

## STUDI EKSPERIMENTAL PERILAKU SIKLIS PENDISIPASI ENERGI PIPA TEGAK

Junaedi Utomo<sup>1</sup>, Muslinang Moestopo<sup>2</sup>, Adang Surahman<sup>3</sup> dan Dyah Kusumastuti<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa S3, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganessa 10, Bandung. Email: utomoj@students.itb.ac.id

<sup>2</sup>Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganessa 10, Bandung. Email: mmoestopo@gmail.com

<sup>3</sup>Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganessa 10, Bandung. Email: adangsur@ganessa.itb.ac.id

<sup>4</sup>Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganessa 10, Bandung. Email: dkusumastuti@si.itb.ac.id

### ABSTRAK

Pada penelitian ini simulasi numerik dengan program ABAQUS terhadap perilaku siklis dan prediksi fraktur daktail pada pendisipasi energi pipa tegak telah dilakukan sebelum uji eksperimental. Dalam makalah ini akan dibahas hasil uji eksperimental terhadap benda uji dari pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan tiga ring di dalam pipa, dan perkuatan pelat pada samping luar pipa. Beban geser siklis dikerjakan pada benda uji untuk memperoleh perilaku siklis pendisipasi energi. Dari perilaku siklis benda uji dapat diperoleh nilai parameter-parameter penentu kinerja seismik, yaitu kekakuan, kekuatan, perpindahan serta kapasitas dan stabilitas disipasi energi dari pendisipasi energi. Kajian terhadap perilaku siklis benda uji hasil uji eksperimental menunjukkan kemungkinan peningkatan kinerja disipasi energi dari pendisipasi energi melalui perbaikan detail pengaku pelat samping luar pipa untuk menghindari fraktur pada daerah sambungan las. Setelah dilakukan perbaikan detail pada pelat pengaku, pendisipasi energi pipa tegak dapat diuji ulang sampai kinerja seismik yang diinginkan tercapai. Untuk keperluan peningkatan proteksi seismik, pendisipasi energi pipa tegak dapat dipasang pada gedung dan jembatan.

Kata kunci: disipasi energi, kinerja seismik, perilaku siklis, pipa tegak, uji eksperimental

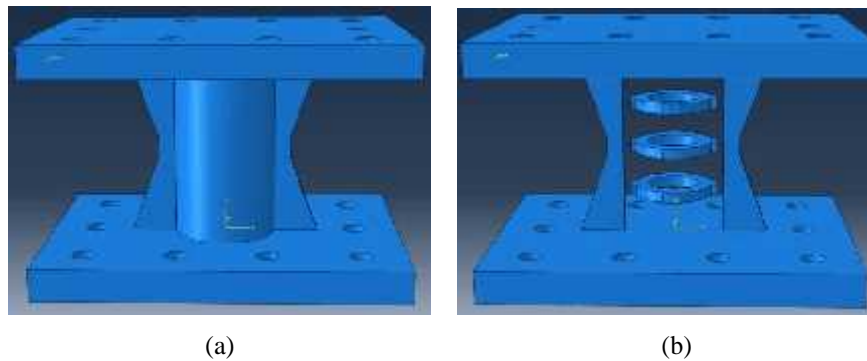
### 1. PENDAHULUAN

Saat bangunan dilanda gempa, sebagian energi gempa bermigrasi ke dalam struktur bangunan sehingga di dalam struktur bangunan terjadi transfer bolak-balik aliran energi dari energi kinetik ke energi regangan dan sebaliknya. Pendisipasi energi dirancang untuk menimbulkan gangguan menguntungkan terhadap aliran energi di dalam struktur agar respon struktur terkontrol sehingga struktur tidak mengalami deformasi lateral berlebihan. Proteksi pasif terhadap struktur bangunan terjadi akibat kerja dari pendisipasi energi. Pendisipasi energi pipa tegak merupakan bagian dari *metallic damper*. Pendisipasi energi pipa tegak mendisipasi input energi gempa melalui kelelahan baja. Pipa bulat dari baja karbon dipilih sebagai material utama pendisipasi energi karena pipa mempunyai elastisitas geometrik, mudah dikerjakan, mudah dipasang, dan murah. Parameter-parameter penentu kinerja seismik pendisipasi energi pipa tegak dari hasil uji eksperimental benda uji akan dibahas dalam tulisan ini.

