

Perkembangan Teknologi Perangkat Disipasi Energi: Studi Literatur

Roro Sulaksitaningrum

Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No. 5 Malang, Jawa Timur, Indonesia

*Penulis korespondensi, Surel: roro.ningrum.ft@um.ac.id

Paper received: 07-05-2021; revised: 19-05-2021; accepted: 25-05-2021

Abstract

Conventional structures absorb earthquake energy by yielding or failure of building materials. Energy dissipation devices are gaining popularity due to their ability to reduce the vibration response of structures subjected to dynamic loads. In recent decades, the development of energy dissipation device technology has continued to develop through research and direct applications in various types of civil buildings. From its development, energy dissipation devices can be grouped into several categories, starting from simple passive energy dissipation devices, semi-active energy dissipation devices that can increase efficiency with an adaptive system that is able to regulate damping behavior in real time, active energy dissipation devices that can increase device capacity and intelligence, until hybrid energy dissipation devices which can increase overall reliability and structural efficiency.

Keywords: energy dissipation devices; dampers; dynamic loads; seismic

Abstrak

Struktur konvensional menyerap energi gempa dengan mengalami *yielding* atau kegagalan (*failure*) pada material bangunan. Perangkat disipasi energi (*energy dissipation devices*) mendapatkan popularitasnya dikarenakan kemampuannya dalam mengurangi respons getaran struktur dari struktural yang menerima berbagai jenis beban dinamis. Dalam beberapa dekade ini, perkembangan teknologi perangkat disipasi energi terus berkembang melalui berbagai riset dan aplikasi langsung dalam berbagai jenis bangunan sipil. Dari perkembangannya, perangkat disipasi energi dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori yaitu mulai dari perangkat disipasi energi pasif yang sederhana, perangkat disipasi energi semi-aktif yang mampu meningkatkan efisiensi dengan adanya sistem adaptif yang mampu mengatur perilaku peredam secara *real time*, perangkat disipasi energi aktif yang dapat meningkatkan kapasitas serta kecerdasan perangkat, hingga perangkat disipasi energi hibrid dimana dapat meningkatkan reliabilitas secara keseluruhan serta efisiensi struktural.

Kata kunci: perangkat disipasi energi; damper; beban dinamis; seismik

1. Pendahuluan

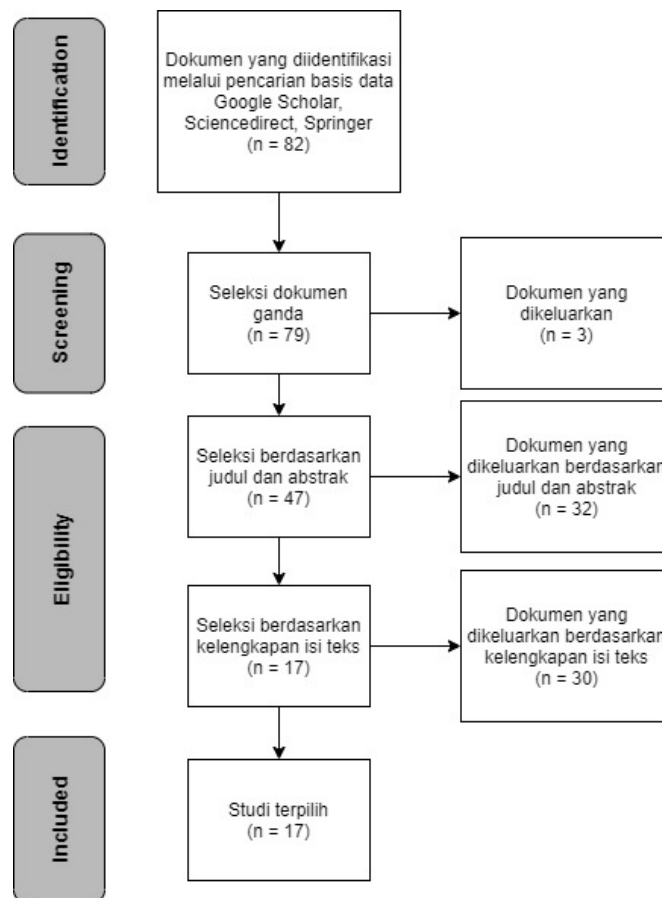
Struktur konvensional menyerap energi gempa dengan mengalami *yielding* atau kegagalan (*failure*) pada material bangunan. Misalnya, energi gempa diserap ketika balok dan kolom baja membentuk sendi plastis atau ketika struktur beton retak (Lee & Taylor, 2001). Sistem kontrol struktural, atau juga dikenal dengan peredam gempa (*dampers*) atau perangkat disipasi energi (*energy dissipation devices*) merupakan salah satu alternatif perangkat tambahan untuk leleh atau kegagalan struktural sebagai cara untuk menyerap energi gempa.

Perangkat disipasi energi mendapatkan popularitasnya dikarenakan kemampuannya dalam mengurangi respons getaran struktur dari sebuah konstruksi bangunan sipil yang telah menerima berbagai jenis beban dinamis. Perangkat disipasi energi membantu mengurangi kebutuhan disipasi energi yang terjadi pada struktur utama (Saaed et al., 2015). Perangkat disipasi energi dapat digunakan sebagai mitigasi gempa pada bangunan baru maupun sebagai

perkuatan struktur pada bangunan tua dengan kekuatan lateral rendah (Javanmardi et al., 2020). Perangkat disipasi energi telah banyak digunakan dalam berbagai jenis struktur bangunan. Dalam beberapa dekade ini, perkembangan teknologi perangkat disipasi energi yang dapat diaplikasikan pada konstruksi bangunan sipil dapat dibagi menjadi beberapa kategori, meliputi perangkat disipasi energi pasif, semi-aktif, aktif dan hibrid.

