

Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial

Sindur P. Mangkoesoebroto

Institut Teknologi Bandung

Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, E-mail: itbpauir@bdg.centrin.net.id

Abstrak

Suatu invensi berupa alat pelepas energi gempa uniaksial dikembangkan dan dibahas secara rinci. Alat tersebut dimaksudkan untuk melindungi struktur bangunan gedung dari kerusakan yang berlebih pada saat kejadian gempa. Energi gempa input pada struktur bangunan gedung direncanakan untuk dimusnahkan oleh alat yang merupakan bagian dari bresing tahan tekuk. Bresing tersebut dipasang pada portal yang merupakan bagian dari rangka pemikul beban gempa. Alat dapat dipasang pada struktur bangunan gedung baru ataupun eksisting, tanpa memerlukan modifikasi signifikan. Alat dibuat cukup ringkas demikian sehingga memudahkan perawatan, operasi, dan perbaikan bila diperlukan. Alat tersebut telah dipatenkan.

Kata-kata Kunci: *Alat pelepas energi gempa, rangka pemikul beban gempa, bresing tahan tekuk.*

Abstract

Invention of uniaxial seismic energy dissipater was developed and analyzed in detail. The device is intended to protect building structures from extensive damage during major earthquakes. The earthquake input energy is designed to be absorbed by the device which is part of a buckling resistant bracing. The bracings are constructed in the seismic resisting frames of building structures. The dissipater can be built in the newly constructed as well as existing building structures without major modification requirements. The design of the device is simple enough to facilitate easy maintenance, operation, and repair when needed. The apparatus was patented.

Keywords: *Seismic energy dissipater, seismic resisting frames, buckling resistant bracing.*

1. Pendahuluan

Bahwasanya sebagian besar wilayah Indonesia terletak pada zona cincin api (*ring of fire*) telah disadari oleh banyak peneliti. Ciri dari wilayah ini adalah adanya aktifitas kegempaan (dan gunung api) dengan intensitas yang tinggi. Hal ini terkait dengan keberadaan beberapa lempeng tektonik yang saling beradu dengan laju pergerakan (*slip rate*) yang besar (dapat mencapai 50~70 mm per tahun dalam kasus Pulau Sumatera dan Jawa). Keadaan ini pada beberapa waktu terakhir, terutama sejak gempa Aceh tahun 2004, telah menyebabkan gempa-gempa lain yang tidak kalah gentingnya, seperti gempa Nias 2005, gempa Jogja 2006, juga gempa Pangandaran pada tahun yang sama; gempa Jawa Barat dan gempa Padang 2009; gempa Sumatera Barat 2010 dan 2012. Pada kejadian gempa-gempa tersebut telah banyak struktur bangunan gedung yang mengalami kegagalan dari kategori sedang hingga berat; bahkan keruntuhan menyeluruh dapat dijumpai dengan mudah disana-sini, menyebabkan korban jiwa yang cukup masif.

Kerusakan struktur bangunan gedung pada umumnya terjadi karena kelemahan *detailings* pada bagian kom-

ponen struktur yang seharusnya berfungsi menyerap energi gempa. Bagian tersebut dapat terletak pada balok di muka kolom, pertemuan balok-kolom, dan ujung kolom/dinding geser bagian bawah dari kolom/dinding geser dasar. Ini adalah bagian-bagian kritis yang perlu mendapat perhatian khusus karena merupakan pusat-pusat pelepas energi gempa pada saat kejadian gempa. Ironisnya, justru bagian-bagian ini yang seringkali mengalami kegagalan pada peristiwa kejadian gempa. Kegagalan bagian-bagian tersebut dalam memikul gaya-gaya gempa beresiko terjadinya kegagalan struktur bangunan gedung secara menyeluruh. Beberapa upaya telah dilakukan untuk menekan resiko akibat kejadian gempa, antara lain, dengan memperkenalkan peta gempa Indonesia pasca 2003, yang diiringi dengan pengkinian peraturan perencanaan bangunan tahan gempa. Namun upaya ini tidak akan membuahkan hasil seperti yang diharapkan tanpa disertai dengan kendali mutu konstruksi untuk menghasilkan struktur bangunan gedung seperti yang seharusnya.

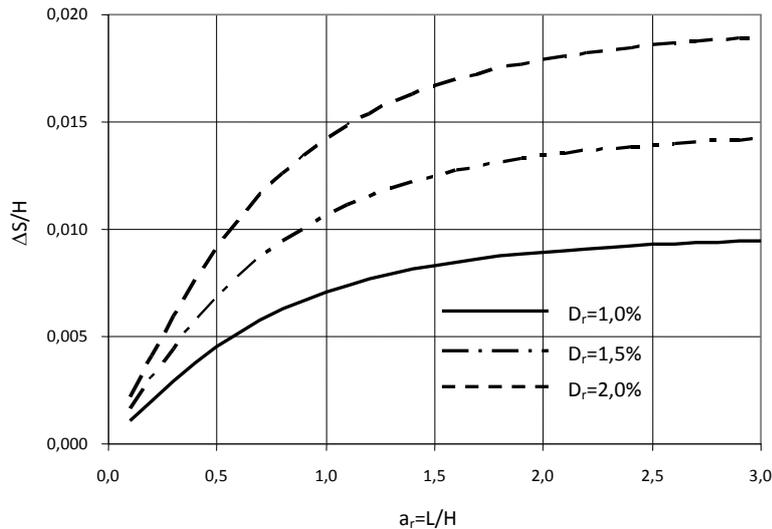
Upaya lain dapat berupa penambahan alat pelepas energi gempa sebagai tambahan dari yang telah disebutkan sebelumnya. Termasuk yang cukup lazim ada-

lah menggunakan isolasi dasar (*base isolation*) (Buckle, 2000), redaman viskoelastis solid (*viscoelastic solid damper*) (Symans, M.D., dkk, 2008), redaman friksi (*friction damper*), redaman fluida (*fluid damper*), dan redaman metal (*metallic damper*). Pada makalah ini dibahas alat pelepas energi gempa uniaksial yang merupakan invensi dari jenis redaman metal. Pada prinsipnya alat tersebut dipasang pada bresing tahan tekuk yang digunakan pada struktur bangunan gedung. Akibat gaya-gaya gempa yang bekerja maka bresing tersebut akan memikul gaya-gaya aksial. Bila gaya aksial melampaui suatu nilai tertentu maka alat pelepas energi akan berdeformasi secara plastis dan oleh karenanya menyerap energi gempa pada struktur bangunan gedung. Selengkapnya keadaan tersebut dijelaskan berikut ini.