### 2. BENDA UJI DAN SETUP BENDA UJI

**Gambar 1** menunjukkan pendisipasi energi pipa tegak dan komponen-komponennya. Ada dua perkuatan terhadap pipa baja yang dipakai yaitu tiga ring baja yang dipasang dengan sambungan las pada dinding dalam pipa dan pelat trapezium yang dilas pada samping luar pipa dan dilas pada pelat dudukan atas dan bawah. Pipa baja karbon *Schedule 80* dan pelat baja dipakai sebagai material pendisipasi energi. Hasil uji tarik dari pipa dan pelat baja ditunjukkan oleh **Tabel 1**. Untuk memperoleh prediksi awal dari perilaku siklis pendisipasi energi dilakukan simulasi numerik dengan program ABAQUS dengan data material dari **Tabel 1**. Dalam kajian ini pendisipasi energi pipa tegak menggunakan pipa baja diameter 114.3 mm. Sebagian besar pipa baja diharapkan mengalami kelelahan

saat mendisipasi energi. Abebe, Kim, & Choi (2013) menunjukkan bahwa agar tegangan geser dan lentur dalam pipa terjadi simultan dan sama sama dominan maka perbandingan tinggi terhadap diameter pipa adalah 3. Jadi tinggi pipa diambil  $3 \times 114.3 = 197.97 \text{ mm} \sim 200 \text{ mm}$ . Tebal pipa adalah 8.6 mm. Dari hasil simulasi numerik diperoleh riwayat gaya geser (*restoring force*) yang terjadi akibat beban geser siklis. Panjang las minimum pada ujung atas dan ujung bawah pelat trapesium ditetapkan berdasar gaya geser maksimum yang terjadi. Panjang las ini dipakai untuk menentukan lebar ujung atas dan ujung bawah pelat trapesium (50 mm) sedang lebar bagian tengah pelat diambil minimum (20 mm). Tebal pelat trapesium adalah 12 mm. Fungsi perkuatan ring adalah untuk stabilisasi tampang pipa sehingga ring dirancang untuk tidak mengalami kelelahan. Masing-masing ring dilas pada empat titik pada dinding dalam pipa (**Gambar 1**) dan tebal ring adalah 12 mm.



Gambar 1. Pendisipasi energi pipa tegak: (a) Pandangan depan; (b) Perkuatan ring dalam dan perkuatan pelat samping luar pipa (pipa tidak ditampilkan)

Tabel 1: Sifat-sifat baja

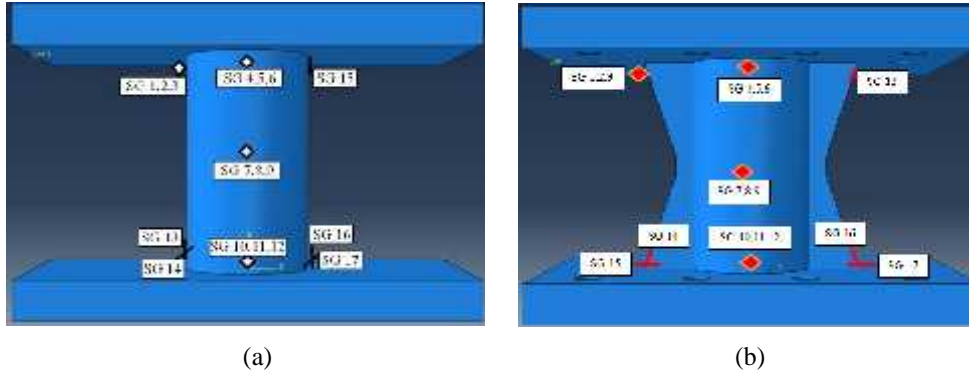
Baja	Modulus elastisitas (MPa)	Tegangan leleh (MPa)	Tegangan Ultimit (MPa)	Regangan putus (%)
Pipa	200.000	330	465	37
Pelat	200.000	360	500	25

Dua benda uji pendisipasi pipa tegak yaitu pendisipasi pipa tegak tanpa perkuatan dan pendisipasi pipa tegak dengan perkuatan akan diuji di laboratorium. *Setup* kedua benda uji ditunjukkan oleh **Gambar 2**. Dua kolom pendek pada **Gambar 2** mempunyai tumpuan jepit di bagian ujung bawah dan ujung atas kolom menyangga rol. Balok kaku diletakkan di atas rol. Pada bagian samping balok dihubungkan dengan dongkrak hidrolik untuk memberikan beban geser siklis. Pelat dudukan atas benda uji dihubungkan ke sayap bagian bawah balok dengan sambungan baut.



