

ANALISIS PENGARUH PEREDAM *HYBRID* DENGAN *TUNED MASS DAMPER* (TMD) DAN *PARTICLE IMPACT DAMPING* (PID) UNTUK MENGURANGI RESPONS SEISMIK PADA MODEL STRUKTUR

Dina Nurani^{1*}, Dedi Suryadi¹

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu

Jalan WR. Supratman Kandang Limun Bengkulu 38371.A

Telepon: (0736) – 344087, 21170227

*E-mail: dinanurani06@gmail.com

Abstract

Structural damage caused by earthquakes has driven the development of more effective vibration control technologies. One approach that has been investigated is the hybrid damping system, which combines a Tuned Mass Damper (TMD) and Particle Impact Damping (PID). This study aims to evaluate the performance of the system in reducing seismic responses in a two-story structure. The research methods include simulations using Working Model 2D software and experimental testing with a shaking table. The TMD parameters were set with a mass ratio of 20% and stiffness of 10%, while the PID was varied with a mass ratio of 1.5%–8% and impact surfaces using styrofoam and rubber with different thicknesses. The simulation results show that the TMD reduced the amplitude by up to 83.64% at a frequency of 9.678 rad/s, while the experimental results recorded a reduction of 51.86%. The best Hybrid configuration was obtained with an 8% PID mass ratio using 2 cm styrofoam, which reduced the amplitude by 78.19% in simulation and 53.19% in experiment. Differences between simulation and experiment were influenced by friction and imperfect connections. These findings demonstrate that the TMD–PID Hybrid system is effective in reducing the dynamic response of structures and has the potential to be applied in earthquake-resistant buildings.

Keywords: Hybrid damper, Tuned Mass Damper (TMD), Particle Impact Damping (PID), seismic response

Abstrak

Kerusakan struktur akibat gempa mendorong pengembangan teknologi peredam getaran yang lebih efektif. Salah satu pendekatan yang diteliti adalah sistem peredam *hybrid* dengan mengombinasikan *Tuned Mass Damper* (TMD) dan *Particle Impact Damping* (PID). Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kinerja sistem tersebut dalam mereduksi respons seismik pada struktur dua lantai. Metode penelitian meliputi simulasi menggunakan perangkat lunak *Working Model 2D* dan pengujian eksperimental dengan meja getar. Parameter TMD ditetapkan dengan rasio massa 20% dan kekakuan 10%, sedangkan PID divariasikan dengan rasio massa 1,5%–8% serta sisi benturan menggunakan *styrofoam* dan *rubber* dengan ketebalan berbeda. Simulasi menunjukkan TMD mampu mereduksi amplitudo hingga 83,64% pada frekuensi 9,678 rad/s, sedangkan hasil eksperimen mencatat penurunan 51,86%. Konfigurasi *Hybrid* terbaik diperoleh pada rasio massa PID 8% dengan *styrofoam* 2 cm, yang mereduksi amplitudo hingga 78,19% pada simulasi dan 53,19% pada eksperimen. Perbedaan hasil simulasi dan eksperimen dipengaruhi oleh gesekan dan sambungan yang tidak sempurna. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem *Hybrid* TMD–PID efektif dalam mereduksi respons dinamis struktur, sehingga berpotensi diterapkan pada bangunan tahan gempa.

Kata Kunci: peredam *Hybrid*, Tuned Mass Damper (TMD), Particle Impact Damping (PID), respons seismik

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan Tingkat kerawanan bencana yang tinggi, baik bencana alam, non-alam, maupun sosial. Kondisi ini dipengaruhi oleh faktor geografis, iklim, serta posisi tektonik yang kompleks [1]. Secara geologis, Indonesia terletak di pertemuan tiga lempeng utama—Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik—serta lempeng mikro Filipina, menjadikannya sangat rentan terhadap aktivitas seismik [2]. Berdasarkan data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), Pulau Sumatera mengalami 1.920 kejadian gempa bumi sepanjang tahun 2023 [3].

Salah satu wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi adalah Provinsi Bengkulu, yang secara geoteknik terbukti memiliki nilai kerentanan seismik tinggi berdasarkan hasil pengukuran mikrotremor [4].

Bangunan yang berada di daerah rawan gempa berpotensi mengalami resonansi apabila frekuensi eksitasi dari gempa mendekati frekuensi alami struktur. Resonansi menyebabkan peningkatan amplitudo getaran secara signifikan dan dapat memperbesar risiko kerusakan struktural [5,6]. Oleh karena itu, sistem perlindungan pasif dan aktif telah banyak dikembangkan untuk mengurangi dampak gaya dinamis terhadap struktur. Tiga pendekatan utama yang umum digunakan yaitu sistem struktur tahan gempa, isolasi seismik, dan sistem kontrol struktur [7].

Salah satu sistem kontrol pasif yang banyak diimplementasikan adalah Tuned Mass Damper (TMD), yaitu perangkat yang dipasang pada struktur dengan massa dan kekakuan tertentu yang disesuaikan untuk menyerap energi dinamis akibat gempa. TMD mampu mengubah karakteristik dinamis struktur dan mentransfer sebagian energi eksitasi ke sistem sekunder. Efektivitas TMD bergantung pada rasio massa, kekakuan, serta penempatan yang tepat. Namun, sistem ini umumnya hanya optimal untuk rentang periode yang sempit (sekitar 0,9–1,1 kali periode alami struktur) [8, 9].