2. Portal Pemikul Gempa pada Struktur Bangunan Gedung dengan Bresing dan Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial

Pada **Gambar 1 (a)** diperlihatkan suatu portal yang merupakan bagian dari struktur bangunan gedung. Dianggap bahwa portal tersebut merupakan bagian dari rangka pemikul beban gempa. Pada portal tersebut diperlihatkan adanya bresing dengan alat pelepas energi. Secara tipikal portal tersebut dapat dimodelkan sebagai terlihat pada **Gambar 1 (b)** dengan tinggi H dan lebar bentang L . Pada pembebanan lateral portal akan mengalami goyangan sebesar ΔL , dan oleh karenanya panjang diagonal yang semula S_0 akan berubah menjadi S . Deformasi aksial bresing adalah $\Delta S = S - S_0$ dapat didekati dengan **Persamaan (1)**.

$$\Delta S \cong S - S_0 = \sqrt{(S - S_0)^2} = \sqrt{S^2 + S_0^2 - 2SS_0} \quad (1)$$



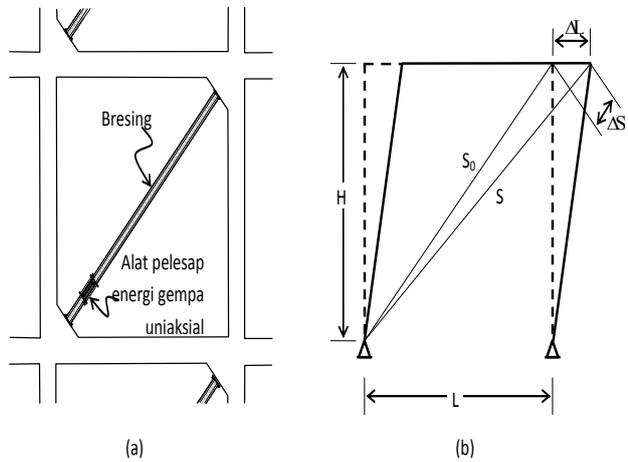
Gambar 2. Hubungan antara deformasi aksial bresing terhadap nisbah persegi (*aspect ratio*) untuk beberapa nilai nisbah simpangan (*drift ratio*)

Mengingat **Persamaan. 2** maka **Persamaan (1)** berubah menjadi **Persamaan (3)** yang bersifat nir-dimensi.

$$S_0^2 = L^2 + H^2; \quad S^2 = [L + \Delta L]^2 + H^2 \quad (2)$$

$$\left(\frac{\Delta S}{H}\right)^2 = 2\left\{p + a_r D_r + \frac{1}{2} D_r^2 - \sqrt{p^2 + 2a_r p D_r + p D_r^2}\right\} \quad (3)$$

Dimana $a_r = L / H$ adalah nisbah persegi (*aspect ratio*), adalah $D_r = \Delta L / H$ nisbah simpangan (*drift ratio*), dan $p = a_r^2 + 1$ adalah suatu parameter. Untuk memudahkan ilustrasi, disajikan **Gambar 2** sebagai bentuk grafis dari **Persamaan (3)**, dan **Tabel 1** yang memperlihatkan besar deformasi aksial bresing untuk beberapa nilai nisbah persegi dan simpangan.



Gambar 1. Portal pemikul beban gempa pada struktur bangunan gedung (a) dengan bresing dan alat pelepas energi gempa uniaksial; (b) model portal dalam keadaan bergoyang

Tabel 1. Deformasi aksial bresing untuk beberapa nilai nisbah simpangan dan persegi

| $D_r = \Delta L/H$ (nisbah simpangan) | a_r (nisbah persegi) | DS/H (nisbah deformasi) | DS (mm) (deformasi aksial bresing) |
|--|--|----------------------------|---------------------------------------|
| 1,5% | $\frac{L}{H} = \frac{6.000}{3.500} = 1,71$ | 0,01286 | 45 |
| 2,0% | $\frac{L}{H} = \frac{6.000}{4.000} = 1,50$ | 0,01667 | 67 |
| 2,0% | $\frac{L}{H} = \frac{3.000}{4.000} = 0,75$ | 0,01200 | 48 |

Nisbah simpangan (*drift ratio*) ditentukan berdasarkan kategori kinerja (*performance category*), indeks kerusakan (*damage index*) struktur bangunan gedung yang diijinkan, dan jenis struktur bangunan gedung (Mangkoesebroto, 2007) yang ditinjau. Sebagai ilustrasi **Tabel 2** memberikan gambaran untuk menentukan nisbah simpangan. Termasuk bangunan dengan kategori kinerja I adalah bangunan-bangunan biasa, seperti rumah tinggal, apartemen, kantor, dan lain-lain; kategori kinerja III adalah jenis bangunan yang diharapkan tetap beroperasi selama dan sesudah kejadian gempa, seperti rumah sakit, pos polisi, gedung tanggap darurat, tempat penyimpanan material berbahaya, dan lain-lain. Sedangkan kategori kinerja II adalah untuk bangunan-bangunan yang terletak diantaranya. Selanjutnya nisbah persegi (*aspect ratio*) berkaitan dengan konfigurasi gedung yang ditinjau.

Deformasi aksial bresing pada **Tabel 1** harus dapat diakomodasi oleh alat pelepas energi gempa uniaksial. Deformasi aksial tersebut pertama-tama diubah menjadi deformasi geser murni dengan harapan bahwa hukum kekekalan masa dapat dipenuhi untuk menekan peluang terjadinya kerusakan pada alat. Rincian mekanisme geser murni dibahas secara lengkap pada bagian berikut ini.

3. Kekekalan Masa dan Keadaan Tegangan

Pertama-tama persamaan tegangan efektif dan kriteria leleh von Mises dapat dinyatakan seperti pada **Persamaan (4)** (Cook and Young, 1985).

$$\sigma_e^2 = \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \leq f_{yw}^2 \quad (4)$$

Tabel 2. Hubungan kategori kinerja, indeks kerusakan, dan nisbah simpangan maksimum untuk beberapa jenis struktur bangunan gedung (Mangkoesebroto, 2007)

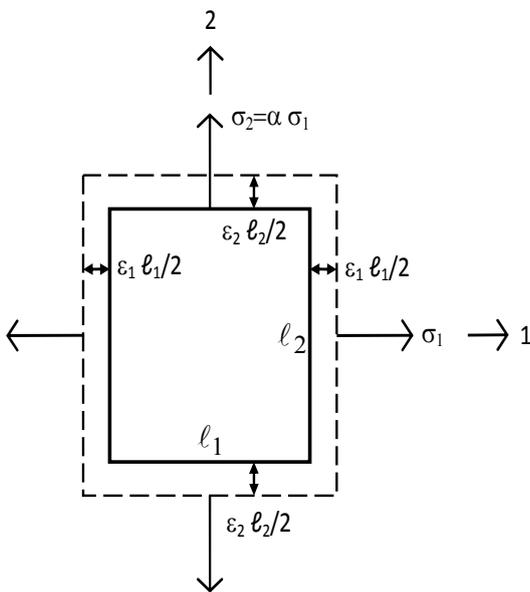
| Kategori kinerja: | I | II | III |
|---|--------------------------------|-----|-----|
| Indeks kerusakan ($N_e \leq N_{er}$): | 2,0 | 1,5 | 1,0 |
| Struktur Bangunan Gedung | Nisbah simpangan maksimum (%) | | |
| Bangunan-bangunan selain daripada dinding geser pasangan batu atau rangka dinding pasangan batu, kurang dari empat tingkat dengan dinding interior, partisi, plafon, dan dinding eksterior yang direncanakan mampu mengakomodasi simpangan antar lantai | 2,5 (tidak untuk 1 tingkat) | 2,0 | 1,5 |
| Bangunan dinding geser dari pasangan batu (tanpa transfer momen diantara dinding-dinding geser) | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Bangunan dinding geser pasangan batu selainnya | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Bangunan rangka dinding pasangan batu | 1,3 | 1,3 | 1,0 |
| Semua bangunan selainnya | 2,0 | 1,5 | 1,0 |

Dimana σ_1 , σ_2 dan σ_3 adalah tegangan utama, dan f_{yw} adalah kuat leleh pelat badan (*web*). Untuk keadaan dua dimensi atau tegangan bidang ($\sigma_3 \approx 0$); dengan $\sigma_2 = \alpha \sigma_1$ dan lakukan penyederhanaan maka **Persamaan (4)** tereduksi menjadi **Persamaan (5)**.

$$\alpha^2 - \alpha + 1 \leq (f_{yw} / \sigma_1)^2 \tag{5}$$

Dimana $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$.