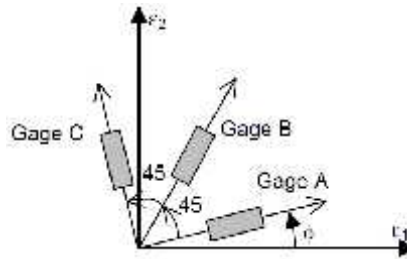
Gambar 2. *Setup* benda uji pendisipasi energi pipa tegak: (a) Pipa tanpa perkuatan; (b) Pipa dengan perkuatan

Lima *strain gauge* tunggal dan empat *strain gauge* roset segi empat dipakai sebagai sensor pada permukaan benda uji untuk mengukur nilai regangan pada tempat-tempat yang diduga mengalami kelelelahan atau pada tempat-tempat yang akan dipantau riwayat nilai regangannya selama benda uji mengalami beban geser siklis. Lokasi *strain gauge* pada kedua benda uji ditunjukkan oleh **Gambar 3**. *Strain gauge* tunggal dipakai untuk mengukur regangan pada arah yang dikehendaki sedang *strain gauge* roset tiga elemen dipakai untuk menentukan medan tegangan dan arahnya pada titik tertentu. Pada masing-masing benda uji dipasang empat *strain gauge* tunggal dan empat *strain gauge* roset segi empat.



Gambar 3. Lokasi *strain gauge* pada benda uji: (a) Pipa tanpa perkuatan; (b) Pipa dengan perkuatan

Huruf SG yang diikuti tiga simbol (misalnya SG A,B,C) adalah roset segi empat. **Gambar 4** menunjukkan roset segi empat dengan orientasi  $\Phi$ . Dari uji eksperimental akan diperoleh nilai pembacaan dari tiga regangan pada *gage* A, B dan C yang dapat dipakai untuk menghitung regangan utama dan orientasinya.



Gambar 4. Orientasi roset segi empat

Tujuh *linear variable differential transducer* (LVDT) dipakai untuk mengukur adanya pergerakan (perpanjangan atau pempendekan) pada arah horisontal dan vertikal (sebagian LVDT tampak pada **Gambar 2**).

### 3. PROSEDUR UJI EKSPERIMENTAL

Beban geser siklis yang dikerjakan ke benda uji dinyatakan dengan perpindahan leleh ( $y$ ) dan terdiri dari:

- (1) Tiga *set* dari enam siklus. Amplitudo tiap siklus konstan pada masing-masing *set* namun meningkat pada siklus-siklus berikutnya dengan urutan  $0.375 y$ ,  $0.50 y$ , dan  $0.75 y$ .
- (2) Satu *set* dari empat siklus dengan amplitudo konstan  $1.0 y$ .
- (3) Lima *set* dari dua siklus. Amplitudo tiap siklus konstan pada masing-masing *set* namun berubah pada siklus-siklus berurutan mengikuti sekuen  $0.375 y$ ,  $1.50 y$ ,  $0.375 y$ ,  $2.0 y$ , and  $0.375 y$ .
- (4) Selanjutnya amplitudo masing-masing siklus berurutan dinaikkan dengan  $1.0 y$  sampai kegagalan terjadi.

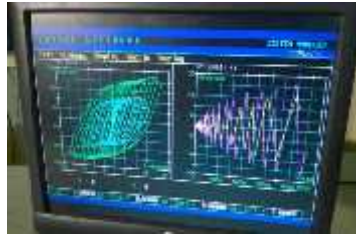
Beban geser siklis yang dikerjakan ditunjukkan oleh **Gambar 5**.



Gambar 5. Beban geser siklis

Dari hasil uji eksperimental benda uji pendisipasi energi pipa tegak diperoleh:

1. Kurva histeretik hubungan gaya dan perpindahan dari kedua benda uji (**Gambar 6**): Kurva histeretik ditunjukkan oleh gambar sebelah kiri. Kurva histeretik bagian dalam milik pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan sedang kurva histeretik bagian luar milik pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan. Fraktur terjadi pada daerah sambungan las pada ujung-ujung pipa seperti ditunjukkan oleh **Gambar 7**.



Gambar 6. Kurva histeretik hasil uji eksperimental



Gambar 7. Fraktur pada kedua benda uji

2. Hasil pembacaan *data logger* untuk regangan tiap *strain gauge* dari kedua benda uji.
3. Hasil pembacaan *data logger* untuk beban dan perpindahan tiap LVDT dari kedua benda uji.

