



## LITERATURE REVIEW : EFISIENSI PERANGKAT TUNED MASS DAMPER (TMD) UNTUK MEREDUKSI RESPON DINAMIS JEMBATAN GANTUNG

Zafira Jovita Bayuyudo\*, Hilda Febriyani Pratiwi, Istiqomah

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

<sup>\*)</sup>Corresponding author, email: [zafirajovitaaa@upi.edu](mailto:zafirajovitaaa@upi.edu)

### ABSTRACTS

*Suspension bridges, as one type of vital infrastructure with long spans, often withstand challenges in the form of dynamic vibrations caused by pedestrian loads, vehicles, wind, or earthquakes. These vibrations can cause problems ranging from discomfort to structural damage. One effective solution to reduce these vibrations is to use a Tuned Mass Damper (TMD). TMD is a passive device designed to reduce dynamic response by adjusting the mass, springs, and dampers, thereby increasing the stability and performance of the bridge. This paper uses a literature study method with the aim of analyzing the TMD reduction system on the dynamic response of suspension bridge structures and to determine the efficient device parameters for reducing the dynamic response of the structure. Through theoretical understanding and literature studies, it is obtained that TMD can significantly increase the damping ratio of the structure, although its performance is highly dependent on design parameters such as mass ratio, tuning frequency, and damping ratio. Parameter analysis shows that increasing the distance factor significantly improves the local performance of TMD, TMD tuning errors can significantly reduce its effectiveness so that there is an analysis of the effectiveness of each parameter.*

### ARTICLE INFO

**Article history:**

Submitted/Received: 7 November 2024

First Revised: 2 Desember 2024

Accepted: 25 Desember 2024

First Available online: 31 Desember 2024

Publication Date: 01 Januari 2025

**Keywords:**

Damping Efficiency, Design Parameters, Dynamic Vibration, Suspension Bridge, Tuned Mass Damper.

## 1. PENDAHULUAN

Jembatan adalah salah satu infrastruktur vital yang berperan dalam mendukung pertumbuhan ekonomi di Indonesia (Mahardika, et. al., 2017). Dalam beberapa tahun terakhir, upaya pembangunan jembatan terus dilakukan untuk meningkatkan atau memperluas aksesibilitas ke berbagai wilayah. Pembangunan ini tidak hanya mencakup jembatan dengan bentang pendek, tetapi juga jembatan dengan bentang panjang (Riyono, et. al., 2018). Dalam berbagai desain jembatan, jembatan gantung dikenal karena kapasitasnya untuk menjangkau jarak yang sangat jauh, sering kali menjadi pilihan utama untuk menghubungkan titik-titik yang jauh melalui bentang struktural yang panjang (Lavassani, et. al., 2023). Namun, struktur jembatan gantung ini sangat rentan terhadap beban dinamis (Pourzeynali, et. al., 2017). Jembatan bentang panjang bersifat fleksibel dan redamannya rendah, sehingga rentan bergetar akibat beban dinamis (Fujino, et. al., 2010).

Dalam merencanakan sebuah jembatan, terdapat beberapa aspek yang harus diperhatikan, antara lain kriteria kekuatan (*strength*), ketahanan terhadap kelelahan material (*fatigue*), dan kemampuan layanan (*serviceability*). Selain itu ada aspek lainnya yang perlu diperhatikan yaitu tinjauan terhadap getaran struktur, khususnya untuk jembatan bentang panjang. Getaran pada jembatan gantung dapat ditimbulkan eksitasi dinamik dari pejalan kaki, kendaraan bermotor, angin, ataupun gempa. Getaran yang terjadi dapat menyebabkan ketidaknyamanan sampai dapat menyebabkan kerusakan yang bersifat katastrofik (Riyono, et. al., 2018). Salah satu cara yang dapat digunakan untuk mereduksi getaran yang terlalu besar, yaitu menggunakan peredam. Beberapa jenis peredam yang digunakan yaitu getaran kontrol aktif (*Active Vibration Control*), getaran kontrol pasif (*Passive Vibration Control*), getaran kontrol semi – aktif (*Semi-active Vibration Control*), dan getaran kontrol hibrida (*Hybrid Vibration Control*) (Zoltowski, et. al., 2022).

Pada jenis peredam getaran kontrol aktif, reduksi getaran memanfaatkan sifat material yang mampu menyerap dan menghilangkan energi getaran. Sistem getaran kontrol semi – aktif memerlukan energi eksternal, bukan untuk secara langsung menahan gaya gempa, melainkan untuk mengubah karakteristik struktur. Sedangkan, sistem kontrol pasif adalah sumber daya eksternal tidak diperlukan untuk pengoperasian, perangkat kontrol pasif memberikan gaya sebagai respons terhadap gerakan struktur. Sistem kontrol pasif saat ini diterima dengan baik, meskipun secara karakteristik disesuaikan dengan gerakan dinamis tertentu dan efektivitasnya (Ghaedi, et. al., 2017). Selain itu, terdapat sistem getaran kontrol hibrida yang mengkombinasikan antara sistem aktif dan pasif. Keunggulan dari sistem ini adalah bahwa ketika gaya kontrol eksternal tidak tersedia, sistem pasif tetap dapat berfungsi secara mandiri (Gkatzogias, et. al., 2016).

Aplikasi sistem kontrol pasif dalam rekayasa jembatan telah menarik banyak perhatian dalam hal mengusulkan perangkat kontrol yang inovatif. Sistem kontrol pasif telah terbukti

efektif dalam mengurangi getaran pada kabel jembatan karena sistem kontrol dapat disesuaikan untuk rasio redaman maksimum (Lee, et. al., 2022).