Beberapa studi eksperimental telah menunjukkan bahwa penambahan TMD dengan parameter yang tepat secara signifikan dapat mereduksi amplitudo getaran pada struktur. Sebagai contoh, penggunaan TMD dengan rasio massa 12% dan kekakuan 10% pada struktur satu lantai mampu menurunkan respons simpangan hingga 75,19% [10]. Hal ini menegaskan pentingnya pemilihan parameter desain yang sesuai agar efektivitas redaman optimal dapat dicapai. Namun demikian, TMD masih memiliki keterbatasan karena sifatnya yang linier dan sensitivitas terhadap perubahan frekuensi eksitasi.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, konsep sistem peredam *Hybrid* mulai dikembangkan, yaitu dengan menggabungkan dua atau lebih perangkat peredam untuk memanfaatkan keunggulan masing-masing. Salah satu kombinasi potensial adalah penggabungan TMD dengan Particle Impact Damper (PID). PID merupakan peredam getaran pasif berbasis tumbukan partikel yang bekerja tanpa memerlukan input eksternal, dan efektif digunakan dalam kondisi eksitasi multi-arah maupun lingkungan ekstrem [11, 12]. Perangkat ini bekerja berdasarkan prinsip pertukaran momentum dan pembuangan energi melalui tumbukan, serta memiliki beberapa parameter desain penting seperti rasio massa, ukuran celah, dan koefisien restitusi [13]. PID bekerja dengan mekanisme tumbukan dengan dinding tempat massa PID berada. Ketika struktur bergetar, partikel di dalam wadah PID bergerak secara acak dan mengalami tabrakan berulang, sehingga energi getaran struktur diubah menjadi energi kinetik partikel, lalu disebarkan dalam bentuk panas dan deformasi lokal [14]. Material permukaan benturan juga dapat mempengaruhi kinerja PID. Misalnya Sebuah studi eksperimental menunjukkan bahwa bahan peredam seperti *rubber* dan foam memiliki karakteristik dampak yang berbeda dari bahan keras, yang mempengaruhi efisiensi dispersi energi dalam PID [15].

Namun demikian, PID memiliki tantangan tersendiri, terutama dalam proses desain karena sifatnya yang non-linier dan rasio redaman terhadap massa yang rendah [8]. Meskipun begitu, beberapa studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa penggunaan PID dapat meningkatkan redaman intrinsik sistem dan bekerja lebih efektif dalam rentang frekuensi yang lebih luas dibanding TMD [16 – 19].

Pendekatan optimasi juga mulai diterapkan untuk meningkatkan efektivitas sistem redaman. Penggunaan metode algoritma genetika telah terbukti mampu menghasilkan parameter TMD optimal yang mampu menurunkan amplitudo getaran hingga 85,94% serta menjaga kestabilan sistem struktur tanpa memerlukan kontrol aktif tambahan [20]. Pemodelan lainnya juga menunjukkan bahwa rasio massa TMD sebesar 20% menghasilkan waktu peluruhan tercepat dan amplitudo terkecil pada struktur dua lantai [21].

Dalam penelitian ini, dikembangkan sistem peredam *Hybrid* yang menggabungkan TMD dan PID, dengan menempatkan PID di dalam massa TMD. Sistem ini dirancang untuk menggabungkan keuntungan dari masing-masing metode redaman dan memberikan kinerja yang lebih efektif terhadap variasi eksitasi. Untuk mengevaluasi performa sistem, digunakan pendekatan kombinasi antara simulasi menggunakan perangkat lunak *Working Model 2D* dan pengujian eksperimental menggunakan meja getar sebagai representasi gaya eksitasi gempa [22]. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan solusi praktis dan aplikatif dalam pengurangan risiko seismik pada struktur bangunan di wilayah rawan gempa seperti Bengkulu.

2. Metode penelitian

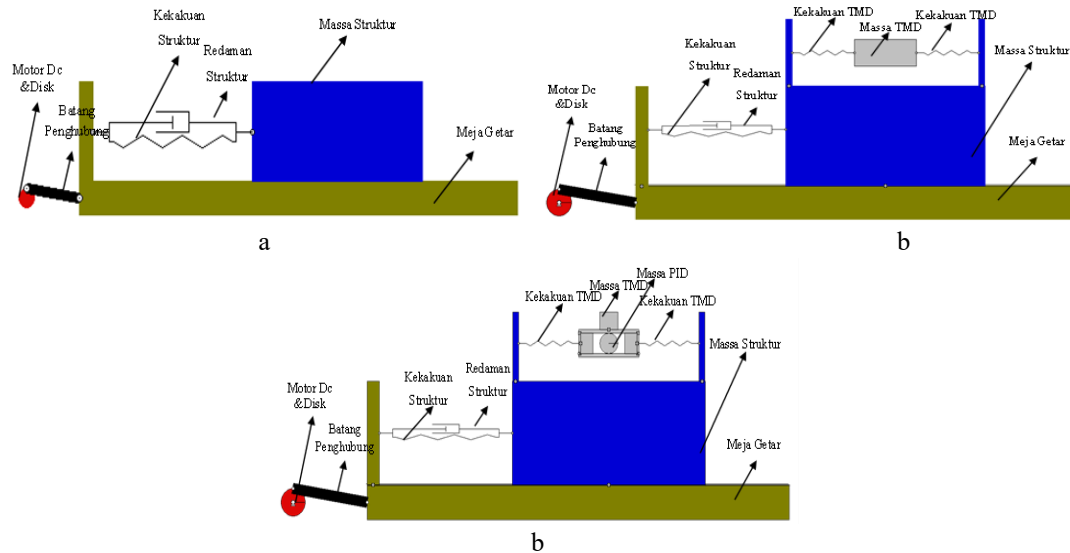
Penelitian ini menggunakan kombinasi simulasi numerik dan pengujian eksperimental untuk mengevaluasi kinerja peredam hibrid pada struktur dua lantai dengan dua derajat kebebasan (2DOF). Respons seismik struktur yang dianalisis difokuskan pada respons perpindahan struktur dan peredam akibat eksistensi seismik. Perpindahan di pilih sebagai parameter utama karena mampu mempresentasikan tingkat deformasi struktur secara langsung. Pengukuran respons perpindahan pada eksperimental dilakukan secara tidak langsung menggunakan sensor *accelerometer*.

