

**DISERTASI**

**ANALISIS KEKAKUAN DAN REDAMAN EFEKTIF *STEEL DAMPER*  
TERHADAP BEBAN SIKLIK LATERAL**

**Analysis of Effective Stiffness and Damping of Steel Damper under Lateral  
Cyclic Loading**

**BASTIAN ARTANTO AMPANGALLO  
D013211015**



**PROGRAM STUDI ILMU TEKNIK SIPIL  
DEPARTEMEN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

**PENGAJUAN DISERTASI**

**ANALISIS KEKAKUAN DAN REDAMAN EFEKTIF  
*STEEL DAMPER* TERHADAP BEBAN SIKLIK LATERAL**

Disertasi  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor  
Program Studi Ilmu Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

ttd

**BASTIAN ARTANTO AMPANGALLO  
D013211015**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2024**

## **PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA**

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Bastian Artanto Ampangallo  
Nomor Mahasiswa : D013211015  
Program Studi : Ilmu Teknik Sipil

Dengan ini menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Analisis Kekakuan dan Redaman Efektif Steel Damper terhadap Beban Siklik Lateral” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng., Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty S.T., M.T. dan Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T. Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 01 Oktober 2024

Yang menyatakan



Bastian Artanto Ampangallo

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis haturkan kehadiran Allah SWT atas selesainya penulisan disertasi ini. Tema pokok disertasi ini menyangkut Analisis Kekakuan dan Redaman Efektif Steel Damper terhadap Beban Siklik Lateral. Bukan hal yang mudah untuk mewujudkan gagasan-gagasan tersebut dalam sebuah susunan disertasi, berkat bimbingan, arahan dan motivasi berbagai pihak maka disertasi ini bisa disusun sebagaimana kaidah-kaidah yang dipersyaratkan, dan untuk itu penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr-Ing. Herman Parung, M.Eng., selaku promotor, yang selalu memberi semangat, bimbingan, koreksi dan saran hingga penulisan disertasi ini selesai.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T. M.T., selaku co-promotor, atas bantuan, bimbingan, koreksi dan saran mulai dari ide penelitian, pelaksanaan penelitian hingga terwujudnya disertasi ini.
3. Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T., selaku co-promotor, atas bantuan, bimbingan dan saran khususnya pada saat pelaksanaan penelitian, dan koreksi-koreksi untuk penyempurnaan disertasi ini.
4. Ketua Unit Penjaminan Mutu S3, Departemen Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Bapak Prof DR. Ir. H. Muhammad Saleh Pallu, M.Eng. yang banyak memberi bimbingan dalam penulisan.
5. Ayahanda Triyono Baroto dan ibunda (Almh) Frederika, serta istri Penulis Irma Payuk, SKM, dan kepada anak-anakku Lionel Frederico Ampangallo, dan Rainer Anthony Ampangallo yang senantiasa menjadi penyemangat dalam penyusunan disertasi ini.

Semoga segala bantuan, motivasi, koreksi dan saran yang telah diberikan mendapat imbalan yang seimbang dari Allah Yang Maha Kuasa. Keterbatasan kemampuan, pengetahuan penulis sehingga disertasi ini masih belum sempurna yang diharapkan, untuk itu koreksi tambahan masih sangat diharapkan untuk perbaikan disertasi ini. Harapan penulis, Disertasi ini dapat memberi manfaat kepada pihak-pihak yang membutuhkan.

Makassar,      Oktober 2024  
Penulis

Bastian Artanto Ampangallo

## ABSTRAK

**BASTIAN ARTANTO AMPANGALLO.** *Analisis Kekakuan dan Redaman Efektif Steel Damper terhadap Beban Siklik Lateral.*

*Steel damper* adalah komponen yang digunakan dalam struktur bangunan untuk mengurangi getaran dan energi yang dihasilkan oleh beban dinamis seperti gempa bumi. Beberapa faktor yang mempengaruhi efektifitas *steel damper* dalam mendissipasi energi antara lain: luas penampang, distribusi massa, geometri penampang, dan kekakuan material. Geometri penampang atau bentuk dari *steel damper* dapat mempengaruhi bagaimana energi diserap dan didissipasi dalam sistem struktural. Penampang dengan variasi geometri yang berbeda dapat memiliki respons mekanis yang berbeda terhadap beban dinamis. Penelitian ini membahas pengujian eksperimental untuk mengetahui perilaku *steel damper* dengan variasi penampang terhadap beban siklik lateral. Adapun variasi penampang *steel damper* yang digunakan yaitu *slit steel damper* (SSD), *tapered steel damper* (TSD) dan *oval steel damper* (OSD). Hasil penelitian menunjukkan kapasitas dissipasi energi pada ketiga variasi penampang tersebut relatif sama. Namun, tipe *slit steel damper* (SSD) memiliki kekakuan yang paling besar dibandingkan dua tipe lainnya.

**Kata Kunci:** *steel damper*, geometri penampang, kapasitas dissipasi energi

## **ABSTRACT**

**BASTIAN ARTANTO AMPANGALLO.** *Analysis of Stiffness and Effective Damping of Steel Damper under Lateral Cyclic Load.*

Steel dampers are structural components used in building structures to reduce vibrations and energy generated by dynamic loads such as earthquakes. Several factors affect the effectiveness of steel dampers in dissipating energy include: cross-sectional area, mass distribution, cross-sectional geometry, and material stiffness. The cross-sectional geometry or shape of the steel damper can affect how energy is absorbed and dissipated in the structural system. Cross sections with different geometry variations can have different mechanical responses to dynamic loads. This research discusses experimental testing to determine the behavior of steel dampers with varying cross-sections under lateral cyclic loads. The steel damper cross-section variations used are slit steel damper (SSD), tapered steel damper (TSD) and oval steel damper (OSD). The results show that the energy dissipation capacity of the three cross-sectional variations is relatively the same. However, the slit steel damper (SSD) type has the greatest stiffness compared to the other two types.

**Keywords:** *steel damper, shape geometry, energy dissipation capacity*

# UJIAN TUTUP DISERTASI

## ANALISIS KEKAKUAN DAN REDAMAN EFEKTIF STEEL DAMPER TERHADAP BEBAN SIKLIK LATERAL

**BASTIAN ARTANTO AMPANGALLO**  
**D013211015**

Menyetujui  
Komisi Penasehat,



**Prof. Dr.-Ing. Herman Parung, M.Eng**  
NIP. 19620729 198703 1 001



**Prof. Dr. Eng. Ir. Rita Irmawaty, S.T., M.T**  
NIP. 19720619 200012 2 001



**Dr. Eng. Ir. A. Arwin Amiruddin, S.T., M.T**  
NIP. 19791226 200501 1 001

Ketua Program S3  
Program Studi Teknik Sipil



**Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T**  
NIP. 19720619 200012 2 001

## DAFTAR ISI

DAFTAR ISI .....	i
DAFTAR TABEL .....	iii
DAFTAR GAMBAR .....	iv
BAB I. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	6
1.3 Tujuan Penelitian .....	7
1.4 Manfaat Penelitian .....	7
1.5 Ruang Lingkup Penelitian .....	8
1.6 Sistematika Penulisan .....	9
BAB II. KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS .....	11
2.1 Teori Dasar .....	11
2.2 Slit Steel Damper .....	15
2.3 Kerangka Konseptual.....	17
2.4 Hipotesis .....	24
2.5 Studi Empiris Penelitian Terdahulu .....	25
BAB III. TOPIK PENELITIAN I .....	33
BAB IV. TOPIK PENELITIAN II.....	42

BAB V. TOPIK PENELITIAN III.....52

BAB VI. PEMBAHASAN UMUM .....64

BAB VII. KESIMPULAN DAN SARAN .....66

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Dimensi sampel uji tarik .....	36
Tabel 2. Hasil uji tarik spesimen pelat baja.....	39
Tabel 3. Dimensi spesimen slit steel damper.....	46
Tabel 4. Hasil pengujian karakteristik pelat baja .....	47
Tabel 5. Regangan eksperimental damper tipe OSD.....	50
Tabel 6. Regangan eksperimental damper tipe TSD .....	51
Tabel 7. Regangan eksperimental damper tipe SSD .....	52
Tabel 8. Dimensi spesimen pengujian siklik .....	55
Tabel 9. Beban dan perpindahan untuk 12 siklus pembebanan .....	59
Tabel 10. Kekakuan efektif .....	61
Tabel 11. Redaman Efektif pada ketiga tipe damper .....	62

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Tipe metallic damper dan arah sumbu pemasangan .....	4
Gambar 2. Skema instalasi metallic damper.....	5
Gambar 3. Jenis-jenis torsional damper .....	12
Gambar 4. Round hole metallic damper .....	13
Gambar 5. Parameter desain steel damper .....	16
Gambar 6. Major cracks pada steel damper .....	16
Gambar 7. Pengelompokan sistem kontrol struktur .....	17
Gambar 8. Kategori dampers menurut Wang dan Munfakh.....	18
Gambar 9. Jenis-jenis <i>metallic dampers</i> .....	19
Gambar 10. Desain slit steel damper oleh Chan dan Albermani.....	20
Gambar 11. Desain tapered slit steel damper.....	21
Gambar 12. Parameter tapered steel damper .....	23
Gambar 13. Kerangka piker pemilihan model steel damper .....	24
Gambar 14. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Baja .....	35
Gambar 15. Dimensi uji tarik spesimen berdasarkan ASTM E8M .....	36
Gambar 16. Spesimen uji tarik.....	37
Gambar 17. Set up benda uji tarik .....	38
Gambar 18. Grafik Hubungan Tegangan Regangan Sampel Pelat .....	39
Gambar 19. Pola Kegagalan Spesimen Uji Tarik.....	40
Gambar 20. Dimensi damper yang diusulkan Madeshwaran.....	44
Gambar 21. Set up pengujian damper .....	46
Gambar 22. Deformasi damper setelah pengujian.....	47
Gambar 23. Grafik Distribusi Regangan Oval Steel Damper .....	48
Gambar 24. Grafik Distribusi Regangan Tapered Steel Damper .....	49
Gambar 25. Grafik karakteristik redaman dan kekakuan .....	53
Gambar 26. Geometri penampang damper .....	54

Gambar 27. Set up pengujian siklik .....	55
Gambar 28. Data Logger .....	56
Gambar 29. Grafik hysteresis loop.....	57
Gambar 30. Envelope curve .....	59
Gambar 31. Grafik Kekakuan Efektif.....	60

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Salah satu bencana alam yang paling mematikan dan menyebabkan kerugian secara emosional, sosial dan finansial adalah gempa bumi. Dalam kurun waktu sepuluh tahun terakhir, sejumlah peristiwa gempa bumi telah mengakibatkan korban jiwa dan kerugian yang cukup besar. Kantor berita *Reuters* telah mencatat sejumlah peristiwa gempa bumi dalam satu dekade terakhir di seluruh belahan bumi diantaranya:

1. Gempa Bumi Sichuan, Tiongkok (2013): Pada 20 April 2013, gempa bumi berkekuatan 7,0 Skala Richter mengguncang provinsi Sichuan, Tiongkok. Gempa ini menyebabkan kerusakan yang signifikan dan menewaskan sekitar 200 orang. Ribuan orang juga mengalami luka-luka.
2. Gempa Bumi Nepal (2015): Pada 25 April 2015, gempa berkekuatan 7,8 Skala Richter melanda Nepal. Gempa ini menyebabkan kerusakan besar di ibu kota Kathmandu dan daerah sekitarnya. Lebih dari 8.000 orang tewas dan jutaan lainnya terdampak oleh gempa ini.
3. Gempa Bumi Mexico City, Meksiko (2017): Pada 19 September 2017, Mexico City dan sekitarnya diguncang oleh gempa bumi berkekuatan 7,1 Skala Richter. Gempa ini menyebabkan kerusakan yang serius dan menewaskan lebih dari 360 orang.
4. Gempa Bumi Lombok, Indonesia (2018): Pada Juli dan Agustus 2018, pulau Lombok, Indonesia, diguncang oleh serangkaian gempa bumi berkekuatan tinggi. Gempa terkuat, pada 5 Agustus 2018, memiliki kekuatan 6,9 Skala Richter. Gempa-gempa ini menyebabkan kerusakan yang luas, menewaskan lebih dari 500 orang, dan mengungsi ribuan penduduk.
5. Gempa Bumi Sulawesi Tengah, Indonesia (2018): Pada 28 September 2018, Sulawesi Tengah, Indonesia, dilanda gempa bumi berkekuatan 7,5 Skala Richter yang diikuti oleh tsunami. Bencana ini menghancurkan kota Palu dan

sekitarnya, menewaskan lebih dari 4.300 orang, dan meninggalkan ribuan lainnya hilang atau terluka.

6. Gempa Bumi Haiti (2021): Pada 14 Agustus 2021, Haiti kembali diguncang oleh gempa bumi berkekuatan 7,2 Skala Richter. Gempa ini mengakibatkan kerusakan yang parah di wilayah barat daya negara tersebut. Lebih dari 2.200 orang tewas dan ribuan lainnya terluka.
7. Gempa Bumi Turki (2023): Pada 6 Februari 2023 juga terjadi gempa bumi di Turki yang memakan korban jiwa. Selain itu, dampak gempa Turki berkekuatan 7,8 skala Richter itu juga mengakibatkan banyak bangunan mengalami kerusakan dan bahkan runtuh.

Dalam keterkaitan respon struktur ketika terkena beban dinamis, seperti gempa bumi, energi yang dihasilkan oleh beban dinamis tersebut dapat menyebabkan getaran yang berlebihan dan merusak struktur. Respon dinamis ini dapat merusak fisik struktur dan mengancam keselamatan manusia. Para ilmuwan telah melakukan banyak riset dan memberikan beberapa alternatif untuk mengurangi bahkan mencegah kerusakan pada struktur yang diakibatkan oleh gempa bumi. Salah satu alternatif yang dikemukakan berupa pengaplikasian sistem kontrol struktur yang dapat meningkatkan kapasitas seismik dari sistem struktur dalam bentuk alat peredam (*damper*) pada elemen struktur. Energi gempa yang masuk ke sistem struktur didissipasi oleh sistem kontrol yang terpasang. Sistem kontrol ini lebih dikenal dengan istilah *seismic devices*. Secara umum, cara kerja sistem kontrol struktur ini yaitu dengan mengubah kekakuan dan menambah massa pada struktur sehingga ketika terjadi gempa, elemen struktur dapat dikontrol dan direncanakan dalam keadaan elastis.

Spencer dan Nagarajaiah (2003) mengklasifikasikan sistem kontrol struktur menjadi empat jenis yaitu sistem kontrol aktif, sistem kontrol pasif, sistem kontrol semi aktif dan sistem kontrol *hybrid*. Pada sistem kontrol aktif dan semi aktif, respon struktur bervariasi tergantung pada gaya gempa atau angin yang bekerja pada struktur. Sistem kontrol aktif bekerja dengan memberi gaya untuk melawan gaya gempa yang diinduksi pada struktur bangunan, dikontrol dengan menggunakan komputer yang memiliki sensor dalam mengukur respon struktur. Sensor mengirim respon struktur ke komputer, kemudian komputer akan

menentukan besar gaya yang diperlukan berdasarkan respon struktur tersebut. Dengan kata lain, sistem kontrol struktur menyesuaikan respon struktur terhadap gaya yang bekerja (gempa atau angin). Kelebihan sistem kontrol aktif adalah menghasilkan respon struktur yang sesuai dengan besar gaya gempa yang terjadi pada bangunan, sedangkan kekurangannya adalah biaya yang tinggi karena membutuhkan energi luar yang cukup besar untuk meredam gaya gempa.

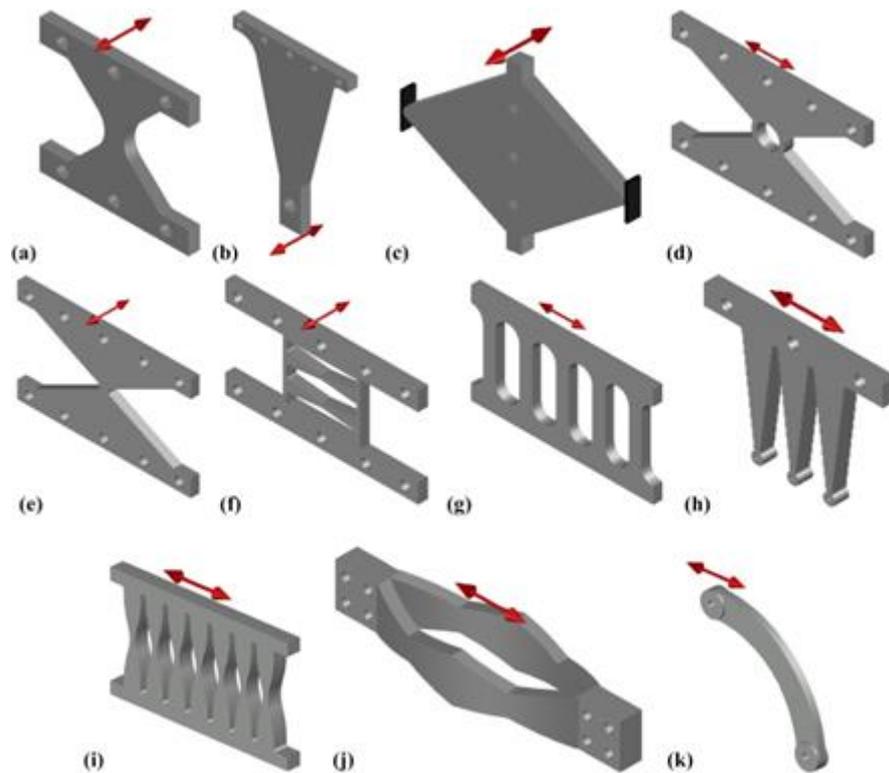
Pada sistem kontrol pasif, respon struktur bergantung pada karakteristik material dan peralatan yang digunakan pada peredam (*dampers*) dan tidak memerlukan sumber energi lain untuk menahan gaya gempa (Javanmardi *et al.*, 2019). Setelah energi gempa masuk ke elemen struktur, sistem ini akan bekerja dengan cara menyerap energi tersebut melalui mekanisme redaman yang bekerja pada *dampers* yang terpasang. Fungsi utama dari sistem ini adalah mengurangi kontribusi elemen struktur utama dalam mendissipasi energi akibat respon gempa yang signifikan.

Kategori sistem kontrol pasif (*passive energy dissipation devices*) dikelompokkan berdasarkan mekanisme dissipasi energi, yang terdiri dari: *base isolators, viscoelastic devices, tuned mass dampers, metallic yielding dampers, friction dampers, liquid dampers, dan viscous dampers*. *Metallic damper* atau *metallic yielding damper* adalah material baja yang digunakan sebagai alat dissipator energi pasif dalam perencanaan suatu bangunan tahan gempa. *Metallic damper* mendissipasi energi yang masuk melalui deformasi inelastis materialnya (baja). Alat ini lebih murah jika dibandingkan alat dissipasi lainnya dan konsep pemasangannya cukup sederhana. Alat ini dipasang pada bagian struktur untuk mereduksi besarnya deformasi akibat gaya gempa melalui deformasi inelastis *damper* di mana sistem kontrol pasif ini mempunyai kekakuan elastisnya sendiri. Penggunaan *damper* ini berfungsi memperkecil respon simpangan struktur dan menghentikan getaran, agar simpangan antar tingkat dapat diperkecil sehingga gaya lateral kolom menjadi kecil.

Berdasarkan kemampuan dalam memikul gaya geser akibat gempa, mekanisme lentur pada *metallic yielding damper* terdiri dari dua, yaitu mekanisme lentur dalam arah sumbu kuat dan melentur dalam arah sumbu lemah. Ketika dipasang pada sumbu kuat, *damper* akan menyerap energi gempa melalui

mekanisme lentur dan geser inelastis, dan apabila dipasang pada sumbu lemah, *damper* akan menyerap energi gempa hanya melalui mekanisme lentur inelastis.

Perbedaan mekanisme ini juga secara ekonomis berpengaruh terhadap pemilihan model pemasangan *damper*. Pemasangan dalam arah sumbu lemah membutuhkan lebih banyak *damper* sehingga lebih mahal jika dibandingkan dengan pemasangan pada sumbu kuatnya. *Damper* yang dipasang searah gaya geser mempunyai kekakuan yang jauh lebih besar.