2. Metode

Berdasar pada tujuan dari penelitian ini yaitu menyajikan review perkembangan teknologi perangkat disipasi energi, maka metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan mengaju pada Preferred Reporting Items for Systematic Review and Meta-Analysis (PRISMA) flow yang tergambar pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram PRISMA

Pada proses Identification, pencarian sumber data yang digunakan pada penelitian ini mulai diidentifikasi melalui pencarian basis data Google Scholar, Scencedirect, dan Springer. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian data meliputi energy dissipation devices, dampers, dynamic loads, seismic, earthquake, building.

Pada proses Screening, hasil pencarian data diseleksi dan dilakukan penghapusan pada dokumen ganda. Hasil proses Screening lalu dilanjutkan pada proses Eligibility atau kelayakan.

Pada proses Eligibility, pertama dokumen yang telah melalui proses screening diseleksi berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini pula dokumen diseleksi berdasarkan tahun

publikasi, target dari penelitian ini ada pada rentang 2000 – 2021, diambil rentang cukup jauh dikarenakan penelitian ini mencakup review perangkat disipasi energi dimulai dari yang sederhana yaitu pada rentang perangkat disipasi energi pasif hingga perangkat terkini pada rentang perangkat disipasi energi hibrid. Lalu tahap kedua dari proses Eligibility adalah seleksi berdasarkan kelengkapan isi yang didasarkan pada kriteria inklusi dan eksklusi yang telah dipaparkan pada Tabel 1.

Setelah melalui dua tahap seleksi di proses Eligibility, studi atau penelitian yang telah terpilih dan memenuhi kriteria inklusi masuk pada tahap Included. Dokumen yang telah terpilih tersebut akan dianalisa lebih lanjut pada penelitian ini dan dipaparkan dengan cara deskriptif.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Diaplikasikan pada bangunan gedung	Diaplikasikan pada jembatan
Perangkat disipasi energi pasif, semi-aktif, aktif, hibrid	Desain bangunan tahan gempa, tanpa perangkat eksternal
Bahasa Inggris, bahasa Indonesia	Bahasa selain bahasa Inggris, bahasa Indonesia

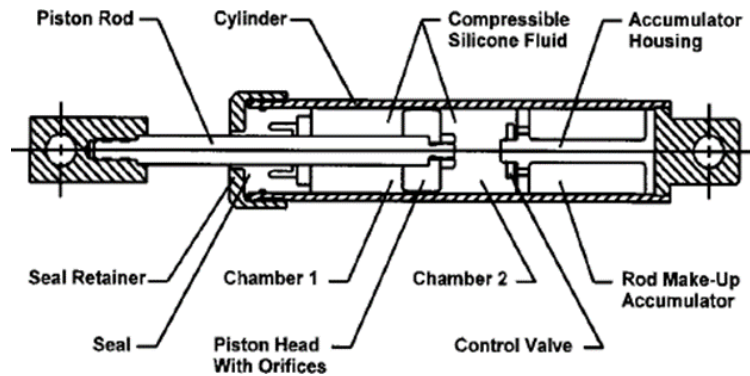
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Perangkat Disipasi Energi Pasif

Perangkat disipasi energi pasif merupakan perangkat untuk meningkatkan redaman, kekakuan, dan kekuatan dari sebuah struktur bangunan sipil. Perangkat disipasi energi pasif dapat digunakan baik untuk mitigasi gempa maupun rehabilitasi bangunan sipil yang mengalami penuaan ataupun penurunan kinerja struktur (Soong & Spencer, 2002). Di antara semua kategori, perangkat disipasi energi pasif merupakan salah satu kontrol getaran struktural paling populer. Hal ini dikarenakan perangkat energi disipasi pasif tidak mahal serta dapat melindungi struktur dari beban seismik dengan memberikan tambahan redaman dan/atau kekakuan pada struktur tanpa sumber energi eksternal dan algoritma kontrol selama pengoperasiannya (Parulekar & Reddy, 2009).

3.1.1. Viscous Dampers

Viscous dampers awal mulanya dikembangkan untuk industri pertahanan serta pesawat luar angkasa (Gilani & Wada, 2008). Namun seiring berjalannya waktu viscous dampers mulai diaplikasikan pada dunia teknik sipil sebagai perangkat peredam eksternal untuk melindungi struktur bangunan sipil dari beban seismik.