Gambar 3 menunjukkan suatu kupon yang berada dalam keadaan tegangan bidang ($\sigma_3 \approx 0$) dalam arah sumbu utamanya, sebelum dan setelah berdeformasi. Pada keadaan ini maka regangan pada ketiga arah sumbu utama dapat dinyatakan dengan **Persamaan (6)** (Cook and Young, 1985).



Gambar 3. Kupon pada keadaan tegangan bidang ($\sigma_3 \approx 0$) dalam arah sumbu utama, sebelum dan setelah deformasi

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - \nu \sigma_2) = \frac{\sigma_1}{f_{yw}} \epsilon_{yw} (1 - \alpha \nu) \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{E} (\sigma_2 - \nu \sigma_1) = \frac{\sigma_1}{f_{yw}} \epsilon_{yw} (\alpha - \nu) \\ \epsilon_3 &= \frac{-\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) = -\nu \frac{\sigma_1}{f_{yw}} \epsilon_{yw} (1 + \alpha) \end{aligned} \tag{6}$$

Dimana E adalah modulus elastisitas, ν adalah nisbah Poisson, dan ϵ_{yw} adalah regangan leleh pelat badan (*web*). Akibat deformasi yang dialaminya, panjang kupon yang semula l_1 , l_2 , l_3 , berubah sesuai **Persamaan (7)**.

$$\begin{aligned} l_1 &\rightarrow l_1 (1 + \epsilon_1) \\ l_2 &\rightarrow l_2 (1 + \epsilon_2) \\ l_3 &\rightarrow l_3 (1 + \epsilon_3) \end{aligned} \tag{7}$$

Masa kupon sebelum dan sesudah deformasi masing masing adalah $M_0 = \rho V_0 = \rho l_1 l_2 l_3$ dan $M = \rho V = \rho l_1 l_2 l_3 (1 + \epsilon_1)(1 + \epsilon_2)(1 + \epsilon_3)$,

dimana V_0 dan V masing-masing adalah volume kupon sebelum dan setelah deformasi, dan ρ adalah rapat masa. Dalam teori plastisitas klasik von Mises, rapat masa ρ senantiasa dapat dianggap konstan (tak-mampat) (Wilson, 2002). Nisbah masa setelah dan sebelum deformasi dapat dinyatakan dengan **Persamaan (8)**.

$$\frac{M}{M_0} - 1 = [\kappa(1 - \alpha\nu) + \kappa(\alpha - \nu) + \kappa^2(1 - \alpha\nu)(\alpha - \nu)] [1 - \kappa\nu(1 + \alpha)] - \kappa\nu(1 + \alpha) \tag{8}$$

$$\text{Dimana } \kappa = \frac{\sigma_1}{f_{yw}} \epsilon_{yw} = \frac{\epsilon_{yw}}{\sqrt{\alpha^2 - \alpha + 1}} = O(\zeta) \ll 1$$

dalam keadaan leleh dan dengan substitusi **Persamaan (5)**. Mengingat κ adalah bilangan kecil (jauh lebih kecil satu) maka **Persamaan (8)** dapat didekati dengan **Persamaan (9)**.

$$\frac{M}{M_0} - 1 \approx \kappa(1 - \alpha\nu) + \kappa(\alpha - \nu) - \kappa\nu(1 + \alpha) \tag{9}$$

Agar kekekalan masa terpenuhi maka $M / M_0 = 1$ atau $\kappa(1 - \alpha\nu) + \kappa(\alpha - \nu) - \kappa\nu(1 + \alpha) = 0$ dan diperoleh **Persamaan (10)**. Secara skematis **Persamaan (10)** memberikan keadaan tegangan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. **Gambar 4 (a)** adalah keadaan tegangan untuk $\sigma_2 = -\sigma_1$, dan **Gambar 4 (c)** adalah keadaan tegangan geser murni yang berasosiasi, dan didapat menggunakan lingkaran Mohr (**Gambar 4 (b)**).

$$a = -1; \quad -s_2 = +s_1 \leq \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}} \tag{10}$$

Secara grafis **Persamaan (5)** dan **(9)** diilustrasikan pada **Gambar 5**. Kurva masa vs. $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ (bawah) diturunkan untuk nilai-nilai $E = 200$ GPa, $\nu = 0,29$ dan $f_{yw} = 240$ MPa. Terlihat bahwa kekekalan masa hanya terpenuhi untuk keadaan geser sederhana, $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1 = -1$, yang

mana $\sigma_{1,max} = f_{yw} / \sqrt{3}$. Pada keadaan tegangan lainnya (uniaksial dan biaksial) tidak terpenuhi kekekalan masa. Hal ini menunjukkan bahwa mekanisme pelepasan energi hanya dapat dilakukan secara berkelanjutan pada keadaan geser sederhana.

4. Analisis Pelat Dalam Geser Sederhana

Alat pelepas energi gempa pada makalah ini terdiri atas bagian yang paling mendasar berupa pelat metal yang bekerja dalam modus geser sederhana (**Gambar 6**). Terlihat pada gambar tersebut sebuah pelat metal

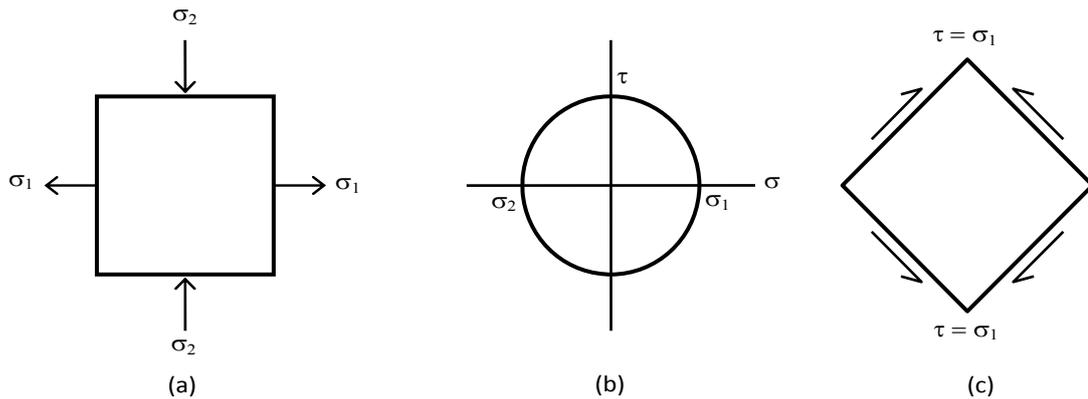
berukuran $\ell \times h$ yang tetap (*fixed*) pada sisi dasarnya dan diberikan simpangan sebesar $u_1 = \delta = \gamma h$ pada sisi atasnya, dimana γ adalah gradien geser; dan $u_1 = \gamma x_2$ pada setiap garis horizontal diantaranya, pada posisi x_2 ; disini simpangan pada arah x_2 , $u_2(x_2) = 0$. Dengan demikian gradien simpangan diberikan pada **Persamaan (11)**, dan matriks regangan pada **Persamaan (12)**.