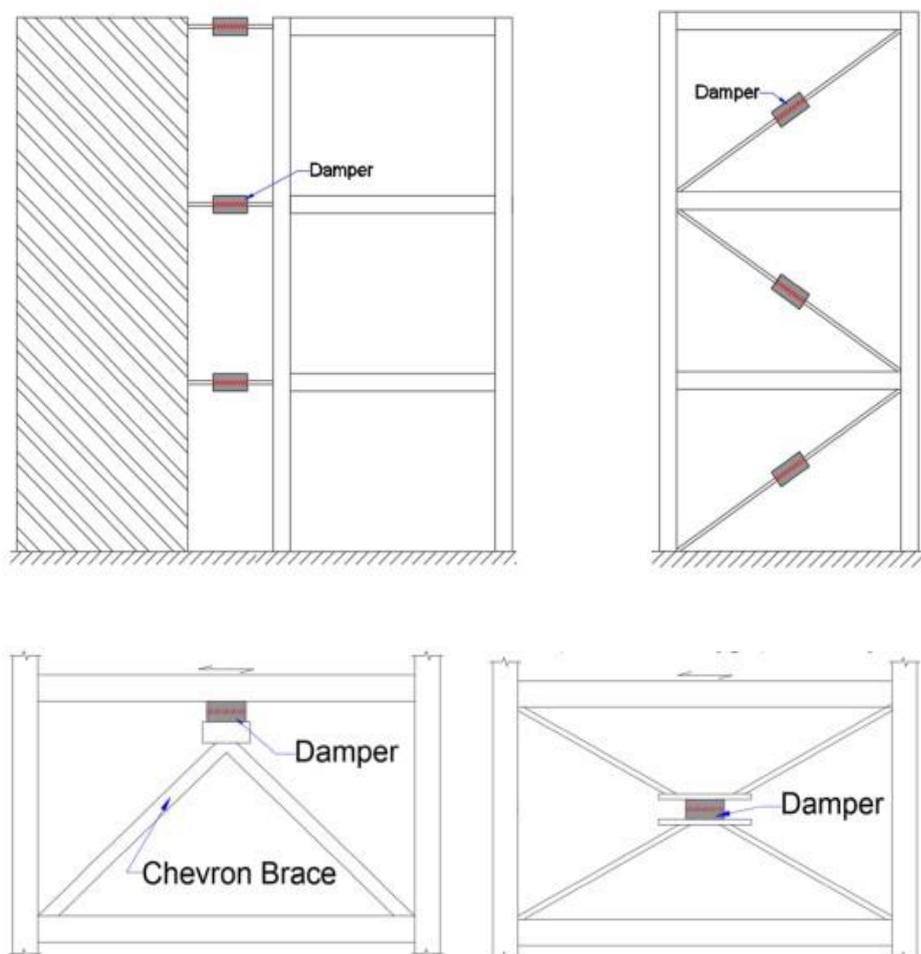


**Gambar 1.** Berbagai tipe *metallic damper* dan arah sumbu pemasangannya  
(Javanmardi *et al.*, 2019)

Mekanisme dan kapasitas redaman dari *metallic damper* tergantung pada material yang digunakan seperti baja, aluminium, tembaga, timah, dan lain-lain. Dalam penelitian ini, penulis melakukan analisis terhadap kapasitas damper dengan berbahan dasar baja (*steel*) yang diaplikasikan dalam arah sumbu kuat. Adapun model yang akan digunakan adalah *slit steel damper*.

Sejumlah penelitian, dalam beberapa kurun waktu terakhir, telah dilakukan untuk mendapatkan desain *steel damper* yang sesuai. Chan *et al.* (2008) melakukan

uji fatik dengan siklus rendah pada *slit damper* dengan konfigurasi bilah (*strip*) yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan kapasitas disipasi energi dari *slit damper* tersebut cukup baik namun mengalami kegagalan getas (*brittle failure*). Selanjutnya, Ghabraie *et al.* (2010) meneruskan penelitian yang dilakukan oleh Chan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan getas yang terjadi. Ghabraie mengemukakan bahwa kegagalan getas yang terjadi pada slit damper model strip disebabkan oleh konsentrasi tegangan yang terakumulasi pada bagian ujung bilah-bilah/*strip* dari *damper*. Oleh karena itu, Ghabraie melakukan optimasi terhadap bentuk bilah dari *slit steel damper* tersebut.



**Gambar 2.** Beberapa skema instalasi *metallic damper* (Javanmardi *et al.*, 2019)

Lee *et al.* (2015) melakukan penelitian pada tiga model *steel strip damper* yang berbeda (bentuk strip menyerupai barbel, berbentuk runcing dan menyerupai jam pasir). Ketiga model ini menunjukkan peningkatan kapasitas terhadap beban

siklik dengan perilaku histeresis yang stabil dan retak yang timbul terdistribusi sepanjang bilah/*strip*. Pada tahun yang sama, Teruna et al. mengembangkan penelitian dengan model damper yang tersusun dari empat pelat baja dengan konfigurasi berbeda di mana setiap ujung bilahan dilengkungkan untuk meminimalkan konsentrasi tegangan. Hasil dari penelitian eksperimental tersebut memperlihatkan perilaku histeresis yang sangat stabil.

Penelitian oleh Lee dan Teruna ini dikembangkan lagi oleh Madeshwaran et al. (2017) dengan membuat analisis numerik untuk mendapatkan bentuk optimal dari damper dengan memperhatikan rasio tinggi terhadap lebarnya. Madeshwaran melakukan pemodelan terhadap tiga model damper (*steel slit damper*) dengan parameter model yang sama namun dengan variasi tinggi penampang yang berbeda. Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah dengan mengurangi lebar pada bagian tengah penampang (*slit*), kegagalan getas akibat konsentrasi tegangan pada daerah ujung strip dapat dihindari. Redaman efektif dari damper yang diuji berada pada kisaran 10%-25% dan peningkatan kapasitas redaman dari benda uji terjadi pada tinggi damper antar 90-270 mm.

Dalam penelitian ini, dilakukan pengujian eksperimental pada tiga jenis *steel damper* (*slit steel damper, tapered steel damper dan oval steel damper*) dengan variasi tipe bukaan yang berbeda di mana dua model geometri *damper* mengacu pada penelitian sebelumnya. Perbedaan bentuk bukaan (*slit*) menjadi faktor pembeda dengan penelitian sebelumnya. Bentuk *slit* pada *steel damper* yang diteliti berbentuk oval. Pemilihan bentuk oval dari *slit steel damper* ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa distribusi tegangan pada sepanjang *strip* dari damper akan lebih merata. Material baja yang digunakan untuk pembuatan damper adalah pelat baja *stainless steel*. Untuk mengetahui karakteristik material pelat baja ini, dilakukan pengujian berupa uji tarik (*coupon test*) dengan mengacu pada *American Standard Testing and Material* (ASTM).

## 1.2 Rumusan Permasalahan

Berdasarkan uraian pada latar belakang masalah, beberapa pokok masalah akan diselidiki dalam penelitian ini. Pokok – pokok tersebut dituangkan dalam rumusan masalah yaitu:

1. Bagaimana karakteristik pelat baja stainless steel sebagai material pembentuk *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper*?
2. Bagaimana distribusi tegangan dan regangan yang terjadi pada penampang *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper* ketika menerima beban siklik lateral?
3. Bagaimana perbedaan kekakuan dan kapasitas redaman efektif antara *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper* ketika menerima beban siklik lateral?

### 1.3 Tujuan Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian eksperimental pada tiga jenis damper yaitu *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval shape slit steel damper*. Adapun tujuan dari kajian tersebut adalah:

1. Menganalisis karakteristik pelat baja *stainless steel* sebagai material pembentuk *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper*.
2. Menganalisis distribusi tegangan pada penampang *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper*.
3. Menemukan tipe *steel damper* yang efektif dari tinjauan kekakuan dan kapasitas redaman terhadap beban siklik lateral.

### 1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini meliputi kajian teoritis dan pengujian secara eksperimental dengan berpedoman pada studi kepustakaan hasil penelitian yang telah dicapai oleh para peneliti terdahulu. Pokok masalah yang hendak diteliti adalah kinerja dari *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval shape slit steel damper* terhadap beban siklik lateral. Adapun di dalam pelaksanaannya, penelitian ini akan dilakukan pada batasan sebagai berikut :

1. Asumsi damper dalam pemodelan adalah kedua ujung terjepit sempurna.
2. Ketebalan pelat damper konstan.
3. Analisis yang dilakukan mengasumsikan damper terpasang dalam arah sumbu kuat.

4. Dimensi damper dalam pengujian eksperimental berpedoman pada dimensi damper yang digunakan sebagai parameter dalam penelitian terdahulu oleh Madheswaran *et al.* yaitu panjang = 500 mm, lebar 360 mm dengan ketebalan pelat = 10 mm.
5. Pada spesimen *damper* yang sudah *ter-set up* akan diberikan riwayat pembebanan bolak-balik (pembebanan siklik) dalam arah horizontal, dengan kontrol yang digunakan adalah *displacement control*.
6. Protokol pengujian eksperimental mengacu pada ASTM dan FEMA 461.
7. Penelitian ini hanya menguji karakteristik material *damper* (pelat baja *stainless steel*), dan perilaku mekanis ketiga jenis *damper*.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini diharapkan dapat memberikan manfaat dan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan, antara lain:

1. Penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman terkait perilaku struktur saat terkena gempa bumi atau gaya lateral lainnya. Dengan menganalisis respons struktur yang dilengkapi dengan *steel damper*, para peneliti dapat mengidentifikasi bagaimana dampak gaya-gaya tersebut dapat diatasi atau dikurangi. Hal ini penting untuk memperbaiki desain struktur bangunan dan meningkatkan keamanan struktural.
2. Penelitian tentang *steel damper* dapat berkontribusi dalam pengembangan teknologi proteksi gempa yang lebih baik. *Steel damper* adalah salah satu metode yang digunakan untuk mengurangi efek gempa bumi pada struktur. Penelitian ini diharapkan menjadi salah satu inovasi baru dalam meningkatkan efisiensi dan kinerja *steel damper*, sehingga memberikan perlindungan yang lebih baik terhadap gempa bumi.
3. Penelitian ini dapat pula menjadi referensi dalam mengevaluasi pengaruh *steel damper* terhadap struktur dan mengoptimalkan desain untuk meningkatkan ketahanan dan keandalan struktural. Ini dapat membantu mengurangi kerusakan akibat gempa bumi dan memperpanjang umur bangunan.

4. Penelitian ini juga dapat berkontribusi dalam mentransfer pengetahuan dan teknologi kepada praktisi, desainer, dan insinyur struktur. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi referensi sehingga orang-orang yang terlibat dalam industri konstruksi dapat memperoleh informasi terbaru tentang metode proteksi gempa bumi yang efektif.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Disertasi ini terdiri dari tujuh bab yang yaitu:

1. Bab I merupakan bagian pendahuluan yang berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah penelitian, tujuan penelitian, manfaat penelitian, Batasan masalah penelitian dan sistematika penulisan.
2. Bab II merupakan tinjauan teori dasar, hasil penelitian terdahulu, kerangka konseptual dan hipotesis yang membahas tentang alur pemikiran yang mendasari dilakukannya penelitian pada *steel damper*, termasuk membahas perbedaan penelitian yang dilakukan dengan penelitian-penelitian terdahulu. Pada bagian ini juga dituliskan hipotesis awal pemilihan model *oval steel damper*.
3. Bab III merupakan topik penelitian I yang berjudul “Pengujian Kuat Tarik Pelat Baja Struktural sebagai Material *Steel Damper*”. Pada bab ini dibahas tentang pengujian karakteristik pelat baja untuk memperoleh data terkait kekuatan dan deformasi dari pelat baja tersebut ketika dikenakan tegangan tarik serta untuk memastikan keseragaman material *damper* yang digunakan.
4. Bab IV merupakan topik penelitian II yang berjudul “Distribusi Tegangan Regangan pada Penampang *Steel Damper* terhadap Beban Siklik Lateral”. Bab ini membahas hasil analisis distribusi tegangan-regangan pada tiga model penampang *steel damper* yaitu: *slit steel damper*, *tapered steel damper* dan *oval steel damper* berdasarkan pengujian eksperimental yang dilakukan.
5. Bab V merupakan topik penelitian III yang berjudul “Perilaku Histeresis dan Efektifitas *Oval Steel Damper* terhadap Beban Siklik Lateral”. Dalam bab ini, dibahas tentang hasil analisis pada pengujian eksperimental untuk tiga variasi *steel damper* yang dihubungkan dengan perilaku histeresis dan efektifitas penggunaan dari ketiga variasi *steel damper* tersebut.