Gambar 1. Viscous Damper (Lee & Taylor, 2001)

Gambar 1 menunjukkan sistem kerja dari viscous dampers yang biasanya digunakan pada struktur bangunan sipil. Viscous dampers bekerja menghasilkan gaya yang mempertahankan gerakan struktur. Gaya ini sebanding dengan kecepatan relatif antara ujung-ujung peredam. Hukum redamannya adalah sebagai berikut:

$$F = CVN \quad (1)$$

dimana

F adalah kekuatan redaman

C adalah konstanta (nilai C tetap konstan selama rentang penuh dari kecepatan)

V adalah kecepatan

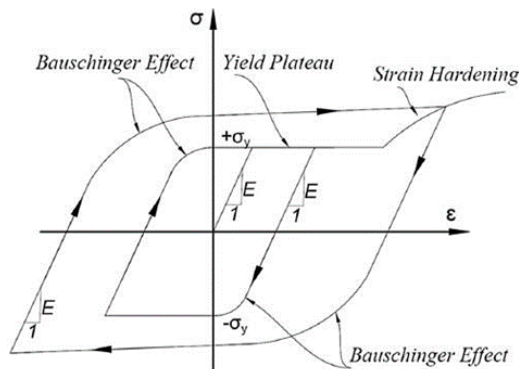
N adalah eksponen yang dapat berkisar dari 0,3 hingga 1,95 (N tetap konstan selama rentang kecepatan penuh)

Dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa tidak ada gaya pegas dalam persamaan ini, sehingga gaya peredam hanya bervariasi dengan kecepatan. Piston pusat bergerak melalui ruang berisi cairan. Saat piston bergerak, ia mendorong cairan melalui lubang di sekitar dan melalui kepala piston. Kecepatan fluida sangat tinggi di area ini, sehingga energi tekanan hulu hampir seluruhnya berubah menjadi energi kinetik. Ketika cairan berekspansi menjadi volume penuh di sisi lain, kepala piston itu melambat dan kehilangan energi kinetiknya serta menjadikannya turbulensi. Hal ini menyebabkan sangat sedikitnya tekanan di sisi hilir kepala piston jika dibandingkan dengan tekanan penuh pada sisi hulu kepala piston. Perbedaan dalam tekanan inilah yang menghasilkan gaya yang cukup besar untuk menahan gerakan peredam. Dalam kebanyakan kasus, cairan berbasis silikon digunakan untuk memastikan kinerja dan stabilitas cairan yang tepat. (Lee & Taylor, 2001).

3.1.2. Metallic Yielding Dampers

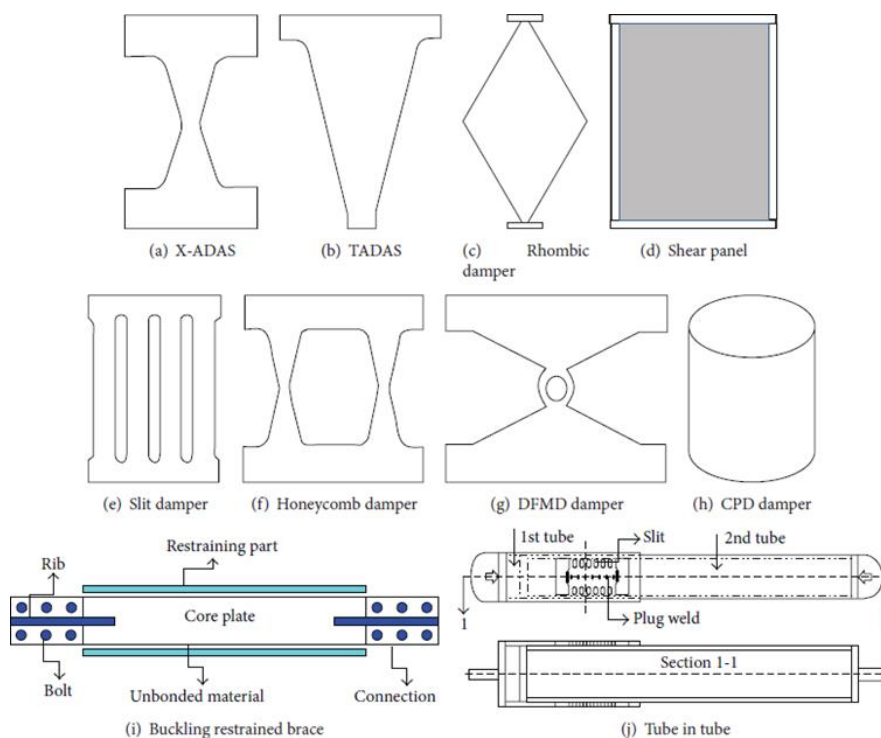
Metallic yielding dampers termasuk dalam hysteresis devices, dimana perangkat ini mendisipasi energi melalui perilaku histeresis (Jaisee et al., 2021). Proses pendisipasian energi pada perangkat ini tidak bergantung pada loading rate. Metallic yielding dampers menghilangkan energi melalui deformasi inelastis dari material penyusun (Saaed et al., 2015). Kelebihan dari metallic yielding dampers jika dibandingkan dengan perangkat disipasi energi aktif dan semi-aktif adalah perilaku histeris yang stabil, tidak bergantung pada loading rate, resistensi terhadap suhu, serta reliabilitas. Material yang biasa digunakan pada metallic yielding dampers meliputi baja, aluminium, timah, tembaga, dan shape-memory alloy. Hal ini

juga yang memberikan nilai lebih pada metallic yielding dampers, karena karakteristik dan perilaku dari material tersebut cukup familiar di dunia teknik sipil. (Javanmardi et al., 2020).



