

## PROTEKSI SEISMIK DENGAN *METALLIC DAMPER* UNTUK BANGUNAN TINGKAT RENDAH SAMPAI SEDANG (137S)

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

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

<sup>2</sup>Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung. Email: adangsur@ganesha.itb.ac.id

<sup>3</sup>Dosen, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan – Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10, Bandung. Email: mmoestopo@gmail.com

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

### ABSTRAK

Pada sistem elastoplastis, perioda getar natural  $T_n$  struktur berhubungan dengan *ductility demand*  $\mu_d$ . Untuk bangunan tingkat rendah,  $T_n$  berada di daerah *acceleration-sensitive* dari spektra sehingga *ductility demand* terhadap struktur menjadi sangat besar, bahkan bila struktur dirancang dengan kuat leleh yang sedikit di bawah kekuatan yang dibutuhkan agar struktur tetap elastis. Jadi bangunan tingkat rendah seharusnya dirancang agar tetap elastis untuk menghindari deformasi inelastis dan *ductility demand* yang berlebihan. Namun bila sejumlah *dampers* ditempatkan pada tempat-tempat strategis dalam struktur, *dampers* akan mengkonsumsi sebagian besar total input energi sehingga *dampers* memberi proteksi seismik terhadap bangunan. Peran *dampers* adalah sebagai alat kontrol terhadap vibrasi berlebihan yang dialami struktur saat merespon beban dinamis gempa. Jika *metallic damper* efektif mendisipasi energi melalui kelelahan metal, level kinerja struktur dapat meningkat, misalnya dari *life safety* meningkat ke *immediate occupancy/operational* dimana hampir semua elemen struktur tetap elastis. Dalam tulisan ini beberapa sistem struktur baja tingkat rendah (MRF, MRF dengan *metallic damper*, EBF dan BRBF) akan analisis dengan analisis dinamik nonlinier (*time-history*) menggunakan gempa artifisial. *Fragility analysis* dilakukan dengan meningkatkan PGA dari 0.2g sampai dengan 1.0g untuk melihat level kinerja masing-masing struktur. Sebelum analisis dinamik nonlinier dikerjakan, pradesain terhadap masing-masing struktur dilakukan memakai prinsip perencanaan kapasitas dengan nilai respon struktur R tertinggi. Hasil *Fragility analysis* akan menunjukkan level kinerja masing-masing struktur (IO, LS, CP atau *beyond collapse*). Kinerja tiap struktur akan dibandingkan dengan struktur yang diberi pendisipasi energi berupa *metallic damper*. Untuk sistem struktur baja tingkat sedang, efektifitas *metallic damper* telah dibahas oleh penulis lain.

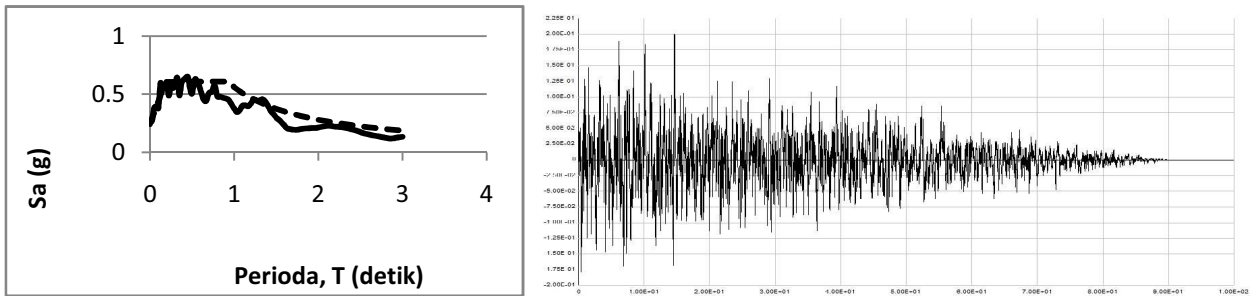
Kata kunci: Analisis dinamik nonlinier, *fragility analysis*, *metallic-damper*, proteksi seismik, struktur baja

