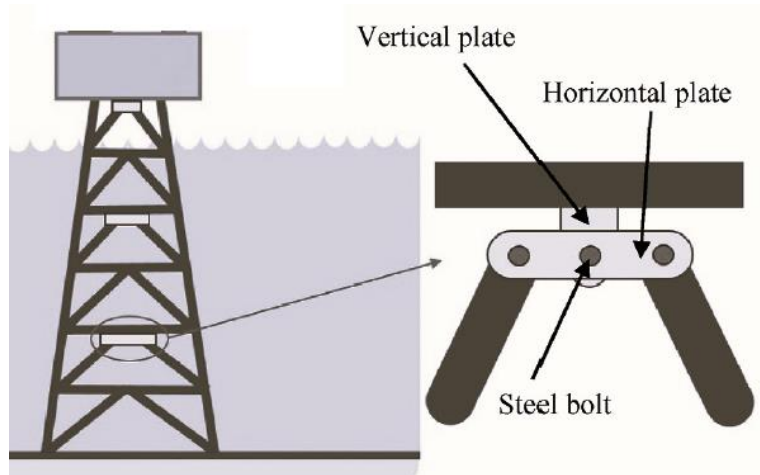
Sejumlah penelitian lain mengaplikasikan berbagai variasi TLD seperti penggunaan gas di dalam tabung U tertutup dengan orifis dan menggabungkan dengan peredam magnetorheologis. Masing-masing memiliki keefektifan sendiri dalam mereduksi respons struktur anjungan lepas pantai akibat beban gempa atau beban gelombang [10].

Kendala yang dihadapi TLD mirip dengan TMD sebelumnya, yaitu dalam hal penempatan peredam tersebut pada anjungan lepas pantai yang sudah dipenuhi dengan berbagai peralatan. Di samping itu, gerakan *sloshing* dari cairan menunjukkan fenomena nonlinier yang dapat mempengaruhi frekuensi TLD terutama jika amplitudo gerakan cukup besar.

### **2.3 Friction Damper (FD)**

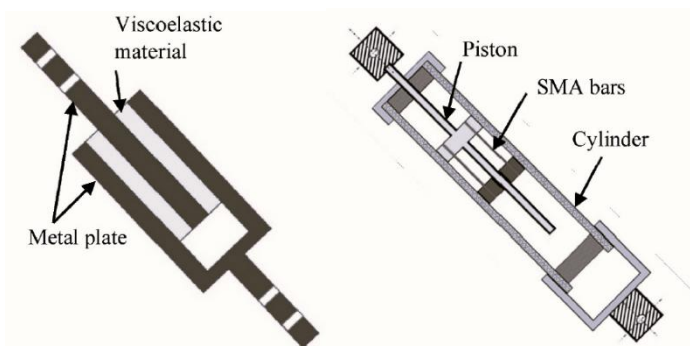
FD memanfaatkan gesekan antara material logam untuk mendisipasikan energi selama struktur berosilasi akibat beban dinamis. Ada beberapa skema FD yang diusulkan sejumlah peneliti, salah satunya menggunakan pelat vertikal yang diapit oleh dua pelat horizontal dan disambungkan dengan baut.

Elemen peredam ini dipasang pada pengkaku (*brace*) struktur anjungan lepas pantai seperti diilustrasikan pada Gambar 25.



**Gambar 25** Skema FD dan pemasangannya pada struktur jaket [10]

Beberapa variasi elemen pendisipasi energi yang mirip dengan FD ini antara lain *viscoelastic damper* (VED) dan *shape memory alloy* (SMA *damper*). Jika FD hanya mengandalkan gesekan antarpelat logam, VED menyelipkan material viskoelastis di antara pelat logam tersebut, dan SMA *damper* menggunakan batang *shape memory alloy*. Keuntungan SMA adalah kemampuannya berdeformasi besar tanpa menyisakan deformasi residual sehingga dapat mendisipasi energi secara histeresis [10]. Gambar 26 memperlihatkan skema peredam VED dan SMA *damper*.



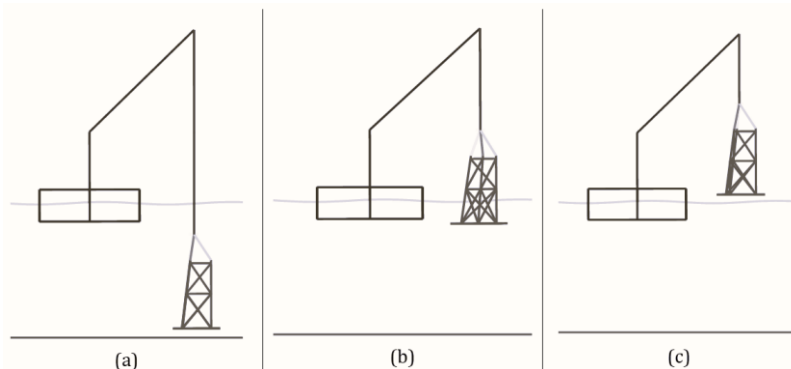
**Gambar 26** Skema peredam VED (kiri) dan SMA (kanan) [10].

Penggunaan FD dan elemen sejenisnya sebagai peredam energi gempa pada bangunan di darat telah cukup teruji. Elemen peredam tersebut dapat

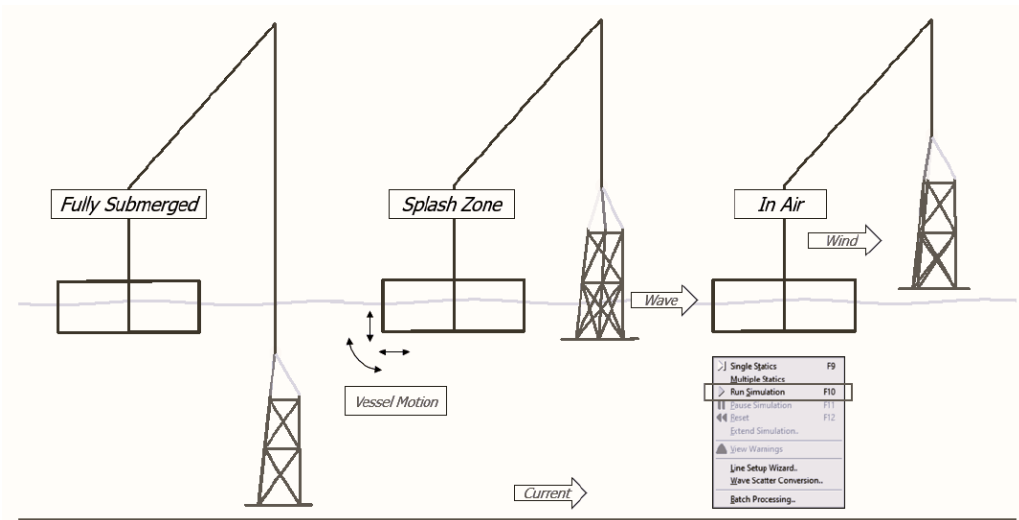
diganti apabila mengalami kerusakan setelah dikenai beban gempa. Hal seperti ini sulit dilakukan pada struktur anjungan lepas pantai, di mana beban dinamik bekerja terus menerus, dan penempatan elemen peredam berada pada bagian struktur yang terletak di bawah air. Aspek durabilitas dan pemeliharaan juga harus menjadi perhatian karena posisi elemen peredam ini.