2.1 Pengujian Simulasi

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak *Working Model 2D* untuk menganalisis respons struktur dua lantai dalam tiga kondisi berbeda, yaitu tanpa peredam, dengan peredam *Tuned Mass Damper* (TMD), dan dengan peredam *Hybrid* yang menggabungkan TMD dan *Particle Impact Damping* (PID). Pada konfigurasi TMD, digunakan rasio massa sebesar 2, 4, 6 sampai 20% dan kekakuan 2, 6, 10, 14 % dari struktur utama.

Sementara itu, untuk peredam *Hybrid*, PID diletakkan di dalam massa TMD dengan variasi rasio massa antara 1,5% , 2%, 4%, 6.5% hingga 8% dari massa struktur utama. Selain itu, material sisi benturan PID divariasikan menggunakan bahan *rubber* dan *styrofoam* dengan ketebalan antara 1, 1.5, dan 2 cm. Simulasi juga mencakup variasi frekuensi gaya gangguan pada rentang 9.5, 9.67, 10 serta 10,5 rad/s, guna mengevaluasi efektivitas redaman dari masing-masing konfigurasi terhadap respons dinamis struktur.

Simulasi numerik dilakukan untuk menganalisis respons dinamis struktur terhadap eksitasi seismik buatan dengan berbagai konfigurasi sistem peredam. Pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak *Working Model 2D* yang memungkinkan visualisasi dan analisis gerak sistem mekanik secara dinamis. Tiga konfigurasi sistem dimodelkan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. A, B, dan C.

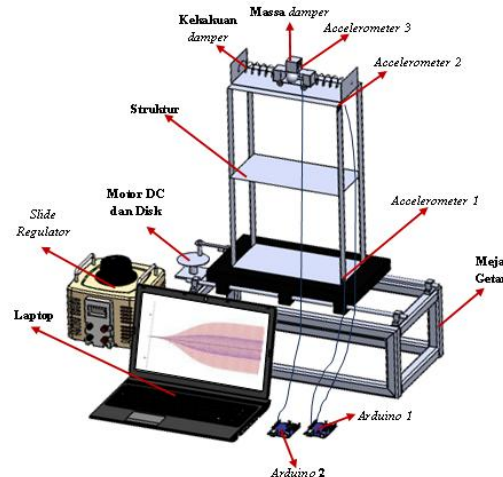


Gambar 1. (a) Pemodelan Struktur Tanpa Peredam; (b) Pemasangan TMD di Lantai 2 Struktur; (c) Pemasangan Mekanisme TMD + PID di Lantai 2 Struktur

Masing-masing model disimulasikan dengan skenario eksitasi harmonik yang identik, yang berasal dari rotasi *disk* motor DC yang ditransformasikan menjadi gerakan translasi oleh batang penghubung. *Output* utama yang diamati dalam simulasi adalah simpangan (*displacement*) dari massa struktur, yang kemudian dianalisis untuk menilai performa redaman dari masing-masing konfigurasi sistem.

2.2 Set-Up Pengujian Eksperimen

Pengujian dilakukan dengan membandingkan respons simpangan struktur tanpa peredam, dengan peredam TMD, dan dengan peredam *Hybrid* (gabungan TMD dan PID). Variasi rasio massa TMD yang diuji yaitu sebesar 20% dari massa struktur utama, dengan rasio kekakuan TMD sebesar 2%, 10%, 18%. Pada konfigurasi peredam *Hybrid*, PID ditempatkan di dalam massa TMD dengan variasi rasio massa sebesar 1,5%, 2%, 4%, 6,5%, dan 8% dari struktur utama. Material sisi benturan yang digunakan dalam PID adalah karet dan *styrofoam*, masing-masing dengan ketebalan 1 cm dan 2 cm. Seluruh konfigurasi peredam ditempatkan pada lantai dua struktur. Pengujian eksperimental dilakukan menggunakan model stuktur bangunan Tingkat 2 yang di pasang pada meja getar sebagai respons seismic terhadap daya dinamis. Skema lengkap perangkat uji ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Pengujian Secara Model Struktur Secara Eksperimen

Struktur terdiri atas 2 lantai, yang nantinya akan dilengkapi dengan sistem TMD dan peredam *Hybrid* yang terdiri dari Tuned Mass Damper (TMD) dan Particle Impact Damping (PID) yang dipasang di lantai paling atas.

Meja getar digerakkan oleh motor DC yang dihubungkan ke cakram dan batang penghubung. Gerakan rotasi dari motor ini diubah menjadi gerakan translasi horizontal melalui sistem batang dan cakram eksentrik. Motor DC diatur menggunakan slide regulator, yang memungkinkan pengguna mengatur kecepatan dan frekuensi eksitasi dengan presisi. Frekuensi eksitasi yang diberikan selama pengujian adalah 9,5 rad/s, 9,67 rad/s, 10 rad/s, dan 10,5 rad/s. Masing-masing skenario dijalankan selama 20 detik, setelah itu motor dimatikan dan meja getar berhenti, sehingga struktur mengalami fase getaran bebas (free vibration) secara alami.

Untuk merekam respons dinamis struktur, digunakan tiga buah sensor percepatan (accelerometer) yang masing-masing dipasang pada lantai dasar (Accelerometer 1), lantai dua (Accelerometer 2), dan pada massa damper (Accelerometer 3). Sensor-sensor ini terhubung ke dua buah mikrokontroler Arduino Uno (disebut sebagai Arduino 1 dan Arduino 2). Dimana arduino 1 merekam sinyal yang dikirim oleh sensor 1 dan 2 sedangkan arduino 2 merekam sinyal dari sensor 3. Arduino bertugas membaca data percepatan dan mengirimkannya ke laptop secara real-time. Laptop berfungsi sebagai pusat akuisisi data, pengaturan sistem, serta visualisasi hasil pengujian melalui serial monitor.