Dari nilai regangan untuk *strain gauge* tunggal dapat diketahui apakah material pada tempat *strain gauge* tersebut mengalami kelelahan selama beban siklis bekerja. Juga dapat dihitung tegangan yang terjadi dengan hukum Hooke ( $\sigma = \epsilon.E$ ) selama baja pada lokasi yang dihitung tegangannya masih elastis. Roset segi empat dipakai untuk mengukur medan tegangan pada titik tertentu. Dari hasil pembacaan simultan dari regangan  $\epsilon_A$ ,  $\epsilon_B$ , dan  $\epsilon_C$  (**Gambar 4**) dapat dihitung regangan utama dan arah orientasinya terhadap roset dengan persamaan-persamaan:

$$\epsilon_{1,2} = \frac{\epsilon_A + \epsilon_C}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_B)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (1)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\epsilon_A - 2\epsilon_B + \epsilon_C}{\epsilon_A - \epsilon_C} \right) \quad (2)$$

Setelah nilai regangan utama diperoleh maka tegangan utama dapat dihitung dengan persamaan-persamaan:

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_1 + \nu\epsilon_2) \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_2 + \nu\epsilon_1) \quad (4)$$

Selanjutnya tegangan ekivalen von Mises ( $\sigma_{vm}$ ) dapat dihitung melalui persamaan:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)^2} \quad (5)$$

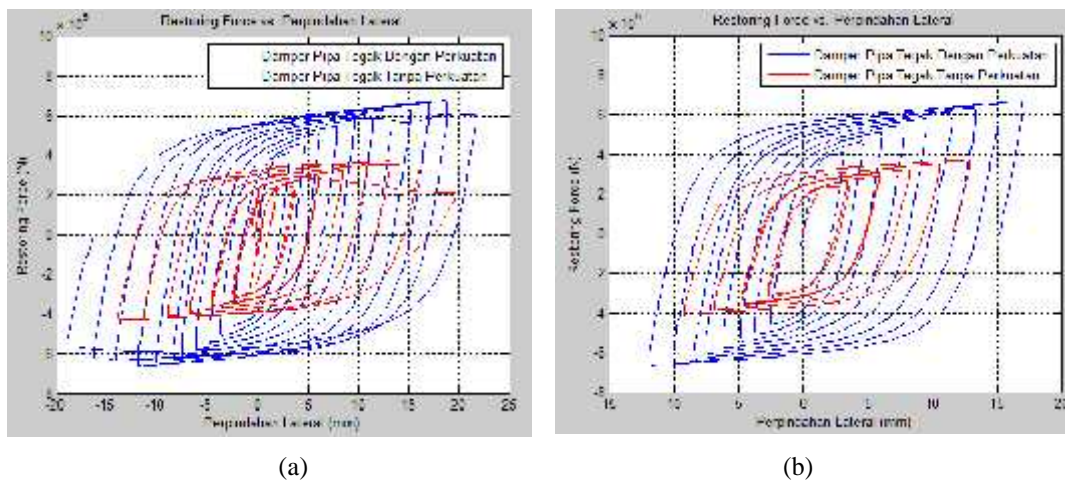
$\sigma_{vm}$  berlaku selama material masih elastis.  $\sigma_{vm}$  dipakai untuk memantau apakah telah terjadi kelelahan pada material.

Hasil pembacaan *data logger* untuk regangan disimpan dalam *file* Microsoft Excel. *Data post processing* dilakukan dengan membuat program Matlab sederhana menggunakan persamaan 1 sampai 5. *Vectorized functions sqrt()* dan *tan()* memungkinkan seluruh hasil pembacaan *data logger* diproses sekali *running*. Hasil *post processing* menunjukkan kedua benda uji mengalami kelelahan merata (*extensive plasticity*) yang mengkonfirmasi hasil simulasi numerik sebelum uji eksperimental benda uji dilakukan. Hasil pembacaan *data logger* untuk LVDT juga disimpan dalam *file* Microsoft Excel. Dari pembacaan LVDT ini kurva histeretik untuk kedua benda uji (**Gambar 6**) dapat direkonstruksi dan dipakai untuk mencari nilai parameter-parameter penentu kinerja seismik pendisipasi energi pipa tegak.