6. Bab VI merupakan pembahasan umum di mana dalam bab ini, temuan utama yang berkaitan dengan rumusan masalah pada bab I dirangkum. Bab ini juga merangkum hubungan antara karakteristik material, distribusi tegangan regangan dan perilaku histeresis dari tiga variasi *steel damper*.
7. Bab VII merupakan kesimpulan dan saran yang mengemukakan secara singkat dan jelas apa yang telah diperoleh dari hasil penelitian. Bab ini juga berisi saran bagi penelitian selanjutnya, sebagai hasil pemikiran penelitian atas keterbatasan penelitian yang dilakukan.

## BAB II

### KERANGKA KONSEPTUAL DAN HIPOTESIS

#### 2.1 Teori Dasar

##### 2.1.1. Tinjauan umum *dampers*

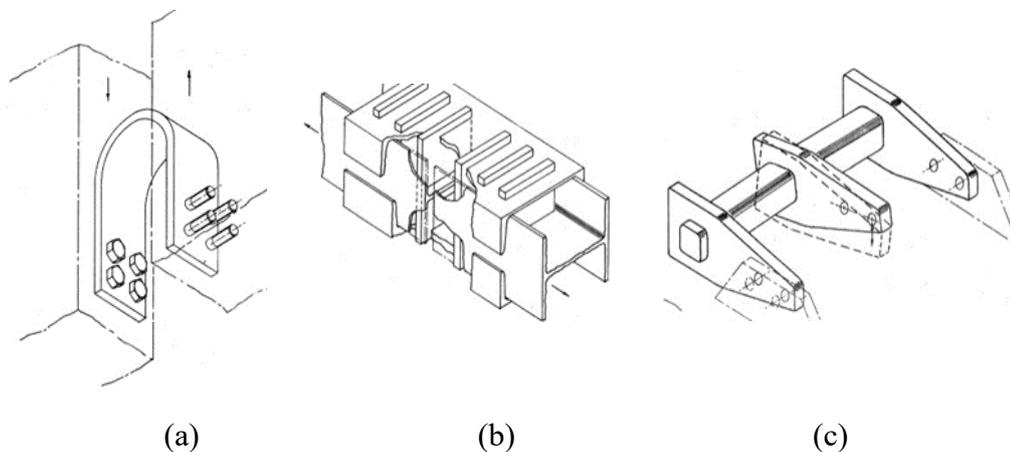
Peredam atau *dampers* merupakan alat tambahan yang dipasang untuk menambah redaman (*damping*) dari suatu sistem struktur. Dampers mempunyai cara kerja mendissipasi energi yang masuk ke struktur dengan mengubah energi tersebut melalui mekanisme sendi plastis atau pelelehan material dampers itu sendiri, sehingga respon simpangan struktur menjadi kecil. Dalam mendissipasi energi, fungsi dampers dalam struktur antara lain menghentikan getaran, memperkecil displacement dan mengurangi simpangan saat resonansi. Apabila dampers ditambahkan pada struktur, simpangan antar lantai dapat diperkecil sehingga gaya lateral yang diterima kolom dapat pula direduksi. Dengan demikian struktur tetap dapat direncanakan secara elastis meskipun gaya gempa yang diperhitungkan besar.

Redaman (*damping*) dalam struktur yang disebut juga *inherent damping*, yaitu redaman yang berasal dari gesekan antara struktur dengan bagian non struktur, gesekan udara dan tutup bukannya penampang beton yang retak, dan plastisitas bahan setelah struktur mengalami deformasi inelastik. Besarnya redaman tersebut sekitar 1% sampai 5%, bergantung pada jenis dan kekakuan struktur yang direncanakan. Pada struktur tanpa redaman, getaran yang terjadi pada struktur akan terus berlanjut, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5 berikut. Pada struktur dengan getaran bebas tanpa redaman (*undamped free vibration*), amplitudo getaran akan tetap dan berulang-ulang, sedangkan pada struktur dengan getaran bebas dan teredam (*damped free vibration*), amplitudo getaran akan semakin berkurang seiring waktu.

Pada sistem *single degree of freedom* (SDOF), ketika terjadi resonansi simpangan getaran akan membesar sesuai dengan amplifikasi yang terjadi di mana nilainya ditentukan oleh faktor dinamis yang berbanding terbalik dengan besarnya faktor redaman (*damping factor*).

### 2.1.2. Jenis-jenis *damper* dan pengaruhnya terhadap kinerja struktur berdasarkan penelitian terdahulu

Sejumlah penelitian menunjukkan peningkatan kinerja struktur dalam merespon beban gempa dengan penambahan damper pada elemen struktur tersebut. Penggunaan damper sebagai kontrol respon seismik dari struktur telah diteliti oleh Kelly et al. pada awal tahun 1970 yang mengembangkan peredam berbahan dasar baja dalam bentuk *U-Shaped Damper*, *Torsional Beam Damper*, *Flexural Beam Damper*. Ketiga model yang digunakan ini sangat berbeda secara geometri. Tujuan dari penelitian yang dilakukan oleh Kelly adalah untuk melihat mekanisme dari masing-masing peredam tersebut, dalam meredam energi gempa yang terjadi.



**Gambar 3** U-Shape steel damper (a); Flexural steel damper (b);  
(c) Torsional steel damper

Selanjutnya, model lain dari jenis steel damper diteliti oleh Tyler, di mana bahan dasar dari alat dissipasi energi pasif ini terbuat dari batang baja bulat yang diruncingkan dan dilas pada pelat angkur sehingga membentuk kantilever (*tapered steel damper*). *Damper* ini bekerja dengan cara mendissipasi energi melalui deformasi plastis dari material baja. Takeda et al. pada tahun 1976 memperkenalkan jenis lain dari *steel damper* yakni *buckling-restrained brace (BRB)*. Peredam ini terdiri dari penyangga konvensional (sebagai komponen utama) yang dibungkus dengan potongan pipa baja berbentuk persegi. Ruang kosong di antara *bracing* dan pipa ini kemudian diisi dengan mortar. Komponen inti baja berfungsi untuk memikul beban aksial, sedangkan material pengisi berupa mortar mendistribusikan

gaya geser akibat tekanan pada komponen inti ke bagian pipa terluar. Peredam BRB ini kemudian dikembangkan lagi oleh beberapa peneliti seperti *circular core buckling-restrained brace* (CBRB oleh Black et al.), *angle buckling-restrained brace* (ABRB oleh Zhao et al.), dan *H-type steel unbuckling brace* (SUB oleh Hao et al.).

Puja dan Bakre pada tahun 2011, di mana dalam penelitian tersebut digunakan X-shape Metallic Damper (XMD) dan ditempatkan pada beberapa bagian dari gedung. Selanjutnya Puja dan Bakre melakukan analisis numerik untuk mendapatkan posisi optimal dan paling efektif dari damper dalam merespon beban gempa. Pada tahun 2014 Hong-Nan Li dkk. melakukan penelitian eksperimental pada tiga jenis metallic damper yang yaitu round-hole metallic damper (RHMD), double X-shape metallic damper (DXMD), dan metallic yielding friction damper (MYDs). Ketiga tipe damper ini kemudian diaktualisasikan pada gedung konstruksi baja dan beton bertulang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan damper pada kedua jenis struktur ini mampu mengurangi displacement pada struktur hingga 36% saat menerima beban gempa.



**Gambar 4** *Round Hole Metallic Damper* oleh Hong-Nan Li (2014)

Selanjutnya, Reza Aghlara, dkk pada tahun 2018 meneliti *metallic damper* yang berbeda dengan menawarkan jenis *damper* yang ekonomis, mudah diinstalasi dan difabrikasi. Jenis damper ini lebih dikenal dengan *Bar-Fuse Damper* (BFD). Dalam penelitiannya, Reza melakukan pengujian eksperimental terhadap BFD pada *chevron brace* dengan menempatkannya pada tengah bentang setiap *bracing*-nya. Berdasarkan hasil pengujian, pemasangan BFD pada *chevron brace* mampu meningkatkan kinerja struktur di mana dengan lebih dari 20 siklus pembebanan,

*displacement* yang terjadi pada struktur hanya 10,6% dari target *displacement* sebelumnya. Pada tahun yang sama, Chang-Hwan Lee, dkk melakukan pengujian eksperimental pada struktur beton bertulang non daktail yang menggunakan *damper*. Dalam penelitian tersebut, Chang bermaksud meningkatkan kapasitas respon seismik dari struktur rangka pemikul momen dengan menambahkan kombinasi *metallic damper* dan *friction damper* pada sistem strukturnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan *damper* pada sistem struktur tersebut meningkatkan kekuatan, kekakuan dan kapasitas dissipasi energi. Peningkatan tersebut ditunjukkan kurva histeretik yang terbentuk pada pengujian siklik dan juga beban maksimum yang mampu dipikul oleh sistem struktur yang diperkuat dengan *damper* yang mengalami peningkatan kapasitas dari struktur tanpa *damper* sebesar 1,33 kali yaitu sebesar 814,8 kN.

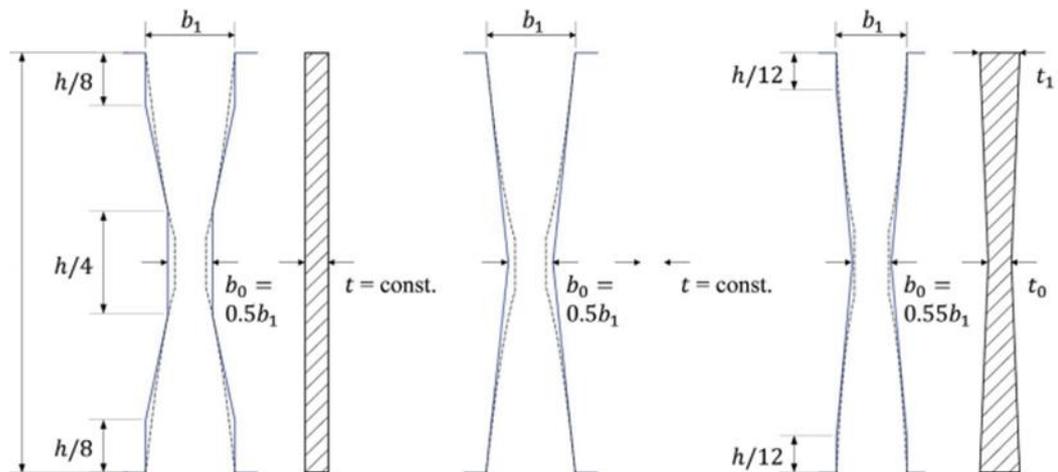
Jenis peredam baja (*steel damper*) yang paling populer dan banyak diaplikasikan pada struktur yaitu peredam yang menggunakan konsep peningkatan redaman dan kekakuan *added damper and stiffness* (ADAS) dan *triangle-plate added damping and stiffness* (TADAS). Damper ini meningkatkan kekakuan dan redaman dari struktur dan juga meningkatkan kapasitas energi dissipasi. Bentuk geometri dari *metallic damper* ini disesuaikan dengan diagram bidang momen karena bentuk ini yang paling optimum dengan menghasilkan pelelehan material merata disepanjang pelat.

