

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Jurnal Penelitian

Analisis Reduksi Respons Struktur terhadap Gempa Menggunakan Sistem Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)

Analysis of Structural Response Reduction to Earthquakes Using a Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) System

Ansadilla Niar Sitanggang¹, Mitsaq Addina Nisa²

¹Program Studi Rekayasa Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Esa Unggul

²Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

Email korespondensi: ansadilla@esaunggul.ac.id

INFO ARTIKEL	ABSTRAK
<p>Kata kunci :</p> <p>Inerter, Tuned Mass Damper Inerter, Respon Struktur, Kontrol Getaran, Gempa</p>	<p>Inerter merupakan elemen mekanik dua terminal yang mampu menghasilkan gaya yang sebanding dengan percepatan relatif antara kedua terminalnya sehingga dapat meningkatkan efek inersia pada suatu sistem struktur. Penggabungan inerter dengan Tuned Mass Damper (TMD) menghasilkan sistem Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) yang berpotensi meningkatkan kinerja pengendalian getaran struktur akibat gempa. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penerapan TMDI terhadap respon dinamik struktur bangunan. Optimasi parameter desain TMDI dilakukan secara numerik dengan memvariasikan rasio frekuensi (f) dan rasio redaman (ξ) berdasarkan minimisasi respon struktur berupa perpindahan. Model yang dianalisis adalah struktur gedung 12 lantai dengan pemasangan TMDI yang dihubungkan antara lantai teratas dan beberapa lantai di bawahnya. Analisis dilakukan menggunakan model MDOF 12 lantai berbasis MATLAB dengan optimasi parameter menggunakan fungsi <i>fminimax</i> dan evaluasi time-history beberapa rekaman gempa. Hasil analisis menunjukkan bahwa pemasangan TMDI yang dihubungkan hingga minimal lantai ke-6 mampu menurunkan respon struktur berupa perpindahan, percepatan, dan kecepatan masing-masing hingga sekitar 50%, 41%, dan 36% dibandingkan struktur tanpa inerter. Selain menghasilkan reduksi respon yang lebih signifikan, sistem TMDI juga memerlukan massa yang lebih kecil dibandingkan TMD konvensional. Untuk mencapai reduksi respon sekitar 20%, TMDI hanya membutuhkan massa sekitar empat kali lebih kecil dibandingkan massa TMD. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa TMDI berpotensi menjadi sistem kontrol getaran yang lebih efisien untuk meningkatkan kinerja seismik struktur bangunan.</p>
ARTICLE INFO	ABSTRACT
<p>Keywords:</p> <p>Inerter, Tuned Mass Damper Inerter, Structural Response,</p>	<p><i>An inerter is a two-terminal mechanical element capable of generating a force proportional to the relative acceleration between its terminals, thereby enhancing the inertial effect in structural systems. The integration of an inerter with a Tuned Mass Damper (TMD) forms a Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) system, which has the potential to improve vibration control performance under seismic excitation. This study aims to evaluate the effect of implementing TMDI</i></p>

Contents list available at journal.uib.ac.id**Journal of Civil Engineering and Planning**Journal homepage: <https://journal.uib.ac.id/index.php/jce>

Vibration Control, Earthquake

on the dynamic response of building structures. The optimal design parameters of the TMDI were determined numerically by varying the frequency ratio (f) and damping ratio (ξ) based on the minimization of structural displacement response. The structural model analyzed in this study is a 12-story building equipped with a TMDI connected between the top floor and several lower floors. The analysis was conducted using a 12-story MDOF model based on MATLAB, with parameter optimization performed using the fminimax function and time-history evaluation under several earthquake records. The results show that connecting the TMDI to at least the 6th floor can reduce the structural responses in terms of displacement, acceleration, and velocity by approximately 50%, 41%, and 36%, respectively, compared with the structure without an inerter. In addition to providing greater response reduction, the TMDI system requires a smaller additional mass compared with a conventional TMD. To achieve approximately 20% response reduction, the TMDI requires a mass that is about four times smaller than that required by a TMD. These findings indicate that the TMDI system has strong potential as an efficient vibration control device for improving the seismic performance of building structures.

1. Pendahuluan

Respon dinamik struktur akibat beban gempa merupakan salah satu permasalahan utama dalam perencanaan bangunan tahan gempa. Getaran struktur yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan struktural maupun nonstruktural serta menurunkan tingkat kenyamanan dan keamanan penghuni bangunan. Oleh karena itu, berbagai metode telah dikembangkan untuk mengurangi respon dinamik struktur, salah satunya melalui penerapan sistem kontrol getaran atau peredam struktur (damper).

Salah satu perangkat kontrol getaran yang paling banyak digunakan adalah *Tuned Mass Damper* (TMD). Prinsip kerja TMD adalah menambahkan massa, pegas, dan peredam yang disetel pada frekuensi tertentu sehingga dapat berosilasi berlawanan fase dengan struktur utama dan mereduksi respon getaran. Namun, efektivitas TMD sangat dipengaruhi oleh besarnya massa tambahan yang digunakan. Pada bangunan tinggi, kebutuhan massa tersebut dapat mencapai ratusan ton sehingga berpotensi meningkatkan beban gravitasi dan memengaruhi desain elemen struktural secara keseluruhan (Gutierrez Soto & Adeli, 2013).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dikembangkan elemen mekanik yang disebut inerter. Inerter merupakan elemen dua terminal yang menghasilkan gaya sebanding dengan percepatan relatif antara kedua terminalnya (Smith, 2002). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa inerter mampu menghasilkan efek inersia yang besar tanpa memerlukan penambahan massa fisik yang signifikan (Papageorgiou & Smith, 2005; Swift et al., 2013).

Penggabungan inerter dengan sistem TMD menghasilkan perangkat kontrol getaran yang dikenal sebagai *Tuned Mass Damper Inerter* (TMDI). Marian & Giaralis (2014) menunjukkan bahwa penambahan inerter pada sistem TMD dapat menghasilkan efek mass amplification sehingga kinerja reduksi respon menjadi lebih baik dibandingkan TMD konvensional. Dengan demikian, TMDI mampu menghasilkan efektivitas pengendalian yang setara atau lebih baik dengan kebutuhan massa yang lebih kecil.

Sejak diperkenalkan, berbagai penelitian telah menunjukkan efektivitas TMDI dalam meningkatkan kinerja pengendalian getaran struktur. Giaralis & Petrini (2017) menunjukkan peningkatan efektivitas

pengendalian getaran pada bangunan tinggi akibat beban angin, sedangkan De Domenico & Ricciardi (2018) menunjukkan potensi TMDI dalam meningkatkan kinerja struktur terhadap eksitasi dinamik. Kajian yang lebih luas oleh Ma et al. (2021) juga menegaskan bahwa sistem kontrol berbasis inerter memiliki potensi besar dalam mitigasi getaran bangunan karena mampu meningkatkan efek inersia tanpa memerlukan massa tambahan yang besar.