$$\frac{\partial u_1}{\partial x_1} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2} = 0 \tag{11}$$

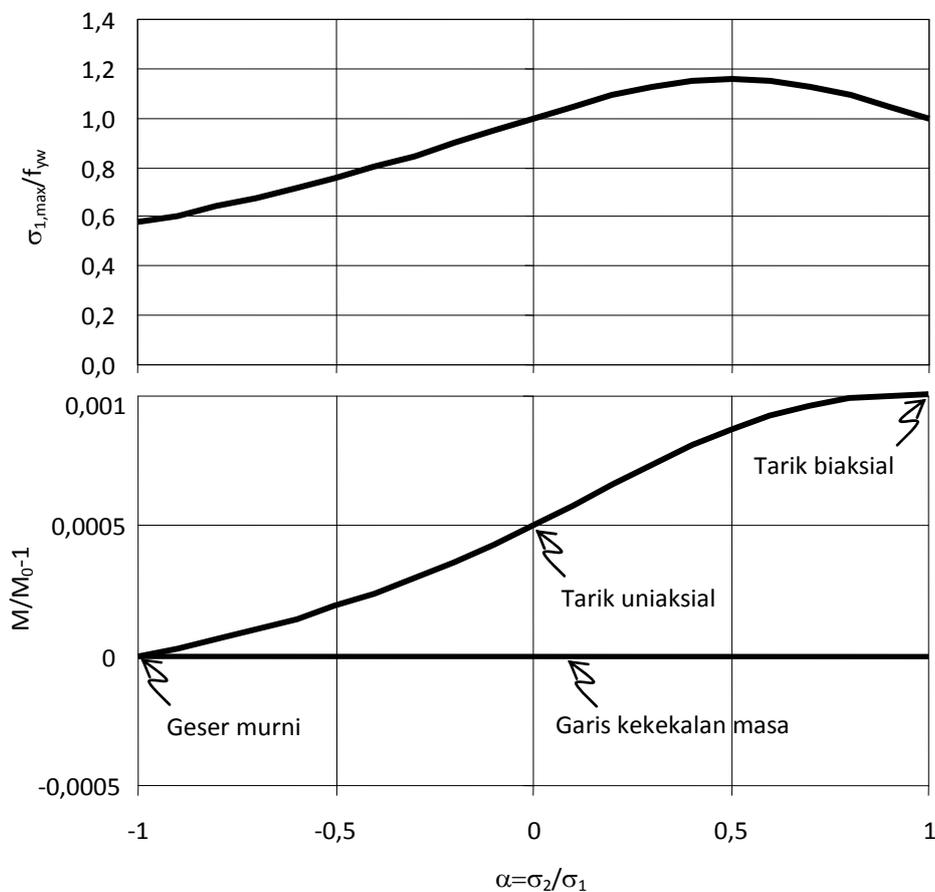
$$\frac{\partial u_1}{\partial x_2} = \gamma; \frac{\partial u_2}{\partial x_1} = 0$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \gamma/2 \\ \gamma/2 & 0 \end{bmatrix}$$

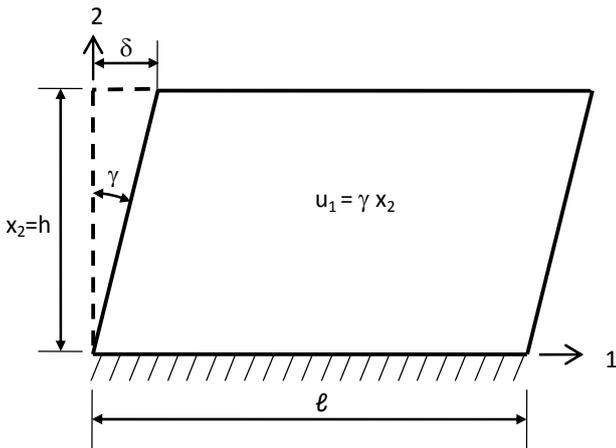
$$= \frac{\gamma}{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{12}$$



Gambar 4. (a) keadaan tegangan untuk $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1 = -1$ sesuai Persamaan (10); (b) lingkaran Mohr untuk keadaan tegangan (a); (c) keadaan tegangan geser murni yang berasosiasi dengan (a)



Gambar 5. Hubungan antara $\alpha = \sigma_2 / \sigma_1$ dan kekekalan masa (bawah), serta nilai $\sigma_{1,max}$ yang dapat dikerahkan (atas)



Gambar 6. Pelat metal berukuran $\ell \times h$ dalam geser sederhana

Dengan transformasi koordinat pada Persamaan (13) maka diperoleh matriks regangan untuk $\theta = \pi/4$ pada Persamaan (14).

$$Q_{ij} = \begin{bmatrix} \sin \theta & \cos \theta \\ -\cos \theta & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{ij}^{\theta = \pi/4} = \frac{\gamma}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Gambar 7 (kiri) memberikan ilustrasi bahwa kupon pada Gambar 6 yang mengalami geser sederhana sesuai Persamaan (12), sama dengan mengalami deformasi pada Gambar 7 (kanan) sesuai Persamaan (14).

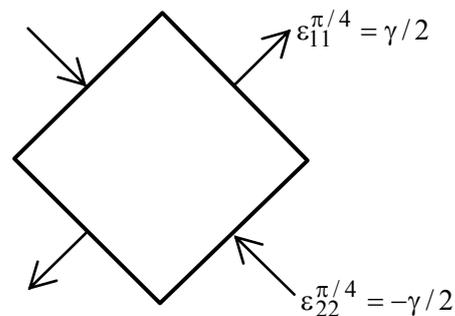
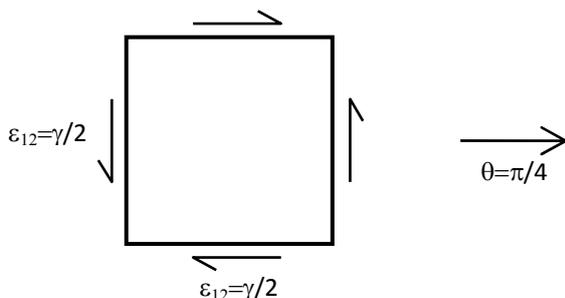
Gunakan inversi dari Persamaan (6) dan substitusikan $\varepsilon_1 = \varepsilon_{11}$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_{22}$ untuk mendapatkan Persamaan (15).

$$\sigma_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{\gamma}{2} - \nu \frac{\gamma}{2} \right) = \frac{E\gamma}{2(1+\nu)}$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1) = \frac{E}{1-\nu^2} \left(-\frac{\gamma}{2} + \nu \frac{\gamma}{2} \right) = -\frac{E\gamma}{2(1+\nu)} \quad (15)$$

Substitusikan Persamaan (15) ke Persamaan (4) dan selesaikan untuk γ diperoleh Persamaan (16).

$$\gamma \leq \frac{2(1+\nu)}{\sqrt{3}} \varepsilon_{yw} \quad (16)$$



Gambar 7. Suatu kupon dalam geser sederhana sesuai Persamaan (12), sebelum dan setelah mengalami transformasi koordinat sesuai Persamaan (13)

Dimana $\varepsilon_{yw} = \frac{f_{yw}}{E}$ adalah regangan leleh pelat, dan

f_{yw} adalah kuat leleh.