Komponen peredam *Hybrid* dipasang di bagian paling atas struktur. Sistem ini terdiri dari massa damper yang digantung menggunakan dua pegas di sisi kanan dan kiri (untuk menghasilkan karakteristik TMD), dan di dalam massa damper terdapat partikel logam bebas (seperti bola baja) yang menghasilkan efek tumbukan ketika sistem bergetar (PID). Kombinasi kedua mekanisme ini dirancang untuk meredam energi getaran baik melalui prinsip linier maupun non-linier.

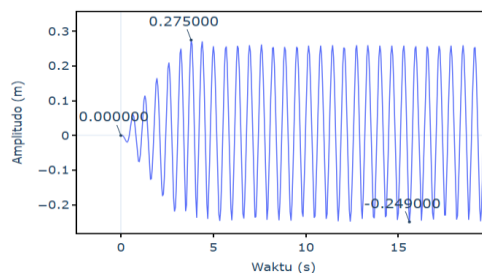
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

eksperimental yang telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem peredam haibrid terhadap respons dinamis sruktur. Analisis dilakukan berdasarkan data yang diperoleh baik dari hasil simulasi menggunakan perangkat lunak. Maupun dari pengamatan langsung melalui pengujian pada model meja getar.

Pembahasan mencakup perbandingan antara struktur tanpa peredam, struktur dengan Tuned Mass Damper (TMD), serta struktur dengan kombinasi peredam *Hybrid* (TMD + PID). Tujuan utama dari pembahasan ini adalah untuk menilai efektivitas sistem peredam dalam mereduksi respons dinamis struktur akibat eksitasi seismik buatan. Hasil yang diperoleh akan menjadi dasar dalam menarik kesimpulan mengenai peran peredam *Hybrid* dalam meningkatkan performa ketahanan struktur terhadap getaran. Dimana hasil yang di peroleh dalam melakukan penelitian antara lain:

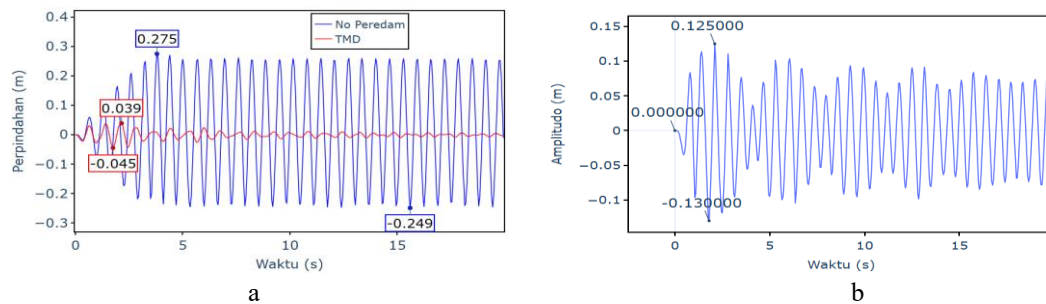
a. Hasil simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *Working Model 2D* untuk mengidentifikasi respons struktur terhadap beban harmonik pada frekuensi 9,678 rad/s. Simulasi ini menjadi tahap awal dalam menguji performa peredam sebelum dilakukan validasi melalui eksperimen. Pada konfigurasi awal tanpa peredam, struktur menunjukkan respons signifikan terhadap gaya gangguan. Simpangan maksimum tercatat sebesar 0,2750 m, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.



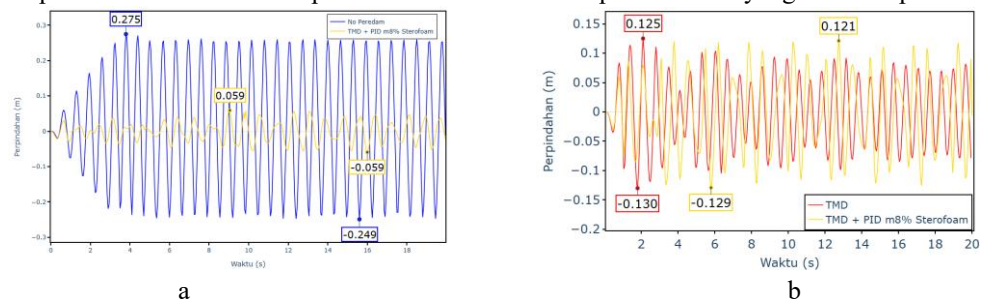
Gambar 3. Hasil Simulasi Respons Struktur Tanpa Peredam Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.678 rad/s

Simpangan yang cukup besar ini mencerminkan terjadinya resonansi, di mana energi dari gaya gangguan sepenuhnya ditransmisikan ke struktur utama tanpa adanya mekanisme peredaman. Maka perlu di tambahkan sebuah mekanisme peredam. Berdasarkan serangkaian simulasi, di dapatkan komposisi terbaik Ketika TMD ditambahkan dengan rasio massa 20% dan kekakuan 10% dari massa struktur utama, terjadi penurunan signifikan pada simpangan menjadi 0,045 m atau berkurang sebesar 83,64%, seperti diperlihatkan pada Gambar 4.a dan Gambar 4.b Simpangan maksimum pada peredam TMD tercatat sebesar 0,125 m, menandakan bahwa sebagian besar energi getar berhasil diserap oleh peredam. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian terbaru yang menunjukkan bahwa viscoelastic dampers sangat efektif dalam meredam respons struktur akibat eksitasi dinamis [23].