Penelitian mengenai sistem kontrol menggunakan peredam massa pada struktur seperti bangunan yang dianalisis terhadap 208 struktur diseluruh dunia, didapatkan bahwa sebanyak 63% dari total jumlah sistem menggunakan peredam massa *Passive Tuned Mass Damper* (PTMD) (Koutsoloukas, et. al., 2022). *Tuned Mass Damper* (TMD) secara umum terdiri dari massa sekunder dengan pegas dan elemen peredam, yang menyediakan histeresis yang bergantung pada frekuensi yang secara efektif meningkatkan peredaman pada struktur primer selama tetap disetel ke mode pertama yang terakhir, misalnya pada bangunan dan jembatan (Gkatzogias, et. al., 2016).

Penelitian yang dilakukan mengenai penerapan TMD di jembatan gantung sampai saat ini hanya sedikit, terutama untuk pengendalian respons seismik dan data saat ini menunjukkan bahwa TMD tidak memadai untuk penekanan gerakan seismik (Lee, et. al., 2022). Beberapa studi telah mengonfirmasi keefektifan TMD dalam mengurangi getaran jembatan (Matin, et. al., 2022). Sehingga, pada studi literatur ini difokuskan untuk menganalisis sistem reduksi TMD terhadap respon dinamik struktur jembatan gantung dan untuk mengetahui parameter perangkat yang efisien untuk mereduksi respon dinamik struktur.

## 2. METODE

Metode yang digunakan dalam kajian ini adalah studi literatur dengan menelaah sumber – sumber tertulis jurnal ilmiah. Metode studi literatur dilakukan dengan tujuan untuk menemukan teori-teori yang relevan dengan permasalahan yang sedang diteliti sebagai bahan tujuan pembahasan hasil kajian.

Hasil kajian diambil dari jurnal ilmiah dengan judul yang berjudul *Passive Control of Ultra-Span Twin-Box Girder Suspension Bridges under Vortex-Induced Vibration Using Tuned Mass Dampers: A Sensitivity Analysis* yang membahas mengenai parameter – parameter yang efisien terhadap perangkat TMD dengan peninjauan variasi torsi maksimum pada kondisi faktor jarak tertentu dalam kaitannya dengan rasio massa, rasio redaman dan rasio frekuensi dan jurnal-jurnal ilmiah terkait TMD sebagai *passive mass damper* dan menemukan keterkaitan antara parameter rasio massa, rasio redaman dan rasio frekuensi terhadap reduksi respon dinamis.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Artikel yang digunakan sebagai studi literatur dalam artikel ini disajikan dalam Tabel 1.

DOI:

Tabel 1. Jurnal Ilmiah Mengenai Peredam Massa

No.	Penulis	Tahun	Judul	Hasil
1	Winarputro Adi Riyono dan Tommy Virlianda Warganegara	2018	Peredam Pasif Untuk Pilon Jembatan Gantung Terhadap Beban Gempa Pada Tahap Konstruksi	Penggunaan peredam massa lebih efektif untuk meredam vibrasi akibat beban dinamik dibandingkan peredam viscous.
2	Seyed Hossein Hosseini Lavassani, Denise-Penelope N. Kontoni, Hamed Alizadeh, Vahidreza Gharehbaghi	2023	Passive Control of Ultra-Span Twin-Box Girder Suspension Bridges under Vortex-Induced Vibration Using Tuned Mass Dampers: A Sensitivity Analysis	Penggunaan TMD dengan parameter optimal dapat secara efektif mengontrol VIV torsional pada jembatan suspensi ultra-span.
3	Randi Nøhr Møller, Steen Krenk, Martin N. Svendsen	2019	Damping System For Long-Span Suspension Bridges	Sistem peredam untuk jembatan suspensi bentang panjang secara efektif meningkatkan stabilitas penyesuaian posisi.
4	Lefteris Koutsoloukas, Nikolaos Nikitas, Petros Aristidou	2022	Passive, Semi-Active, Active And Hybrid Mass Dampers: A Literature Review With Associated Applications On Building-Like Structures	Dari analisis 208 struktur diseluruh dunia dengan penggunaan peredam massa, 63% dari total jumlah sistem menggunakan peredam massa Passive Turned Mass Damper (PTMD).
5	S. Pourzeynali, A. Bahar, S. Pourzeynali	2017	Vertical Vibration Control Of Suspension Bridges Subjected To Earthquake By Semi-Active Mr Dampers	Kontrol getaran vertikal jembatan suspensi menggunakan MR dampers dengan mengusulkan tiga model paling efektif.
6	Deni Ariadi	2014	Optimasi Tuned Mass Damper Pada Bangunan Di Daerah Gempa Menggunakan Algoritma Genetika	Analisis menunjukkan bahwa peningkatan rasio massa TMD mengurangi frekuensi rasio dan meningkatkan rasio redaman.
7	Wong Foek Tjong, Takim Andriyono, Robby Sumendap, Freddy Gunawan	2003	Penggunaan Tuned Mass Damper Pada Struktur Studi Efektifitas Gedung Dalam	Efektivitas Tuned Mass Dampers (TMD) dalam meredam respons bangunan terhadap gempa sangat

				Mereduksi Respons Dinamik Akibat Beban Seismik	bergantung pada jenis gempa, periode dasar struktur, dan jumlah lantai.
8	Xinzhong Chen, Ahsan Kareem	2003	Efficacy of Tuned Mass Dampers for Bridge Flutter Control	Desain optimal Tuned Mass Damper (TMD) sangat bergantung pada karakteristik dinamis struktural dan aerodinamis jembatan.	
9	Dedi Suryadi, M. Rasyid Ridlo, Novalio Daratha, Indra Agustian	2021	Pengaruh Tuned Mass Damper (TMD) Terhadap Respons Getaran pada Struktur Bangunan	Tuned Mass Damper (TMD) dengan rasio TMD 12% md dan 10% kd dapat mereduksi getaran struktur sebesar 75,19% pada gangguan 11,5 rad/s.	
10	Jati Sunaryati, Rudy Ferial, Dicky Febri Hadi	2009	Studi Efektifitas Penggunaan Tuned Mass Damper Untuk Mengurangi Pengaruh Beban Gempa Pada Struktur Bangunan Tinggi Dengan Layout Bangunan Berbentuk "U"	Faktor-faktor yang mempengaruhi perilaku struktur dengan Tuned Mass Damper (TMD) meliputi penempatan TMD, persentase massa, dan jumlah TMD dalam mereduksi respons struktur seperti gaya geser, momen, dan deformasi.	