Sebagai ilustrasi, untuk material baja BJ37 dengan karakteristik mekanik pada Gambar 8 ($f_{yw} = 240$ MPa) diperoleh gradien geser $\gamma_y = 0,0018$ pada saat leleh. Dengan demikian deformasi geser pada sisi atas pelat (Gambar 6 untuk pelat metal berdimensi $\ell \times h = 300 \times 75$ mm²) menjadi $u_{1y}(x_2=h) = \delta = \gamma_y h = 0,0018 \times 75 \text{ mm} = 0,135$ mm (pada saat leleh).

Mengingat $\varepsilon_{uw} \approx 170 \varepsilon_{yw}$ maka pada saat *ultimate* diharapkan dapat tercapai $u_{1u}(x_2=h) \approx 100 u_{1y}(x_2=h) = 100 \times 0,135 \text{ mm} = 13,5$ mm. Nilai ini memberikan

$$\text{gradien geser ultimate sebesar } \gamma_u = \frac{u_{1u}(x_2=h)}{h} = \frac{13,5}{75} = 18\%$$

Setengah dari gradien geser *ultimate*, $\gamma_u/2$, akan menyebabkan $\varepsilon_{12,max}$ pada pelat (lihat Gambar 7 (kiri)), dan $\varepsilon_{12,max}$ tersebut harus dibandingkan terhadap ε_{11} dari uji tarik uniaksial, karena pada kasus tersebut

$$\varepsilon_{11} = \frac{\gamma}{2} = \varepsilon_{12} \text{ . Secara kualitatif nilai } \gamma_u/2 = 9\% \text{ masih}$$

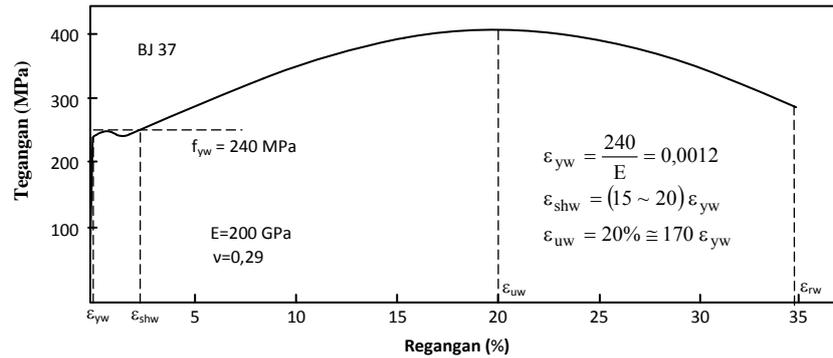
dibawah batas *ultimate* $\varepsilon_{uw} = 20\%$ (Gambar 8) sehingga deformasi geser pada pelat adalah sekira 13,5 mm; dan nilai ini dikalikan dua seharusnya lebih besar daripada nilai ΔS pada Tabel 1. Bila tidak terpenuhi maka keperluan tersebut dapat dipenuhi dengan cara meningkatkan $h = 75$ mm menjadi 150 mm sehingga diperoleh $2u_{1u} =$

$$2 \times 13,5 \text{ mm} \times \frac{150 \text{ mm}}{75 \text{ mm}} = 54 \text{ mm} > DS (= 48 \text{ mm untuk}$$

kasus $D_r = \Delta L/H = 2,0\%$ dan $a_r = L/H = 0,75$).

5. Kajian Numerik Alat Pelepas Energi Gempa Uniaksial

Isometri alat pelepas energi gempa uniaksial diperlihatkan pada Gambar 9 (kiri) dan potongannya pada Gambar 9 (tengah) dan (kanan). Terlihat alat tersebut berbentuk palang (*cruciform*) yang terbuat dari empat



Gambar 8. Karakteristik mekanik material baja karbon (BJ37) (Salmon, dkk, 2009)

pelat metal. Mengingat cara kerjanya bersifat simetri atau asimetri maka kajian numerik hanya dilakukan terhadap satu pelat metal saja (lihat Gambar 10). Pelat metal pada gambar tersebut bekerja pada keadaan tegangan geser sederhana.

Kelangsingan pelat metal harus dari kategori kompak agar dapat menghasilkan kurva histeresis yang gemuk dan stabil.

Kelangsingan pelat adalah $\lambda = \frac{l}{t_w} = \frac{300\text{mm}}{5\text{mm}} = 60$,

sedangkan batasan untuk penampang kompak adalah $\frac{l}{t_w} \leq \frac{1.100}{\sqrt{f_{yw}}} \left(= \frac{1.100}{\sqrt{240}} = 70 \right)$ (SNI 03-1729-2000)

untuk material baja karbon setara BJ37, atau

$\frac{l}{t_w} \leq \frac{810}{\sqrt{f_{yw}}} \left(= \frac{810}{\sqrt{66}} = 100 \right)$ untuk perunggu.

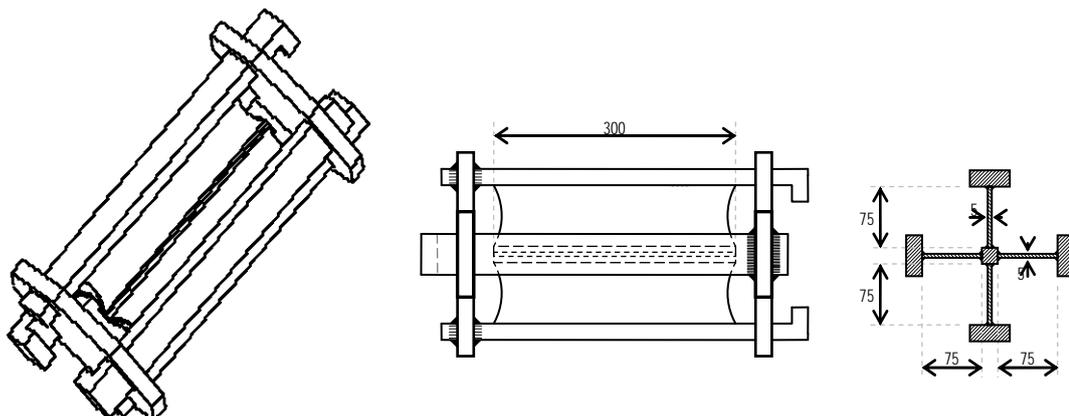
Dengan demikian pelat memenuhi persyaratan kekompakan penampang untuk material baja ataupun perunggu.

Dimensi flens ditentukan menurut keseimbangan gaya pada Persamaan (17).

$$T = a b f_{yf} = 0,6 f_{yw} t_w l \tag{17}$$

Maka dapat dihitung luas flens sebagai $a \times b = \frac{0,6 f_{yw} t_w l}{f_{yf}} = \frac{0,6 \times 240 \times 5 \times 300}{355} = 608 \text{ mm}^2 = 15' \times 40 \text{ mm}^2$.