Karakteristik mekanik dari *steel damper* telah diteliti oleh para ahli (Steimer dan Chow 1984; Schol 1990; Hanson 1986; Bergman dan Hanson 1986,1990; Whittaker et al 1989; Su and Hanson 1990). Uji terhadap perangkat TADAS yang lain dilakukan oleh Tsai et al (1992). Hasil pengujian menunjukkan kapasitas rotasi perangkat TADAS secara khusus diuji umumnya  $\pm 0,25$  radian di mana rotasi yang terjadi pada umumnya akibat pembebanan siklis. Hal ini juga menunjukkan kekakuan elastis sangat dapat diprediksi dengan mempertimbangkan deformasi lentur saja (Tsai et al. 1993). Peredam dengan konsep ADAS maupun TADAS dapat digunakan pada semua jenis portal penahan momen dalam meningkatkan redaman dan kekakuan dari struktur.

## 2.2 Slit Steel Damper (SSD)

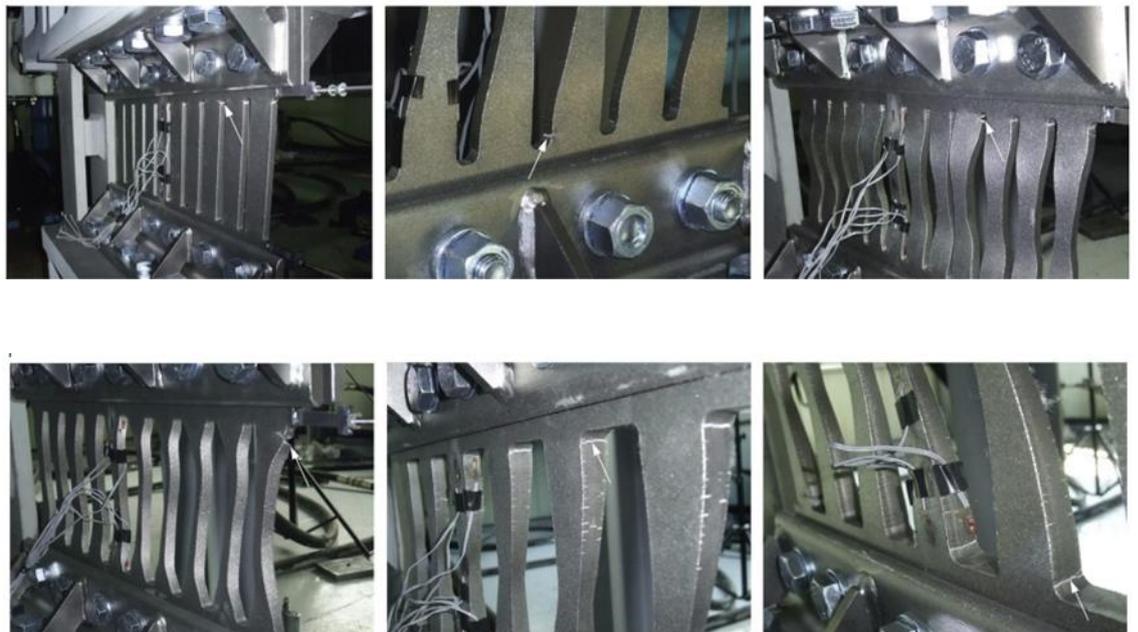
*Slit Steel Damper* (SSD) pertama kali diperkenalkan oleh Chan dan Albermani dan selanjutnya dikembangkan oleh beberapa peneliti lainnya. SSD terbuat dari baja penampang Wide Flange di mana pada bagian badan (web) diberi celah-celah (slit) yang bertujuan untuk mengurangi getas pada peredam tersebut. Damper jenis ini mendisipasi energi melalui pembentukan sendi plastis atau pelelehan lentur materialnya. Alat ini dapat dipasang pada bermacam-macam struktur: gedung bertingkat tinggi, menara, bentangan yang panjang, dan jembatan. Tujuan utama pemasangan *Steel Slit Damper* antara lain: pada gedung tinggi untuk mengurangi getaran gedung akibat angin, pada menara untuk mengurangi getaran akibat gempa bumi dan angin, pada struktur berbentangan panjang untuk mengurangi getaran akibat lalu lintas, dan pada jembatan untuk mengurangi goyangan akibat angin atau getaran akibat lalu lintas.

Kegagalan akibat konsentrasi tegangan pada ujung *strip* damper menjadi fokus dalam penelitian selanjutnya, di mana pada tahun 2015 Lee et al. melakukan penelitian pada tiga tipe *steel slit damper* yaitu dumbbell-shaped strip damper (DSD), tapered strip damper (TSD), dan hourglass-shaped strip damper (HSD). Ketiga tipe damper ini memiliki bukaan (*slit*) yang bervariasi. Untuk memperoleh bentuk dan dimensi yang optimal dari ketiga tipe SSD tersebut dalam memikul beban siklik serta untuk mengetahui distribusi tegangan pada *damper* tersebut, Lee et al. melakukan optimasi terhadap bentuk dasar dari pelat damper yang berbentuk *strip*. Konsep dasar yang dikemukakan adalah ketika damper yang berupa bilah/strip tersebut diberikan beban horizontal, secara bersamaan momen lentur dan gaya aksial akan bekerja pada strip tersebut. Namun apabila rasio tinggi terhadap lebar (*aspect ratio*) besar, perilaku dominan dari damper adalah perilaku lentur. Adapun strip dari damper ini diidealisasikan sebagai balok yang terkekang sempurna pada kedua ujungnya. Akibat beban sebesar  $P$  yang bekerja, balok tersebut akan berdeformasi dalam arah kurvatur ganda, dan momen lentur akan meningkat secara linear dari bentang tengah ke ujung balok.



**Gambar 5** Parameter desain *steel damper* oleh Lee dkk. (2015)

Dari hasil pengujian eksperimental yang dilakukan oleh Lee et al. pada ketiga model yang diteliti, konsentrasi tegangan masih tetap terjadi pada sisi-sisi dampers. Hal ini terlihat dari pola retak yang terjadi pada *damper* ketika diberi beban siklik.



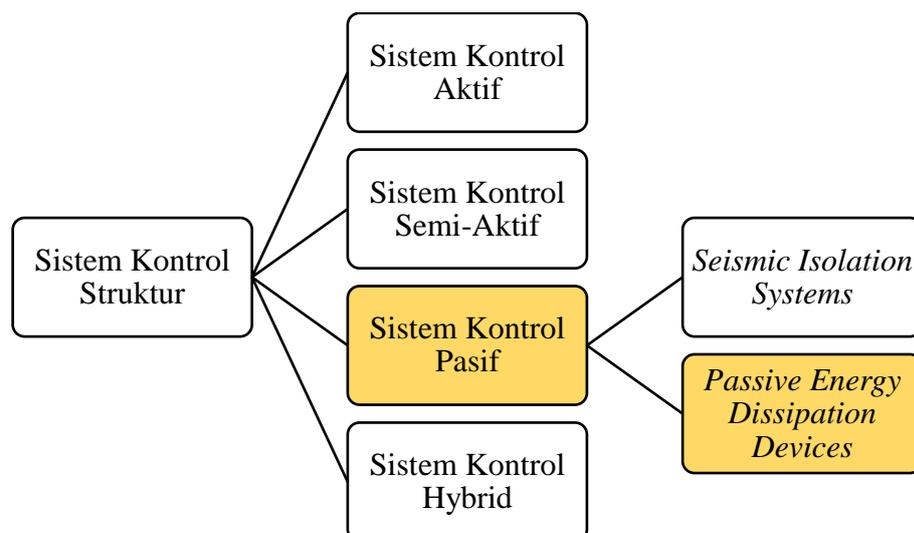
**Gambar 6** Major cracks yang terjadi pada tiga variasi *steel damper* oleh Lee dkk. (2015)

## 2.3 Kerangka Konseptual

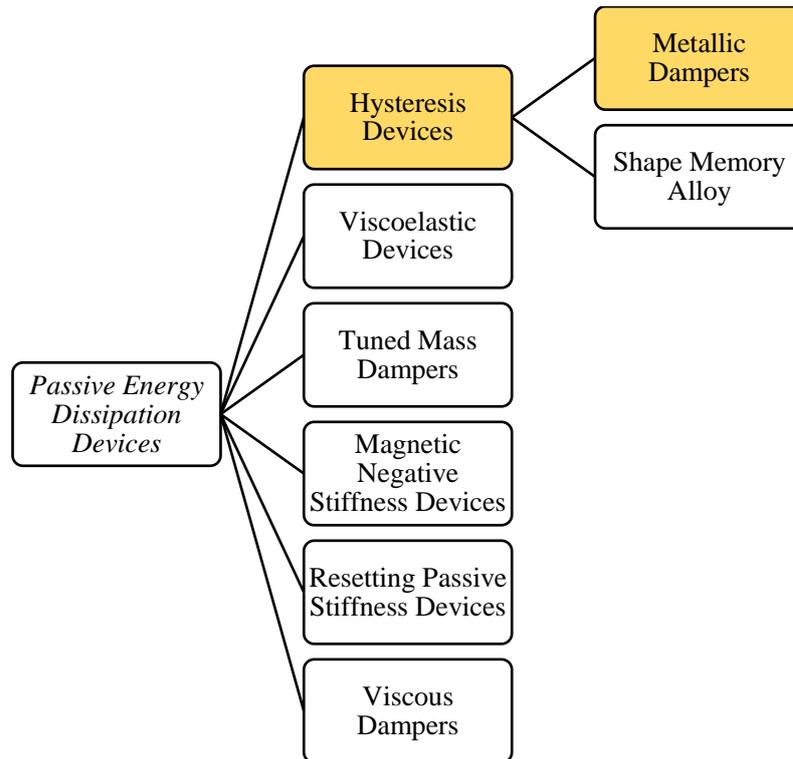
### 2.3.1 Klasifikasi *dampers* berdasarkan penelitian terdahulu

Selain berat sendiri, elemen struktur juga menerima berbagai jenis beban dinamis dan lingkungan termasuk beban angin, beban lalu lintas dan beban gempa. Kerusakan yang cukup parah pada konstruksi jembatan dan gedung sebagian besar disebabkan oleh peristiwa gempa bumi. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem kontrol yang dapat melindungi struktur terhadap getaran akibat beban gempa.