### 3.1. Hasil

Jembatan gantung adalah jenis jembatan yang memiliki bentang lebih besar daripada bentuk jembatan lainnya, karena bentangnya semakin besar, strukturnya menjadi lebih fleksibel (Pinkal, et. al., 2017). *Tuned Mass Damper* (TMD) adalah perangkat yang dipasang pada struktur untuk meminimalkan getaran. Pada perangkat ini, massa yang relatif kecil dipasang pada pegas yang diredam yang disetel untuk beresilasi keluar fase dengan frekuensi alami struktur, mengurangi amplitudo maksimum struktur primer dan menghilangkan energi getaran. Penerapan TMD yang terkenal di gedung pencakar langit adalah TMD bulat terbesar di dunia dari Taipei 101 yang difungsikan untuk menahan beban angin pada bangunan atas setinggi 508m. TMD telah terbukti efektif terhadap eksitasi harmonik dan angin dan berhasil diterapkan di gedung, menara, dan cerobong asap di seluruh dunia untuk pengaturan respons angin. TMD paling ideal untuk struktur dengan peredaman ringan dan khususnya efektif dalam gerakan tanah akibat gempa bumi yang

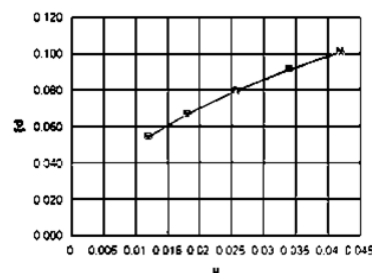
DOI:

Bayuyudo et al., **Literature Review: Efisiensi Perangkat *Tuned Mass Damper* ...** | 22 berlangsung lama (Lee, et. al., 2022). Namun, kinerja TMD sangat bergantung pada parameternya (massa, frekuensi, rasio peredaman, dll.) dan dapat menjadi kurang optimal jika tidak disetel dengan benar (Lee, et. al., 2022).

Silinder hidrolik penggerak sebagai peredam pada jembatan tidak hanya dapat mengurangi amplitudo getaran tetapi juga dapat mengubah rentang getaran bebas. Persamaan gerak pada persamaan (1) menunjukkan bahwa distribusi kekakuan (K), redaman (C), dan massa (M) memiliki dampak yang signifikan terhadap perilaku dinamis struktur.

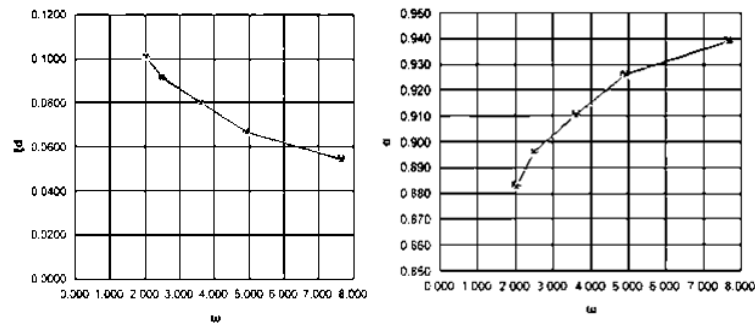
$$Mx(t) + Cx(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

Dengan demikian, metode untuk mengurangi getaran jembatan adalah dengan memodifikasi karakteristik dinamis dalam tahap desain (Zoltowski, et. al., 2022). Sistem kontrol pasif efektif dalam mengendalikan getaran tetapi penyesuaian frekuensi natural menara berubah seiring dengan peningkatan ketinggian selama konstruksi (Inoue, et. al., 2025). Hal ini dibuktikan dengan grafik hasil optimasi rasio massa yang diplot terhadap frekuensi rasio serta grafik rasio massa diplot terhadap rasio redaman TMD, kemudian diperoleh grafik sebagai berikut :



Gambar 1. Rasio Massa dan Rasio Redaman TMD  
Sumber : Ariadi (2014)

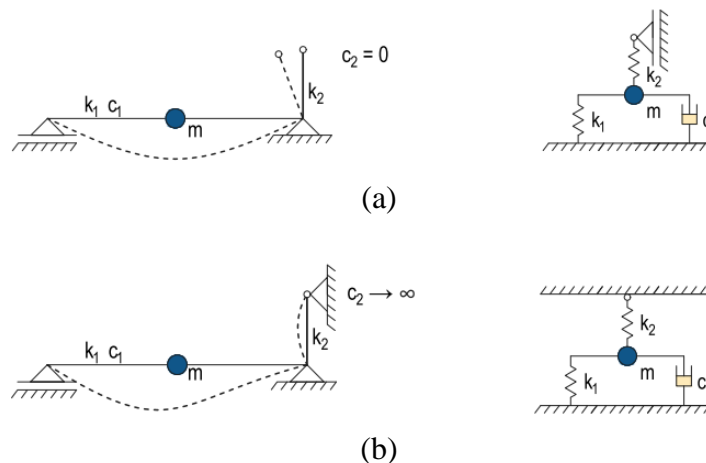
Pada Gambar 1, menunjukkan bahwa ketika rasio massa meningkat maka rasio redaman TMD naik seiring meingkatnya rasio massa. Kemudian, untuk melihat hubungan rasio redaman dengan frekuensi alami, didapatkan hasil pada gambar 2(a) bahwa frekuensi alami meningkat dan rasio redaman akan menurun. Begitu pula dengan frekuensi ratio, karena frekuensi alami dan frekuensi ratio berbanding lurus, ketika frekuensi alami meningkat, maka frekuensi rasio pun meningkat yang ditunjukkan pada gambar 2(b).