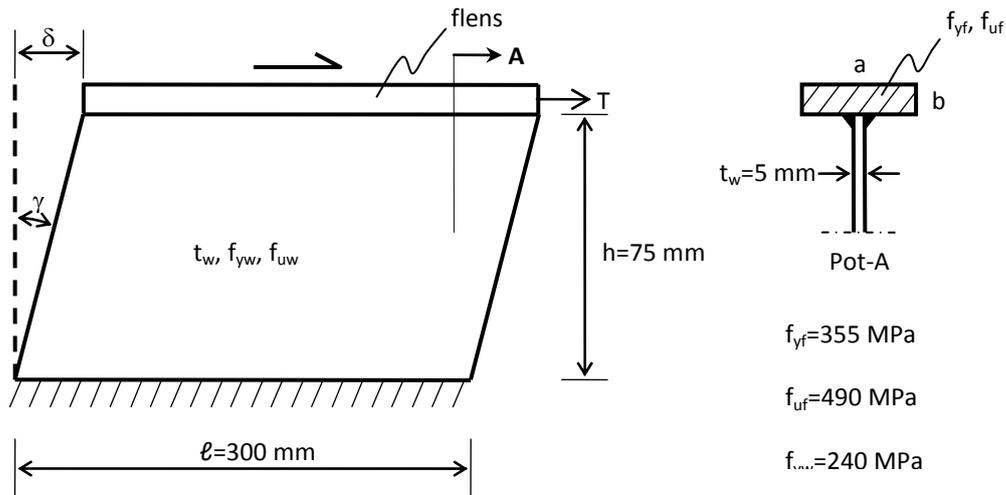
Karakteristik mekanik material baja dan perunggu yang digunakan pada pelat diperlihatkan pada Gambar 11. Kurva garis penuh adalah data aktual, sedangkan kurva garis putus-putus adalah input pada program ADINA. Rincian data material disajikan pada Tabel 3.



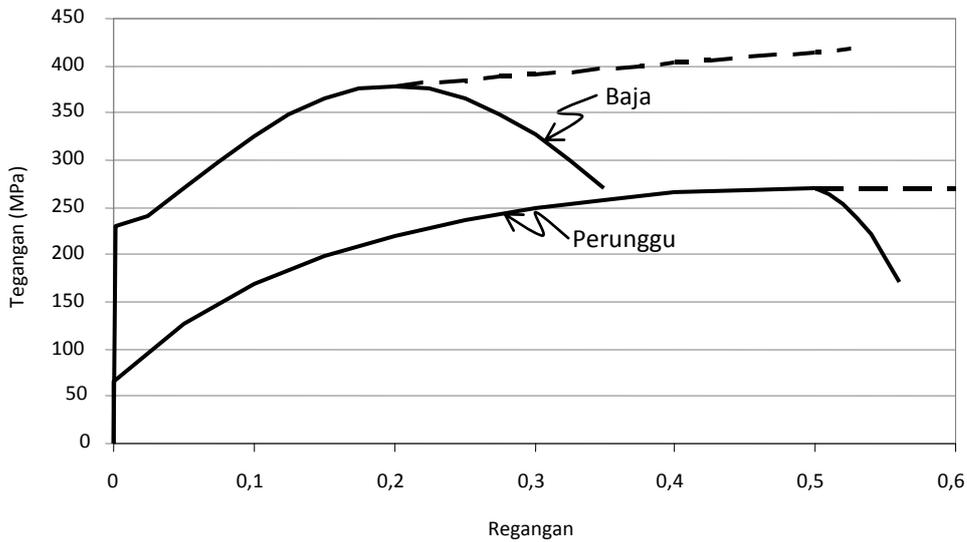
Gambar 9. Alat pelepas energi gempa uniaksial: Isometri (kiri), potongan memanjang (tengah), dan potongan melintang (kanan)

Tabel 3. Data material baja (SNI 03-1729-2000) dan perunggu (NBS, 1967)

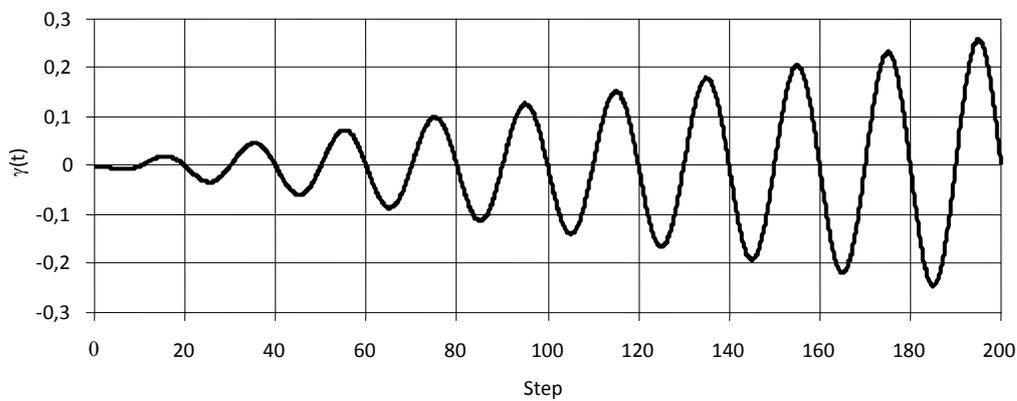
| Material | Modulus Young E (GPa) | Kuat leleh f _{yw} (MPa) | Kuat tarik f _{uw} (MPa) | Rapat Masa ρ (kN.s ² /m ⁴) | Nisbah Poisson (ν) |
|----------|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--|-----------------------|
| Baja | 200 | 240 | 370 | 8,00 | 0,29 |
| Perunggu | 106 | 66 | 270 | 9,00 | 0,34 |



Gambar 10. Pelat metal penyusun alat pelepas energi gempa uniaksial dan spesifikasi material



Gambar 11. Karakteristik mekanik material baja dan perunggu sebagai penyusun pelat badan (web). Kurva bergaris putus-putus adalah input pada program ADINA



Gambar 12. Riwayat gradien geser sebagai fungsi step waktu pada uji numerik pelat dalam geser sederhana

Pelat pada **Gambar 10** diberikan riwayat gradien geser sebagai fungsi dari step waktu, $\gamma(t)$, seperti ditunjukkan pada **Gambar 12**. Kajian numerik dilakukan dengan bantuan perangkat lunak ADINA 8.7, dan hasilnya diperlihatkan pada **Gambar 13** untuk sebaran geser pada pelat akibat $\gamma(t)$ pada step waktu $t=195$. Terhadap elemen E pada pelat (lihat **Gambar 13**) dilakukan observasi untuk parameter regangan geser. Elemen E dipilih sebagai rujukan karena merupakan lokasi dengan regangan geser maksimum (untuk material baja).

Riwayat regangan geser, ϵ_{xy} , pada elemen E sebagai fungsi dari gradien geser, γ , dengan anggapan penguatan regangan kinematik (*kinematic hardening*) diperlihatkan pada **Gambar 14** untuk material baja dan perunggu. Terlihat bahwa regangan geser maksimum pada elemen E adalah sekira dua kali gradien geser yang diberikan untuk kedua jenis material yang ditinjau. Untuk material baja gradien geser sebesar $\gamma=0,18$ memberikan regangan geser maksimum sekira $\epsilon_{xy,max}=0,32$, dan nilai tersebut sudah mendekati batas fraktur untuk kurva baja pada **Gambar 11**. Sebaliknya, untuk material perunggu, batas fraktur tersebut tercapai pada $\epsilon_{xy,max}=0,52$ (**Gambar 11**) dengan gradien geser sebesar $\gamma=0,25$ (**Gambar 14**). Hal ini penting karena persyaratan $2u_{1u}(x_2=h)^3 \Delta S$, dapat pula dicapai dengan cara memilih material yang lebih daktail daripada baja, dalam hal ini perunggu, selain dengan cara memperbesar dimensi tinggi, h , dari pelat metal seperti yang telah diulas sebelumnya.