Pada aplikasi pengendalian respons seismik, TMDI menunjukkan kinerja yang menjanjikan. Patsialis et al. (2023) melaporkan bahwa TMDI yang dirancang secara optimal mampu menghasilkan reduksi respon struktur yang lebih besar dibandingkan TMD konvensional pada bangunan bertingkat yang tereksitasi gempa. Selanjutnya, Konar & Ghosh (2024) melalui kajian satu dekade perkembangan TMDI menyimpulkan bahwa sistem ini merupakan salah satu teknologi kontrol getaran yang paling prospektif untuk aplikasi struktur tahan gempa.

Meskipun demikian, kajian mengenai pengaruh konfigurasi pemasangan inerter, optimasi parameter desain, serta efektivitas TMDI terhadap berbagai karakteristik rekaman gempa pada bangunan bertingkat masih relatif terbatas. Di sisi lain, penelitian mengenai respons dinamik struktur akibat gempa masih terus berkembang dan menunjukkan pentingnya upaya reduksi respons struktur dalam perancangan bangunan tahan gempa (Felny, 2025; Zhafira et al., 2023). Oleh karena itu, penelitian mengenai penerapan TMDI pada struktur yang tereksitasi gempa masih perlu dilakukan untuk memperoleh konfigurasi dan parameter sistem yang menghasilkan kinerja optimum.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penerapan inerter pada sistem Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) terhadap respon dinamik struktur bangunan akibat beban gempa. Analisis dilakukan pada model gedung 12 lantai dengan menerapkan TMDI yang dihubungkan antara lantai teratas dan beberapa lantai di bawahnya. Optimasi parameter desain dilakukan secara numerik melalui variasi rasio frekuensi dan rasio redaman untuk memperoleh konfigurasi yang menghasilkan reduksi respon struktur yang optimal.

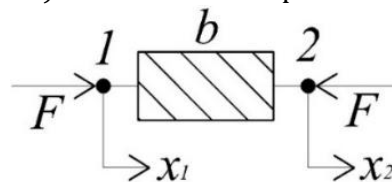
2. Tinjauan Pustaka

2.1 Inerter

Inerter merupakan elemen mekanik dua terminal yang menghasilkan gaya yang sebanding dengan percepatan relatif antara kedua terminalnya. Konsep inerter pertama kali diperkenalkan oleh Malcolm C. Smith dalam sintesis jaringan mekanik untuk sistem kontrol (Smith, 2002). Berbeda dengan massa konvensional yang menghasilkan gaya sebanding dengan percepatan absolut, inerter menghasilkan gaya yang bergantung pada percepatan relatif antara kedua terminalnya. Oleh karena itu, inerter dapat meningkatkan efek inersia dalam suatu sistem tanpa memerlukan penambahan massa fisik yang besar (Smith, 2002). Hubungan gaya pada inerter dapat dinyatakan sebagai:

$$F = b(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_2) \quad (1)$$

di mana \ddot{x}_1 dan \ddot{x}_2 merupakan percepatan pada masing-masing terminal inerter, sedangkan b adalah koefisien inerter yang memiliki satuan kilogram. Nilai b sering disebut sebagai *inertance* atau koefisien massa efektif dari inerter (Smith, 2002). Skema inerter dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1 Skema inerter

Sumber: Smith, 2002

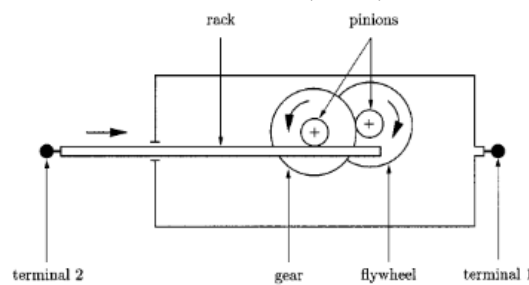
Inerter tidak terbatas pada konfigurasi mekanik tertentu selama memenuhi hubungan gaya tersebut. Berbagai bentuk inerter telah dikembangkan, antara lain *rack-pinion inerter*, *ballscrew inerter*, dan *fluid inerter* (Papageorgiou & Smith, 2005; Swift et al., 2013). Salah satu konfigurasi yang paling umum

digunakan untuk menjelaskan prinsip kerja inerter adalah model rack–pinion yang terdiri dari dua pinion, sebuah *gear wheel*, dan *flywheel*.

Pada sistem tersebut, gerakan translasi pada terminal inerter akan diubah menjadi gerakan rotasi pada *flywheel* melalui mekanisme *gear*. Rasio antara jari-jari girasi *flywheel* dan radius pinion, serta rasio gear yang digunakan, dapat memperbesar efek inersia yang dihasilkan (Papageorgiou & Smith, 2005). Hubungan gaya yang dihasilkan oleh sistem mekanik tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$F = (m\alpha_1^2\alpha_2^2)\ddot{u} \quad (2)$$

di mana m adalah massa *flywheel*, sedangkan α_1 dan α_2 merupakan rasio mekanik yang terkait dengan konfigurasi gear. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa perubahan kecil pada rasio gear dapat menghasilkan peningkatan efek inersia yang signifikan (Smith, 2002). Berikut merupakan model skematik dari inerter yang diperkenalkan oleh Smith (2002).



Gambar 2 Model skematik inerter

Sumber: Smith, 2002

Eksperimen laboratorium yang dilakukan oleh Christos Papageorgiou dan Malcolm C. Smith menunjukkan bahwa sistem inerter tipe *rack–pinion* dapat menghasilkan efek dinamik yang setara dengan massa lebih dari 700 kg dengan massa perangkat sekitar 3,5 kg (Papageorgiou & Smith, 2005). Hal ini menunjukkan bahwa inerter mampu menghasilkan rasio amplifikasi massa yang sangat besar, sehingga berpotensi meningkatkan performa sistem kontrol getaran pada struktur.