Gambar 2. (a) Frekuensi Alami dan Rasio Redaman TMD (b) Frekuensi alami dan Frekuensi Rasio  
Sumber : Ariadi (2014)

Kemudian, parameter rasio massa ditinjau kembali dengan nilai kekakuan yang variatif. Setelah disimulasikan, terlihat bahwa TMD dapat dibuktikan bahwa TMD dapat mengurangi perpindahan pada struktur akibat beban gempa pada nilai kekakuan yang besar.

Cara untuk meningkatkan redaman dalam sistem tanpa perubahan signifikan pada frekuensi alami dengan mengubah rasio redaman  $c_2$  dari nilai kecil ke rentang kritis. Peningkatan nilai  $c_2$  ke “rasio overcritical” mengubah kekakuan sistem dan mengubah frekuensi alami pertama. Efek ini disertai dengan penurunan redaman karena  $c_2$  tidak lagi berfungsi sebagai peredam dalam sistem getar (Zoltowski, et. al., 2022).



Gambar 3. Pemodelan Sederhana Peredam Eksternal  
Sumber : Krzysztof, et. al. (2022)

Dimana :

$k_1, k_2$  = kekakuan internal

$c_1$  = peredam internal

$c_2$  = peredam eksternal

$m$  = massa titik

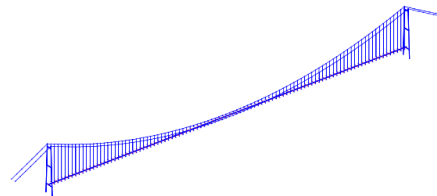
DOI:

Pada gambar 3(a) pemodelan  $c_2$  konvergen ke 0, ketika  $c_2$  sangat rendah, pegas  $k_2$  tidak dapat bekerja dan sistem tersebut merupakan masalah derajat kebebasan standar satu, di mana kekakuan sama dengan  $k_{min} = k_1$ . Pada gambar 3(b) pemodelan  $c_2$  konvergen ke tak terhingga, perpindahan  $y_2$  hampir terhalang dan sistem tersebut kembali menjadi masalah derajat kebebasan standar satu, di mana  $k_{max} = k_1 + k_2$

Kesimpulan dari 2 pemodelan tersebut menunjukkan bahwa frekuensi alami sistem dapat memodifikasi nilai  $c_2$  (redaman eksternal)

### Pemodelan Turned Mass Damper pada Jembatan

Salah satu faktor yang mempengaruhi perilaku struktur dengan Tuned Mass Damper (TMD) dalam mereduksi respons struktur adalah penempatan TMD (Sunaryati, et. al., 2009). Berdasarkan penelitian analisis efektivitas penempatan posisi TMD pada struktur, posisi TMD bekerja efektif pada posisi atas dari struktur (Suryadi, et. al., 2021). Ketidakstabilan aerodinamis jembatan diatasi oleh empat peredam yang ditempatkan dalam pengaturan simetris ganda (Moller, et. al., 2019). Karena jarak antara titik pemasangan perangkat pada tiang dan pada kabel suspensi relatif panjang, sambungan melalui kabel pra-tegangan dipertimbangkan. Sambungan kabel hanya mentransfer gaya tegangan, maka peredam perlu ditempatkan secara paralel dengan pegas pra-tegangan yang digambarkan sebagai berikut :



Gambar 4. Pemodelan Jembatan Gantung

Sumber : Moller (2019)



Gambar 5. Redaman Eksternal

Sumber : Moller (2019)

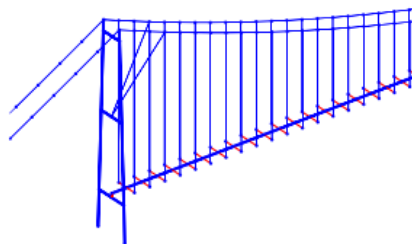


Gaya yang bekerja pada struktur akibat adanya perangkat peredam eksternal lokal seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5 adalah :

$$f_j(t) = \sum_j w_j f_j(t) \quad (2)$$

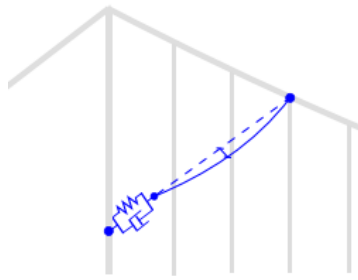
Pada persamaan (2),  $f_j(t)$  adalah besarnya gaya perangkat  $j=1-4$  dan  $w_j$  adalah vektor konektivitas perangkat redaman eksternal. Vektor konektivitas berisi nol pada semua derajat kebebasan yang tidak terkait dengan simpul pemasangan perangkat, yaitu sebagai gaya peredam dari 2 titik berbeda yang memiliki vektor tanda berlawanan. Sehingga, hasil ini menyiratkan bahwa langkah pertama untuk desain peredam adalah dengan menentukan posisi perangkat yang memberikan vektor konektivitas  $w_j$ , setelah itu diikuti oleh proses penyetalan untuk mendapatkan parameter perangkat  $k_j$  (kekakuan) dan  $c_j$  (redaman).

Konfigurasi yang diteliti secara rinci berikut ini terdiri dari empat perangkat peredam pegas paralel yang ditempatkan secara simetris di balok silang tengah tiang dan dihubungkan ke kabel suspensi utama di sambungan gantungan ketiga dengan kabel, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Perangkat tersebut dipasang di bagian tengah tiang untuk memastikan bahwa mereka bebas dari kabel gantungan. Ketinggian titik pemasangan ke tiang dipilih berdasarkan geometri tiang yang ada, dan jarak horizontal ke pemasangan kabel suspensi sesuai dengan 3% dari panjang bentang, yang untuk kabel dengan kendur akan memberikan redaman sekitar 3% pada mode kabel antisimetris pertama. Gambar 7 menunjukkan sketsa sistem kabel peredam pegas. Kabel yang menghubungkan perangkat peredam pegas paralel ke kabel suspensi utama dianggap sangat kaku dibandingkan dengan pegas, sehingga frekuensi penjepit  $\omega_\infty$  ditemukan dengan memasukkan elemen batang yang sangat kaku di antara tiang dan kabel suspensi.