Gambar 2. Perilaku Histeresis dari Logam (Javanmardi et al., 2020)

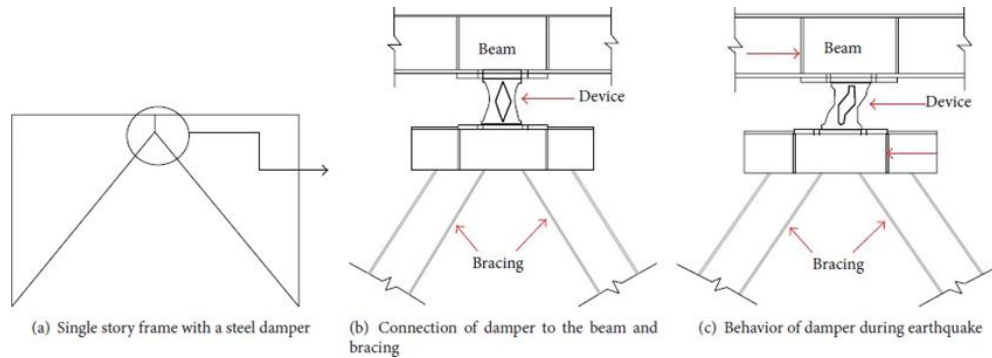
Dikarenakan bahan logam memiliki perilaku nonlinier, maka perilaku histeris material logam memiliki keuntungan dalam mendisipasi energi dinamis, terutama dalam sistem linier. Gambar 2 di atas menunjukkan penggambaran dari hysteretic loop dari logam pada umumnya. Hysteretic loop dari logam, seperti baja, aluminium, timah dan tembaga adalah serupa. Namun, perilaku histeris tersebut mungkin akan sedikit berbeda bergantung pada bentuk geometri metallic yielding dampers yang digunakan, seperti yang tergambar pada Gambar 3. (Javanmardi et al., 2020).



Gambar 3. Metallic Yielding Dampers (Teruna et al., 2015)

Berdasarkan mekanisme lelehnya, metallic yielding dampers dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu aksial, geser, dan lentur. ADAS, TADAS, honeycomb damper, DFMD, low-yield rhombic, dan slit damper termasuk dalam tipe leleh lentur, sedangkan buckling-

restrained brace termasuk dalam leleh aksial dikarenakan tipe ini yielding sepanjang arah gaya aksial yang timbul di bresing. Tube in tube merupakan tipe kombinasi dari buckling-restrained brace and slit damper. Gambar 4 menggambarkan instalasi metallic yielding dampers pada konfigurasi bresing K. (Teruna et al., 2015).



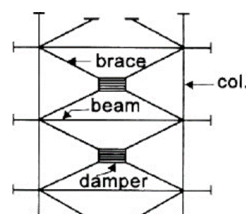
Gambar 4. Instalasi Metallic Yielding Dampers pada Konfigurasi Chevron (Teruna et al., 2015)

3.1.3. Friction Dampers

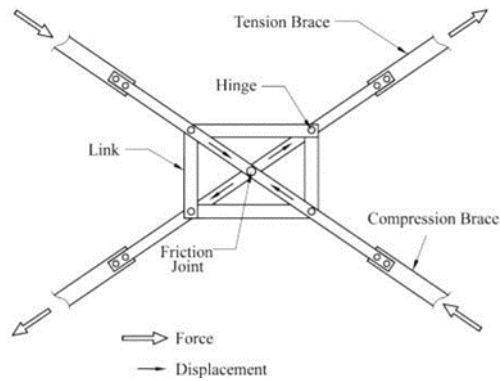
Gaya gesekan (friction) dapat digunakan secara efektif untuk mendisipasi energi dan mengurangi kerusakan pada struktur bangunan sipil selama gempa terjadi. Friction dampers termasuk dalam hysteresis devices, bersamaan dengan metallic yielding dampers. Proses pendisipasian energi pada perangkat ini pun tidak bergantung pada loading rate (Javanmardi et al., 2020). Melalui pergeseran dari satu atau banyak permukaan, perangkat ini menghilangkan getaran mekanik dan mengubahnya menjadi panas atau dapat dikatakan jika disipasi energi pada friction dampers ini merupakan perubahan dari energi kinetik menjadi energi potensial dan panas yang kemudian dilepaskan ke sekitarnya (Barzegar et al., 2020) (Jaisee et al., 2021). Terdapat berbagai macam pengembangan dari friction dampers, beberapa di antaranya adalah Pall friction damper (PFD), Slotted Bolted Connection (SBC), dan Energy Dissipating Restraint (EDR).

3.1.4. Pall Friction Dampers (PFD)

Seperti terlihat pada Gambar 5, perletakan Pall Friction Dampers (PFD) adalah di persilangan dari sistem bracing. Gambar 6 mengilustrasikan Pall Friction Dampers (PFD), dimana terdiri dari batang diagonal yang kaku dengan engsel friksi pada titik pertemuannya serta disambungkan dengan elemen horizontal dan vertikal.