Tegangan geser, τ_{xy} , pada elemen E (**Gambar 13**) sebagai fungsi dari regangan geser, ϵ_{xy} , diperlihatkan

pada **Gambar 15** untuk kedua material yang digunakan. Terlihat bahwa material baja menunjukkan sifat yang lebih kokoh daripada material perunggu, dan keduanya secara konsisten memberikan $\tau_{xy,max} \approx f_{yw}/\sqrt{3}$ (lihat **Persamaan (10)** dan **Gambar 4 (c)**), sesuai dengan anggapan penguatan regangan kinematik. Dari hubungan ini dapat diharapkan bahwa untuk dimensi pelat metal yang identik, material perunggu menunjukkan kemampuan pelepasan energi yang lebih rendah daripada material baja.

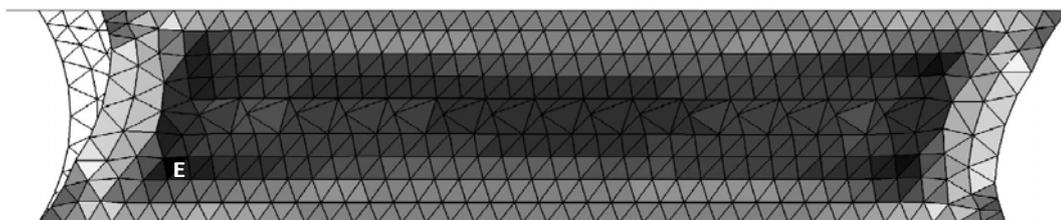
Hubungan gaya aksi, T (**Gambar 10**), sebagai fungsi dari gradien geser, γ , diperlihatkan pada **Gambar 16**. Gaya aksi maksimum adalah $T=0,20$ MN dan $0,05$ MN, masing-masing untuk material baja dan perunggu, atau material baja sekira empat kali lebih kokoh daripada material perunggu. Faktor empat kali ini konsisten dengan kuat leleh material baja yang sekira empat kali kuat leleh material perunggu (lihat **Tabel 3**) bila digunakan anggapan penguatan regangan kinematik.

Energi histeresis sebanding dengan luas *loop* untuk setiap siklus. Terlihat bahwa *loop* histeresis untuk material baja jauh lebih gemuk daripada untuk material perunggu. Secara umum persamaan kesetimbangan energi untuk keadaan kuasi-statis dinyatakan pada **Persamaan (18a)** (Mangkoesoebroto, 2007), bahwa energi input sama dengan jumlah energi histeresis dan regangan.

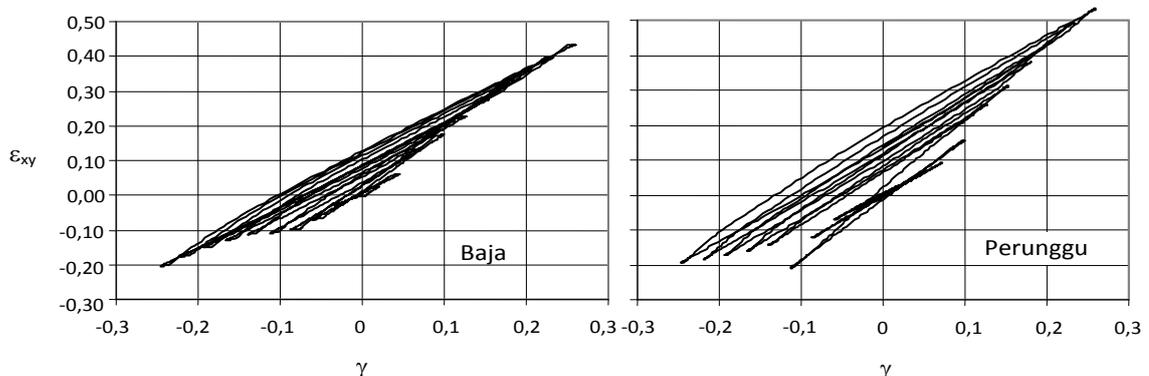
$$E_I = E_h + E_e \tag{18a}$$

atau

$$\frac{e_I}{e_h} = \frac{e_e}{e_h} + 1 \tag{18b}$$



Gambar 13. Sebaran regangan geser pada pelat badan (*web*) dengan gradien geser maksimum pada step waktu $t=195$ (radius 10 mm, material baja). Elemen E adalah lokasi dengan regangan geser maksimum



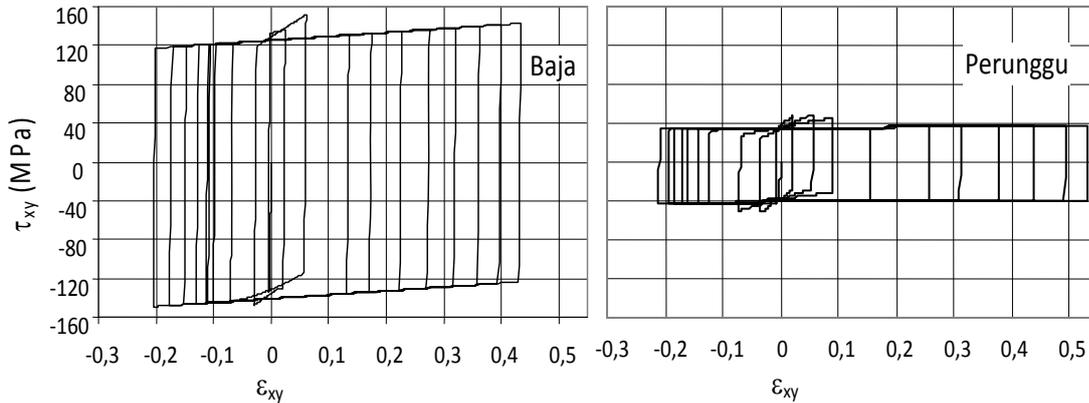
Gambar 14. Hubungan regangan geser, ϵ_{xy} , pada elemen E (**Gambar 13**) sebagai fungsi dari gradien geser, γ , untuk material baja dan perunggu

dimana e_i , e_e , dan e_h masing-masing adalah rapat energi-^a (*energy density*) input, elastik/regangan, dan histeresis.

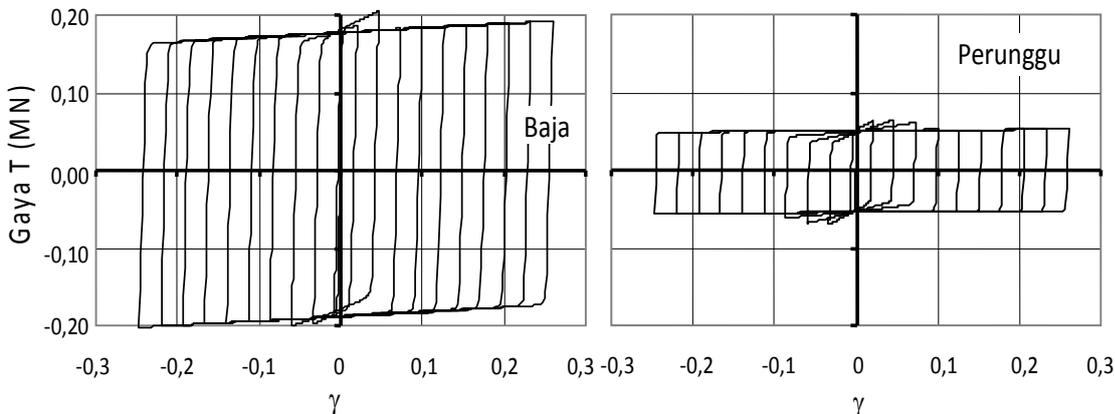
Rapat energi input dan histeresis (e_i , e_h) sebagai fungsi dari gradien geser, γ , diperlihatkan pada **Gambar 17**, yang menunjukkan hubungan linier diantara keduanya, baik untuk material baja maupun perunggu. Terlihat bahwa material baja mampu melepas energi sekira empat kali dari material perunggu, atau sebanding dengan nisbah kuat lelehnya, untuk anggapan penguatan regangan kinematik. Sedangkan, nisbah e_i/e_h sebagai fungsi dari gradien geser, γ , ditunjukkan pada **Gambar 18**, yang menunjukkan efektifitas pelepasan energi; semakin mendekati nilai satu semakin efektif suatu material dalam melepas energi (lihat **Persamaan 18(b)**). Sungguhpun material perunggu lebih kecil dalam melepas energi, namun dari **Gambar 18** terlihat bahwa perunggu lebih efektif melepas energi daripada material baja. Keduanya sangat efektif melepas energi terutama untuk nilai gradien geser $|\gamma| > 0,05$.