Gambar 6. Posisi Damper

Sumber : Moller (2019)



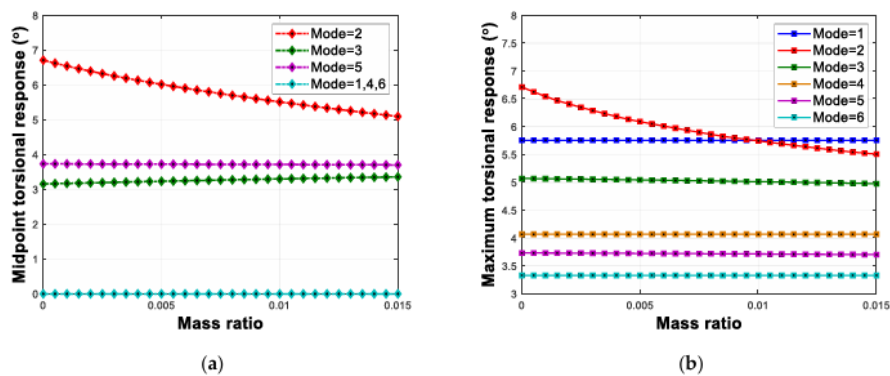
Gambar 7. Sketsa Sistem Damper

Sumber : Moller (2019)

### 3.2. Pembahasan

Efektifitas TMD dalam meredam respons sangat bervariasi, bergantung kepada jenis gempa bumi yang bekerja dan periode dasar struktur atau jumlah tingkat bangunan (Tjong, et. al., 2003). Maka dari itu, untuk melihat efektifitasnya TMD didesain terhadap suatu parameter. Parameter TMD didesain di sekitar nilai optimalnya (Chen, et. al., 2003).

Momen polar inersia massa melibatkan dua parameter utama: rasio massa dan jarak antara massa dan sumbu rotasi, yang menentukan distribusi massa di sekitar sumbu rotasi. Dalam konteks ini, jarak disebut sebagai faktor jarak ( $r$ ). Proses optimasi bertujuan untuk mencapai massa paling ringan dengan distribusi yang sesuai di sekitar sumbu rotasi. Untuk tujuan,  $r$  diasumsikan sebagai 1, dan sensitivitas rasio massa diperiksa berdasarkan deviasi standar titik tengah ( $L/2$ ) dan titik dengan respons torsi maksimum di seluruh bentang. Penambahan TMD dapat mengubah lokasi respons maksimum (Lavassani, et. al., 2023).



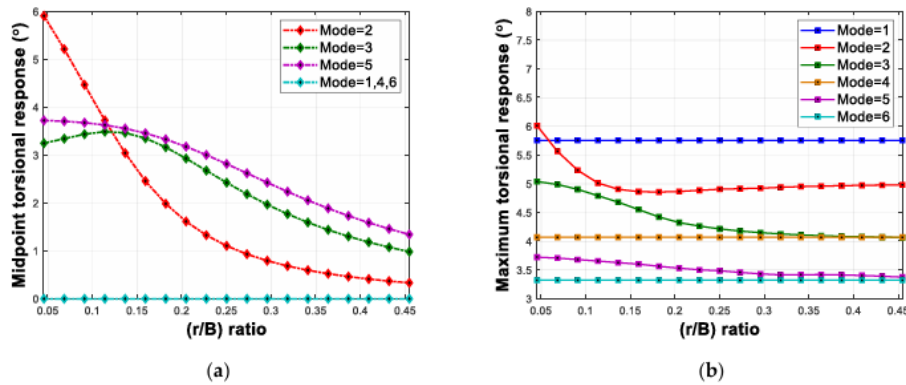
Gambar 8. Variasi Torsi Terhadap Rasio Massa Pada Bentang  $L/2$  dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 8(a) variasi torsi maksimum titik  $L/2$  terhadap rasio massa dan gambar 8(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio massa. Menurut Gambar 8, respons maksimum yang tidak terkontrol di titik tengah dan seluruh bentang sama dengan dan sama dengan 6.72 derajat. Pada Gambar 8a, dengan meningkatkan rasio massa, respons

DOI:

titik tengah dari mode kedua dikurangi dengan kemiringan yang sesuai, sedangkan respons mode lain yang sesuai tetap tidak berubah. Pada Gambar 8b, respons maksimum seluruh jembatan dalam mode kedua telah dikurangi dengan peningkatan rasio massa. Sekarang, perhitungan dilakukan dengan menyelidiki pengaruh faktor jarak. Dalam hal ini, Gambar 9 menunjukkan kelengkungan variasi torsi maksimum terhadap faktor jarak.