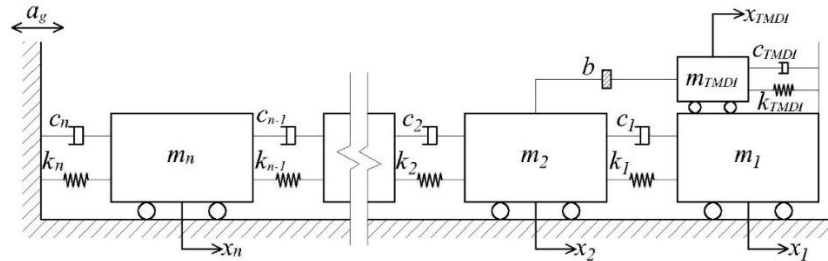
2.2 Tuned Mass Damper Inerter (TMDI)

Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) merupakan pengembangan dari sistem Tuned Mass Damper (TMD) dengan menambahkan elemen inerter ke dalam sistem. Konsep ini bertujuan untuk meningkatkan efektivitas reduksi getaran tanpa memerlukan massa tambahan yang besar. Penelitian mengenai TMDI dalam bidang rekayasa struktur mulai berkembang setelah diperkenalkan oleh Luca Marian dan Agathoklis Giaralis yang mengkaji desain optimal TMDI pada sistem struktur *Multi Degree of Freedom* (MDOF) (Marian & Giaralis, 2014). Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penambahan inerter pada TMD dapat menghasilkan efek mass amplification, sehingga kinerja reduksi respon struktur meningkat secara signifikan dibandingkan dengan TMD konvensional (Marian & Giaralis, 2014).

Pada sistem TMDI, inerter dihubungkan antara massa TMD dan salah satu lantai pada struktur. Konfigurasi ini memungkinkan inerter menghasilkan gaya tambahan yang bergantung pada percepatan relatif antara kedua titik tersebut. Akibatnya, efek inersia yang bekerja pada sistem menjadi lebih besar dibandingkan dengan TMD konvensional (Giaralis & Petrini, 2017; Marian & Giaralis, 2014). Beberapa penelitian selanjutnya menunjukkan bahwa TMDI mampu memberikan reduksi respon struktur yang lebih baik dengan massa tambahan yang relatif kecil (Giaralis & Petrini, 2017; Patsialis et al., 2023). Selain itu, konfigurasi pemasangan inerter pada lantai yang berbeda dapat mempengaruhi efektivitas sistem dalam mengendalikan getaran struktur (Patsialis et al., 2023).

2.3 Persamaan Gerak Sistem TMDI

Persamaan gerak sistem TMDI bergantung pada jumlah derajat kebebasan (Degree of Freedom/DOF) dari struktur yang dianalisis. Untuk sistem Single Degree of Freedom (SDOF), persamaan geraknya serupa dengan sistem TMD konvensional, namun terdapat tambahan koefisien inerter b pada matriks massa (Marian & Giaralis, 2014).



Gambar 3 Sistem TMDI pada struktur MDOF

Sumber: Marian & Giaralis, 2014

Pada struktur *Multi Degree of Freedom* (MDOF), inerter dapat dihubungkan antara massa TMD dan salah satu rantai pada struktur utama seperti yang digambarkan pada Gambar 3 (Giaralis & Petrini, 2017; Giaralis & Taflanidis, 2018). Dalam kasus ini, persamaan gerak sistem dapat dinyatakan dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -Ma_g \quad (3)$$

di mana M , C , dan K masing-masing merupakan matriks massa, redaman, dan kekakuan sistem, sedangkan a_g merupakan percepatan gempa pada dasar struktur (Marian & Giaralis, 2014; Patsialis et al., 2023).

Penambahan inerter akan memodifikasi matriks massa sistem karena adanya tambahan komponen inersia sebesar b . Hal ini menyebabkan karakteristik dinamik struktur berubah sehingga respon getaran dapat direduksi secara lebih efektif (Giaralis & Petrini, 2017; Marian & Giaralis, 2014). Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa posisi pemasangan inerter pada struktur dapat mempengaruhi efektivitas TMDI dalam mengendalikan respon struktur.

2.4 Parameter Tuning TMD

Kinerja sistem TMDI sangat dipengaruhi oleh parameter desainnya, terutama rasio frekuensi dan rasio redaman (Giaralis & Petrini, 2017; Marian & Giaralis, 2014). Frekuensi alami dari sistem TMDI dapat dinyatakan sebagai (Marian & Giaralis, 2014):

$$\omega_{TMDI} = \sqrt{\frac{k_{TMDI}}{m_{TMDI} + b}} \quad (4)$$

sedangkan rasio redaman sistem dinyatakan sebagai (Marian & Giaralis, 2014):

$$\xi_{TMDI} = \frac{c_{TMDI}}{2(m_{TMDI} + b)\omega_{TMDI}} \quad (5)$$

Dalam proses desain, parameter tuning biasanya dinyatakan dalam bentuk rasio frekuensi dan rasio redaman optimum. Parameter tersebut bergantung pada rasio massa TMD terhadap massa struktur serta rasio inerter yang dinyatakan sebagai (Marian & Giaralis, 2014; Patsialis et al., 2023):

$$\beta = \frac{b}{M_1} \quad (6)$$

di mana M_1 merupakan massa modal dari ragam getar fundamental struktur.

Penentuan parameter optimal TMDI dapat dilakukan secara analitik maupun numerik (Marian & Giaralis, 2014; Patsialis et al., 2023). Pada banyak penelitian, optimasi numerik digunakan untuk memperoleh kombinasi rasio frekuensi dan rasio redaman yang menghasilkan reduksi respon struktur maksimum (Patsialis et al., 2023). Proses optimasi tersebut umumnya dilakukan menggunakan perangkat lunak komputasi seperti MATLAB dengan algoritma optimasi tertentu.

3. Metode

Struktur yang dianalisis dalam penelitian ini adalah gedung beton bertulang 12 lantai yang secara fisik berupa sistem portal. Untuk keperluan analisis numerik menggunakan MATLAB, struktur tersebut diidealisasi menjadi model lumped mass multi-degree-of-freedom (MDOF) dengan pendekatan shear building. Dengan pendekatan ini setiap lantai dimodelkan sebagai massa terpusat yang dihubungkan oleh elemen kekakuan dan redaman antar lantai, sehingga sistem memiliki 12 derajat kebebasan (12 DOF) yang merepresentasikan perpindahan lateral tiap lantai. Sistem kontrol getaran yang digunakan adalah Tuned Mass Damper yang dikombinasikan dengan Tuned Mass Damper Inerter. Massa TMD ditempatkan pada lantai paling atas struktur (lantai 12), sedangkan elemen inerter dihubungkan antara massa TMD dengan lantai lain pada struktur untuk meningkatkan efek inersia sistem.

Parameter desain TMDI diperoleh melalui proses optimasi numerik menggunakan fungsi *fminimax* pada MATLAB yang bertujuan meminimalkan respon struktur. Secara umum fungsi optimasi tersebut dituliskan sebagai berikut

$$[x, fval] = fminimax (fun, x0, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (7)$$

di mana *x* merupakan variabel desain yang menghasilkan kondisi optimal dan *fval* adalah nilai minimum dari fungsi objektif. Parameter *fun* adalah fungsi objektif yang akan diminimalkan, sedangkan *x0* merupakan tebakan awal variabel desain. Parameter *A*, *b*, *Aeq*, dan *beq* menyatakan batasan linear, sedangkan *lb* dan *ub* adalah batas bawah dan batas atas variabel desain. Dalam penelitian ini tidak digunakan batasan persamaan maupun pertidaksamaan linear sehingga parameter tersebut diabaikan.