Perlu kiranya disampaikan adanya *geometric nonlinearity* pada *setup* benda uji. Kolom pendek yang menyangga balok kaku tingginya tetap sehingga saat balok bergeser akibat beban siklis benda uji tidak hanya mengalami pergeseran lateral namun juga mengalami gaya aksial akibat balok tidak bisa ikut turun/naik saat menggeser benda uji. Timbulnya gaya aksial yang tidak diharapkan ini yang menyebabkan terjadinya *geometric nonlinearity* sehingga *setup* benda uji ini hanya akurat dipakai untuk uji eksperimental benda uji dengan perpindahan lateral kecil.

#### 4. PARAMETER PENENTU KINERJA SEISMIK PENDISIPASI ENERGI

Parameter-parameter penentu kinerja seismik pendisipasi energi pipa tegak adalah: kekakuan, kekuatan, perpindahan serta kapasitas dan stabilitas disipasi energi dari pendisipasi energi. Untuk menentukan nilai dari parameter-parameter penentu seismik ini perlu direkonstruksi terlebih dahulu kurva histeretik (*Q-δ curve*) kedua benda uji dari pembacaan LVDT hasil dari uji eksperimental benda uji. **Gambar 8a** menunjukkan kurva histeretik hasil uji eksperimental untuk kedua benda uji. **Gambar 8b** menunjukkan bagian kurva histeretik (*Q-δ curve*) yang stabil dari kedua benda uji yang akan dipakai untuk mencari nilai parameter-parameter penentu kinerja seismik benda uji.

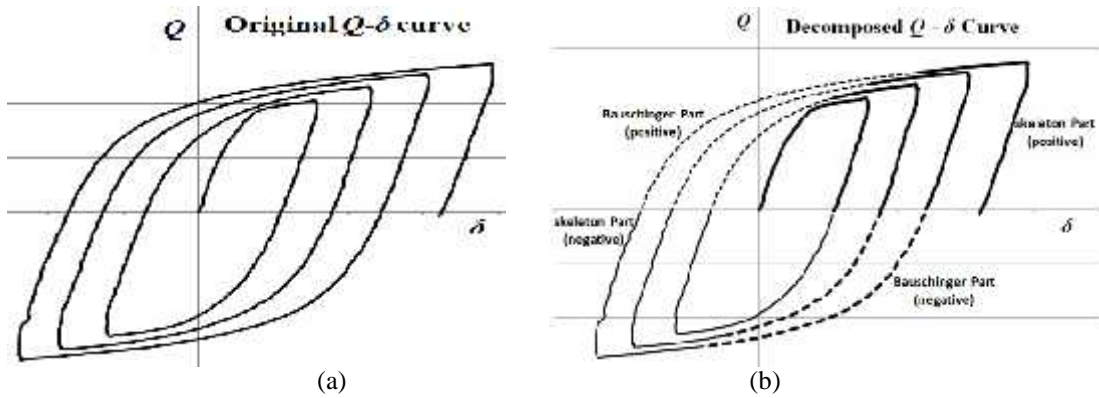


Gambar 8. Kurva histeretik kedua benda uji: (a) Hasil uji eksperimental; (b) Bagian kurva histeretik yang stabil

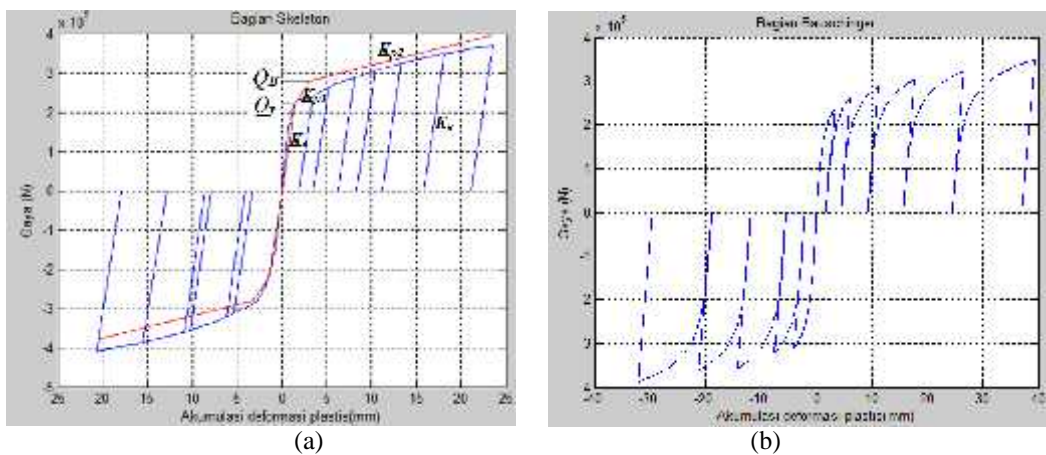
Dengan memakai *energy-based damage model* yang diusulkan oleh Benavent-Climent (2007), *Q-δ curve* pada **Gambar 8b** dari kedua benda uji dipecah menjadi bagian skeleton dan bagian Bauschinger pada *domain* positif dan *domain* negatif. Untuk mempercepat proses, dekomposisi dikerjakan melalui program yang dibuat dengan Matlab. Contoh dekomposisi dari *Q-δ curve* ditunjukkan oleh **Gambar 9**. Untuk kedua benda uji, alur kurva yang melebihi level beban yang dicapai oleh siklus sebelumnya disambungkan berurutan dan menghasilkan kurva bagian skeleton dan kurva bagian Bauschinger seperti ditunjukkan oleh **Gambar 10** dan **Gambar 11**. Bagian skeleton dari kedua benda uji didekati dengan tiga garis. Garis pertama mulai dari titik awal adalah kekakuan elastik  $K_e$ . Garis kedua mulai dari akhir garis pertama adalah kekakuan plastis pertama  $K_{p1}$ . Garis ketiga adalah kekakuan plastis kedua  $K_{p2}$ . Parameter pada **Gambar 10** dan **Gambar 11** dapat dinyatakan nondimensional sebagai berikut: kekakuan plastis