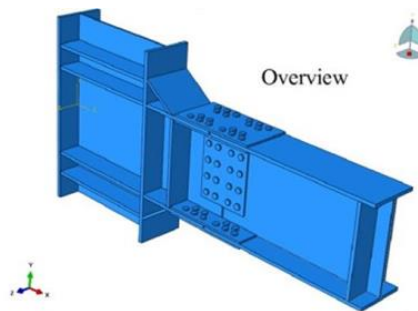
Gambar 5. Perletakan Pall Friction Dampers (PFD) (Cheng et al., 2008)



Gambar 6. Pall Friction Dampers (PFD) (Zahraei et al., 2013)

3.1.5. Slotted Bolted Connection (SBC)

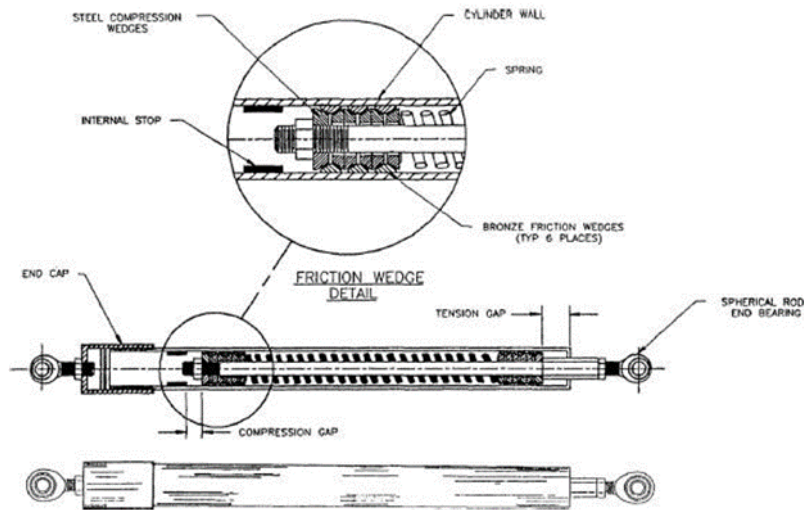
Meskipun PFD merupakan alternatif yang baik untuk disipasi energi pada rangka pemikul momen dan rangka bresing, kapasitas tahanan bebannya ternyata relatif rendah. Selain itu, memerlukan pekerjaan presisi untuk pembuatannya dan pelatihan khusus untuk proses pemasangan, yang mengakibatkan biaya tambahan. Oleh karena itu, untuk mengatasi kekurangan tersebut didesainlah friction dampers yang lebih sederhana yaitu Slotted Bolted Connection (SBC), seperti terlihat pada Gambar 7. (Nikoukalam et al., 2015) (Shu et al., 2016).



Gambar 7. Slotted Bolted Connection (SBC) (Shu et al., 2016)

3.1.6. Energy Dissipating Restraint (EDR)

Komponen dalam perangkat Energy Dissipating Restraint (EDR) terdiri dari baji tekan dan gesekan, pegas, komponen penghentian internal, serta silinder. Perangkat ini bekerja dengan menggeser gesekan dalam rentang gerak tertentu yang telah ditentukan sebelumnya, dan gerak dibatasi dengan menggunakan komponen penghentian internal. Di sini, gesekan geser dihasilkan oleh baji gesekan dengan mengubah gaya aksial yang diterapkan pada pegas menjadi tekanan normal terhadap permukaan bagian dalam silinder. Oleh karena itu, perangkat ini termasuk dalam peredam yang kompleks dalam hal perilaku tetapi sederhana dalam hal fitur mekanis yang memiliki dua karakteristik unik, yaitu kemampuan pemusatan diri yang kuat dan gaya gesekan proporsional terhadap perpindahan. (Jaisee et al., 2021).



Gambar 8. Energy Dissipating Restraint (EDR) (Jaisee et al., 2021)

3.2. Perangkat Disipasi Energi Semi-Aktif, Aktif, dan Hibrid

Perangkat disipasi energi semi-aktif, aktif, dan hibrid adalah pengembangan dari teknologi perangkat disipasi energi pasif. Penggunaan perangkat disipasi energi semi-aktif, aktif, dan hibrid sebagai perlindungan pada struktur bangunan sipil terhadap beban gempa mendapat perhatian yang cukup besar dalam beberapa tahun terakhir melalui berbagai penelitian dan pengaplikasian langsung pada struktur bangunan sipil di lapangan.

Perangkat disipasi energi semi-aktif, aktif, dan hibrid merupakan perangkat yang menyalurkan gaya yang terintegrasi dengan pemrosesan real-time melalui evaluator/pengontrol dan sensor di dalam struktur. Perangkat ini bergerak bersamaan dengan eksitasi dari beban seismik yang terjadi, sehingga hal ini dapat meningkatkan pelayanan dan keamanan. Penelitian sampai saat ini juga telah mencapai tahap di mana sistem aktif telah diinstal dalam skala penuh pada struktur bangunan sipil sebagai mitigasi terhadap bahaya seismik. (Soong & Spencer, 2002).

Sejumlah perusahaan pun sedang mengerjakan 'peredam pintar' dengan redaman yang dikontrol secara elektronik. Peredam ini dapat mengubah tingkat redamannya untuk meminimalkan respons dinamis struktur. Karena peredam pintar membutuhkan daya eksternal dan sistem kontrol, oleh karena itu perangkat ini harus dirancang untuk menghasilkan perilaku 'gagal-aman' jika terjadi kegagalan pada kelistrikan struktur bangunan yang sedang terlayani. (Lee & Taylor, 2001).