## 2.4 Pengangkatan Saat Instalasi dan Pembongkaran

Pengangkatan struktur atau bagian struktur anjungan lepas pantai perlu dilakukan pada saat instalasi struktur dan pada saat pembongkarannya. Tantangan utama proses pengangkatan ini adalah adanya gerakan kapal pengangkat dan gaya hidrodinamis yang bekerja pada struktur yang diangkat. Praktik yang disarankan adalah menggunakan faktor amplifikasi dinamis dalam merancang sistem pengangkatan untuk mengakomodir gerakan kapal dan gaya hidrodinamis tersebut. Standar operasi pengangkatan [23] menyarankan analisis statis dengan memasukkan nilai-nilai faktor amplifikasi tertentu, namun kadang-kadang sejumlah faktor dirasakan terlalu konservatif. Untuk memperoleh faktor amplifikasi yang akurat, harus dilakukan analisis dinamis terhadap sistem pengangkatan yang lengkap, yang memasukkan faktor gerakan kapal dan gaya hidrodinamis akibat gelombang. Analisis dinamis dilakukan terhadap setiap tahapan pengangkatan sesuai dengan pembebanan yang bekerja. Gambar 27 memperlihatkan skema analisis tahapan pengangkatan ini. Gambar 28 memperlihatkan skema simulasi dinamis beserta beban-beban yang dipertimbangkan dalam setiap tahap, di samping berat sendiri dari struktur dan sistem pengangkatnya.



**Gambar 27** Skema pengangkatan struktur jacket saat (a) sepenuhnya di dalam air, (b) sebagian di air dan udara, dan (c) sepenuhnya di udara [24].



**Gambar 28** Ilustrasi skema simulasi dinamis pengangkatan struktur jaket [24]

Tabel 2 menyajikan nilai faktor amplifikasi dinamis yang disarankan oleh standar DNV-ST-N001. Faktor amplifikasi ini harus digunakan jika analisis pengangkatan dilakukan secara statis sepenuhnya. Perlu dicatat bahwa faktor ini belum mempertimbangkan faktor konsekuensi dari beban dan pergeseran pusat massa beban. API RP 2A [7] menggunakan pendekatan yang berbeda dalam menentukan faktor amplifikasi dinamis ini. Standar ini menggunakan faktor amplifikasi tunggal yang sudah memasukkan faktor pergeseran pusat massa beban. Nilai faktor amplifikasi yang disarankan adalah 2.0 untuk elemen struktur yang tersambung langsung dengan titik angkat dan 1.35 untuk elemen struktur lainnya.

**Tabel 2** Nilai Faktor Amplifikasi Dinamis Berdasarkan DNV-ST-N001 [23]

Beban Statis (ton)	Faktor Amplifikasi Dinamis		
	Onshore	Inshore	Offshore
3 – 100	1.10	$1.07 + 0.05\sqrt{(100/SHL)}$	$1 + 0.25\sqrt{(100/SHL)}$
100 – 300	1.05	1.12	1.25
300 – 1000	1.05	1.10	1.20
1000 – 2500	1.03	1.08	1.15
> 2500	1.03	1.05	1.10

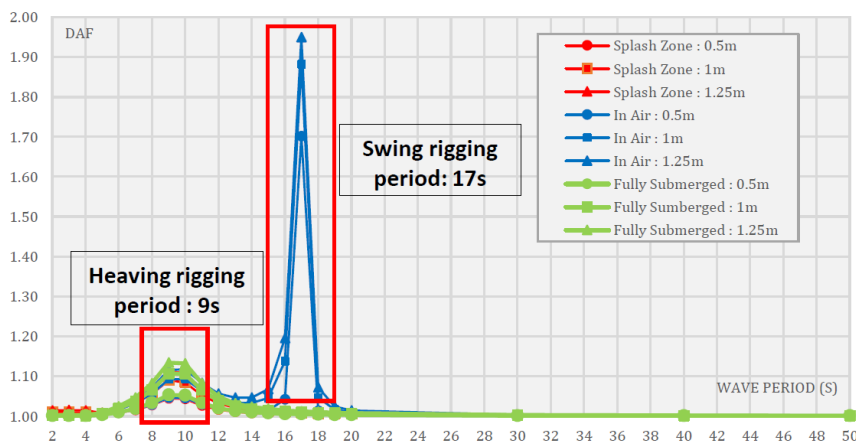
Masturi, dkk. [24] melakukan analisis dinamis untuk kasus pengangkatan bagian bawah dari struktur jaket saat pembongkaran setelah masa layanan

struktur berakhir. Struktur jacket dengan berat sekitar 250 metrik ton terletak pada perairan sedalam 66 m. Beban gelombang berupa gelombang linier dengan tinggi gelombang berkisar antara 0.5 hingga 1.25 m, sedangkan beban angin dan arus masing-masing berasal dari angin dengan kecepatan 16.9 m/detik dan arus dengan kecepatan 0.55 m/detik.

Simulasi dinamis yang dilakukan pada ketiga tahapan pengangkatan menghasilkan faktor amplifikasi sebesar 1.02, lebih kecil daripada faktor amplifikasi yang disarankan oleh standar.

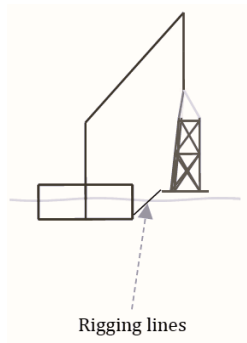
Selanjutnya dilakukan analisis sensitivitas dengan memvariasikan periode gelombang yang bekerja pada struktur. Hal ini ditujukan untuk mengidentifikasi kemungkinan resonansi jika periode gelombang sama atau dekat dengan periode gerakan sistem pengangkatan. Gambar 29 menyajikan grafik hasil analisis sensitivitas faktor amplifikasi dinamis untuk berbagai periode gelombang.

Hasil analisis sensitivitas ini memperlihatkan adanya dua kemungkinan resonansi, yaitu pada periode 9 detik dan 17 detik. Kedua periode itu berturut-turut bertepatan dengan periode ragam getar saat sistem beban dan tali pengangkat mengayun vertikal (*heaving*) dan mengayun ke samping (*swing*). Nilai faktor amplifikasi tertinggi untuk kasus ayunan vertikal terjadi saat beban sepenuhnya berada di dalam air, sedangkan untuk kasus ayunan ke samping nilai tertinggi terjadi saat beban berada di udara. Nilai faktor amplifikasi pada saat resonansi ini hampir mencapai 2.0, melebihi faktor amplifikasi 1.25 yang disarankan oleh standar.