pertama menjadi  $k_{p1}=K_{p1}/K_e$  dan kekakuan plastis kedua menjadi  $k_{p2}=K_{p2}/K_e$ . Dari kurva histeretik hasil uji eksperimental diperoleh nilai parameter-parameter sebagai berikut:

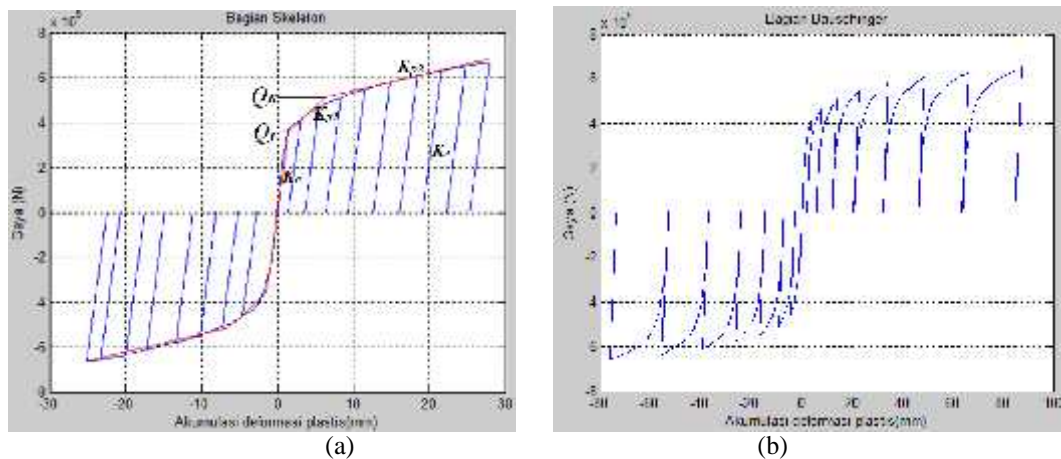
1. Pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan:  $Q_y = 219809$  N,  $y = 1.45$  mm,  $K_e = 151590$  N/mm,  $Q_B = 280000$  N,  $k_{p1} = 0.2341$  and  $k_{p2} = 0.0377$ .
2. Pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan:  $Q_y = 360000$  N,  $y = 1.41$  mm,  $K_e = 255320$  N/mm,  $Q_B = 510000$  N,  $k_{p1} = 0.1214$  and  $k_{p2} = 0.0313$ .



Gambar 9. Contoh dekomposisi  $Q-\delta$  curve: (a) Kurva histeretik asal; (b) Kurva histeretik terdekomposisi



Gambar 10. Dekomposisi  $Q-\delta$  curve pendisipasi energi pipa tanpa perkuatan: (a) Bagian skeleton; (b) Bagian Bauschinger



Gambar 11. Dekomposisi  $Q-\delta$  curve pendisipasi energi pipa dengan perkuatan: (a) Bagian skeleton; (b) Bagian Bauschinger

Total energi yang didisipasi oleh benda uji pendisipasi energi pipa tegak dihitung sebagai berikut: Masing-masing segmen pada bagian skeleton dan bagian Bauschinger membentuk poligon tertutup sehingga luas tiap segmen dapat dihitung dengan fungsi *polyarea()* dari Matlab. Luas tiap segmen ini mewakili bagian energi yang didisipasi oleh pendisipasi energi pipa tegak. Bila luas tiap segmen pada bagian skeleton dan pada bagian Bauschinger dijumlah maka diperoleh total energi yang didisipasi akibat beban siklis yang bekerja. Total energi yang didisipasi oleh pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan pada *domain* positif dan *domain* negatif ditunjukkan oleh **Tabel 2**, sedang untuk pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan ditunjukkan oleh **Tabel 3**.