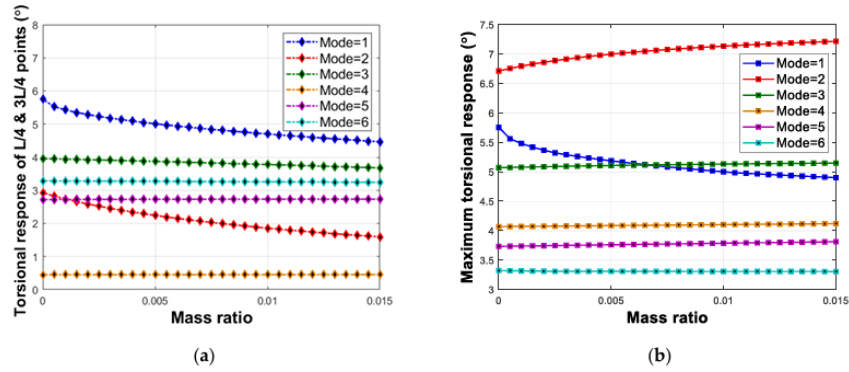
Gambar 9. Variasi Torsi Terhadap Faktor Jarak Pada Bentang  $L/2$  dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 9(a) variasi torsi maksimum titik  $L/2$  terhadap faktor jarak dan gambar 9(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap faktor jarak. Pada sumbu horizontal Gambar 9,  $r/B$ , yang menandakan rasio faktor jarak terhadap lebar dek. Rasio ini dapat memberikan pertimbangan yang lebih praktis. Gambar 9a menunjukkan respons maksimum titik tengah mode kedua, 6 derajat, menurun dengan kenaikan  $r/B$ . Gradien kelengkungan mode kedua telah menurun dengan kenaikan  $r/B$ , yang menunjukkan ada nilai tertentu bahwa setelah itu kenaikan  $r/B$  tidak terlalu efektif. Di sini, nilai yang disebutkan adalah 0.25. Kelengkungan mode tiga mirip dengan mode lima, dan sedikit peningkatan terlihat di bagian awalnya. Gambar 9b menunjukkan bahwa rentang  $r/B$  yang sesuai adalah 0,1 hingga 0.2. Seperti parameter rasio massa, kinerja lokal TMD pada nilai 93% terlalu baik dari kinerja totalnya 16%.

Perbandingan Gambar 8 dan 9 menunjukkan bahwa parameter  $r/B$  dapat mereduksi respon mode lainnya, atau sebaliknya terhadap rasio massa yang tidak dapat mengubah respon mode lainnya.

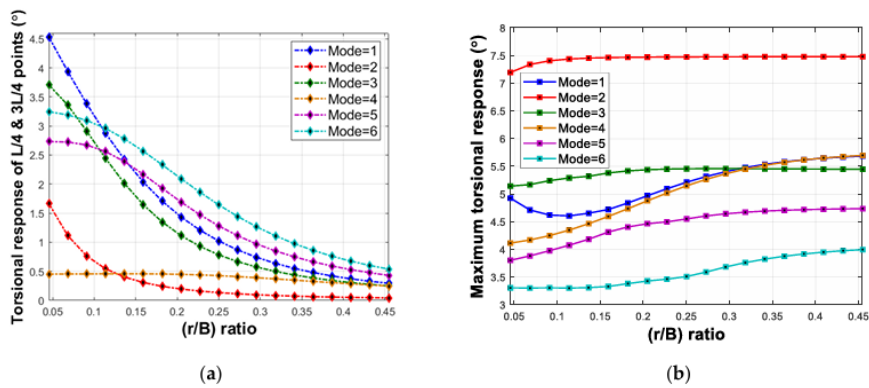
Gambar 10 dan 11 menunjukkan sensitivitas respons dalam kaitannya dengan variasi rasio massa dan faktor jarak untuk dua kondisi TMD.



Gambar 10. Variasi Torsi Terhadap Rasio Massa Pada Bentang L/4 dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

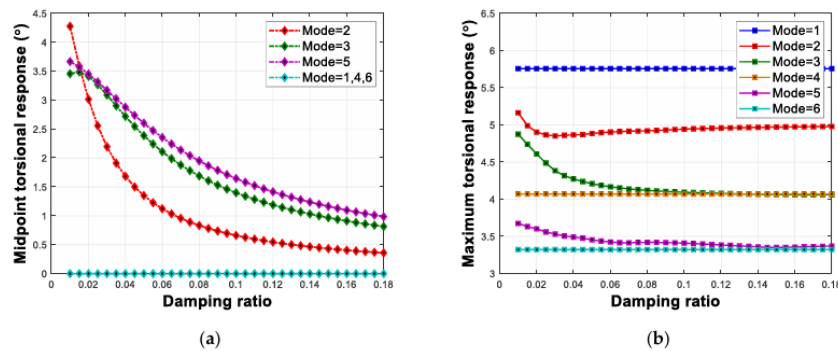
Pada gambar 10(a) variasi torsi maksimum titik L/4 dan 3L/4 terhadap rasio massa dan gambar 10(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio massa. Gambar 10 menunjukkan peran utama rasio massa dalam pengurangan respons mode pertama dan kedua yang bersesuaian. Gambar 10b menunjukkan bahwa dengan meningkatkan rasio massa, respons mode kedua diintensifkan, sedangkan respons mode pertama menurun. Oleh karena itu, dua TMD, yang terletak di titik L/4 dan 3L/4, memberikan kinerja lokal yang positif di semua mode yang dipertimbangkan; namun, total satu tidak positif untuk semua mode.



Gambar 11. Variasi Torsi Terhadap Faktor Jarak Pada Bentang L/4 dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 11(a) variasi torsi maksimum titik L/4 dan 3L/4 terhadap faktor jarak dan gambar 11(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap faktor jarak. Gambar 11a menunjukkan bahwa peningkatan faktor jarak secara signifikan meningkatkan kinerja lokal TMD untuk semua moda. Gambar 11b menunjukkan bahwa peningkatan faktor jarak terlebih dahulu mengurangi respons; namun, setelah  $r/B = 0,2$ , respons moda lain meningkat.