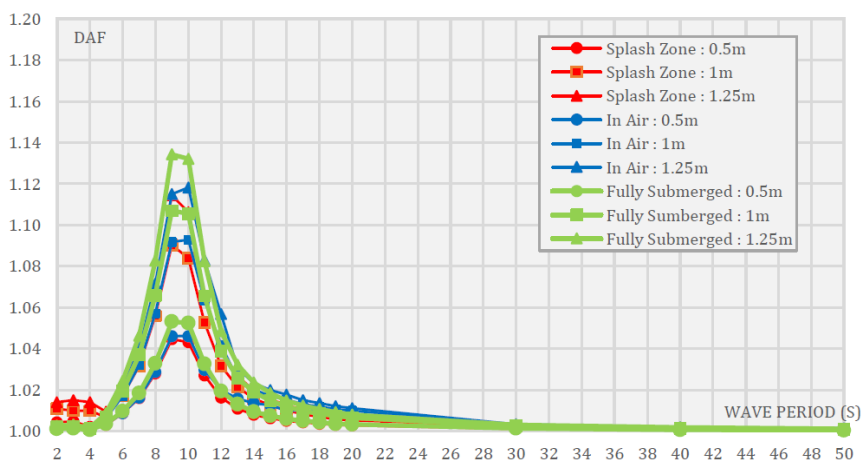
Gambar 29 Nilai faktor amplifikasi untuk berbagai periode gelombang [24].

Untuk memitigasi peningkatan faktor amplifikasi ini, dilakukan penambahan tambatan dari beban ke kapal pada saat pengangkatan di udara sehingga baik ayunan vertikal maupun ayunan ke samping dapat dikurangi. Gambar 30 memperlihatkan skema tambahan penambatan beban ini.



**Gambar 30** Pengangkatan di udara dengan penambahan tali penambat beban ke kapal [24].

Grafik analisis sensitivitas untuk sistem yang baru ini diperlihatkan pada Gambar 31. Pada grafik ini terlihat bahwa resonansi yang menyebabkan ayunan ke arah samping berhasil dihilangkan oleh penambatan ini. Nilai faktor amplifikasi terbesar adalah 1.13 yang merupakan kondisi resonansi untuk ayunan vertikal saat beban masih berada di bawah permukaan air. Hal ini dimaklumi karena tali tambat tambahan belum bekerja saat beban masih berada di posisi tersebut. Faktor amplifikasi 1.13 ini masih lebih kecil daripada faktor amplifikasi yang disarankan oleh standar sehingga tidak diperlukan mitigasi lebih lanjut.



**Gambar 31** Nilai faktor amplifikasi setelah penambahan *rigging line* [24].



### 3. INFRASTRUKTUR ENERGI TERBARUKAN

Di masa sekarang ini, dorongan untuk beralih dari energi fosil yang sumbernya makin terbatas ke energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kesadaran akan pentingnya keberlanjutan. Energi angin merupakan salah satu dari energi terbarukan dan ramah lingkungan ini. Industri pembangkit tenaga angin tumbuh dengan pesat, pada tahun 2016 telah terbangun pembangkit dengan kapasitas total 54 GW di seluruh dunia. Permintaan pasar akan energi angin ini diperkirakan meningkat sebesar 60 hingga 75 GW per tahun [25].

Lepas pantai merupakan lokasi yang ideal sebagai lokasi sistem pembangkit tenaga angin. Tidak adanya masalah ketersediaan lahan serta tidak adanya hambatan terhadap angin yang menggerakkan turbin merupakan salah satu aspek yang menguntungkan. Oleh karena itu, sistem pembangkit tenaga angin lepas pantai menjadi pilihan.

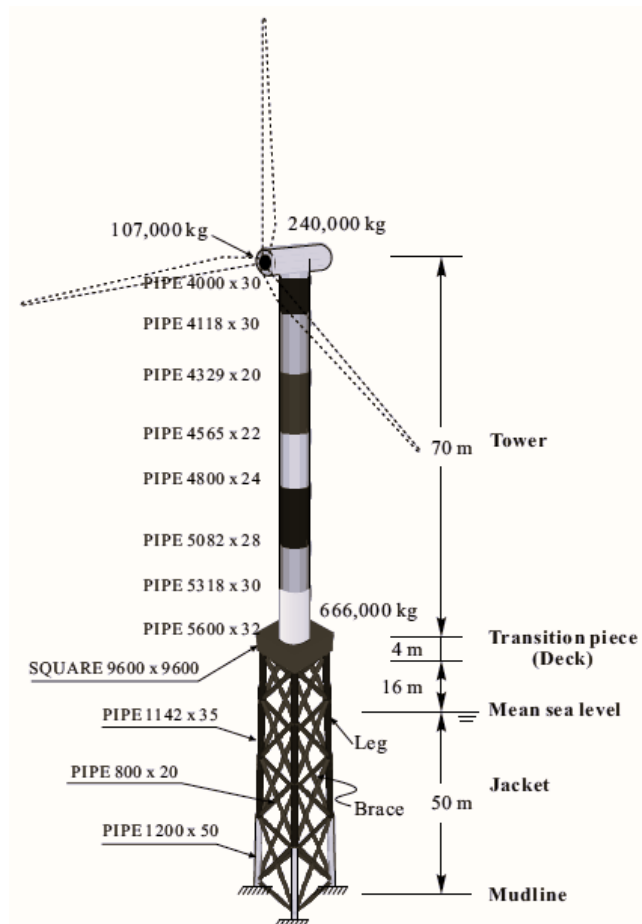
Baik di darat maupun di lepas pantai, teknologi pemanfaatan tenaga angin menjadi energi tidak memiliki perbedaan. Namun infrastruktur pendukung masing-masing memiliki tantangan lingkungan yang berbeda. Struktur turbin angin lepas pantai, sebagaimana struktur lepas pantai lainnya, berhadapan dengan kondisi lingkungan yang keras, yang menghendaki analisis dinamis lengkap agar struktur tidak mengalami kegagalan selama masa layannya.

#### 3.1 Turbin Angin Lepas Pantai

Struktur turbin angin lepas pantai terdiri atas menara yang mendukung bilah-bilah (*blades*) yang berputar serta *hub* dan *nacelle* di tengahnya. Bilah-bilah menangkap energi angin dan mengubahnya menjadi energi mekanis melalui putarannya. *Hub* menyatukan bilah-bilah, mengoptimalkan sudut serang dan kecepatan putarnya. *Nacelle* merupakan rumah bagi komponen yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik yang selanjutnya disalurkan ke pengguna.

Menara dan turbin angin didukung oleh pondasi dan struktur bawah yang mirip dengan struktur anjungan lepas pantai lainnya, dapat berupa struktur tetap yang terpancang ke dasar laut atau berupa struktur terapung. Namun teknologi untuk struktur turbin angin lepas pantai tipe terapung saat ini masih

dalam tahap awal perkembangannya [26]. Gambar 32 memperlihatkan skema turbin angin dasar (*baseline*) 5 MW dari NREL (National Renewable Energy Laboratory) [27] yang umum dipakai sebagai struktur referensi untuk meneliti perilaku struktur turbin angin lepas pantai tipe tetap [28].