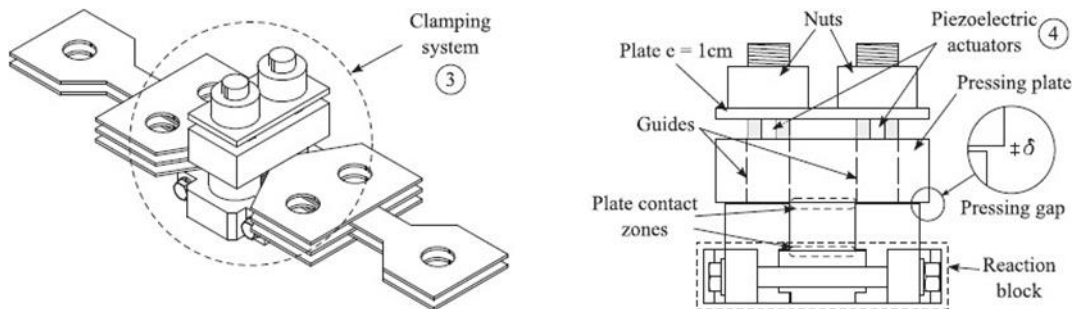
3.2.1. Perangkat Disipasi Energi Semi-Aktif

Perangkat disipasi energi semi-aktif adalah pengembangan dari perangkat disipasi energi pasif. Mereka biasanya disebut dengan perangkat yang dapat dikendalikan (controllable) atau peredam cerdas (intelligent dampers). Hal ini dikarenakan perangkat disipasi energi semi-aktif memiliki sistem adaptif dimana dapat meningkatkan efisiensi. Untuk meningkatkan kinerja, sistem adaptif dari perangkat disipasi energi semi-aktif mengatur perilaku peredam berdasarkan informasi yang dikumpulkan dari eksitasi dan respon struktural yang terjadi. Perangkat disipasi energi semi-aktif terdiri dari beberapa komponen,

di antaranya sensor (untuk mengukur input dan/atau output), komputer kontrol (untuk memproses hasil pengukuran dan menghasilkan sinyal kontrol ke aktuator), aktuator kontrol (untuk mengatur perilaku perangkat disipasi energi pasif), serta perangkat disipasi energi pasif. Aktuator yang ada dalam perangkat semi-aktif bertindak untuk mengontrol pergerakan perangkat disipasi energi pasif, tidak langsung menerapkan kekuatannya pada struktur. Oleh karena itu, perangkat semacam ini membutuhkan daya kecil, seperti baterai, dimana hal ini akan menguntungkan jika terjadi kegagalan kelistrikan saat terjadi gempa bumi. (Saaed et al., 2015).

3.2.2. Semi-Active Friction Dampers

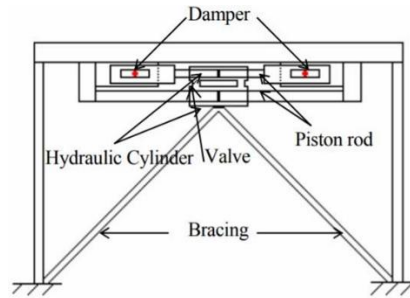
Semi-Active friction dampers (SAFD) juga disebut dengan peredam gesekan variabel atau terkendali (variable or controllable friction dampers). Perangkat ini biasanya terdiri dari satu atau lebih antarmuka gesekan serta mekanisme penjepitan yang dapat dikontrol, seperti terlihat pada Gambar 9. Mekanisme penjepitan pada SAFD dapat menghasilkan gaya kontak normal yang dapat disesuaikan. Dengan mengendalikan gaya normal, gaya slip dari peredam dapat diatur secara real time. Sebuah SAFD biasanya mampu menghasilkan efek redaman yang lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan PFD. Hal ini dikarenakan gaya gesernya dapat disesuaikan secara instan sesuai dengan karakteristik dinamis beban seismik dan respons struktural. Perangkat inipun memerlukan energi jauh lebih sedikit daripada perangkat aktif, karena tindakan kontrol SAFD diterapkan secara internal, bukan langsung pada sistem struktural, dimana structural memiliki massa yang besar. Penerapan SAFD umumnya memerlukan instalasi sistem penginderaan untuk memantau sistem respon dan eksitasi, dan juga hukum kontrol yang sesuai untuk menentukan gaya slip yang paling tepat secara real time, sehingga respons seismik dari struktur yang dikendalikan dapat ditekan secara lebih efektif. Untuk mencapai itu beberapa jenis aktuator telah diuji, seperti hidrolik, pneumatik, elektromagnetik dan piezoelektrik. (Lu et al., 2018; Pardo-Varela & Llera, 2015).



Gambar 9. Semi-Active Friction Dampers (Pardo-Varela & Llera, 2015)

3.2.3. Semi-Active Stiffness Dampers

Semi-Active stiffness dampers terdiri dari silinder hidrolik seimbang, batang piston kerja ganda, katup kontrol solenoida tertutup dan tabung yang menghubungkan dua ruang silinder. Cairan akan mengalir dengan bebas dan akan membuka kunci koneksi saat katup terbuka, sehingga mengurangi kekakuan struktural. Sebaliknya, ketika katup tertutup, cairan tidak dapat mengalir, dengan demikian secara efektif mengunci balok ke bresing dan menghasilkan peningkatan kekakuan struktural (Saaed et al., 2015)(Tan et al., 2010). Instalasi semi-active stiffness dampers pada kerangka balok-kolom dapat dilihat pada Gambar 10.