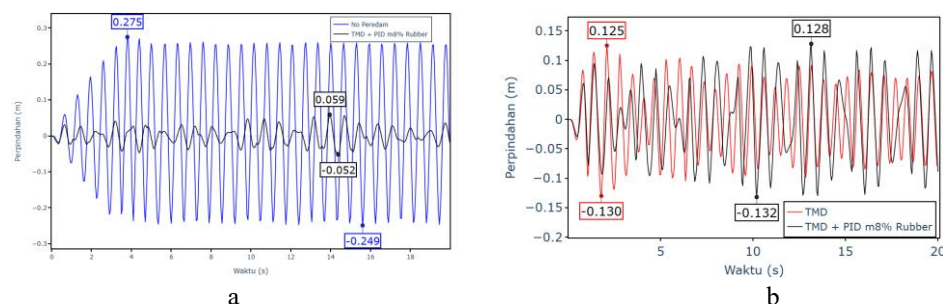


Gambar 4. a. Grafik Perbandingan Simpangan Struktur Sistem Tanpa peredam Dan Sistem Dengan tambahan TMD Untuk Nilai MTMD 20% Dan K 10% Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s
b. Grafik Simpangan Sistem Peredam TMD Untuk Nilai MTMD 20% Dan K 10% Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

Selanjutnya, simulasi konfigurasi peredam hibrida menunjukkan performa yang kompetitif. Dengan kombinasi TMD (20% massa, 10% kekakuan) dan PID (8% massa) serta penggunaan bahan benturan dari *styrofoam* setebal 2 cm, simpangan struktur dapat direduksi hingga 0,060 m atau setara dengan 78,18%, dengan simpangan peredam sebesar 0,769% dari simpangan struktur utama, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Sebagai pembandingan, ketika material benturan diganti dengan *rubber* pada konfigurasi yang sama, hasil simulasi menunjukkan simpangan struktur tetap sebesar 0,060 m, namun simpangan internal peredam meningkat menjadi 3,0769%, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.a dan Gambar 5.b Hasil penelitian ini di perkuat dengan penelitian [24] yang menyatakan bahwa kombinasi peredam pasif dan semi-aktif mampu memberikan kontrol respons seismik yang lebih adaptif dan efisien.



Gambar 5. a. Perbandingan Hasil Simulasi Respons Simpangan Struktur Utama dengan Tambahan Peredam Hybrid *styrofoam* pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s
b. Perbandingan Hasil Simulasi Respons Simpangan Peredam Hybrid *styrofoam* pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s



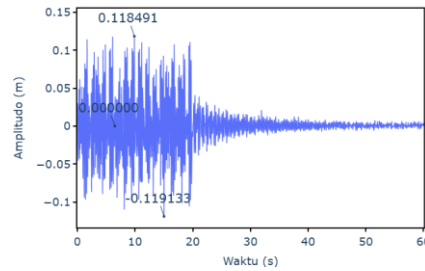
Gambar 6. a. Perbandingan Hasil Simulasi Respons Simpangan Struktur Utama dengan Tambahan Peredam Hybrid *rubber* pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s.
b. Perbandingan Hasil Simulasi Respons Simpangan Peredam Hybrid *rubber* pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

Hasil ini mengindikasikan bahwa meskipun keduanya memiliki efisiensi redaman struktur utama yang setara, material *styrofoam* lebih unggul dalam meredam gerakan internal peredam, sedangkan *rubber* cenderung mengalami deformasi lebih besar.

b. Hasil Pengujian Eksperimen

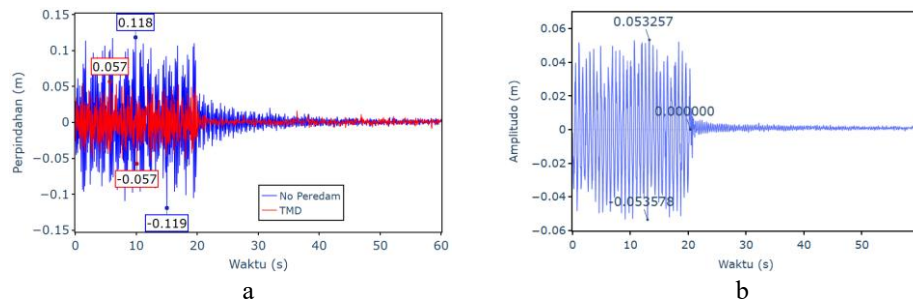
Verifikasi hasil simulasi dilakukan melalui pengujian eksperimental menggunakan meja getar, dengan frekuensi eksitasi yang disesuaikan sebesar 9,67 rad/s. Pengujian ini bertujuan untuk menilai performa aktual sistem peredam dalam kondisi fisik nyata serta mengidentifikasi potensi perbedaan akibat faktor eksternal seperti gesekan,

sambungan yang tidak sempurna, dan tidak idealan material. Pada struktur tanpa peredam, hasil eksperimen menunjukkan simpangan sebesar 0,1184 m (Gambar 7), yang menjadi dasar perbandingan efektivitas sistem peredam lainnya.



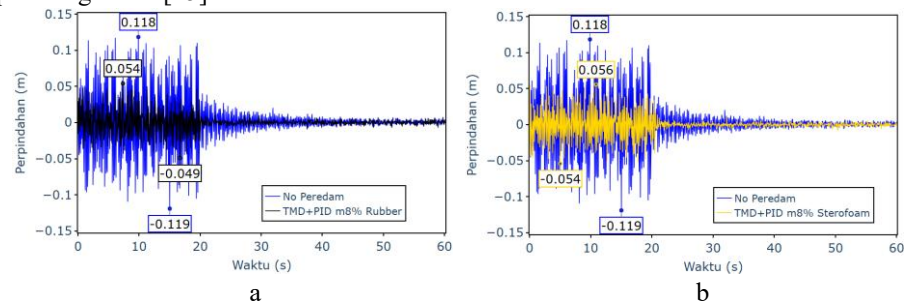
Gambar 7. Grafik pengujian eksperimen Simpangan Sistem Tanpa Peredam Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

Setelah sistem TMD diterapkan dengan rasio massa 20% dan kekakuan 10%, simpangan struktur menurun menjadi 0,0570 m, yang mencerminkan reduksi sebesar 51,86% terhadap kondisi awal, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 8.a.