Akumulasi deformasi plastis pada pendisipasi energi pipa tegak dihitung sebagai berikut: Panjang alas masing-masing segmen pada sumbu horisontal dijumlahkan. Pada bagian skeleton dan bagian Bauschinger penjumlahan dilakukan pada *domain* positif dan *domain* negatif untuk memperoleh akumulasi deformasi plastis akibat beban siklis pada kedua *domain* tersebut. Akumulasi deformasi plastis pada pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan pada *domain* positif dan *domain* negatif ditunjukkan oleh **Tabel 2**, sedang untuk pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan ditunjukkan oleh **Tabel 3**.

Tabel 2. Pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan

Energi yang didisipasi dan akumulasi deformasi plastis	Bagian skeleton	Bagian Bauschinger
Energi regangan yang didisipasi - domain positif	6.6279e+06 N.mm	9.9910e+06 N.mm
Energi regangan yang didisipasi - domain negatif	-6.3945e+06 N.mm	-9.4754e+06 N.mm
Akumulasi deformasi plastis - domain positif	21.1268 mm	37.0505 mm
Akumulasi deformasi plastis - domain negatif	-17.9603 mm	-29.5396 mm

Tabel 3. Pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan

Energi yang didisipasi dan akumulasi deformasi plastis	Bagian skeleton	Bagian Bauschinger
Energi regangan yang didisipasi - domain positif	1.4413e+07 N.mm	4.2814e+07 N.mm
Energi regangan yang didisipasi - domain negatif	-1.3565e+07 N.mm	-3.8582e+07 N.mm
Akumulasi deformasi plastis - domain positif	25.4357 mm	84.8870 mm
Akumulasi deformasi plastis - domain negatif	-22.5253 mm	-73.8365 mm

Normalisasi dilakukan terhadap:

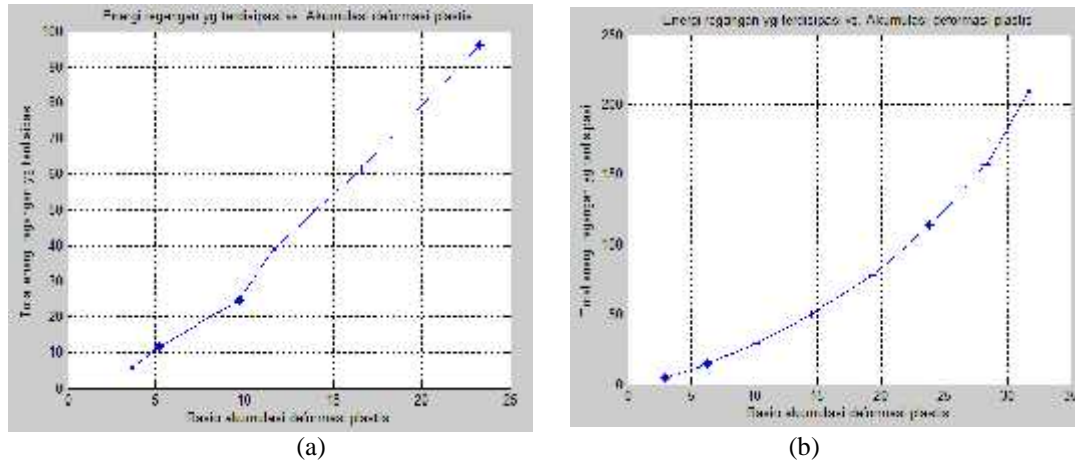
1. Akumulasi disipasi energi regangan masing-masing segmen pada bagian skeleton dan bagian Bauschinger untuk *domain* positif dan negatif, yaitu dengan membagi akumulasi energi regangan dengan  $Q_y^* y$ .
2. Akumulasi deformasi plastis masing-masing segmen pada bagian skeleton untuk *domain* positif dan negatif, yaitu dengan membagi akumulasi deformasi plastis pada bagian skeleton dengan  $y$ .