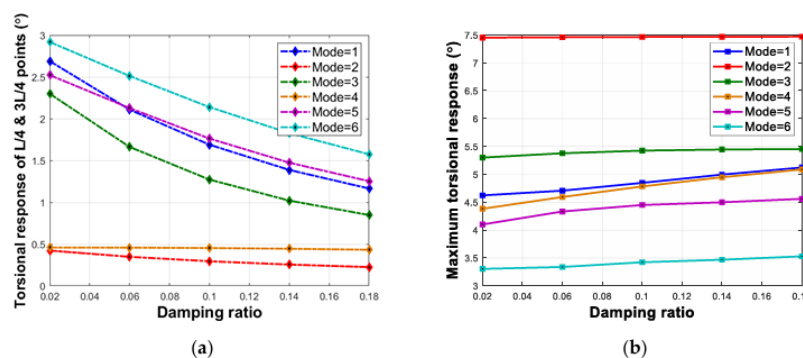


Gambar 12. Variasi Torsi Terhadap Rasio Redaman Pada Bentang L/2 dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 12(a) variasi torsi maksimum titik L/2 terhadap rasio redaman dan gambar 12(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio redaman. Gambar 12a mengungkapkan bahwa dengan meningkatkan rasio redaman, respons 2 titik yang sesuai dalam mode dua, tiga, dan lima berkurang secara signifikan. Tentu saja, gradien pengurangan respons mode kedua terlalu tinggi dibandingkan dengan yang lain dalam kisaran 0 hingga 10 persen. Gambar 12b menunjukkan bahwa efek rasio redaman pada respons maksimum seluruh jembatan terlalu rendah dibandingkan dengan titik tertentu seperti 2. Khususnya, untuk mode dua, kinerja lokal TMD adalah 90%, sedangkan totalnya adalah 7.6%. Dengan demikian, parameter rasio redaman efektif dalam kinerja lokal TMD, dan efisiensi totalnya adalah nuansa.

Seperti kondisi satu TMD, rasio redaman menghasilkan kinerja lokal yang sesuai, dan kisarannya yang sesuai adalah 0 hingga 10 persen. Gambar 13 menunjukkan sensitivitas respons dalam kaitannya dengan variasi rasio redaman untuk dua kondisi TMD.



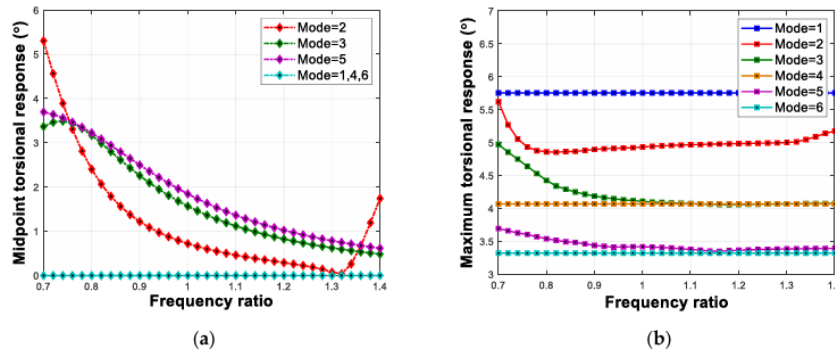
Gambar 13. Variasi Torsi Terhadap Rasio Redaman Pada Bentang L/4 dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 13(a) variasi torsi maksimum titik L/4 dan 3L/4 terhadap rasio redaman dan gambar 13(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio redaman.

DOI:

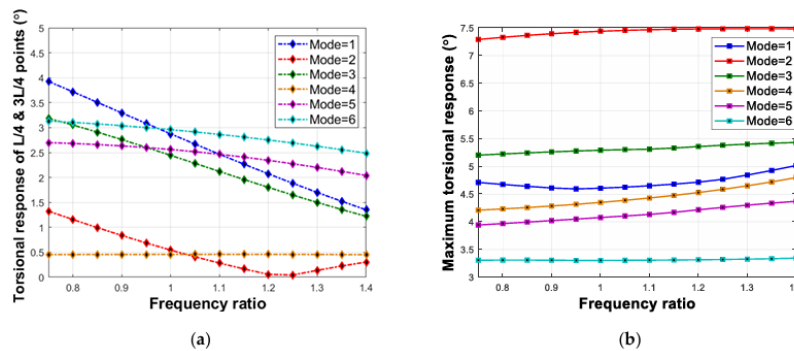
Gambar 14(a) mengungkapkan bahwa respons titik L/2 yang sesuai menurun akibat peningkatan rasio frekuensi. Bagian akhir dari kelengkungan mode kedua yang sesuai menunjukkan bahwa ketika frekuensi penyetelan menyimpang secara signifikan dari frekuensi mode, efek yang tidak menguntungkan akan muncul. Gambar 14 menunjukkan bahwa setelah  $f = 1.3\omega_2$ , respons maksimum seluruh rentang dan titik L/2 akan meningkat.



Gambar 14. Variasi Torsi Terhadap Rasio Frekuensi Pada Bentang L/2 dan Bentang Utuh

SumberS : Lavassani (2023)

Pada gambar 14(a) variasi torsi maksimum titik L/2 terhadap rasio frekuensi dan gambar 14(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio frekuensi. Gambar 15 menunjukkan sensitivitas respons terkait dengan variasi rasio frekuensi untuk dua kondisi TMD. Perlu dicatat bahwa rasio massa,  $r/B$ , dan rasio redaman masing-masing dianggap 1%, 0.2, dan 10%.



Gambar 15. Variasi Torsi Terhadap Rasio Frekuensi Pada Bentang L/4 dan Bentang Utuh

Sumber : Lavassani (2023)

Pada gambar 15(a) variasi torsi maksimum titik L/4 dan 3L/4 terhadap rasio frekuensi dan gambar 15(b) variasi torsi maksimum titik bentang utuh terhadap rasio frekuensi. Kesalahan penyetelan TMD dapat secara signifikan menurunkan efektivitasnya. Dalam hal ini, respons harus ditangani dalam rentang sekitar frekuensi mode tertentu. Gambar 14

menunjukkan respons VIV yang sesuai dalam variasi rasio frekuensi 0.7 hingga 1.4. Rasio massa,  $r/B$ , dan rasio redaman masing-masing adalah 1%, 0.2, dan 10%.