Variabel desain yang dioptimasi adalah rasio frekuensi dan rasio redaman dari sistem TMDI. Fungsi objektif yang digunakan dalam proses optimasi adalah nilai Root Mean Square (RMS) perpindahan lantai paling atas struktur. Secara matematis fungsi objektif tersebut dapat dinyatakan sebagai

$$J = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x_{top}^2(t) dt} \quad (8)$$

di mana $x_{top}(t)$ adalah perpindahan lantai paling atas terhadap waktu.

Untuk menentukan konfigurasi TMDI yang paling efektif, dilakukan beberapa variasi pemasangan inerter pada struktur. Massa TMD ditempatkan pada lantai 12, sedangkan terminal kedua dari inerter dihubungkan ke beberapa lantai di bawahnya secara bertahap. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh panjang sambungan inerter terhadap performa reduksi respon struktur. Konfigurasi yang dianalisis ditunjukkan pada tabel berikut.

Tabel 2.1 Konfigurasi pemasangan TMDI

Konfigurasi	Sambungan Inerter
TMDI-1	Lantai 12 -11
TMDI-2	Lantai 12 -10
TMDI-3	Lantai 12 - 9
TMDI-4	Lantai 12 - 8
TMDI-5	Lantai 12 - 7
TMDI-6	Lantai 12 - 6

Sumber: Peneliti

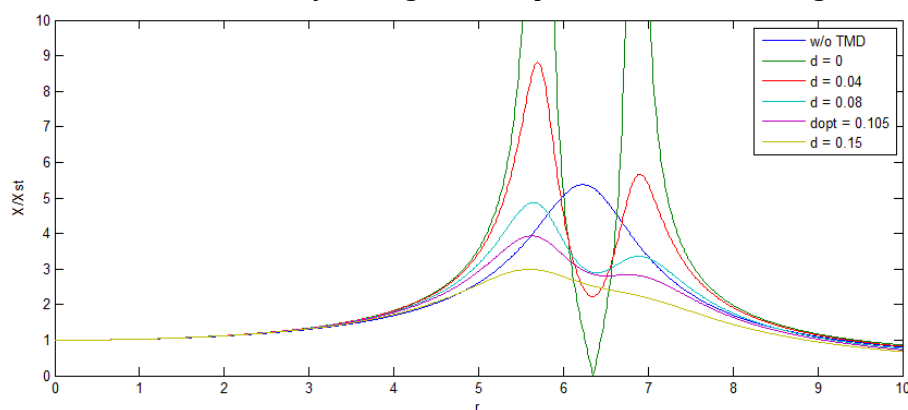
Setiap konfigurasi dianalisis untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap respon struktur yang meliputi perpindahan, kecepatan, dan percepatan lantai.

Sebelum dilakukan analisis terhadap beban gempa, sistem terlebih dahulu dianalisis terhadap beban percepatan harmonik yang diberikan pada dasar struktur. Analisis ini bertujuan untuk memverifikasi kemampuan sistem TMDI dalam mereduksi respon dinamis struktur. Setelah parameter optimal diperoleh, sistem kemudian diuji menggunakan beberapa rekaman gempa untuk mengevaluasi efektivitas TMDI dalam mengurangi respon struktur. Hasil respon struktur dari setiap konfigurasi dibandingkan untuk menentukan lokasi sambungan inerter yang menghasilkan reduksi respon paling optimal pada gedung 12 lantai yang dianalisis.

4. Hasil dan Pembahasan

3.1 Respon Struktur Akibat Eksitasi Harmonik

Analisis awal dilakukan dengan memberikan eksitasi percepatan harmonik pada dasar struktur untuk mengevaluasi karakteristik dinamik sistem kontrol getaran pada domain frekuensi. Respon struktur dinyatakan dalam bentuk *Dynamic Amplification Factor* (DAF), yaitu rasio antara amplitudo respon struktur terhadap amplitudo eksitasi. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan tingkat amplifikasi respon struktur akibat variasi frekuensi eksitasi. Analisis dilakukan pada lantai teratas struktur karena lantai tersebut umumnya mengalami respon terbesar dibandingkan lantai lainnya.



Gambar 4 Grafik DAF dengan menggunakan TMD pada lantai 12

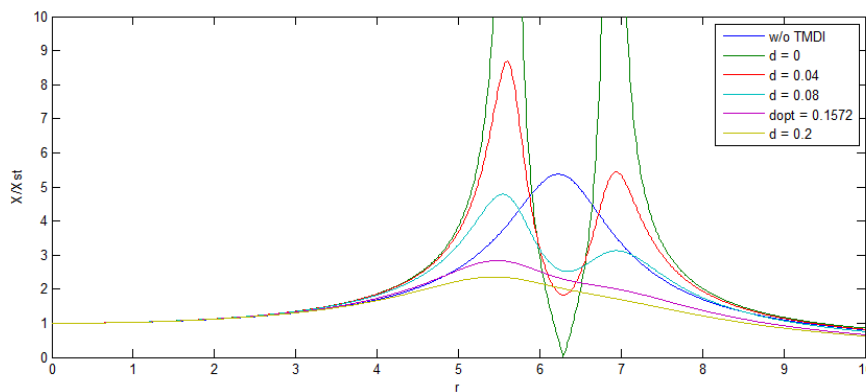
Sumber: Peneliti

Gambar 4 menunjukkan kurva DAF struktur yang menggunakan sistem Tuned Mass Damper (TMD) pada berbagai nilai rasio redaman. Terlihat bahwa nilai DAF maksimum terjadi pada rentang $6 < r < 7$, di mana r merupakan rasio antara frekuensi eksitasi terhadap frekuensi natural struktur. Pada rentang tersebut, frekuensi eksitasi mendekati frekuensi alami sistem sehingga terjadi kondisi mendekati resonansi yang menyebabkan peningkatan amplitudo respon struktur secara signifikan.

Penerapan TMD menyebabkan puncak resonansi terpecah menjadi dua puncak resonansi yang lebih rendah dibandingkan sistem tanpa peredam. Fenomena ini menunjukkan bahwa keberadaan TMD mengubah karakteristik dinamik sistem sehingga amplitudo respon pada daerah resonansi dapat dikurangi. Selain itu, peningkatan rasio redaman menyebabkan kedua puncak resonansi semakin menurun hingga mencapai kondisi optimum. Berdasarkan hasil optimasi diperoleh rasio redaman optimum sebesar 0,105 yang menghasilkan nilai DAF maksimum minimum pada daerah resonansi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa pemilihan rasio redaman yang tepat berperan penting dalam menentukan efektivitas sistem TMD dalam mengendalikan respon struktur.