Penjumlahan dilakukan terhadap:

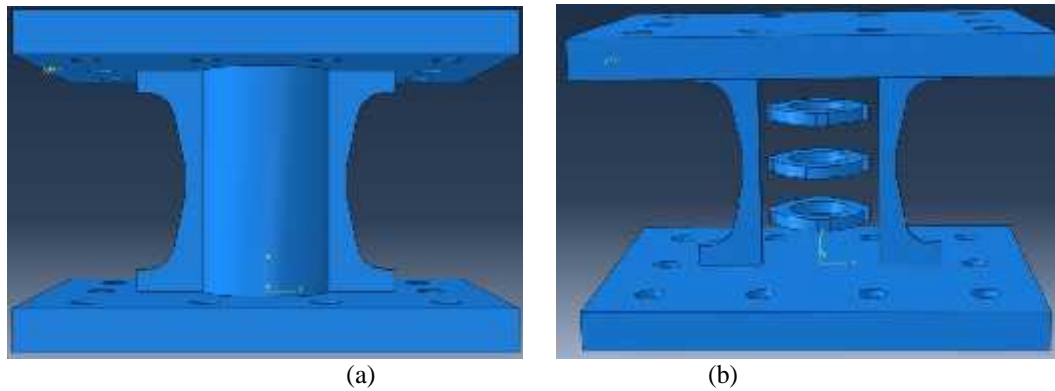
1. Nilai absolut dari akumulasi disipasi energi regangan yang telah dinormalisasi untuk bagian skeleton dan bagian Bauschinger pada masing-masing *domain*.
2. Nilai absolut dari akumulasi deformasi plastis yang telah dinormalisasi untuk bagian skeleton pada masing-masing *domain*.

Plot dari kedua nilai absolut ini menunjukkan riwayat akumulasi disipasi energi regangan terhadap akumulasi deformasi plastis dari kedua benda uji (**Gambar 12**).

Dari **Gambar 12** tampak bahwa pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan mampu mendisipasi energi jauh lebih besar dibanding dengan pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan. Kegagalan kedua benda uji pada sambungan las, yang merupakan *heat affected zone*, menunjukkan potensi deformasi plastis dalam material baja yang tidak dapat termanfaatkan sepenuhnya. Perbaikan detil dapat dilakukan pada pengaku samping luar untuk menghindari fraktur pada daerah sambungan las. Pendisipasi energi pipa baja dengan pengaku samping luar yang telah diperbaiki ditunjukkan oleh **Gambar 13**.



Gambar 12. Plot energi regangan yang terdisipasi vs. akumulasi deformasi plastis: (a) Pendisipasi energi pipa tegak tanpa perkuatan; (b) Pendisipasi energi pipa tegak dengan perkuatan



Gambar 13. Pendisipasi energi pipa tegak setelah dilakukan perbaikan pengaku pada samping luar pipa: (a) Pandangan depan; (b) Perkuatan ring dalam dan perkuatan pelat samping luar pipa (pipa tidak ditampilkan)

## 5. KESIMPULAN

Dari studi eksperimental perilaku siklis benda uji pendisipasi energi pipa baja tegak, tanpa dan dengan perkuatan, dapat diketahui nilai-nilai parameter penentu kinerja seismik dari kedua benda uji tersebut. Kegagalan kedua benda uji pada daerah sambungan las, yang merupakan *heat affected zone* dengan nilai *fracture toughness* rendah dan bervariasi, memberi indikasi telah terjadi kegagalan prematur karena potensi deformasi plastis dalam material baja tidak dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Perbaikan detil pada pengaku samping luar pipa dapat dilakukan untuk menghindari fraktur pada daerah sambungan las agar potensi deformasi plastis baja, yang berkorelasi dengan kinerja seismik pendisipasi energi pipa tegak, dimanfaatkan sepenuhnya.

## ACKNOWLEDGMENT

Penelitian ini memperoleh sponsor dana Program Riset Desentralisasi DIKTI tahun 2015 (FTSL PN-1-09-2015).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abebe, D. Y., Kim, J. W., & Choi, J. H. (2013). Hysteresis Characteristics of Circular Pipe Steel Damper Using LYP225. *Steel Innovations Conference 2013*, Christchurch, New Zealand, no. February, pp. 3–10, 2013.
- Benavent-Climent, A. (2007). An energy-based damage model for seismic response of steel structures. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, (January), 1049–1064. doi:10.1002/eqe