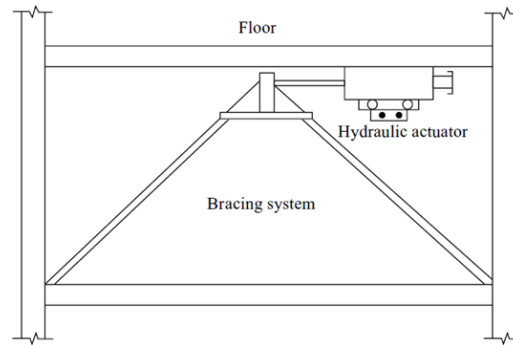
Gambar 10. Semi-Active Stiffness Dampers (Tan et al., 2010)

3.2.4. Perangkat Disipasi Energi Aktif

Pada perangkat disipasi energi pasif dan semi-aktif, terlepas dari efisiensi biaya dan reliabilitasnya, perangkat tersebut memiliki keterbatasan dalam kapasitas dan/atau kecerdasan untuk mengontrol respons seismik struktural. Misalnya, sistem pasif memiliki mekanisme sederhana dan mudah dibuat, tetapi mereka tidak dapat beradaptasi dengan eksitasi yang selalu berubah. Selain itu, beberapa perangkat disipasi energi pasif menjadi efektif untuk mengendalikan sebuah mode getaran dominan, namun tidak efektif untuk mode lainnya. Perangkat semi-aktif, seperti yang disebutkan sebelumnya, juga dapat beradaptasi dengan eksitasi, namun efisiensinya dibatasi dalam batas maksimum kapasitas perangkat pasif di mana mereka berada. Kebutuhan inilah yang telah menyebabkan berkembangnya teknologi perangkat disipasi energi aktif. (Saaed et al., 2015).

3.2.5. Active Brace Systems

Active brace systems atau sistem bresing aktif, memanfaatkan bresing struktural yang ada untuk memasang perangkat kontrol aktif (aktuator) ke dalam sistem struktur yang ada, seperti terlihat pada Gambar 11. Active brace systems dapat terintegrasi dalam beberapa jenis sistem bresing, yaitu bresing diagonal, V-bresing terbalik, K-bresing, ataupun X-bresing. Kekuatan kontrol yang besar dapat dihasilkan oleh servo valve-controlled aktuator hidrolis, yang dipasang pada sistem bresing antara dua lantai yang berdekatan. Sistem ini terdiri dari katup servo, pengontrol katup servo, aktuator hidrolis, catu daya hidrolis, sensor, dan komputer kontrol dengan algoritma yang telah ditentukan sebelumnya. Komputer kontrol menggunakan kontrol algoritma untuk memproses pengukuran sensor dan kemudian memberi pesan pada kontrol sinyal. Sinyal ini akan digunakan oleh katup servo untuk menyesuaikan arah dan intensitas aliran. Dengan demikian perbedaan tekanan ini akan menghasilkan gaya kontrol yang diperlukan untuk menahan beban seismik pada struktur. (Cheng et al., 2008; Saaed et al., 2015).



Gambar 11. Active Brace Systems (Cheng et al., 2008)

3.2.6. Perangkat Disipasi Energi Hibrid

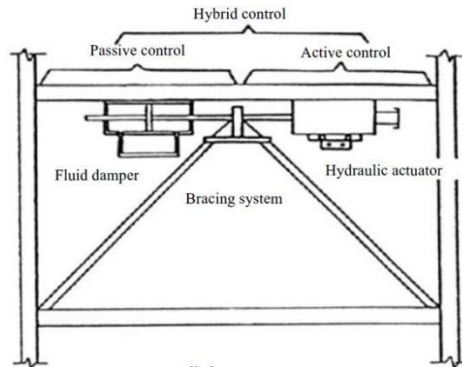
Seperti yang disajikan sebelumnya, perangkat disipasi energi aktif digunakan untuk mengimbangi kapasitas dan kecerdasan yang terbatas pada perangkat disipasi energi pasif dan semi-aktif. Perangkat disipasi energi aktif beroperasi tergantung pada pasokan daya eksternal. Hal ini dapat menghambat pengaplikasian perangkat disipasi energi aktif di lapangan dikarenakan membutuhkan penginderaan yang rumit dan sistem pemrosesan sinyal, sehingga mengurangi reliabilitas kontrol perangkat, dan akhirnya membutuhkan peralatan pembangkit tenaga yang besar dan tidak dapat dicapai dengan biaya yang wajar. (Cheng et al., 2008).

Oleh karena itu, tiga kelompok utama perangkat disipasi energi yaitu pasif, aktif, dan semi-aktif, dapat diaplikasikan dengan mengelompokkannya menjadi kombinasi seri atau paralel sehingga terpilih keuntungan terbaik dari masing-masing kelompok. Pengelompokkan inilah yang disebut dengan perangkat disipasi energi hibrid. (Saaed et al., 2015).

Pengembangan perangkat disipasi energi hibrid telah diselidiki oleh banyak peneliti guna menemukan potensi peningkatan reliabilitas secara keseluruhan dan efisiensi struktural. Karena perangkat disipasi energi hibrid terdiri dari banyak sistem kontrol, maka perangkat ini dapat menyelesaikan beberapa batasan-batasan yang dihadapi perangkat penyusun ketika bertindak sendirian. Dengan demikian, tingkat kinerja yang lebih tinggi dapat dicapai. (Spencer Jr & Nagarajaiah, 2003).