#### 4. KESIMPULAN

*Tuned Mass Damper* (TMD) adalah pendekatan kontrol mekanis pasif yang sering digunakan dalam jembatan gantung untuk mengelola getaran yang diakibatkan oleh berbagai jenis beban. Tiga parameter utama membentuk TMD adalah rasio massa, frekuensi penyetulan, dan rasio peredaman. Pada hubungan rasio massa dan rasio redaman, rasio redaman TMD akan naik seiring meingkatnya rasio massa. Kemudian, untuk melihat hubungan rasio redaman dengan frekuensi alami, didapatkan hasil bahwa frekuensi alami meningkat dan rasio redaman akan menurun. Pada suatu studi kasus, ketinggian titik pemasangan ke tiang dipilih berdasarkan geometri tiang yang ada, dan jarak horizontal ke pemasangan kabel suspensi sesuai dengan 3% dari panjang bentang. Hal ini bergantung pada gaya yang bekerja pada struktur akibat adanya perangkat peredam eksternal. Pada analisis parameter menunjukkan bahwa peningkatan faktor jarak secara signifikan meningkatkan kinerja lokal TMD, kesalahan penyetulan TMD dapat secara signifikan menurunkan efektivitasnya sehingga terdapat analisis efektivitas masing-masing parameter.

#### REFERENSI

- Ariadi, D. (2014). *Optimasi Tunedmass Damper Pada Bangunan Di Daerah Gempa Menggunakan Algoritma Genetika*. Jurnal Magister Teknik Sipil, 1-10.
- Chen, X., & Kareem, A. (2003). *Efficacy of Tuned Mass Dampers for Bridge Flutter Contro*. *Journal Of Structural Engineering*, 1291.
- Fujino, Y., Siringoringo, D. M., Nagayama, T., & Su, D. (2010). *Control, simulation and monitoring of bridge vibration—Japan’s recent development and practice*. In Proceedings of the IABSE-JSCE Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-II (pp. 61-74).
- Ghaedi, K., Ibrahim, Z., Adeli, H., & Javanmardi, A. (2017). *Invited Review: Recent developments in vibration control of building and bridge structures*. *Journal of Vibroengineering*, 19(5), 3564-3580.
- Gkatzogias, K. I., & Kappos, A. J. (2016). *Semi-active control systems in bridge engineering: a review of the current state of practice*. *Structural Engineering International*, 26(4), 290-300.
- Inoue, M., Siringoringo, D. M., Fujino, Y., & Koike, Y. (2025). *Identification of Vortex-Induced Vibration on the Osman Gazi Suspension Bridge Tower and Mitigation by an Active Mass Damper*. *Journal of Bridge Engineering*, 30(2), 04024108.
- Koutsoloukas, L., Nikitas, N., & Aristidou, P. (2022). *Passive, semi-active, active and hybrid mass dampers: A literature review*. *Developments in the Built Environment*, 100094.

DOI:

- Lavassani, S. H., Kontoni, D. P. N., Alizadeh, H., & Gharehbaghi, V. (2023). *Passive control of ultra-span twin-box girder suspension bridges under vortex-induced vibration using tuned mass dampers: A sensitivity analysis*. *Buildings*, 13(5), 1279.
- Lee, S., & Neelam, T. (2022). *Anti-seismic Technology in Suspension Bridge Designs: A Review*. *Journal of Student Research*, 11(1).
- Mahardhika, B., & Wahyuni, E. (2017). *Perencanaan Modifikasi Rangka Busur Baja pada Jembatan Pemali disertai Damper sebagai Longitudinal Stopper*. *Jurnal Teknik ITS*, 6(1), D7-D11.
- Moller, R. N., Krenk, S., & Svendsen, M. N. (2019). *Damping System For Long-Span Suspension Bridges*. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(12), e2448.
- Nasional, B. S. (2016). SNI 1725: 2016. *Pembebanan untuk jembatan*. Badan Standarisasi Nasional, 1-67.
- Pinkal, G., Sweta, P., Vipul, P., Nikunj Patel, G. P., & Scholars, R. (2017). *Study on Suspension Bridge: Analysis and Construction criteria*. *International Journal of Scientific Development and Research*, 2(4).
- Pourzeynali, S., Bahar, A., & Pourzeynali, S. (2017). *Vertical Vibration Control Of Suspension Bridges Subjected To Earthquake By Semi-Active MR Dampers*. *Scientia Iranica*, 24(2), 439-451.
- Riyono, W. A., & Warganegara, T. V. (2018). *Peredam Pasif untuk Pilon Jembatan Gantung terhadap Beban Gempa pada Tahap Konstruksi (Passive Damper for Suspension Bridge Pylon Under Earthquake Load During Construction Phase)*. *Jurnal Jalan Jembatan*, 35(1), 40-50.
- Sunaryati, J., Ferial, R., & Hadi, D. F. (2009). *Studi Efektifitas Penggunaan Tuned Mass Damper untuk Mengurangi Pengaruh Beban Gempa pada Struktur Bangunan Tinggi dengan Layout Bangunan Berbentuk "U"*. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 5(2), 13-26.
- Suryadi, D., Ridlo, M. R., Daratha, N., & Agustian, I. (2021). *Pengaruh Tuned Mass Damper (TMD) Terhadap Respons Getaran pada Struktur Bangunan*. *Semesta Teknika*, 24(2), 84-92.
- Tjong, W. F., Sumendap, R., Gunawan, F., & Andriano, T. (2003). *Studi Efektifitas Penggunaan Tuned Mass Damper Pada Struktur Gedung Dalam Mereduksi Respons Dinamik Akibat Beban Seismik*. *Civil Engineering Dimension*, 5(2), 51-62.
- Zoltowski, K., Banas, A., Binczyk, M., & Kalitowski, P. (2022). *Control Of The Bridge Span Vibration With High Coefficient Passive Damper*. *Theoretical consideration and application*. *Engineering Structures*, 254, 113781.