Gambar 3 adalah pengelompokan sistem kontrol struktur oleh Spencer BF Jr dan Nagarajaiah S (2003) yang dalam jurnalnya berjudul “State of The Art of Structural Control” mengelompokkan sistem kontrol getaran struktur menjadi empat kategori umum yaitu: sistem kontrol pasif, sistem kontrol aktif, sistem kontrol semi-aktif dan sistem kontrol *hybrid*. Keempat sistem kontrol tersebut dapat digunakan untuk mitigasi bahaya seismik pada struktur baru, dan untuk perkuatan struktur lama yang memiliki kapasitas gaya lateral yang kurang baik misalnya portal pracetak. Sistem kontrol pasif merupakan sistem kontrol yang paling populer dari keempat kategori yang ada, karena selain murah, penggunaan sistem ini pada struktur tidak membutuhkan sumber energi eksternal dalam memberikan redaman dan atau kekakuan. Spencer BF Jr dan Nagarajaiah S selanjutnya membagi sistem kontrol pasif ke dalam dua kelompok yaitu: sistem isolasi seismik (*seismic isolation systems*) dan perangkat dissipasi energi pasif (*passive energy dissipation devices*) yang lebih sering disebut *dampers*.



**Gambar 7** Pengelompokan sistem kontrol struktur menurut Spencer BF Jr (2003)



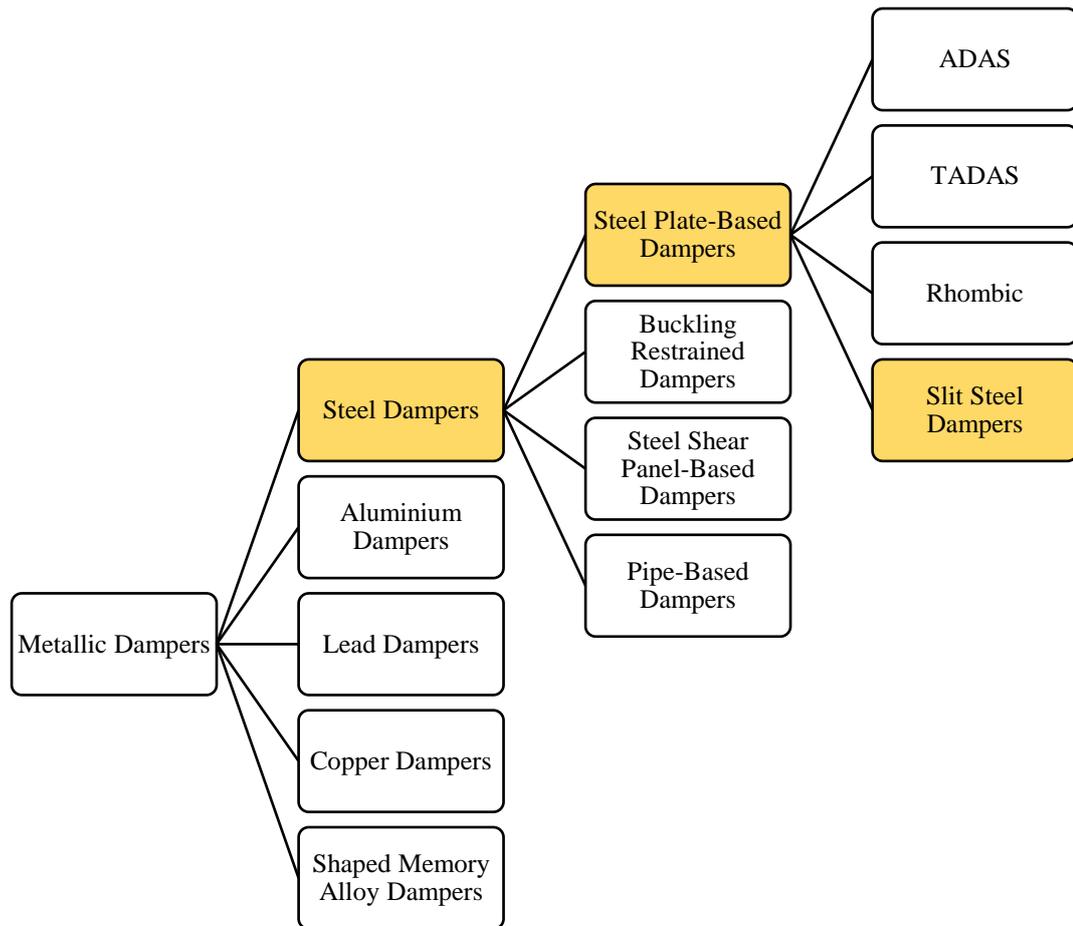
**Gambar 8** Kategori dampers menurut Wang dan Munfakh (2014)

Wang dan Munfakh (2014) membagi *dampers* menjadi beberapa kategori yaitu: alat peredam mekanisme histeresis (*hysteresis devices*), alat peredam mekanisme viskoelastik (*viscoelastic devices*), alat peredam dengan penyetaraan massa (*tuned mass dampers*), *magnetic negative stiffness devices*, *resetting passive stiffness devices* dan *viscous dampers*. Selanjutnya, *hysteresis devices* dikelompokkan menjadi peredam berbahan logam (*metallic dampers*) dan peredam dengan perpaduan dari beberapa material (*shape memory alloy*), di mana dissipasi energi dari kedua jenis alat peredam ini tidak bergantung pada tingkat pembebanan.

Berdasarkan material pembentuknya, *metallic dampers* terdiri dari: *steel dampers*, *aluminium dampers*, *lead dampers*, *copper dampers*, dan *shaped memory alloy dampers*. Mekanisme redaman pada *metallic damper* sangat bergantung pada jenis material yang menjadi material dasar pembentuk *damper* tersebut. Peredam dengan bahan dasar pelat baja (*steel plate-based dampers*) merupakan salah satu jenis dari *metallic dampers* di mana jenis ini masih memiliki sejumlah bentuk.

Penelitian ini melakukan analisis terhadap kinerja dan efektifitas *steel plate-based dampers*, khususnya untuk model *slit steel dampers*.

Slit Steel Damper (SSD) pertama kali diperkenalkan oleh Chan dan Albermani. SSD dibentuk dengan memberikan celah-celah pada pelat dengan model dan jarak tertentu.



**Gambar 9** Jenis-jenis *metallic dampers* menurut Chan dan Albermani (2008)

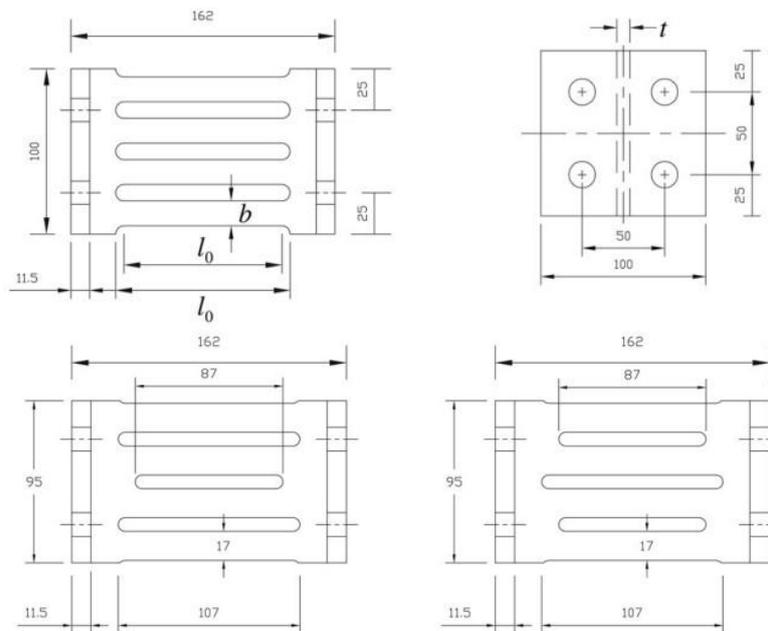
### 2.3.2 Kelebihan dan Kekurangan Model *Steel Damper* pada Penelitian Terdahulu

*Federal Emergency Management Agency* (FEMA) 461 menyebutkan bahwa ada dua model pengujian yang dapat dilakukan untuk mengetahui kekuatan dari *metallic damper*. Pengujian yang dimaksud yaitu: pengujian melalui pemberian beban siklik terhadap damper itu sendiri; dan pengujian terhadap struktur yang

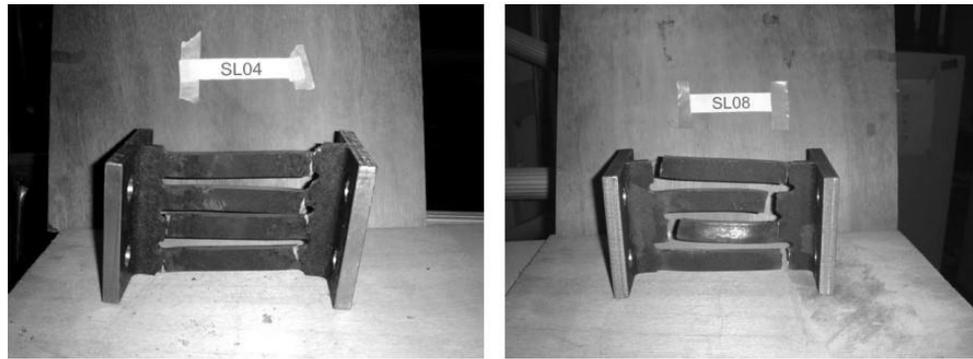
dilengkapi damper dengan menggunakan meja getar (*shaking table*). Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis terhadap karakteristik dan kinerja *metallic damper* khususnya untuk tipe *slit steel damper* sehingga model pengujian yang dilakukan adalah dengan pemberian beban siklik pada *damper*. Dari pengujian tersebut dapat diperoleh grafik hubungan beban terhadap perpindahan (*load-displacement*).

Grafik hubungan beban-perpindahan ini disebut juga *hysteresis loop* di mana faktor-faktor mekanis yang mempengaruhi kapasitas *slit steel damper* dapat dihitung dan diketahui. Faktor-faktor mekanis yang dimaksud yaitu: perpindahan akibat leleh (*yield displacement*), perpindahan ultimit (*ultimate displacement*), kekuatan leleh (*yield strength*), kekuatan ultimit (*ultimate strength*), daktilitas, kekakuan efektif, energi total yang terdissipasi dan redaman efektif.

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Ricky W.K. Chan dan Faris Albermani (2008) pada slit steel damper menunjukkan perilaku histeresis yang sangat stabil. Namun penurunan kapasitas terjadi seiring dengan terjadinya retakan pada ujung-ujung sisi damper yang disebabkan oleh konsentrasi tegangan pada ujung-ujung sisi tersebut. Konsentrasi tegangan ini menyebabkan terjadinya kegagalan getas (*brittle failure*) pada *damper*.