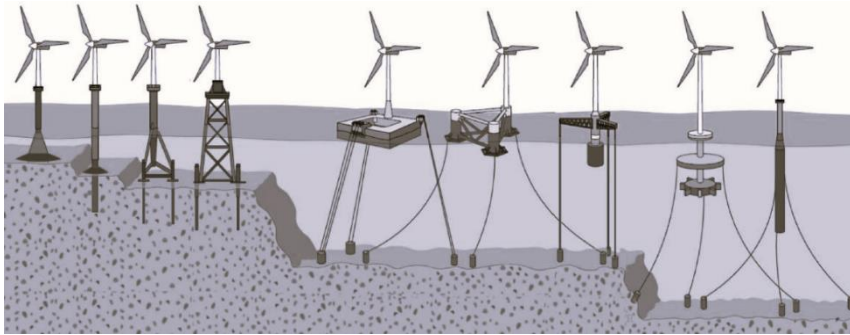


**Gambar 32** Skema dan dimensi turbin angin lepas pantai dasar berkapasitas 5 MW dari NREL [28].

Dengan semakin matangnya teknologi turbin angin lepas pantai dan semakin berkurangnya risiko komersialnya, mayoritas sistem turbin angin lepas pantai memiliki karakteristik yang sama, seperti sumbu rotasi horizontal, turbin menghadap angin (*upwind*), dan menggunakan tiga bilah. Hanya struktur pendukungnya yang bervariasi, disesuaikan dengan kedalaman laut dan kondisi lingkungan laut di sekitar turbin angin tersebut.

Gambar 33 memperlihatkan sketsa sejumlah pondasi turbin angin yang pernah atau sedang dikembangkan saat ini. Beberapa struktur tipe tetap untuk

perairan yang relatif dangkal hingga menengah yang diilustrasikan adalah struktur beton berbasis gravitasi, struktur tiang tunggal (*monopile*), struktur berkaki tiga (*tripod*) dan struktur jaket. Sedangkan struktur tipe terapung yang digambarkan adalah struktur *buoyancy* dengan kolam redaman, *semi submersible*, tension leg platform (TLP), dan *spar*.



**Gambar 33** Skema sejumlah struktur pendukung turbin angin lepas pantai [29]

Wei, dkk. [28] melakukan analisis dinamis dalam domain waktu terhadap tiga model struktur anjungan turbin angin lepas pantai tipe jaket dengan periode alami berkisar antara 2.5 hingga 4.9 detik. Hasil yang diperoleh berupa faktor amplifikasi dinamis yang merupakan perbandingan gaya geser dasar dari analisis dinamis terhadap gaya geser dasar hasil analisis ekuivalen statis. Faktor amplifikasi dinamis berkurang seiring meningkatnya tinggi gelombang. Untuk gelombang reguler, nilai faktor amplifikasi berkisar antara 0.90 dan 1.10, sedangkan untuk gelombang irreguler nilainya dapat mencapai 1.40. Untuk gelombang yang lebih besar dari 10 m, efek dinamis sudah tidak terlalu berarti dibandingkan dengan pengaruh statis berupa gaya gelombang yang besar.

Hutauruk [30] melakukan kajian stabilitas selama instalasi turbin angin lepas pantai dan mengkaji kemungkinan penambahan pemberat untuk meningkatkan kestabilan selama instalasi. Analisis dinamis dilakukan dalam domain waktu dan domain frekuensi. Struktur turbin angin mengalami gerakan yang cukup signifikan selama proses instalasi sehingga tidak memenuhi kriteria kestabilan jika tidak diberikan pemberat tambahan. Penambahan pemberat sekitar 750 ton dapat mengatasi masalah kestabilan ini, namun proses instalasi tetap harus dilakukan pada kondisi gelombang yang terkontrol.

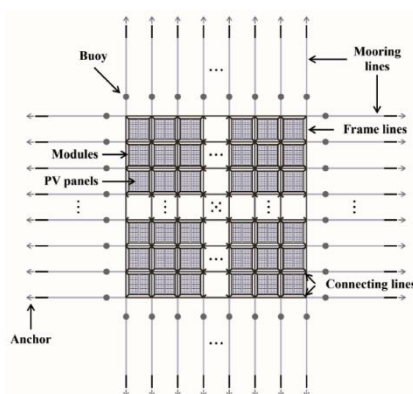
### 3.2 Panel Surya Terapung

Selain energi dari angin, energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan yang semakin populer. Terkait hal ini, lokasi di lepas pantai kembali memberikan keuntungan pembangkitan energi surya ini dibandingkan daratan.

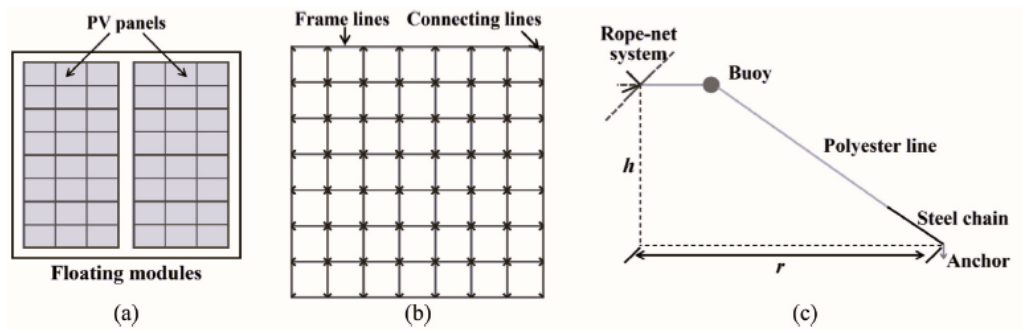
Penempatan panel surya di lepas pantai memberikan sejumlah keuntungan, antara lain dalam hal pengurangan penggunaan lahan daratan, area yang lebih terbuka tanpa halangan, serta terbuka lebarnya kemungkinan kombinasi dengan kegiatan produktif lain seperti pembudidayaan ikan [31]. Di samping itu, PV terapung dapat pula ditempatkan dalam jaringan yang sama dengan turbin angin lepas pantai [32].

Karena beban panel surya relatif kecil dibandingkan pembangkit energi angin ataupun energi konvensional migas, panel surya lepas pantai umumnya ditempatkan pada struktur terapung agar biaya infrastrukturnya tidak menjadi jauh lebih besar daripada biaya pembangkitan energi. Analisis struktur jelas harus dilakukan secara dinamis mengingat struktur panel surya terapung akan bergerak mengikuti kondisi permukaan laut. Gambar 34 dan 35 memperlihatkan skema struktur panel surya terapung ini. [33].

Panel surya diletakkan pada struktur rangka bidang pengapung (*floaters*) yang terapung di permukaan air yang bergerak mengikuti permukaan air. Sistem struktur rangka bidang ini ditambatkan dengan tali tambat dan jangkar ke dasar perairan.



**Gambar 34** Denah skema satu modul panel surya terapung lepas pantai [32].



**Gambar 35** Skema (a) modul panel surya terapung, (b) sistem struktur rangka bidang pendukung, dan (c) sistem tambatnya [32]

Terdapat beberapa kelas struktur pengapung, yaitu [34]:

- a. Kelas 1: rakit berukuran besar yang dibangun dari pipa HDPE (*high density polyethylene*) dan struktur pendukung dari baja atau aluminium,
- b. Kelas 2: dibangun seluruhnya dari HDPE yang berukuran lebih kecil, umumnya berupa modul-modul yang disambungkan dengan sejenis kait, dan
- c. Kelas 3: sistem ponton yang saling disambungkan yang mampu mendukung modul panel surya.