Gambar 8. a. Grafik Perbandingan hasil eksperimental Simpangan Sistem Tanpa Peredam Dan Sistem Dengan tambahan TMD Untuk Nilai Md 20% Dan Kd 10% Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s.
b. Grafik Perbandingan Simpangan Peredam TMD Untuk Nilai Md 20% Dan Kd 10% Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

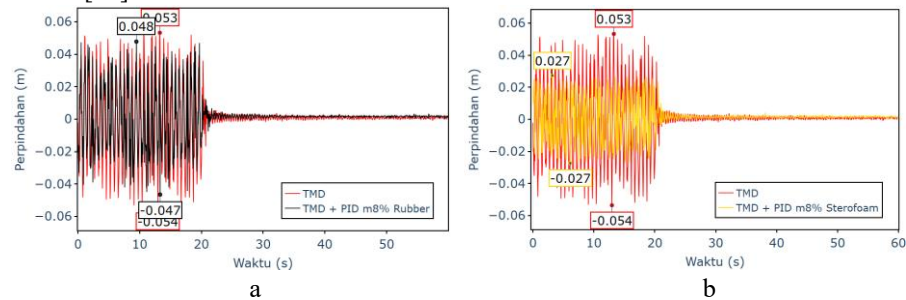
Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi getar berhasil dialihkan ke peredam tanpa menyebabkan simpangan berlebih pada komponen peredam itu sendiri. Pengujian kemudian dilanjutkan dengan konfigurasi peredam hibrida, yang mengombinasikan TMD dan PID dengan variasi material benturan *styrofoam* dan *rubber*. Pada konfigurasi hibrida berbahan *styrofoam* (dengan ketebalan sisi benturan 2 cm), struktur utama menunjukkan simpangan sebesar 0,0554 m, atau mengalami reduksi sebesar 53,19% dibandingkan struktur tanpa peredam. Simpangan maksimum yang terjadi pada sistem peredam hibrida dengan *styrofoam* adalah sebesar 0,0273 m, atau sekitar 48,89% dari simpangan struktur utama, yang ditampilkan pada Gambar 9.a dan 9.b Perilaku serupa juga diamati pada bangunan bertingkat dalam eksperimen dengan *Hybrid* damper berbasis cairan dan massa aktif, yang menunjukkan penurunan signifikan dalam amplitudo getaran [25].



Gambar 9. a. Perbandingan Hasil Eksperimen Respons Struktur Tanpa Peredam Dan Dengan Penambahan Jenis Peredam Hybrid Rubber Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 rad/s
b. Perbandingan Hasil Eksperimen Respons Struktur Tanpa Peredam Dan Dengan Penambahan Jenis Peredam Hybrid Styrofoam Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 rad/s

Hasil ini menunjukkan bahwa peredam *styrofoam* mampu menyerap energi dengan cukup efektif tanpa menimbulkan deformasi berlebih. Sementara itu, ketika material benturan diganti dengan *rubber*, simpangan struktur utama tercatat sebesar **0,054 m**, yang berarti reduksi sebesar **54,21%**—nilai tertinggi dari seluruh konfigurasi

eksperimen. Namun, simpangan pada sistem peredam hibrida *rubber* meningkat menjadi **0,0356 m**, atau **65,71%** dari simpangan struktur utama, seperti ditunjukkan pada Gambar 10.a Karakteristik redaman internal ini juga tercermin dalam penggunaan damper viskous berbasis mekanisme tuas-kolom, yang secara efektif mengurangi deformasi komponen internal peredam [26]



Gambar 10. a. Perbandingan Hasil Eksperimen Respon Simpangan peredam *Hybrid Rubber* Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

b. Perbandingan Hasil Eksperimen Respon Simpangan peredam *Hybrid styrofoam* Pada Frekuensi Gaya Gangguan 9.67 Rad/s

Nilai ini menunjukkan bahwa meskipun *rubber* memberikan redaman terbaik pada struktur utama, bahan ini menghasilkan deformasi internal yang lebih besar, kemungkinan akibat sifat elastis *rubber* yang cenderung menyimpan dan melepaskan energi dalam bentuk osilasi. Secara keseluruhan, baik *styrofoam* maupun *rubber* menunjukkan performa yang baik, tetapi dengan karakteristik yang berbeda: *styrofoam* lebih unggul dalam membatasi simpangan internal peredam, sementara *rubber* lebih efektif dalam mereduksi simpangan struktur utama.

Pada hasil pengujian secara eksperimen struktur dengan peredam jenis TMD nilai amplitudo yang terjadi pada masing – masing gaya gangguan berbeda dengan yang pengujian secara simulasi. Secara umum, amplitudo yang dihasilkan pada setiap variasi rasionya masih bersifat fluktuatif, hal ini terjadi karena frekuensi gaya gangguan yang diberikan pada struktur masih berada sekitar frekuensi pribadi struktur itu sendiri [10]. Serta pada pengujian secara eksperimental terdapat faktor luar yang menjadikan hasil mengalami perbedaan dengan hasil pengujian simulasi [27].