Untuk mengevaluasi pengaruh penambahan inerter, analisis yang sama dilakukan menggunakan sistem Tuned Mass Damper Inerter (TMDI) dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5. Secara umum, bentuk kurva DAF yang dihasilkan TMDI menunjukkan karakteristik yang serupa dengan TMD, yaitu munculnya dua puncak resonansi pada daerah sekitar frekuensi tuning. Namun demikian, amplitudo maksimum yang dihasilkan TMDI lebih rendah dibandingkan TMD konvensional.



Gambar 5 Grafik DAF dengan menggunakan TMDI pada lantai 12

Sumber: Peneliti

Berdasarkan Gambar 4 dan Gambar 5, nilai DAF maksimum pada kondisi optimum mengalami penurunan setelah penambahan elemen inerter. Penurunan tersebut mengindikasikan bahwa sistem TMDI memiliki kemampuan yang lebih baik dalam membatasi amplifikasi respon struktur pada daerah resonansi dibandingkan TMD konvensional. Secara teoritis, penambahan inerter menghasilkan tambahan efek inersia pada sistem tanpa memerlukan penambahan massa fisik yang besar. Efek inersia tambahan tersebut memungkinkan peningkatan kinerja sistem peredam sehingga respon resonansi struktur dapat dikurangi. Hasil ini konsisten dengan konsep mass amplification yang menjadi dasar pengembangan sistem TMDI sebagaimana dilaporkan oleh Marian dan Giaralis (2014).

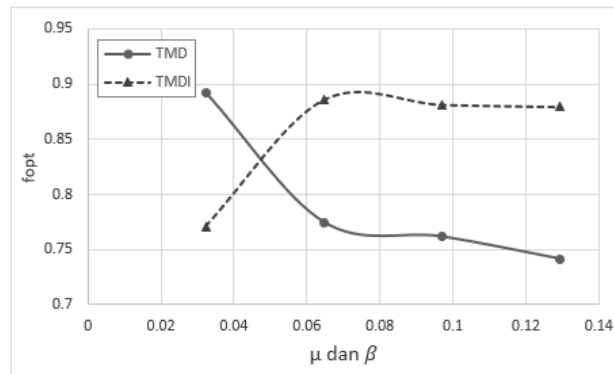
Selain menghasilkan amplitudo maksimum yang lebih rendah, kurva DAF TMDI juga menunjukkan respon yang lebih terkendali pada rentang frekuensi di sekitar resonansi. Temuan ini mengindikasikan bahwa penambahan inerter memberikan pengaruh positif terhadap kinerja sistem peredam pada domain frekuensi. Dengan demikian, hasil analisis harmonik memberikan verifikasi awal bahwa penggunaan inerter berpotensi meningkatkan efektivitas sistem kontrol getaran dibandingkan TMD konvensional.

Meskipun analisis harmonik mampu menunjukkan peningkatan kinerja TMDI pada kondisi resonansi, karakteristik eksitasi harmonik masih bersifat idealisasi dan belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi pembebanan gempa yang bersifat tidak stasioner dan memiliki kandungan frekuensi yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan analisis lebih lanjut menggunakan rekaman gempa untuk mengevaluasi kinerja TMDI pada kondisi pembebanan yang lebih realistis serta untuk menentukan parameter optimum sistem.

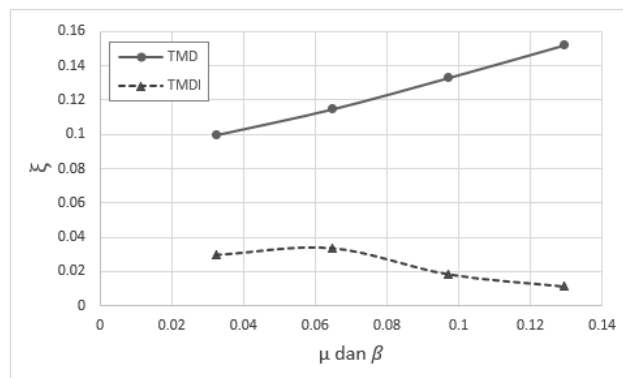
3.2 Respon Struktur Akibat Eksitasi Gempa

Hasil optimasi menunjukkan bahwa peningkatan nilai β menyebabkan rasio frekuensi optimum semakin mendekati frekuensi natural struktur utama. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *inertance* mengubah karakteristik dinamik sistem struktur-peredam sehingga kondisi tuning optimum berbeda dibandingkan TMD konvensional. Temuan ini sejalan dengan Marian & Giaralis (2014) yang

menunjukkan bahwa keberadaan inerter menghasilkan efek mass amplification dan memengaruhi kondisi tuning optimum sistem.



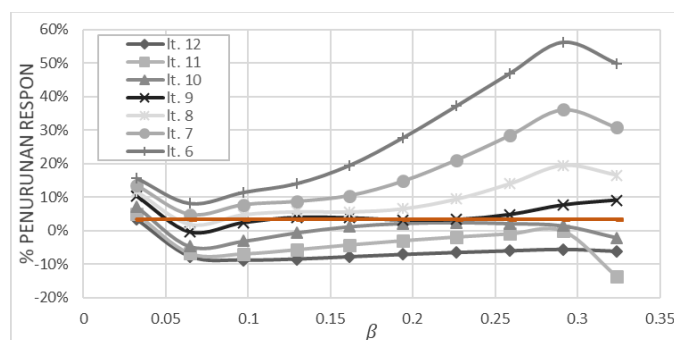
Gambar 6 Grafik parameter TMD dan TMDI untuk parameter f
Sumber: Peneliti



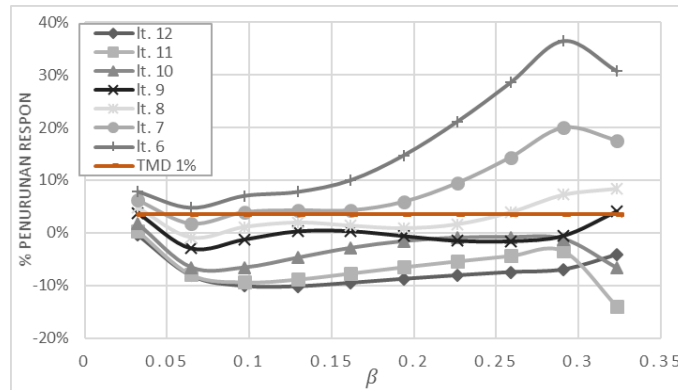
Gambar 7 Grafik parameter TMD dan TMDI parameter xi
Sumber: Peneliti

Selain itu, peningkatan β menyebabkan rasio redaman optimum cenderung menurun, menunjukkan bahwa kebutuhan redaman optimum berkurang seiring bertambahnya *inertance*.