Gambar 36 hingga 38 memperlihatkan contoh masing-masing kelas struktur pengapung di atas.



**Gambar 36** Contoh sistem panel surya terapung kelas 1 [33].



**Gambar 37** Contoh sistem panel surya terapung kelas 2 [33].



**Gambar 38** Contoh sistem panel surya terapung kelas 3 [33].

Analisis dinamis struktur panel surya terapung ini memerlukan model hidroelastisitas dari sistem struktur rangka bidang yang masih dikembangkan hingga saat ini. Sejumlah parameter fundamental, seperti ragam getar dominan dan gaya pada tali tambat, telah dihasilkan [32]. Namun masih diperlukan penelitian lebih lanjut untuk meyakinkan agar struktur ini mampu berfungsi sebagaimana yang diinginkan.

## 4. PENGEMBANGAN LANJUTAN DINAMIKA STRUKTUR LEPAS PANTAI

Aplikasi Dinamika Struktur pada perancangan infrastruktur migas konvensional, khususnya anjungan lepas pantai tipe jaket telah diterapkan oleh standar perancangan, sehingga analisis ekuivalen statis sudah mencukupi. Pengembangan penelitian lanjutan pada aspek ini mungkin lebih pada penentuan parameter gelombang yang lebih merepresentasikan gelombang di lokasi struktur. Begitu pula dengan penentuan nilai faktor beban gelombang yang lebih akurat, yang terkait dengan statistik gelombang di lokasi tersebut. Namun untuk mengurangi respons struktur lebih lanjut dengan penambahan elemen peredam atau elemen pendisipasi energi, masih diperlukan penelitian dan pengembangan lebih lanjut sebelum diaplikasikan secara masal pada struktur.

Dari pembahasan sejumlah metode untuk mereduksi respons dinamis struktur lepas pantai tipe tetap dapat disimpulkan bahwa upaya mengikuti keberhasilan metode yang sama untuk struktur daratan telah menunjukkan hasil yang positif. Namun sebagian besar penelitian yang dilakukan masih dalam tahap analitis, numerik, dan eksperimen laboratorium. Masih terdapat sejumlah kendala dalam implementasi pada struktur aktual di lapangan. Elemen peredam seperti TMD atau TLD umumnya berukuran relatif besar sehingga menimbulkan masalah dalam hal penempatan elemen peredam pada area yang terbatas. Pengaruh lingkungan lepas pantai terhadap efektifitas elemen peredam juga masih perlu diteliti, mengingat struktur anjungan lepas pantai biasanya terbuka dan terkena langsung oleh pengaruh cuaca.

Elemen peredam yang bersifat mendisipasi energi, seperti FD dan VED harus dipasang pada pengkaku yang berada di bawah permukaan air, sehingga rentan terkena korosi dan ditumpangi oleh organisme laut (*marine growth*) di samping dikenai oleh gelombang secara langsung. Lebih jauh lagi, penambahan elemen pada struktur bawah akan meningkatkan beban gelombang yang diterima struktur.

Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai (KK TLP), FTSL, ITB telah membuat peta jalan penelitian yang mencakup sejumlah aspek yang terkait dengan struktur lepas pantai. Gambar 39 memperlihatkan peta jalan



meningkatkan kekuatan dan durabilitas dari material peredam yang umum digunakan saat ini.

- f. Metode instalasi elemen peredam pada struktur yang sudah terbangun.
- g. Dengan berkembang pesatnya teknologi baterai, penggunaan peredam aktif atau semi aktif dapat dikembangkan lebih lanjut.

Di samping untuk mereduksi respons struktur anjungan terhadap beban dinamis, bidang Dinamika Struktur Lepas Pantai dapat pula dikembangkan pada upaya pemanfaatan energi laut, seperti energi arus atau gelombang. Sejauh ini keefektifan pembangkit energi laut ini masih diusahakan agar meningkat dalam layak dipasang di lapangan. Dalam hal ini, analisis dinamika struktur diperlukan agar pembangkit energi laut tersebut mengalami osilasi sebesar-besarnya akibat eksitasi yang mungkin tidak terlalu besar.



## 5. PENUTUP

Aspek Dinamika Struktur pada sejumlah tipe infrastruktur energi lepas pantai telah disajikan, dari infrastruktur migas konvensional hingga infrastruktur energi terbarukan. Pada struktur-struktur konvensional telah ditunjukkan perlunya analisis dinamis untuk mendapatkan respons yang akurat yang dapat digunakan untuk optimasi struktur. Sejumlah upaya pengendalian respons dinamis struktur telah disampaikan. Struktur turbin angin lepas pantai merupakan infrastruktur energi terbarukan yang sudah cukup banyak dibangun di seluruh dunia memberikan kesempatan lebih pada aplikasi Dinamika Struktur karena beban dinamik yang meningkat dibandingkan struktur anjungan migas. Terakhir disajikan juga struktur panel surya terapung yang jelas memerlukan Dinamika Struktur dan perilaku dinamisnya masih dalam tahap penelitian dan pengembangan.

Beberapa catatan dan tantangan mengenai aplikasi elemen peredam pada struktur aktual juga dibahas, dilanjutkan dengan usulan sejumlah topik penelitian lebih lanjut yang relevan untuk menghadapi tantangan tersebut. Diharapkan dengan penelitian dan pengembangan selanjutnya, kontribusi keilmuan Dinamika Struktur Lepas Pantai dalam upaya menghasilkan energi yang ramah lingkungan dan terbarukan akan semakin nyata.

Pembangkitan energi yang berasal dari proses fisik di laut sendiri, seperti pasang surut, arus, dan gelombang juga merupakan wilayah penelitian bidang Dinamika Struktur Lepas Pantai yang masih terbuka lebar. Jika sebelumnya ilmu Dinamika Struktur digunakan untuk mereduksi respons dinamis struktur lepas pantai, pada pembangkit energi laut ini ilmu Dinamika Struktur sebaliknya harus digunakan untuk memperbesar respons dinamik pembangkit agar efektif dalam membangkitkan energi.



## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih yang sebesar-besarnya kami sampaikan kepada semua pihak yang telah berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung hingga terselesaikannya buku orasi ilmiah ini. Dari dosen-dosen yang mengenalkan kami dengan bidang ilmu Dinamika Struktur dan Dinamika Struktur Lepas Pantai, para dosen pembimbing di tingkat sarjana, magister, dan doktor, hingga kolega dosen-dosen di Program Studi Teknik Kelautan yang berinteraksi sehari-hari melaksanakan Tridharma bersama-sama.

Khusus untuk penulisan buku orasi ilmiah ini, ucapan terima kasih kami sampaikan kepada tiga kolega dosen KK Teknik Lepas Pantai, Eko C. Ilman, Lurohman Mamin, dan Farid P. Bakti, yang membantu untuk memperoleh sejumlah referensi dan ilustrasi yang digunakan dalam buku ini.



# DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. W. Clough and J. Penzien (1993). Dynamics of Structures, 2<sup>nd</sup> edition. International Editions. McGraw-Hill Book Co., Singapore.
- [2] J. L. Humar (2012). Dynamics of Structures, 3<sup>rd</sup> edition. CRC Press, FL, USA.
- [3] S. S. Rao (2005). Mechanical Vibrations, SI edition. Prentice-Hall, Singapore.
- [4] A. K. Chopra (2020). Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering, 5<sup>th</sup> edition in SI Units. Peason Education Limited, UK.
- [5] Badan Standardisasi Nasional (2019). SNI 1726:2019, Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung dan Non-gedung.
- [6] S. K. Chakrabarti (2005). Handbook of Offshore Engineering, Vol. I. Elsevier, Oxford.
- [7] American Petroleum Institute (2000). API RP 2A, Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design. American Petroleum Institute, Washington, DC, USA.
- [8] H. Benaroya and S. M. Han (2005). Probability Models in Engineering and Science. Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA.
- [9] S. K. Chakrabarti (1997). Hydrodynamics of Offshore Structures. Springer-Verlag, Berlin.
- [10] N. Sarkar, T. Konar and A. Gosh (2025). Passive vibration control techniques for offshore structures under different environmental loading: A review. Ocean Engineering 320, 120296. .  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.120296>
- [11] J. Ou, X. Long, Q. S. Li, and Y. Q. Xiao (2017). Vibration control of steel jacket offshore platform structures with damping isolation systems. Engineering Structures 29, 1525-1538.
- [12] F. Zahra, Rildova, S. M. Adiyastuti, and F. Falahi (2019). Preliminary study on tuned mass damper utilization to reduce wave-induced vibration of jacket platforms. International Journal of Structural Integrity Vol. 10, Issue 1, 2-12. <https://doi.org/10.1108/IJSI-03-2018-0015>

- [13] J. P. den Hartog (1984). *Mechanical Vibrations*. Dover Publications Inc., NY, USA.
- [14] A. A. Golafshani and A. Gholizad (2009). Friction damper for vibration control in offshore steel jacket platforms. *Journal of Constructional Steel Research* 65, 180-187. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.07.008>.
- [15] R. Ma, H. Zhang, and D. Zhao (2010). Study on the anti-vibration devices for a model jacket platform. *Marine Structures* 23, 434-443.
- [16] R. K. Sharma, V. Domala, and R. Sharma (2019). Dynamic analysis of an offshore jacket platform with a tuned mass damper under the seismic and ice loads. *Ocean System Engineering* 9, 369-390. <https://doi.org/10.12989/ose.2019.9.4.369>.
- [17] C. S. Lin, F. Liu, J. Zhang, and C. C. Lin (2017). Multiple tuned mass dampers for vibration control of offshore platform against natural loadings. *The World Congress on Advance in Structural Engineering and Mechanics*, 1-18.
- [18] A. Jafarabad, M. Kashani, M. R. A. Parvar, and A. A. Golafshani (2014). Hybrid damping systems in offshore jacket platforms with float-over deck. *Journal of Construction Steel Research* 98, 178-187. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.02.004>.
- [19] A. D. Ghosh and T. Konar (2023). Popular passive dampers for structural control: a review. *Journal of Structural Engineering* 50, 24-38.
- [20] X. Chen, L. Wang, and J. Xu (1999). TLD technique for reducing ice-induced vibration on platforms. *Journal of Cold Region Engineering* 13, 139-152.
- [21] Q. Jin, X. Li, N. Sun, J. Zhou, and J. Guan (2007). Experimental and numerical study on tuned liquid dampers for controlling earthquake response of jacket offshore platform. *Marine Structures* 20, 238-254. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2007.05.002>.
- [22] M. R. Chenaghloou, A. R. M. Gharabaghi, and M. Mohasel (2021). Dynamic response control of offshore jacket platforms. *12<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering*, 1-8.
- [23] Det Norske Veritas (2023). DNV-ST-N001, Marine operation and marine warranty.
- [24] L. M. Masturi, Rildova, and G. K. Maldini (2025). Dynamic response of a jacket lower module in the decommissioning lifting operation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* Vol. 1464, 012034. ISSN: 1755-1315. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1464/1/012034>.

- [25] Global Wind Energy Council. Global wind report 2016. Networks 2017. <http://gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2016/#>.
- [26] L. Y. Pao and K. E. Johnson (2009). A tutorial on the dynamics and control of wind turbines and wind farms. American Control Conference 2009, 2076-2089.
- [27] J. M. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott (2009). Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA.
- [28] K. Wei, A. T. Myers, and S. R. Arwade (2017). Dynamic effects in the response of offshore wind turbines supported by jackets under wave loading. *Engineering Structures* 142, 36-45. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.074>
- [29] S. Rodriguez, C. Restrepo, G. Katsouris, R. T. Pinto, M. Soleimanzadeh, P. Bosman, and P. Bauer (2016). A Multi-Objective Optimization Framework for Offshore Wind Farm Layouts and Electric Infrastructures. *Energies* 9, 216. <https://doi.org/10.3390/en9030216>.
- [30] S. J. H. Hutauruk (2025). Stability and Global Motion Analysis for Wind Turbine with Adjustable Clump Weight During Installation. Tugas Akhir, Program Studi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung.
- [31] H. Liu, V. Krishna, J. L. Leung, T. Reindl, and L. Zhao (2018). Field experience and performance analysis of floating PV technologies in the tropics. *Progress in Photovoltaics*, 26, pp. 957-967. <https://doi.org/10.1002/pip.3039>
- [32] O. Delbeke, J.D. Moschner, and J. Driesen (2023). The complementarity of offshore wind and floating photovoltaics in the Belgian North Sea, an analysis up to 2100. *Renewable Energy*, 218, Article 119253. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119253>
- [33] D. Zhang, H. Tian, Z. Yuan, S. Yu, J. Du, and H Li (2025). Dynamic characteristics of a novel floating offshore photovoltaic system with flexible rope-net connection. *Ocean Engineering* 342, 123155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123155>
- [34] R. Cazzaniga (2020). Floating PV Structures. Chapter in *Floating PV Plants*, Elsevier. 33-45.



# CURRICULUM VITAE



Nama : Rildova  
Tempat/tgl lahir : Pasaman / 1 April 1970  
Kel. Keahlian : Teknik Lepas Pantai  
Alamat Kantor : Program Studi Teknik Kelautan,  
Institut Teknologi Bandung,  
Gedung TP Rahmat lantai 3,  
Jl. Ganesa 10, Bandung.  
Nama Istri : Refinda  
Nama Anak : Faza Muhammad Rida  
Adila Rildova  
Wafiy Addin Rildova  
Nura Mubina Rildova

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. Sekolah Dasar Adabiah, Padang, 1982.
2. Sekolah Menengah Pertama Adabiah, Padang, 1985.
3. Sekolah Menengah Atas Negeri 2, Padang, 1988.
4. Sarjana, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, 1993.
5. Magister, Jurusan Teknik Sipil, penguatan Rekayasa Struktur, Institut Teknologi Bandung, 1996.
6. Ph.D. in Engineering Mechanics, Department of Engineering Science and Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, USA, 2004.
7. Program Profesi Insinyur, Subprodi Teknik Kelautan, Institut Teknologi Bandung, 2020.