c. Komposisi rasio Terbaik

Dari keseluruhan simulasi dan eksperimen yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi peredam yang optimal sangat dipengaruhi oleh rasio massa, kekakuan, dan jenis material benturan yang digunakan. TMD dengan rasio massa 20% dan kekakuan 10% menunjukkan performa maksimal dalam simulasi, dengan reduksi simpangan mencapai 83,71%. Namun dalam pengujian eksperimen, konfigurasi peredam hibrida menunjukkan performa terbaik, dengan *rubber* menghasilkan reduksi simpangan 54,21% dan *styrofoam* 53,19%. Meskipun *rubber* sedikit lebih unggul dalam meredam simpangan struktur utama, *styrofoam* terbukti lebih efektif dalam membatasi simpangan internal peredam. Oleh karena itu, pemilihan material benturan dalam sistem peredam hibrida harus mempertimbangkan tidak hanya kemampuan redaman terhadap struktur utama, tetapi juga kapasitas untuk menjaga kestabilan peredam itu sendiri. Keseluruhan hasil ini dirangkum dalam Tabel 1, yang menunjukkan konfigurasi rasio dan material terbaik untuk mencapai efisiensi maksimal dalam pengendalian getaran. Dengan mempertimbangkan baik hasil simulasi maupun eksperimen, sistem peredam hibrida dengan kombinasi parameter yang tepat memiliki potensi besar sebagai solusi yang efektif dan adaptif dalam pengendalian respons dinamis struktur bangunan terhadap beban seismik. Parameter terbaik di peroleh pada konvigurasi massa TMD 20%, massa PID 8% dan kekakuan 10%.

Tabel 1. Komposisi Rasio Terbaik

Frekuensi Gangguan	Jenis dan Ketebalan Sisi Benturan	Amplitudo Struktur (m)		Amplitudo Peredam (m)		Reduksi amplitudo struktur (%)	
		Simulasi	Eksperimen	Simulasi	Eksperimen	Simulasi	Eksperimen
9.5	<i>Rubber</i> 2 cm	0.0650	0.0552406	0.1340	0.05182	75.9259	50.403
	<i>Styrofoam</i> 2 cm	0.0640	0.0671	0.1350	0.0316	76.2963	39.739
9.678	<i>Rubber</i> 2 cm	0.0600	0.054238	0.1320	0.0479	78.1818	54.209
	<i>Styrofoam</i> 2 cm	0.060	0.0554	0.1290	0.02726	78.1818	53.197
10	<i>Rubber</i> 2 cm	0.055	0.0570998	0.1260	0.04056	79.1667	40.608
	<i>Styrofoam</i> 2 cm	0.0550	0.0595	0.1240	0.027	79.1667	38.134
10.5	<i>Rubber</i> 2 cm	0.0510	0.0590083	0.1250	0.03526	71.3483	18.289
	<i>Styrofoam</i> 2 cm	0.0520	0.0501	0.1230	0.0254	70.7865	30.594

Hasil studi ini menunjukkan bahwa kombinasi rasio massa TMD sebesar 20% dan rasio kekakuan sebesar 10% pada pengujian simulasi maupun eksperimental memberikan efisiensi terbaik dalam mengurangi respons struktural terhadap gempa bumi pada model yang digunakan. Kesimpulan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa peningkatan rasio massa TMD cenderung meningkatkan kemampuan pengurangan respons getaran, terutama dalam kondisi eksitasi harmonik atau resonansi.

Sebagai contoh dalam sebuah penelitian eksperimental menunjukkan bahwa variasi rasio massa hingga 20% dan rasio kekakuan hingga 10% dapat secara efektif mengurangi amplitudo respons pada struktur eksperimental serupa [10, 28]. Konteks konfigurasi struktur model dan parameter eksperimental yang digunakan dalam studi ini, rasio massa 20% memberikan penurunan respons yang paling signifikan. Perbedaan ini menegaskan bahwa nilai optimal parameter TMD dapat bergantung pada karakteristik dinamis struktur, jenis rangsangan, serta batasan geometris dan fisik model uji yang digunakan [28].

Namun Dapat di lihat pada Tabel 1 hasil antara simulasi dan eksperimental memiliki perbedaan walaupun pola yang di hasilkan sama dan parameter yang optimal sama. Hal ini di karenakan oleh beberapa faktor yang tidak dapat dimodelkan secara lengkap dalam simulasi. Di antara faktor-faktor utama tersebut adalah gesekan pada sambungan dan rel gerak, celah pada sambungan mekanis, serta ketidaksempurnaan material dan sistem pengujian. Selain itu, simulasi mengasumsikan kondisi ideal dengan parameter konstan untuk massa, kekakuan, dan redaman, sedangkan nilai-nilai ini dapat berubah dalam eksperimen karena toleransi produksi dan kondisi pengujian. Perbedaan ini menyebabkan reaksi dalam eksperimen cenderung menunjukkan fluktuasi yang lebih kompleks daripada hasil simulasi.

4. Kesimpulan

1. Simulasi menunjukkan bahwa TMD (massa 20%, kekakuan 10%) mampu mereduksi amplitudo simpangan hingga 83,71% (dari 0,263 m menjadi 0,045 m), sementara peredam hibrida (PID 8% + *styrofoam* 2 cm) mereduksi 78,19% menjadi 0,060 m dengan *styrofoam* lebih efektif dibanding *rubber*.
2. Eksperimen memvalidasi hasil simulasi, dengan TMD menurunkan amplitudo sebesar 51,86% (menjadi 0,057 m), dan peredam hibrida berbasis *rubber* (54,21%) serta *styrofoam* (53,19%) terbukti optimal untuk struktur utama dan internal.