Hubungan antara β dan efektivitas pengendalian respon ditunjukkan pada Gambar 8 hingga Gambar 10. Pada tahap awal, peningkatan β meningkatkan persentase reduksi perpindahan, percepatan, dan kecepatan struktur. Karena β merepresentasikan rasio inertance terhadap massa struktur, peningkatan nilainya meningkatkan massa dinamik efektif tanpa penambahan massa fisik yang signifikan sehingga kemampuan perangkat menyerap energi getaran menjadi lebih besar. Hasil ini konsisten dengan konsep *tuned viscous mass damper* yang dikemukakan oleh Ikago et al. (2012) dan fenomena *mass amplification* yang dilaporkan Marian & Giaralis (2014).

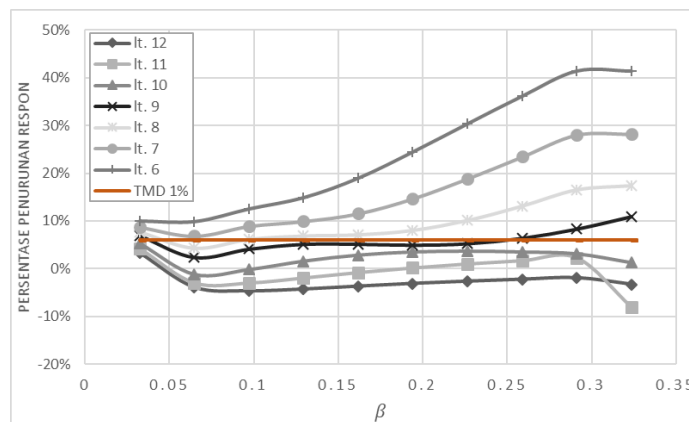


Gambar 8. Grafik hubungan β dengan persentase penurunan respon perpindahan
Sumber: Peneliti



Gambar 9. Grafik hubungan β dengan persentase penurunan respon percepatan

Sumber: Peneliti

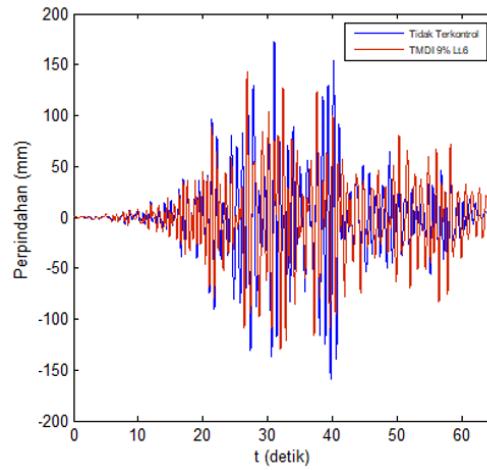


Gambar 10. Grafik hubungan β dengan persentase penurunan respon kecepatan

Sumber: Peneliti

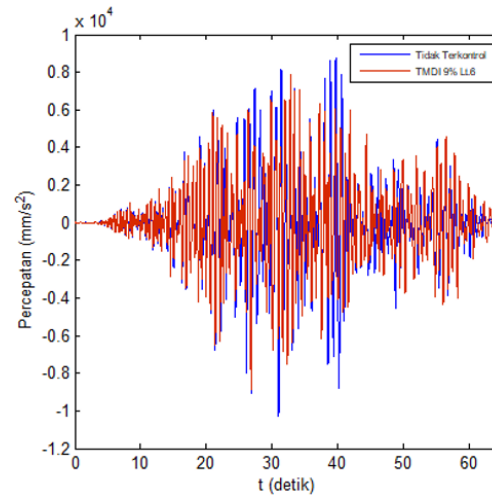
Namun demikian, peningkatan nilai β tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja sistem. Gambar 8 hingga Gambar 10 menunjukkan bahwa persentase reduksi respon mencapai nilai maksimum pada β sekitar 0.29, kemudian menurun ketika β terus ditingkatkan. Pada tahap awal, peningkatan β meningkatkan efek inersia sehingga transfer energi getaran dari struktur ke perangkat TMDI menjadi lebih efektif. Akan tetapi, inertance yang terlalu besar mengubah karakteristik dinamik sistem gabungan struktur-TMDI dan menyebabkan terjadinya *detuning effect*, yaitu berkurangnya efektivitas peredam akibat ketidaksesuaian kondisi tuning optimum. Fenomena ini sejalan dengan temuan Konar & Ghosh (2024), yang menunjukkan adanya nilai *inertance* optimum dan bahwa *over-inertance* dapat menurunkan efektivitas pengendalian respon. Pada model struktur 12 lantai yang dianalisis, nilai optimum diperoleh pada β sekitar 0,29, yang menunjukkan bahwa pemilihan parameter *inertance* merupakan aspek penting dalam perancangan TMDI untuk mencapai kinerja pengendalian respon yang maksimum.

Berdasarkan konfigurasi optimum yang diperoleh, sistem TMDI selanjutnya dievaluasi menggunakan rekaman gempa Hokkaido 2003. Hasil pada Gambar 11 hingga Gambar 13 menunjukkan bahwa penerapan TMDI mampu mereduksi respon struktur secara signifikan dengan penurunan perpindahan maksimum sebesar 50%, percepatan maksimum sebesar 41%, dan kecepatan maksimum sebesar 36%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa perangkat TMDI mampu menyerap sebagian energi getaran yang ditransfer ke struktur sehingga amplitudo respon dapat ditekan secara efektif.



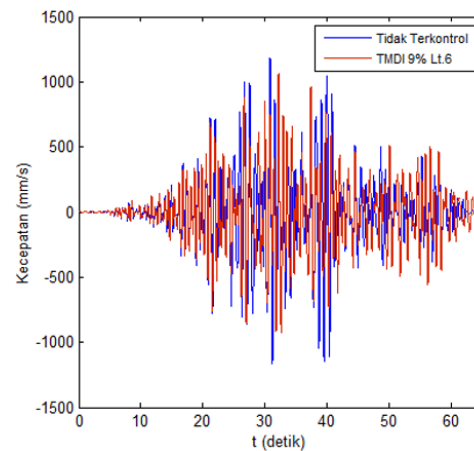
Gambar 11 Perpindahan respon perpindahan struktur dengan dan tanpa TMDI tereksitasi gempa Hokkaido

Sumber: Peneliti



Gambar 12 Perpindahan respon percepatan struktur dengan dan tanpa TMDI tereksitasi gempa Hokkaido

Sumber: Peneliti



Gambar 13 Perpindahan respon kecepatan struktur dengan dan tanpa TMDI tereksitasi gempa Hokkaido

Sumber: Peneliti

Selanjutnya, konfigurasi optimum yang sama diterapkan pada gempa Kobe 1995, Loma Prieta 1989, dan Northridge 1994. Hasil pada Tabel 3.1 menunjukkan bahwa TMDI secara umum memberikan reduksi respon yang lebih besar dibandingkan TMD konvensional. Rata-rata reduksi perpindahan, percepatan, dan kecepatan yang dihasilkan TMDI masing-masing sekitar 35%, 28%, dan 24%, sedangkan TMD konvensional hanya sekitar 11%, 10%, dan 9%.