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Dosen pada Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan / Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, 1997-sekarang.
2. Manajer Program Magister Teknik Kelautan, FTSL, 2012-2013.
3. Wakil Kepala Unit Layanan Pengadaan Barang/Jasa, 2014.
4. Wakil Direktur, Direktorat Logistik, 2016-2019.
5. Sekretaris Senat Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, 2018-2023.
6. Sekretaris Komisi II, Senat Akademik ITB, 2019-2024.
7. Anggota Senat Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, 2023-2025.

8. Ketua Kelompok Keahlian Teknik Lepas Pantai, FTSL, 2023-2025.
9. Ketua Program Studi Sarjana Teknik Kelautan, 2025-2027.

### **III. RIWAYAT KEPANGKATAN**

1. Penata Muda, III/a, 1 Februari 1997.
2. Penata, III/c, 1 Oktober 2010.
3. Penata Tk. I, III/d, 1 April 2015.
4. Pembina, IV/a, 1 April 2024.

### **IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL**

1. Asisten Ahli, 1 Januari 2001.
2. Lektor Kepala, 1 April 2010.
3. Guru Besar, 1 Desember 2024.

### **V. KEGIATAN PENELITIAN**

1. Study Numerik dan Eksperimen Fenomena Sloshing Pada Cairan Suhu Elevated, Refrigerated dan Cryogenic Dalam Tangki.
2. Dynamic Load Contributions on Decommissioning Jacket Lifting
3. Desain Dermaga Apung di Pulau Parit, Kepulauan Riau.
4. Pengaruh Seabed Subsidence pada Keandalan Struktur Anjungan Lepas Pantai di Perairan Laut Jawa
5. Faktor Keamanan Fatigue untuk Anjungan Braced Monopod di Laut Natuna, Laut Jawa dan Selat Makassar berdasarkan Analisis Keandalan
6. Pengembangan Material Ramah Lingkungan Berbahan Dasar Rami untuk Struktur Pelindung Pantai di Indonesia
7. Beban Uplift Gelombang pada Struktur Dermaga Pelabuhan
8. Sustainable Geobag Material
9. Aplikasi Tuned Mass Damper Untuk Perpanjangan Masa Layan Struktur Jacket Platform
10. Aplikasi Tuned Mass Damper Untuk Mereduksi Respons Struktur Jacket Platform Akibat Gelombang

### **VI. PUBLIKASI**

1. L. M. Masturi, Rildova, and G. K. Maldini (2025). Dynamic response of a jacket lower module in the decommissioning lifting operation.

IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1464, 012034. ISSN: 1755-1315. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1464/1/012034>

2. L. M. Masturi, Rildova, and R. P. Siahaan (2025). Wave parameter selection criteria in spectral fatigue analysis four legs fixed platform. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1464, 012035. ISSN: 1755-1315. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1464/1/012035>
3. N. Yuanita, M. Abednego, R. Rabbani, E. Gunawan, Rildova, R. Fagmi, and A. Kurniawan (2024). Cost estimation comparison between natural and synthetic fibers textile for temporary geobag-dyke structure in coastal protection systems. In: Phillips, M.R., Al-Naemi, S., and Duarte, C.M. (eds.), *Coastlines under Global Change: Proceedings from the International Coastal Symposium (ICS) 2024 (Doha, Qatar)*. Journal of Coastal Research, Special Issue No. 113, pp. 809-813. Charlotte (North Carolina), ISSN 0749-0208.
4. Rildova, D. Kusumastuti, M. Suarjana, and S. S. Mulyadi (2024). Lessons Learned from Recent Earthquakes in Indonesia: Research on Confined Masonry Structures and Improvement of Building Permit Procedures. Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering, Milan, Italy, 1-5 July 2024.
5. Rildova, N. Yuanita, A. Kurniawan, K. Kahdar, Mardiyati, R. M. F. Fagmi, E. Gunawan, and R. H. Rabbani (2024). Application of ramie-based eco-friendly material in coastal protection structures in Indonesia: feasibility study focusing on strength and biodegradability. *International Journal of Sustainable Engineering*, 17:1, 1-12, DOI: <https://doi.org/10.1080/19397038.2024.2346367>
6. P. B. S. S. Sidabalok dan Rildova (2024). Beban Vertikal Gelombang pada Deck Dermaga di Pelabuhan Marore, Provinsi Sulawesi Utara. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 31, No. 1, ISSN 0853-2982. DOI: <https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.1.12>
7. Paramashanti, Rildova, M. F. Hermanto, and N. Nandalianadhira (2023). Determination of LRFD Environmental Load Factors of Offshore Platform in the North of Java Sea and Makassar Strait.

International Journal of Geomate, Vol. 25, No. 111. ISSN: 2186-2990.  
DOI: <https://doi.org/10.21660/2023.111.4010>

8. Hendriyawan, V. Anggara, D. Tami, I. N. Hamdan, Rildova, and F. P. Bakti (2023). Effects of Prior Footprints on the Bearing Capacity of Spudcan Foundations: A Case Study. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1249, 012032. ISSN: 1755-1315. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1249/1/012032>
9. Hendriyawan, D. D. Aditramulyadi, R. L. Tawekal, and Rildova (2022). Development of seismic map for offshore platform design in Indonesia, case study of the North Coast of Java. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1065, 012033. ISSN: 1755-1315. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012033>
10. Paramashanti, Rildova, V. N. B. Sucipto, and A. Kurniawan (2022). Influence of random variable on reliability index of braced monopod platform based on fatigue analysis in Madura North Java Sea. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Vol. 1065, 012026. ISSN: 1755-1315. .  
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012026>
11. E. Lim, D. Kusumastuti, Rildova, M. Asneindra, and S. S. Mulyadi (2021). Performance based evaluation of an existing continuous reinforced concrete bridge – a case study. E3S Web of Conference Vol. 331, 05008. ISSN: 2267-1242. .  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202133105008>
12. F. Zahra, Rildova, S. M. Adiyastuti, and F. Falahi (2019). Preliminary study on tuned mass damper utilization to reduce wave-induced vibration of jacket platforms. International Journal of Structural Integrity, Vol. 10 No. 1. ISSN: 1757-9864. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJSI-03-2018-0015>
13. A. Juan, Paramashanti, Rildova, and H. Setiawan (2018). Design and reliability analysis of accommodation work barge mooring configuration at a tension leg platform in Makassar Strait, Indonesia. MATEC Web of Conferences 270, 01003. ISSN: 2262-236X. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201927001003>