6. Kesimpulan

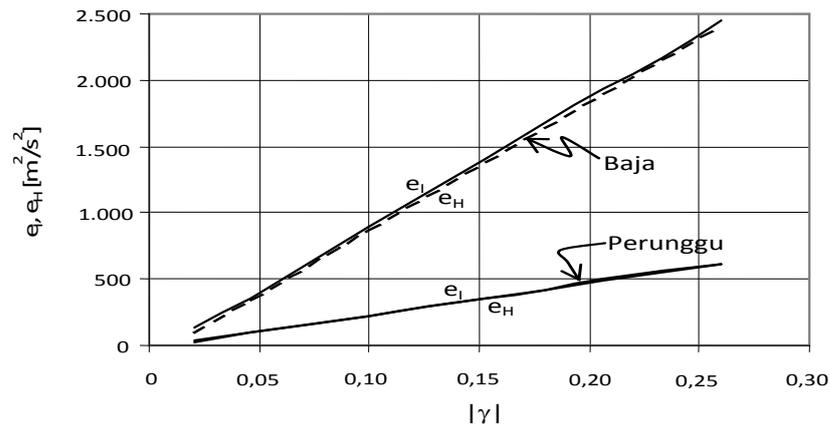
1. Suatu alat pelepas energi gempa uniaksial telah dikembangkan dan dikaji. Pada dasarnya alat tersebut adalah bagian dari suatu bresing tahan tekuk yang dipasang pada portal yang merupakan bagian dari rangka pemikul beban gempa dari struktur bangunan gedung.
2. Pada saat kejadian gempa bresing akan mengalami deformasi aksial. Deformasi aksial tersebut selanjut diubah menjadi mekanisme geser sederhana yang kemudian menyebabkan suatu komponen palang (*cruciform*) yang terbentuk dari empat pelat metal melakukan pemusnahan energi.
3. Pemusnahan energi dilakukan dalam mekanisme geser sederhana karena hanya dalam mekanisme ini kekekalan masa dapat terpenuhi.



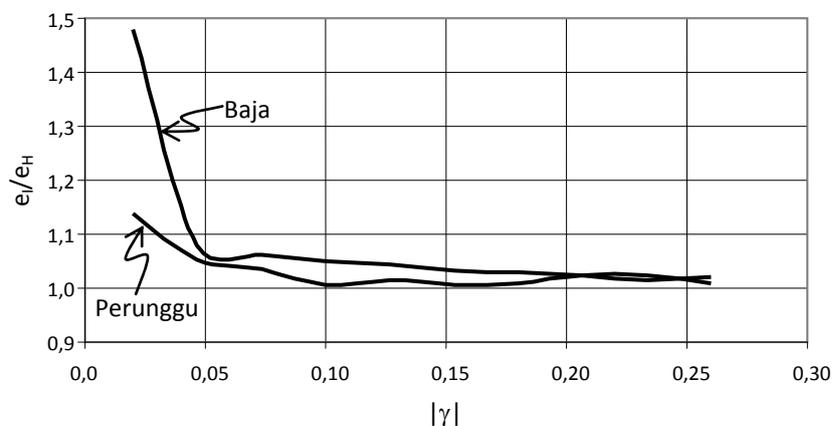
Gambar 15. Hubungan tegangan geser, τ_{xy} , pada elemen E (**Gambar 13**) sebagai fungsi dari regangan geser, ϵ_{xy} , untuk material baja dan perunggu



Gambar 16. Hubungan gaya aksi T (**Gambar 10**) sebagai fungsi dari gradien geser, γ , untuk material baja dan perunggu



Gambar 17. Hubungan antara rapat energi input dan histeresis, e_i , e_H , terhadap gradien geser, γ , untuk material baja dan perunggu



Gambar 18. Hubungan antara nisbah e_i/e_H terhadap gradien geser, γ , untuk material baja dan perunggu

Dua jenis material baja dan perunggu sebagai pembentuk komponen pelepas energi telah dikaji secara rinci. Material baja dapat melepas energi lebih besar daripada perunggu, tetapi material perunggu melepas energi lebih efektif daripada baja. Kedua material menunjukkan efektifitas pelepasan energi pada gradien geser diatas 5%. Mengingat daktilitas material perunggu yang lebih besar daripada baja maka dimensi alat dapat dibuat lebih kecil daripada bila digunakan material baja. Sungguhpun demikian, perencanaan rinci alat perlu dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa faktor antara lain kompleksitas struktur bangunan gedung dan keadaan gempa pada tapak dimaksud.

Alat dapat dipasang pada struktur bangunan gedung yang baru ataupun yang telah ada, tanpa memerlukan modifikasi yang signifikan. Alat direncanakan mudah perawatan, operasi, dan perbaikan bila diperlukan. Pengembangan alat tersebut merupakan invensi baru dan telah dipatenkan dengan nomor P00201300086.

7. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan PT Propenta, serta masukan dari team Reviewer Jurnal Teknik Sipil.

Daftar Pustaka

- Buckle, I.G., 2000, *Passive Control of Structures for Seismic Loads*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2825, Auckland, NZ.
- Cook, R.D. and Young, W.C., 1985, *Advanced Mechanics of Materials*, McMillan, pp. 8-22.
- Mangkoesebroto, S.P., 2007, *Seismic Performance Chart for Simple Structures*, Research Report Series No. 1/2007, ISBN 978-979-16472-0-5, Indonesia Center for Earthquake Engineering.
- NBS, 1967, in *Standards & Properties: Mechanical Properties of Copper and Copper Alloys at Low Temperatures*, http://www.copper.org/resources/properties/144_8/144_8.html

- Salmon, C.G., Johnson, J.E., and Malhas, F.A., 2009, *Steel Structures: Design and Behavior*, Prentice Hall, Chapter 2.
- SNI 03-1729-2000, *Tatacara Perencanaan Struktur Baja untuk Bangunan Gedung*.
- Symans, M.D., Charney, F.A., Whittaker, A.S., Constantinou, M.C., Kircher, C.A., Johnson, M.W., and McNamara, R.J., 2008, *Energy Dissipation Systems for Seismic Applications: Current Practice and Recent Developments*, *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 3-21.
- Wilson, C.D., 2002, A Critical Reexamination of Classical Metal Plasticity, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 69, Jan., pp. 63-68.