Tabel 3.1. Persentase penurunan respon dengan berbagai histori gempa

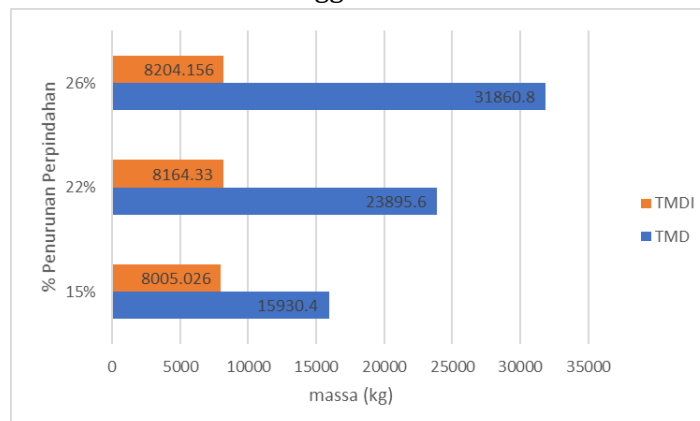
Percepatan Gempa	Perpindahan		Percepatan		Kecepatan	
	TMD	TMDI	TMD	TMDI	TMD	TMDI
Hokkaido	3%	50%	6%	41%	3%	36%
Kobe	13%	29%	17%	50%	14%	40%
Loma Prieta	18%	37%	11%	19%	11%	19%
Northridge	9%	23%	6%	2%	8%	2%

Meskipun demikian, tingkat reduksi tidak seragam untuk seluruh rekaman gempa. Efektivitas tertinggi diperoleh pada gempa Hokkaido dan Kobe, sedangkan yang terendah terjadi pada gempa Northridge. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja TMDI dipengaruhi tidak hanya oleh parameter perangkat, tetapi juga oleh karakteristik frekuensi dan distribusi energi gempa. Temuan ini sejalan dengan Konar & Ghosh (2024), yang menyatakan bahwa efektivitas TMDI bergantung pada kesesuaian antara parameter tuning dan karakteristik eksitasi seismik.

Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa parameter TMDI yang dioptimasi berdasarkan rekaman gempa Hokkaido tetap mampu memberikan reduksi respon yang lebih baik dibandingkan TMD konvensional pada seluruh rekaman gempa yang dianalisis. Pada model struktur 12 lantai yang ditinjau, penggunaan TMDI menghasilkan rata-rata reduksi perpindahan sekitar 35%, sedangkan TMD konvensional hanya sekitar 11%. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan inerter tidak hanya meningkatkan efektivitas pengendalian respon pada kondisi optimasi, tetapi juga memberikan efektivitas pengendalian yang lebih baik pada berbagai karakteristik gempa dibandingkan TMD konvensional.

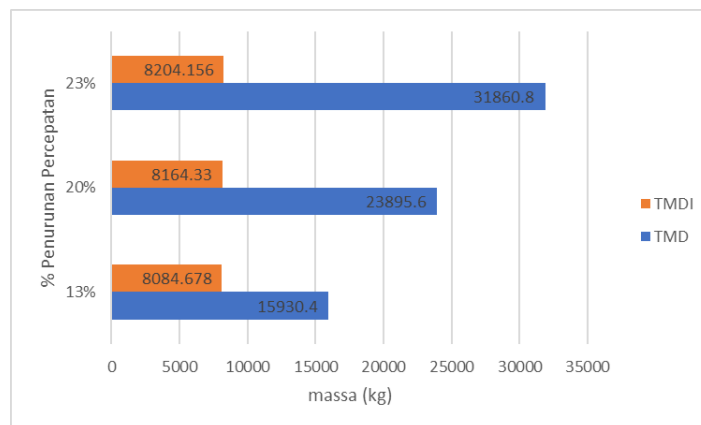
3.3 Efek Pembesaran Massa

Salah satu keunggulan utama sistem TMDI adalah kemampuannya menghasilkan efek pembesaran massa dinamis melalui penggunaan elemen inerter. Dalam penelitian ini digunakan rasio 200:1 untuk menghubungkan massa fisik inerter dengan massa dinamis yang dihasilkan. Analisis dilakukan pada konfigurasi TMDI yang dihubungkan dengan lantai 6 dengan variasi nilai β antara 0 hingga 0,35, yang ekuivalen dengan massa dinamis antara 1% hingga 10% dari massa struktur utama.



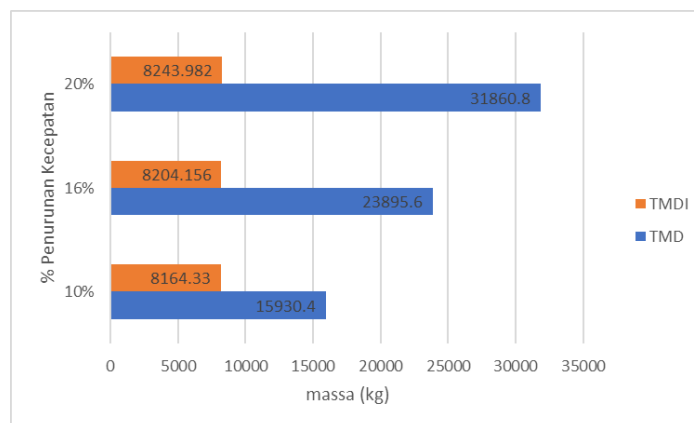
Gambar 14 Perbandingan massa TMD dan TMDI dalam menghasilkan respon perpindahan yang hampir sama

Sumber: Peneliti



Gambar 15 Perbandingan massa TMD dan TMDI dalam menghasilkan respon percepatan yang hampir sama

Sumber: Peneliti



Gambar 16 Perbandingan massa TMD dan TMDI dalam menghasilkan respon kecepatan yang hampir sama

Sumber: Peneliti

Berdasarkan Gambar 14 hingga Gambar 16, sistem TMDI mampu menghasilkan tingkat reduksi respon yang hampir setara dengan TMD konvensional meskipun menggunakan massa fisik yang jauh lebih kecil. Sebagai contoh, untuk mencapai reduksi perpindahan sekitar 26%, sistem TMD memerlukan massa sebesar 31.860,8 kg, sedangkan TMDI hanya memerlukan massa fisik sebesar 8.204,2 kg. Dengan demikian, massa yang dibutuhkan oleh TMDI hanya sekitar 25,8% dari massa TMD atau setara dengan kebutuhan massa hampir empat kali lebih kecil.