14. Arianta, R. L. Tawekal, A. Taufik, and Rildova (2017). API 5L X65 Material Elastic Modulus Degradation on Springback of Dent. Proceedings of the Third International Conference on Science, Technology, and Interdisciplinary Research, September 18-20, 2017, Bandar Lampung, Indonesia, Paper no. 592.
15. D. Kusumastuti, M. Suarjana, F. W. Prasetyo, and Rildova. (2016). Experimental Study of Confined Masonry Wall with Opening under Cyclic Load. Proceedings of the 3rd International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation, Nusa Dua, Bali, August 1-2, 2016.
16. Arianta, R. L. Tawekal, A. Taufik, and Rildova (2015). Determination of Geometry Factor of Crack in Dented API 5L X65 Pipeline Using Finite Element. International Journal of Scientific & Engineering Research, 6: 1343-1349.
17. Arianta, R. L. Tawekal, A. Taufik, and Rildova (2013). Study of Residual Stress of Dented Steel Plates. Proceedings of the Second International Conference on Sustainable Infrastructure and Built Environment (SIBE2013). Volume II, November 19-20, 2013, Bandung, Indonesia, ISBN 978-979-98278-4-5.
18. Rildova, D. Kusumastuti, M. Suarjana, and K. S. Pribadi (2012). Experimental Study on the Behaviour of Plastered Confined Masonry Wall under Lateral Cyclic Load. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, September 24-28, 2012. ISBN: 978-1-63439-651-6.
19. M. Suarjana, D. Kusumastuti, K. S. Pribadi, Rildova, and T. H. Lie (2012). Structural Analysis of Typical Confined Masonry Structure. Proceedings of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, September 24-28, 2012. ISBN: 978-1-63439-651-6.
20. W. Wijaya, D. Kusumastuti, M. Suarjana, Rildova, and K. S. Pribadi (2011). Experimental Study on Wall-Frame Connection of Confined Masonry Wall. Procedia Engineering 14, 2094-2102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.263>

21. Rildova and D. Kusumastuti (2008). Effect of structural variation on the performance of MTMD as a seismic response control. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008, Paper No. 11-0091.
22. D. Kusumastuti, K. S. Priyadi, and Rildova (2008). Reducing earthquake vulnerability of non-engineered buildings: Case study of retrofitting of school building in Indonesia. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008, Paper No. S18-029.
23. K. S. Priyadi, D. Kusumastuti, and Rildova (2008). Learning from recent Indonesian earthquakes: An overview to improve structural performance. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, October 12-17, 2008, Paper No. 01-1019.
24. Rildova and D. Kusumastuti (2007). Application of multiple tuned mass dampers in reducing seismic response of buildings. Proceedings of the 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering (8PCEE), Singapore, December 5-7, 2007, Paper No. 241.
25. Rildova, D. Kusumastuti, and N. Handayani (2007). Optimal placement of multiple tuned mass dampers to improve structural performance of buildings under earthquake excitation. Proceedings of the 1st European Asian Conference on Civil Engineering (EACEF), Lippo Karawaci, September 25-26, 2007, C123-C130.
26. D. Kusumastuti and Rildova (2006). Seismic performance of structures with multiple tuned mass dampers. Proceedings of the Tenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Bangkok, Thailand, August 3-5, 2006, Vol 7: 89-94.
27. Rildova and M. P. Singh (2006). Seismic protection of counterweight-rails in elevators in buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35: 385-394. <https://doi.org/10.1002/eqe.521>

28. Rildova, and M. P. Singh (2005). Acceleration feedback-based active and semi-active response control of rail-counterweight systems of elevators. *Shock and Vibration*, 12: 435-448. DOI: <https://doi.org/10.1155/2005/130907>
29. M. P. Singh and Rildova (2004). Seismic protection for rail-counterweight system in elevator, Third China-Japan-US Symposium on Structural Health Monitoring and Control (Hongnan Li, Hui Li, and Guoxin Wang, eds.), Dalian, China, October 13-16, 2004, 81-84.
30. Rildova and M. P. Singh (2004). Acceleration-feedback seismic response control of rail-counterweight system in elevators. Proceedings of International Symposium on Network and Center-Based Research for Smart Structures Technologies and Earthquake Engineering (SE04) (E. Tachibana, B.F. Spencer Jr., and Y. Mukai, eds.), Osaka, Japan, July 6-9, 2004, Dalian University Technology Press, 133-138.
31. M. P. Singh and Rildova (2004). Seismic countermeasures for rail-counterweight system in elevators. Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 2825.
32. M. P. Singh, Rildova, and L. E. Suarez (2004). Non-linear seismic response of the rail-counterweight system in elevators in buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 33: 249-270. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.347>
33. Rildova, and M. P. Singh (2003). Seismic fragility analysis and performance improvement of elevators in building structures, ATC-29-2 Seminar on Seismic Design, Retrofit, and Performance of Nonstructural Components in Critical Facilities, Newport Beach, CA, October 23-24, 2003.
34. Rildova (2002). Seismic performance of rail-counterweight systems of elevators. MCEER-Student Leadership Council Annual Retreat, Buffalo, NY, August 2-4, 2002.

35. Rildova, M. P. Singh, and L. E. Suarez (2002). Seismic performance evaluation of elevator systems in buildings. Proceedings of the 7th US National Conference on Earthquake Engineering, Boston, MA, July 21-25, 2002.
36. M. P. Singh and Rildova (2002). Seismic response of elevators in buildings and their sensor needs, Proceedings of the US-Europe Workshop on Sensors and Smart Structures Technology (L. Faravelli and B. F. Spencer, eds.), Como and Somma Lombardo, Italy, April 12-13, 2002, John Wiley & Sons, pp. 97-102.
37. M. P. Singh, Rildova, and L. E. Suarez (2002). Seismic behavior of rail-counterweight systems of elevators in buildings. Technical Report MCEER-02-0002, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York, NY.
38. M. P. Singh, L. E. Suarez, and Rildova (2002). Seismic response of rail-counterweight systems in elevators. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31: 281-303. DOI: <https://doi.org/10.1002/eqe.109>
39. M. P. Singh and Rildova (2000). Seismic protection of some nonstructural components in hospitals, Proceedings of the 2nd MCEER Workshop on Mitigation of Earthquake Disaster by Advanced Technologies (MEDAT-2) (M. Bruneau and D. J. Inman, eds.), Las Vegas, NV, November 2000.
40. M. P. Singh, L. E. Suarez, and Rildova (1999). Seismic protection of equipment by rolling isolators. 1999 ASME Applied Mechanics and Materials Conference, Blacksburg, VA, June 27-30, 1999.

## **VII. PENGHARGAAN**

1. Satyalancana Karya Satya X, 2014.
2. Satyalancana Karya Satya XX, 2019.
3. Penghargaan Bidang Pendidikan, Institut Teknologi Bandung, 2024.

## **VIII. SERTIFIKASI**

1. Sertifikasi Dosen, Departemen Pendidikan Nasional, 2011.
2. Sertifikat Ahli Pengadaan Nasional, Lembaga Kebijakan Pengadaan Barang/Jasa Pemerintah, 2013.
3. Sertifikat Kompetensi Ahli Teknik Dermaga – Jenjang 9, Badan Nasional Sertifikasi Profesi, 2022.



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

### Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532  
🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    FgbITb    FGB\_ITB  
📍 @fgbitb\_1920    Forum Guru Besar ITB