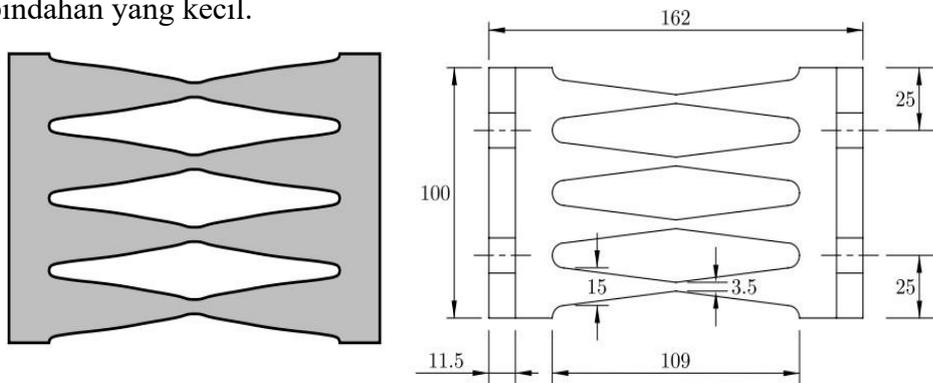
(a)



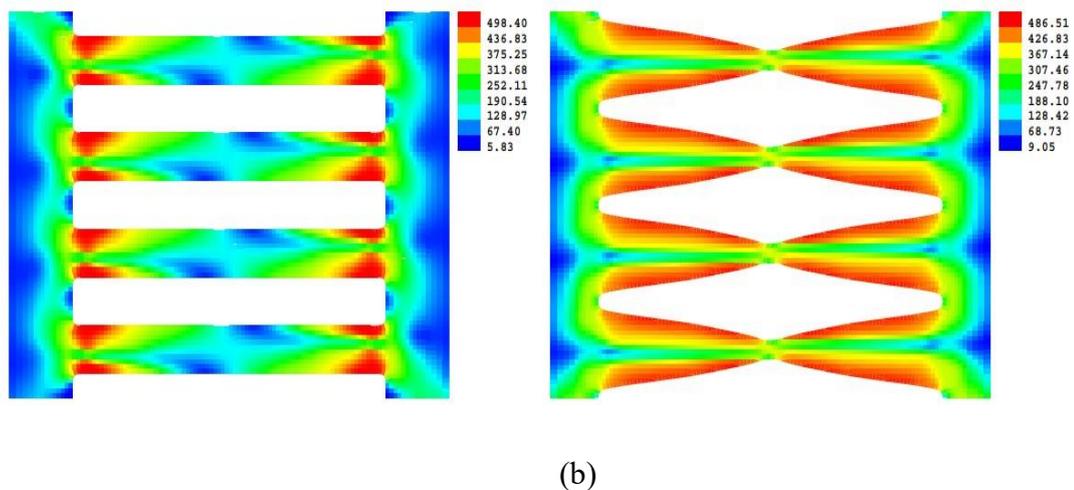
(b)

**Gambar 10** (a) Model SSD yang diusulkan; (b) Kegagalan pada benda uji *slit steel damper* (Chan dan Albermani, 2008)

Mode kegagalan pada slit steel damper dalam penelitian Chan dan Albermani menjadi perhatian dalam penelitian selanjutnya. Melalui studi analisis numerik, Ghabraie (2010) selanjutnya melakukan optimasi terhadap bentuk slit steel damper yang diusulkan oleh Chan dan Albermani dengan maksud untuk menghindari konsentrasi tegangan pada ujung-ujung sisi damper. Dalam penelitian tersebut, Ghabraie mengusulkan model geometri baru dengan bentuk bilah/*slit* yang berbeda dari model sebelumnya. Selain peningkatan dalam kapasitas redaman mencapai 56% dari model yang diusulkan oleh Chan dan Albermani, distribusi tegangan pada model *tapered slit steel damper* (TSSD) ini juga menurut Ghabraie terdistribusi lebih merata pada penampangnya. Hasil analisis terhadap pemodelan numerik yang dilakukan juga menunjukkan perilaku histeresis yang stabil di mana terjadi peralihan dari fase elastis ke fase plastis secara bertahap dan leleh terjadi pada nilai perpindahan yang kecil.



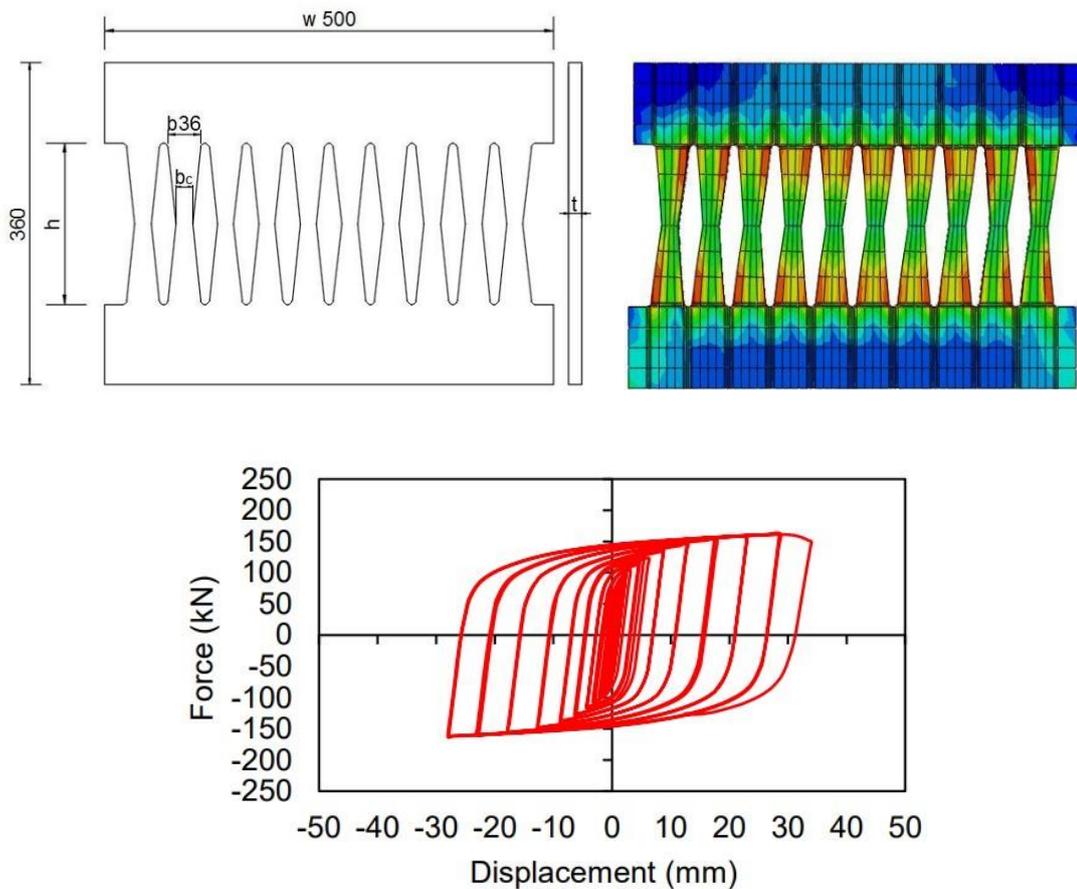
(a)



**Gambar 11** (a) Desain TSSD yang diusulkan; (b) Hasil analisis numerik (Ghabraie, 2010)

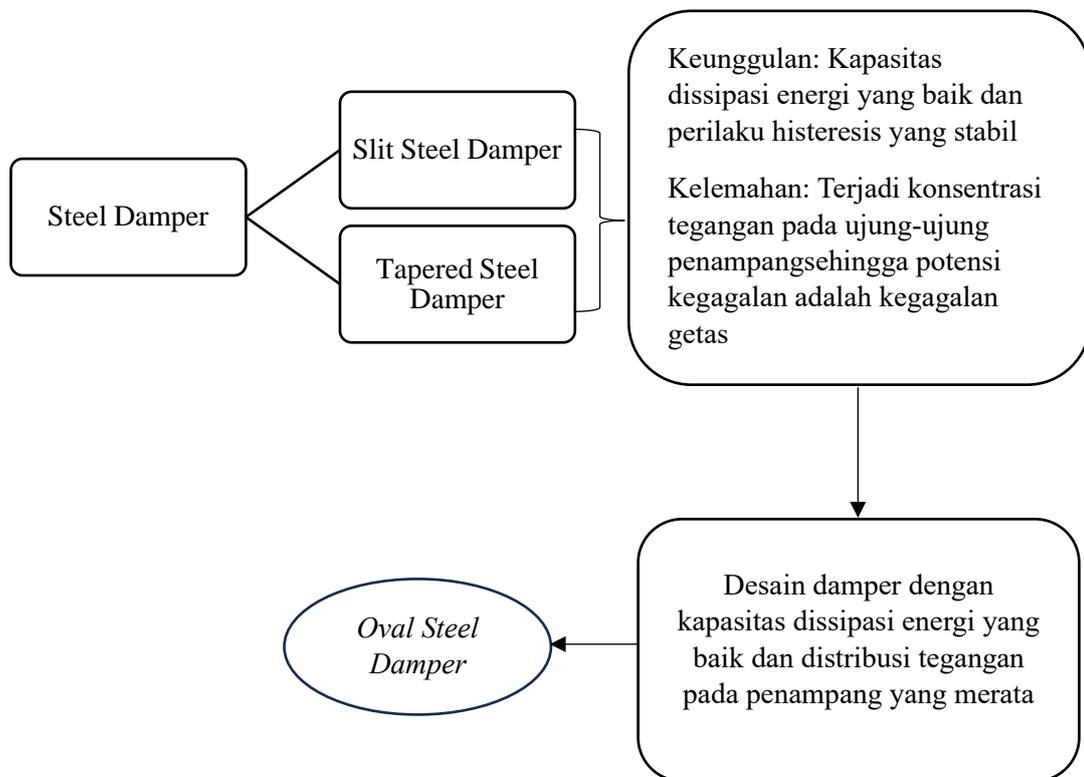
Lee pada tahun 2015 melakukan penelitian pada tiga model *steel strip damper* yang berbeda. Ketiga model ini menunjukkan peningkatan kapasitas terhadap beban siklik dengan perilaku histeresis yang stabil dan retak yang timbul terdistribusi sepanjang bilah/*strip*. Pada tahun yang sama, Teruna et al. mengembangkan penelitian dengan model damper yang tersusun dari empat pelat baja dengan konfigurasi berbeda di mana setiap ujung bilahan dilengkungkan untuk meminimalkan konsentrasi tegangan. Hasil dari penelitian eksperimental tersebut memperlihatkan perilaku histeresis yang sangat stabil.

Penelitian oleh Lee dan Teruna ini dikembangkan lagi oleh Madeshwaran dkk. (2017) dengan membuat analisis numerik untuk mendapatkan bentuk optimal dari damper dengan memperhatikan rasio tinggi terhadap lebarnya. Madeshwaran melakukan pemodelan terhadap tiga model damper (*steel slit damper*) dengan parameter model yang sama namun dengan variasi tinggi penampang yang berbeda. Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah dengan mengurangi lebar pada bagian tengah *slit*, kegagalan getas akibat konsentrasi tegangan pada daerah ujung strip dapat dihindari. Redaman efektif dari damper yang diuji berada pada kisaran 10%-25% dan peningkatan kapasitas redaman dari benda uji terjadi pada tinggi damper antar 180 mm.