Fenomena serupa juga terlihat pada respon percepatan dan kecepatan. Ketika target reduksi respon meningkat, kebutuhan massa pada TMD konvensional bertambah secara signifikan, sedangkan massa fisik TMDI relatif konstan pada kisaran 8.000–8.200 kg. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kinerja TMDI tidak semata-mata diperoleh melalui penambahan massa fisik, tetapi melalui kontribusi gaya inersia tambahan yang dihasilkan oleh elemen inerter. Temuan ini sejalan dengan penelitian Lazar et al. (2014) yang menunjukkan bahwa perangkat berbasis inerter mampu meningkatkan efektivitas pengendalian getaran melalui mekanisme gaya inersia tambahan tanpa memerlukan peningkatan massa fisik yang besar.

Secara fisik, inerter menghasilkan gaya yang sebanding dengan percepatan relatif antara kedua ujung perangkat. Akibatnya, massa fisik yang relatif kecil dapat menghasilkan efek inersia yang jauh lebih

besar dibandingkan massanya sendiri. Mekanisme ini dikenal sebagai *mass amplification*, yaitu peningkatan massa dinamis efektif tanpa memerlukan penambahan massa aktual yang besar (Marian & Giaralis, 2014). Temuan ini sejalan dengan konsep dasar TMDI yang dikemukakan oleh Marian dan Giaralis (2014), namun hasil penelitian ini menunjukkan secara kuantitatif bahwa pada model gedung 12 lantai yang ditinjau, penerapan inerter mampu mempertahankan tingkat reduksi respon yang setara dengan TMD konvensional dengan kebutuhan massa hingga hampir empat kali lebih kecil. Hasil tersebut menunjukkan potensi TMDI sebagai alternatif yang lebih efisien dibandingkan TMD konvensional, terutama pada bangunan bertingkat yang memiliki keterbatasan ruang maupun kapasitas struktur untuk menampung massa peredam yang besar.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pengaruh inerter pada sistem *Tuned Mass Damper Inerter* terhadap respon struktur akibat gempa, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan inerter pada sistem TMDI menyebabkan rasio frekuensi optimum cenderung mendekati frekuensi natural struktur dan kebutuhan rasio redaman optimum menjadi lebih kecil dibandingkan TMD konvensional.
2. Pada kondisi optimum, TMDI mampu mereduksi respon struktur hingga 50% untuk perpindahan, 41% untuk percepatan, dan 36% untuk kecepatan.
3. Tingkat efektivitas TMDI dipengaruhi oleh karakteristik gempa yang digunakan, sehingga persentase reduksi respon bervariasi untuk setiap rekaman gempa.
4. TMDI menunjukkan efisiensi massa yang lebih tinggi dibandingkan TMD konvensional, dengan kebutuhan massa peredam hingga hampir empat kali lebih kecil untuk menghasilkan tingkat reduksi respon yang setara.

Penelitian ini masih terbatas pada model struktur 12 lantai dengan perilaku linier elastis dan belum divalidasi secara eksperimental. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mempertimbangkan analisis nonlinier, pengujian eksperimental, optimasi multiobjektif, dan evaluasi terhadap kondisi multi-hazard.

Daftar Rujukan

- [1] De Domenico, D., & Ricciardi, G. (2018). Optimal design and seismic performance of tuned mass damper inerter (TMDI) for structures with nonlinear base isolation systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 47(12), 2539–2560. <https://doi.org/10.1002/eqe.3098>
- [2] Felny, F. (2025). Structural Performance Analysis of The BPJN Bengkulu Office Building Using The Response Spectrum Method Based on SNI 1726:2019. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 6(2), 188–199. <https://doi.org/10.37253/jcep.v6i2.11292>
- [3] Giaralis, A., & Petrini, F. (2017). Wind-Induced Vibration Mitigation in Tall Buildings Using the Tuned Mass-Damper-Inerter. *Journal of Structural Engineering*, 143(9). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0001863](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0001863)
- [4] Giaralis, A., & Taflanidis, A. A. (2018). Optimal tuned mass-damper-inerter (TMDI) design for seismically excited MDOF structures with model uncertainties based on reliability criteria. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(2). <https://doi.org/10.1002/stc.2082>
- [5] Gutierrez Soto, M., & Adeli, H. (2013). Tuned Mass Dampers. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 20(4), 419–431. <https://doi.org/10.1007/s11831-013-9091-7>

- [6] Ikago, K., Saito, K., & Inoue, N. (2012). Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(3), 453–474. <https://doi.org/10.1002/eqe.1138>
- [7] Konar, T., & Ghosh, A. (Dey). (2024). Tuned mass damper inerter for seismic control of multi-story buildings: Ten years since inception. In *Structures* (Vol. 63). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106459>
- [8] Lazar, I. F., Neild, S. A., & Wagg, D. J. (2014). Using an inerter-based device for structural vibration suppression. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(8), 1129–1147. <https://doi.org/10.1002/eqe.2390>
- [9] Ma, R., Bi, K., & Hao, H. (2021). Inerter-based structural vibration control: A state-of-the-art review. In *Engineering Structures* (Vol. 243). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112655>
- [10] Marian, L., & Giaralis, A. (2014). Optimal design of a novel tuned mass-damper-inerter (TMDI) passive vibration control configuration for stochastically support-excited structural systems. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 38, 156–164. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2014.03.007>
- [11] Papageorgiou, C., & Smith, M. C. (2005). Laboratory experimental testing of inerters. *Proceedings of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, 3351–3356. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582679>
- [12] Patsialis, D., Taflanidis, A. A., & Giaralis, A. (2023). Tuned-mass-damper-inerter optimal design and performance assessment for multi-storey hysteretic buildings under seismic excitation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(3), 1541–1576. <https://doi.org/10.1007/s10518-021-01236-4>
- [13] Smith, M. C. (2002). Synthesis of mechanical networks: the inerter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(10), 1648–1662. <https://doi.org/10.1109/TAC.2002.803532>
- [14] Swift, S. J., Smith, M. C., Glover, A. R., Papageorgiou, C., Gartner, B., & Houghton, N. E. (2013). Design and modelling of a fluid inerter. *International Journal of Control*, 86(11), 2035–2051. <https://doi.org/10.1080/00207179.2013.842263>
- [15] Zhafira, T., Kurniawan, I. B., Purwanto, P., Hidayat, M. F., & Prayuda, H. (2023). The Structure Analysis of Five Floor Mall Building in Semarang City According to SNI 1726-2019 and SNI 2847-2019. *Journal of Civil Engineering and Planning*, 4(1), 1–13. <https://doi.org/10.37253/jcep.v4i1.6872>