3.2.7. Hybrid Damper Actuator Bracing Control

Pada Hybrid Damper Actuator Bracing Control, terdapat banyak perangkat disipasi energi pasif yang dapat digunakan, seperti liquid mass dampers, spring dampers, and viscous fluid dampers. Karena memiliki kapasitas pembangkit tenaga yang kuat, hidrolik aktuator dapat digunakan sebagai perangkat aktif untuk sistem ini, seperti terlihat pada Gambar 12. Berbagai eksperimen dan penelitian menunjukkan bahwa sistem ini memiliki kapasitas yang lebih besar daripada perangkat disipasi energi pasif dalam mengurangi respons seismik struktur, serta membutuhkan lebih sedikit kekuatan kontrol jika dibandingkan dengan perangkat disipasi energi. (Saaed et al., 2015, Cheng et al., 2008).



Gambar 12. Instalasi Hybrid Damper Actuator Bracing Control (Cheng et al., 2008).

4. Simpulan

Dalam beberapa dekade ini, perkembangan teknologi perangkat disipasi energi terus berkembang melalui berbagai riset dan aplikasi langsung dalam berbagai jenis bangunan sipil. Perkembangan teknologi perangkat disipasi energi terus menyempurnakan berbagai kekurangan dari tipe sebelumnya. Selama perkembangannya, perangkat disipasi energi dapat dikelompokkan menjadi beberapa kategori yaitu mulai dari perangkat disipasi energi pasif yang sederhana, perangkat disipasi energi semi-aktif yang mampu meningkatkan efisiensi dengan adanya sistem adaptif yang mampu mengatur perilaku peredam secara real time, perangkat disipasi energi aktif yang dapat meningkatkan kapasitas serta kecerdasan perangkat, hingga perangkat disipasi energi hibrid dimana dapat meningkatkan reliabilitas secara keseluruhan serta efisiensi struktural.

Daftar Rujukan

- Barzegar, V., Laflamme, S., Downey, A., Li, M., & Hu, C. (2020). Numerical evaluation of a novel passive variable friction damper for vibration mitigation. *Engineering Structures*, 220, 110920.
- Cheng, F. Y. (2008). *Smart structures: innovative systems for seismic response control*. CRC press.
- Miyamoto, H. K., Gilani, A. S., & Wada, A. (2008, October). State of the art design of steel moment frame buildings with dampers. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China*.
- Jaisee, S., Yue, F., & Ooi, Y. H. (2021). A state-of-the-art review on passive friction dampers and their applications. *Engineering Structures*, 235, 112022.
- Javanmardi, A., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Ghadim, H. B., & Hanif, M. U. (2020). State-of-the-art review of metallic dampers: testing, development, and implementation. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 27(2), 455-478.
- Lee, D., & Taylor, D. P. (2001). Viscous damper development and future trends. *The Structural Design of Tall Buildings*, 10(5), 311-320.
- Lu, L. Y., Lin, T. K., Jheng, R. J., & Wu, H. H. (2018). Theoretical and experimental investigation of position-controlled semi-active friction damper for seismic structures. *Journal of Sound and Vibration*, 412, 184-206.
- Nikoukalam, M. T., Mirghaderi, S. R., & Dolatshahi, K. M. (2015). Analytical study of moment-resisting frames retrofitted with shear slotted bolted connection. *Journal of Structural Engineering*, 141(11), 04015019.
- Pardo-Varela, J., & De la Llera, J. C. (2015). A semi-active piezoelectric friction damper. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 44(3), 333-354.
- Parulekar, Y. M., & Reddy, G. R. (2009). Passive response control systems for seismic response reduction: A state-of-the-art review. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(01), 151-177.
- Saaed, T. E., Nikolakopoulos, G., Jonasson, J. E., & Hedlund, H. (2015). A state-of-the-art review of structural control systems. *JVC/Journal of Vibration and Control*, 21(5), 919- 937. <https://doi.org/10.1177/1077546313478294>

- Shu, Z., Ma, R., & He, M. (2016). Dimensional analysis of the slotted bolted connections against impulsive earthquake ground motions. *Journal of Constructional Steel Research*, 125, 128-141.
- Soong, T. T., & Spencer Jr, B. F. March (2002). Supplemental energy dissipation: State-of-the-art and state-of-the-practice. *Engineering Structures*, 24(3), 243-59.
- Spencer Jr, B. F., & Nagarajaiah, S. (2003). State of the art of structural control. *Journal of Structural Engineering*, 129(7), 845-856.
- Tan, P., Zhou, F., & Yan, W. (2010). A semi-active variable stiffness and damping system for vibration control of civil engineering structures. In *2004 ANCEER Annual Meeting*.
- Teruna, D. R., Majid, T. A., & Budiono, B. (2015). Experimental study of hysteretic steel damper for energy dissipation capacity. *Advances in Civil Engineering*, 2015.
- Zahraei, S. M., Moradi, A., & Moradi, M. (2013). Using pall friction dampers for seismic retrofit of a 4-story steel building in Iran. In *Topics in Dynamics of Civil Structures, Volume 4* (pp. 101-107). Springer, New York, NY.