**Gambar 12** Parameter *tapered slit damper* yang optimal (Madeshwaran, 2017)

Meskipun telah diperoleh parameter optimal dari damper oleh Madeshwaran, namun konsentrasi tegangan masih terjadi pada ujung penampang. Untuk menghindari hal tersebut penulis mengusulkan bentuk penampang berbentuk oval (oval steel damper). Dalam penelitian ini, penulis melakukan pengujian eksperimental pada tiga jenis *slit steel damper* dengan variasi tipe bukaan yang berbeda di mana dua dari tiga model geometri *damper* mengacu pada penelitian Madeshwaran. Perbedaan bentuk bukaan (*slit*) menjadi faktor pembeda dengan penelitian sebelumnya. Bentuk *slit* pada *steel damper* yang diteliti berbentuk oval. Pemilihan bentuk oval dari *slit steel damper* ini dilakukan dengan mengasumsikan bahwa distribusi tegangan pada sepanjang *strip* dari damper akan lebih merata.



**Gambar 13** Kerangka pikir pemilihan model pada *steel damper*

## 2.4 Hipotesis

Secara umum, *slit steel damper* dirancang untuk menyerap energi seismik dengan cara memanfaatkan deformasi plastis pada elemen strukturalnya. Ketika gempa terjadi, *damper* tersebut mengalami deformasi yang menghasilkan distribusi tegangan di seluruh penampangnya. Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan perilaku *damper* di mana konsentrasi tegangan terjadi hanya pada bagian tertentu dari penampang *damper*. Konsentrasi tegangan di sudut-sudut penampang dapat menyebabkan risiko retak dan kegagalan struktural jika tegangan yang diterapkan melebihi kapasitas material. Pada penampang oval, sudut-sudut yang tajam tidak ada lagi, sehingga risiko konsentrasi tegangan di sudut-sudut tersebut diharapkan lebih rendah.

## 2.5 Studi empiris penelitian terdahulu

No	Judul	Penulis	Metode	Hasil Penelitian
1	Numerical Models of Hysteretic Steel Plate Damper with a Hollow Diamond Shape for Energy Dissipation	Daniel R. Teruna, dkk	Penelitian ini melakukan studi numerik untuk mengevaluasi perilaku peredam pelat baja ketika pembebanan siklik.	Model numerik terbukti berkorelasi baik dengan data eksperimen, dan model trilinear ditemukan lebih cocok untuk menggambarkan mekanisme penyerapan energi. Selain itu, penelitian ini membandingkan kapasitas disipasi energi dari dua spesimen damper dan membahas kesesuaian model sederhana yang berbeda untuk aplikasi teknik. Hasilnya memberikan wawasan berharga untuk desain dan analisis peredam baja untuk aplikasi struktural.

2	Experimental and analytical study of Block Slit Damper	Hossein Ahmadi Amiri, dkk	<p>Penelitian ini membahas perilaku dan kinerja perangkat disipasi energi pelat baja, khususnya berfokus pada jenis peredam yang disebut <i>block slit damper</i> (BSD). Kajian meliputi analisis elemen hingga, pengujian eksperimental, dan analisis teoritis perangkat BSD.</p>	<p>Hasil penelitian menemukan bahwa pengaruh ketebalan terhadap ketahanan tekuk dan disipasi energi, serta pentingnya rasio tinggi terhadap lebar dalam menentukan efisiensi disipasi energi. Penelitian ini memberikan informasi terkait desain dan optimalisasi perangkat BSD untuk konstruksi tahan gempa.</p>
3	Study of the Effect of Geometric Parameters of Steel Block Slit Dampers on Energy Absorption	Peyman Katal Mohseni, dkk	<p>Artikel ini membahas pengembangan dan kinerja peredam untuk struktur baja dengan menganalisis efek parameter geometris yang berbeda pada penyerapan energi, kekakuan, dan redaman pada peredam.</p>	<p>Hasil penelitian menyimpulkan bahwa peningkatan nilai lebar (b1) akan meningkatkan kekakuan dan penyerapan energi, sedangkan penurunan nilai (b2) tidak mempengaruhi penyerapan energi secara signifikan.</p>

4	The geometric shape effect of steel slit dampers in their behavior	M.A. Kafi, dkk	Metode penelitian yang digunakan yaitu dengan menyelidiki faktor-faktor seperti konfigurasi sudut, rasio panjang terhadap lebar, kapasitas gaya, kekakuan efektif, penyerapan energi, dan tekuk dalam menganalisis perilaku <i>damper</i> .	Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa kapasitas menahan beban dari peredam berubah seiring dengan rasio tinggi-lebar sudut dan jumlah baris sudut. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa peredam dengan dua baris bilah menunjukkan kapasitas gaya 61,6% lebih tinggi dibandingkan peredam dengan satu baris bilah.
5	Numerical Analysis of Steel Slit Dampers under Cyclic Loading	Madheswaran, dkk	Penelitian ini menggunakan metode analisis numerik dan studi parametrik untuk mengidentifikasi konfigurasi geometris peredam yang sesuai untuk kinerja yang lebih baik dalam hal kekuatan, keuletan, dan kapasitas disipasi energi.	Hasil penelitian membahas tentang pengaruh konfigurasi peredam, termasuk rekomendasi mengurangi lebar pada sisi tengahnya. Hasil penelitian juga memperlihatkan peningkatan redaman dengan variasi ketebalan dan lebar pada sisi tengah.

6	Shape optimization of metallic yielding devices for passive mitigation of seismic energy	Kazem Ghabraie, dkk	Metode penelitian berfokus pada optimasi struktur dengan metode Bi-Directionary Evolutionary Structural Optimization (BESO) untuk optimalisasi bentuk peredam struktural, termasuk optimasi material pembentuk struktur damper.	Hasil penelitian mengemukakan bahwa penggunaan metode Bi-Directionary Evolutionary Structural Optimization (BESO) untuk optimalisasi bentuk peredam struktural menghasilkan peningkatan kapasitas disipasi energi, distribusi tegangan yang merata, dan ketahanan terhadap kelelahan pada siklus rendah.
7	State-of-the-Art Review of Metallic Dampers: Testing, Development and Implementation	Ahad Javanmardi, dkk	Metode penelitian menggunakan studi literatur untuk memperoleh informasi terkait berbagai jenis damper termasuk kesamaan parameter-parameter yang ada pada setiap tipe damper.	Hasil penelitian menyatakan sejumlah parameter yang dibutuhkan untuk menganalisis karakteristik damper.

8	Experimental Study of a New Bar Damper Device for Vibration Control of Structures Subjected to Earthquake Loads	Khaled Ghaedi, dkk	Metode penelitian berupa analisis terhadap hasil pengujian eksperimental tipe Bar Damper (BD) dengan terlebih dahulu melakukan pemodelan dan menentukan parameter desain.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa damper tipe BD ini terbukti memiliki perilaku histeresis yang stabil di bawah beban siklik. Damper ini mampu mengalami perpindahan besar tanpa penurunan kekuatan dan kekakuan yang signifikan. Selanjutnya, analisis menunjukkan bahwa rasio kepadatan batang merupakan parameter desain penting yang mengendalikan kekakuan efektif dan kapasitas disipasi energi peredam.
9	Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings	Chang-Hwan Lee, dkk	Metode penelitian meliputi pengujian eksperimental terhadap tiga tipe <i>slit damper</i> yang berbeda dan melakukan optimasi untuk	Hasil penelitian menunjukkan bahwa model damper yang direkomendasikan menunjukkan kinerja seismik yang sangat baik dibandingkan dengan peredam

			mengurangi konsentrasi tegangan pada ujung-ujung damper.	konvensional. Selain itu, kinerja struktural dapat diprediksi secara akurat menggunakan persamaan desain yang disajikan dalam tulisan ini.
10	Preliminary study on a composite steel slit damper	Jinkyu Kim, dkk	Metode penelitian yang digunakan berupa investigasi awal terhadap perkembangan <i>steel damper</i> yang dapat merespons secara efektif pada berbagai tingkat pembebanan seismik. Kinerja steel damper diselidiki pada melalui pengujian eksperimental dan analitis.	Hasil penelitian menunjukkan kestabilan respon histeretik dengan keuletan yang cukup, dimana respon multifase diamati pada kasus pembebanan siklik. Selanjutnya hasil analisis numerik nonlinier yang menggabungkan model perubahan regangan kinematik dan isotropik menunjukkan keandalan yang sangat baik dari damper tersebut.
11	Design of Optimal Slit Steel Damper Under Cyclic Loading for	Masoud Zabihi-Samani	Metode penelitian berupa analisis numerik dengan bantuan Cuckoo Search untuk mendapatkan desain optimal damper yang akan	Hasil penelitian menyajikan slit damper yang dioptimalisasi dengan menggunakan metode Cuckoo Search memperlihatkan kapasitas yang lebih

	Special Moment Frame by Cuckoo Search		digunakan pada struktur rangka momen khusus dan membandingkannya dengan damper konvensional.	baik bila dibandingkan dengan damper konvensional.
12	Hourglass-shaped strip damper subjected to monotonic and cyclic loadings	Chang-Hwan Lee, dkk	Kapasitas struktural damper tipe hourglass slit dampers (HSD) yang mengalami pembebanan monotonik dan siklik dilakukan pada penelitian ini. Parameter pengujian yang digunakan adalah laju pembebanan, kekuatan material, dan jumlah peredam.	Hasil penelitian menunjukkan kapasitas ketahanan beban yang besar pada pembebanan monotonik, tingkat keuletan yang sangat baik Disipasi energi yang baik juga ditunjukkan pada pembebanan siklik, dengan distribusi kerusakan yang merata di seluruh ketinggian strip.
13	Prediction of the force displacement capacity boundary of an unbuckled steel slit damper	Amir Ahmad Hedayat	Metode penelitian berupa analisis numerik menggunakan metode elemen hingga dan kombinasi yang berbeda pada tiga tipe slit steel damper yang berbeda.	Hasil penelitian menunjukkan bahwa rumus teoritis tidak cukup dapat diandalkan. Oleh karena itu, dengan menggunakan hasil elemen hingga dan analisis regresi untuk setiap jenis SSD, direkomendasikan rumus khusus yang mempertimbangkan

				semua parameter geometri efektif untuk memprediksi gaya dan perpindahan.
14	Evaluation of Structural Behavior of Hysteretic Steel Dampers under Cyclic Loading	Sang-Woo Kim, dkk	Metode penelitian berupa pengujian eksperimental terhadap dua jenis peredam baja (U shape dan D shape) untuk mengetahui kinerja struktural pada masing-masing damper tersebut. Semua peredam dirancang dengan bahan pelat baja di kedua sisinya untuk menyalurkan gaya geser eksternal.	Peredam berbentuk D menunjukkan perilaku ulet dengan kapasitas disipasi energi yang sangat baik setelah luluh tanpa penurunan kekuatan selama pembebanan siklik. Dengan kata lain, spesimen berbentuk D menunjukkan kinerja yang sangat baik, sekitar 3,5 kali lipat bila dibandingkan dengan spesimen berbentuk U.