Daftar Pustaka

- [1] D. Hartono *et al.*, “Analisis Sejarah, Dampak, Dan Penanggulangan Bencana Gempa Bumi Pada Saat Pandemi Covid-19 Di Sulawesi Barat,” *PENDIPA J. Sci. Educ.*, vol. 5, no. 2, pp. 218–224, 2021, doi: 10.33369/pendipa.5.2.218-224.
- [2] R. D. Kusumastuti, Viverita, Z. A. Husodo, L. Suardi, and D. N. Danarsari, “Developing a resilience index towards natural disasters in Indonesia,” *Int. J. Disaster Risk Reduct.*, vol. 10, no. PA, pp. 327–340, 2014, doi: 10.1016/j.ijdrr.2014.10.007.
- [3] Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), “Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI),” <https://dibi.bnpb.go.id/>, diakses 30 Juli 2024.
- [4] M. Farid and L. Z. Mase, “Implementation of seismic hazard mitigation on the basis of ground shear strain indicator for spatial plan of Bengkulu city, Indonesia,” *Int. J. GEOMATE*, vol. 18, no. 69, pp. 199–207, 2020, doi: 10.21660/2020.69.24759.
- [5] A. Yanto, “Metode Sederhana Untuk Mengetahui Karakteristik Dinamik Model Struktur Pada Skala Laboratorium,” *J. Tek. Mesin ITP*, vol. 5, no. 2, pp. 117–126, 2015.
- [6] N. C. Idham, “Earthquake Disaster Mitigation in the Building Industry,” *J. Archit. Res. Des. Stud.*, vol. 4, no. 2, pp. 86–95, 2020.
- [7] Y. Ikeda, M. Yamamoto, T. Furuhashi, and H. Kurino, “Recent research and development of structural control in Japan,” *Japan Archit. Rev.*, vol. 2, no. 3, pp. 219–225, 2019, doi: 10.1002/2475-8876.12081.
- [8] M. A. Akbar, W. O. Wong, and E. Rustighi, “A Hybrid Damper with Tunable Particle Impact Damping and Coulomb Friction,” *Machines*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/machines11050545.
- [9] K. Y. Cheng, F. Jiang, H. Lou, *Smart Structures: Innovative Systems for Seismic Response Control*, CRC Press, 2008.
- [10] D. Suryadi, M. R. Ridlo, N. Daratha, and I. Agustian, “Pengaruh Tuned Mass Damper (TMD) terhadap Respons Getaran pada Struktur Bangunan,” *Semesta Teknika*, vol. 24, no. 2, pp. 84–92, 2021, doi: 10.18196/st.v24i2.12727.
- [11] L. Gagnon, M. Morandini, and G. L. Ghiringhelli, “A review of particle damping modeling and testing,” *J. Sound Vib.*, vol. 459, p. 114865, 2019.
- [12] Z. Lu, Z. Wang, S. F. Masri, and X. Lu, “Particle impact dampers: Past, present, and future,” *Struct. Control Health Monit.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–25, 2018.
- [13] M. A. Akbar and W. O. Wong, “A Hybrid Damper with Particle Impact Damper and Coulomb Friction Designed for Free Vibration Damping,” in *LNCE*, vol. 432, Springer, 2023.
- [14] K. S. Marhadi and V. K. K. A, “ARTICLE IN PRESS Particle impact damping : effect of mass ratio , material , and shape,” vol. 283, pp. 433–448, 2005, doi: 10.1016/j.jsv.2004.04.013.
- [15] M. Ayaz, H. Raza, and N. Husnain, “Results in Engineering Quantitative evaluation of surface material effects on particle impact damper performance- a time domain analysis,” *Results Eng.*, vol. 28, no. October, p. 107590, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.107590.
- [16] A. S. Butt and F. A. Akl, “Experimental Analysis of Impact-Damped Flexible Beams,” *J. Eng. Mech.*, vol. 123, no. 4, pp. 376–383, 1997.
- [17] C. Saluena, T. Pöschel, and S. E. Esipov, “Dissipative properties of vibrated granular materials,” *Phys. Rev. E*, vol. 59, no. 4, pp. 4422–4425, 1999.
- [18] S. M. Zahrai and A. F. Rod, “Effect of impact damper on SDOF system vibrations under harmonic and impulsive excitations,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 181, no. 1, 2009.
- [19] Z. Lu, D. Wang, and P. Li, “Comparison study of vibration control effects between suspended tuned mass damper and particle damper,” *Shock Vib.*, vol. 2014, 2014, doi: 10.1155/2014/903780.
- [20] D. Suryadi, A. Prasetya, N. Daratha, and I. Agustian, “Optimum Design Of Tuned Mass Damper Parameters To Reduce Seismic Response On Structure Using Genetic Algorithm,” vol. 1, pp. 41–49, 2023, [Online]. Available: <https://journals.utm.my/aej/article/view/17890/8143>
- [21] D. Suryadi, A. Putra, A. Fauzan, Zuliantoni, and N. Daratha, “Pemodelan Sistem Peredam Struktur dengan Menggunakan Tuned Mass Damper,” in *Pros. SeNITiA 2019*, pp. 47–54, 2019.

- [22] L. Z. Mase, T. F. Fathani, and A. D. Adi, "Pengaruh Frekuensi Getaran Terhadap Potensi Likuifaksi," *Teknosia*, vol. III, no. 2, pp. 16–22, 2017.
- [23] Zhan Shu, Ruokai You, & Yazhou Xie (2024). Viscoelastic Dampers for Vibration Control of Building Structures: A State-of-Art Review. *Journal of Earthquake Engineering**, 28(12), 3558–3585. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2345180>
- [24] *Hybrid* seismic control of buildings using tuned mass and magnetorheological dampers. *Structures and Buildings**, 173(7), 471–487, 2019. <https://doi.org/10.1680/jstbu.18.00090>
- [25] Vibration control of multi-story building structure by *Hybrid* control using tuned liquid damper and active mass damper. *Journal of Mechanical Science and Technology**, 34, 5005–5015, 2020. <https://doi.org/10.1007/s12206-020-1105-4>
- [26] Study on Vibration Reduction Effect of the Building Structure Equipped with Intermediate Column–Lever Viscous Damper. *Buildings**, 14(6), 1881, 2024. <https://doi.org/10.3390/buildings14061881>
- [27] Fouad Y. Alhamashi and Waleed K. Al-Ashtai, "Design of Tuned Mass Damper Used to Enhance the Response of Structure under Seismic Action," *Design Engineering*, pp. 1-18, 2022.
- [28] W. Dirbas, "The Effect of Tuned Mass Damper Mass Ratio on Wind Turbine Vibration Mitigation," vol. 14, no. 6, pp. 18388–18394, 2024.