## 1. PENDAHULUAN

Prosedur analisis dinamik nonlinier (*time-history*) adalah prosedur analisis terbaik saat ini untuk melakukan evaluasi perilaku struktur dengan *passive energy dissipation devices* (Symans et al. 2008). Dalam analisis dinamik nonlinier, *seismic performance level* untuk intensitas gempa yg telah didefinisikan (10% PE dalam 50 tahun dan 2% PE dalam 50 tahun) diperiksa terhadap *demand parameters* dan *acceptance criteria* yg telah ditetapkan. Perform-3D V5.0 dipakai untuk melakukan analisis dinamik nonlinier. Analisis dilakukan dengan *step-by-step integration* memakai Newmark  $\beta = 1/4$  method dengan memakai *integration time step* tertentu. Perform-3D mempunyai sejumlah asumsi, prosedur, kiat agar analisis dinamik nonlinier dapat disederhanakan dengan hasil cukup akurat. Saat ini Perform-3D V5.0 (2011) telah mengimplementasikan ASCE-41, FEMA 356 dan FEMA 440 sehingga membuat analisis nonlinier struktur menjadi menarik untuk dilakukan.

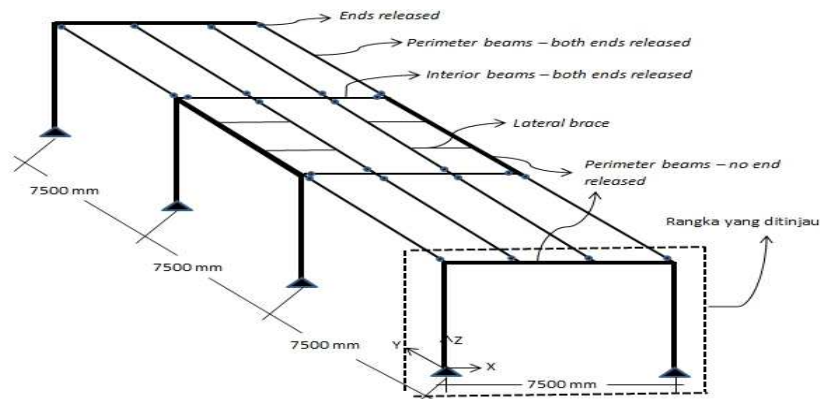
## 2. BANGUNAN TINGKAT RENDAH SAMPAI SEDANG

Struktur yang akan dianalisis diandaikan merupakan bangunan perkantoran satu lantai yang lokasinya berada di Jakarta, berdiri di atas tanah lunak. Respon spektra untuk analisis dapat dibentuk sesuai prosedur yang ada di RSNi 1726-201x. Respon spektra ini selanjutnya dijadikan target spektra dari SIMQKE (*artificial motion generation program*, Vanmarke et al (1976), hasil dari *running* SIMQKE ditunjukkan oleh **Gambar 1**.



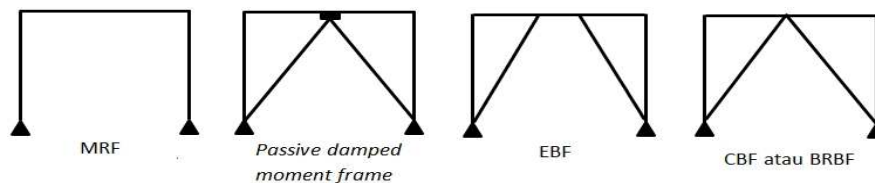
Gambar 1. *Generated Spectra* dari gempa artifisial Jakarta PGA = 0.2g

Dari **Gambar 1** tampak bahwa input energi besar ada pada rentang waktu getar natural  $T_n$  antara 0.1 sampai 1.3 detik, dengan respon lebih keras antara 0.2 sampai 0.6 detik. Bangunan tingkat rendah sampai sedang berada sekitar rentang waktu ini. Untuk bangunan tingkat rendah,  $T_n$  berada di daerah *acceleration-sensitive* dari spektra sehingga *ductility demand* terhadap struktur menjadi sangat besar, bahkan bila struktur dirancang dengan kuat leleh yang sedikit di bawah kekuatan yang dibutuhkan agar struktur tetap elastis. Analisis dinamik nonlinier sangat membantu untuk melihat perilaku struktur dengan  $T_n$  berada di daerah *acceleration-sensitive* dari spektra. *Maximum Considered Earthquake* (MCE) mewakili gempa dengan intensitas maksimum (2% PE dalam 50 tahun) yang mungkin terjadi. Deteriorasi cepat terhadap kapasitas komponen yang dirancang untuk menahan deformasi inelastis harus dihindari, kecuali bila deteriorasi cepat terjadi pada intensitas gempa pada level MCE atau lebih besar. Verifikasi melalui analisis dinamik nonlinier dapat dilakukan untuk memastikan bahwa tuntutan yang terjadi dalam model tidak melebihi batas deteriorasi komponen. **Gambar 2** menunjukkan model struktur yang akan dianalisis:



Gambar 2. Model struktur yang dianalisis

Empat konfigurasi rangka yang dianalisis ditunjukkan oleh **Gambar 3**:



Gambar 3. Konfigurasi Struktur

Perencanaan awal dengan prinsip desain kapasitas dilakukan untuk MRF, CBF, EBF dan BRBF sebelum analisis dinamik nonlinier dilakukan untuk menentukan kuat perlu dan dimensi elemen pada masing-masing rangka sesuai RSNI-1726-201x (10% PE dalam 50 tahun) menggunakan nilai R tertinggi. Tujuan perencanaan kapasitas adalah untuk mencegah terjadi tekuk pada balok dan kolom, bukan untuk mencegah leleh terbatas pada elemen-elemen rangka saat menahan beban gempa yang intensitasnya dibuat semakin besar.

### 3. FRAGILITY ANALYSIS

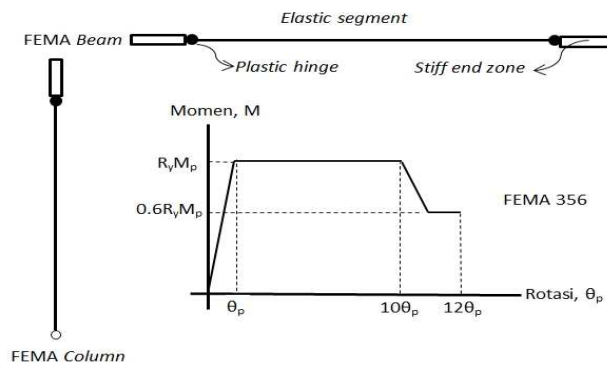
*Fragility analysis* dilakukan memakai gempa artifisial Jakarta dengan meningkatkan amplitudo percepatan. *Fragility analysis* berkaitan dengan proteksi seismik karena dapat memberi informasi tentang potensi kerapuhan struktur. PGA=0.2g (10% PE dalam 50 tahun), PGA=0.4g (2% PE dalam 50 tahun), PGA=0.6g, PGA=0.8g dan PGA=1.0g

dipakai untuk *nonlinear time-history dynamic analysis* dengan Perform-3D V5.0. Hanya dua kombinasi beban yang ditinjau yaitu 1.2D dan 1.6L dan 1.32D+0.5L+1.3Q<sub>E</sub>. Semua rekaman gempa yang dipakai untuk analisis dikali dengan faktor  $\rho = 1.3$  sesuai ketentuan RSNI-1726-201x.

Level kinerja struktur ditentukan melalui kombinasi level kinerja komponen struktural dan nonstruktural. Hanya level kinerja komponen struktural yang ditinjau dalam tulisan ini. Ada tiga level kinerja yang dipakai yaitu: (1). *Immediate Occupancy* (IO): struktur hanya mengalami kerusakan kecil, tidak ada *drift* permanen dan tidak ada penurunan substansial dari kekuatan dan kekakuan. (2). *Life Safety* (LS): struktur mengalami kerusakan moderat, ada *drift* permanen namun elemen-elemen penahan beban gravitasi masih berfungsi. (3). *Collapse Prevention* (CP): terjadi kerusakan cukup parah, ada *drift* permanen yang besar, elemen-elemen penahan beban gravitasi masih berfungsi namun struktur mendekati runtuh. Level kinerja MRF, *passive-damped moment frame*, EBF dan BRBF akan dikaji melalui *fragility analysis*. Level kinerja menunjukkan proteksi seismik struktur yang bersangkutan.

**3.1. Moment Resisting Frame (MRF)**

Pendisipasi energi pada MRF adalah rotasi sendi plastis pada ujung-ujung balok. Dari pradesain diperoleh dimensi balok W12x26 dan kolom W14x48. Seperti ditunjukkan oleh hasil analisis pada **Tabel 1** berikut bahwa struktur ini terlalu fleksibel ( $\Delta_u$  sangat besar karena dasar kolom berupa sendi) yang akan berkorelasi dengan kerusakan signifikan pada elemen-elemen nonstruktural. Untuk Perform-3D, *strength envelope* balok dan kolom untuk MRF ditunjukkan oleh **Gambar 4** berikut:



**Gambar 4.** Model komponen dan *strength envelope*

*Drift* (FEMA 356): 0.7% (IO), 2.5% (LS) dan 5% (CP)  
*Acceptance criteria* (FEMA 356): IO =  $2\theta_y$ , LS =  $7\theta_y$  dan CP =  $9\theta_y$

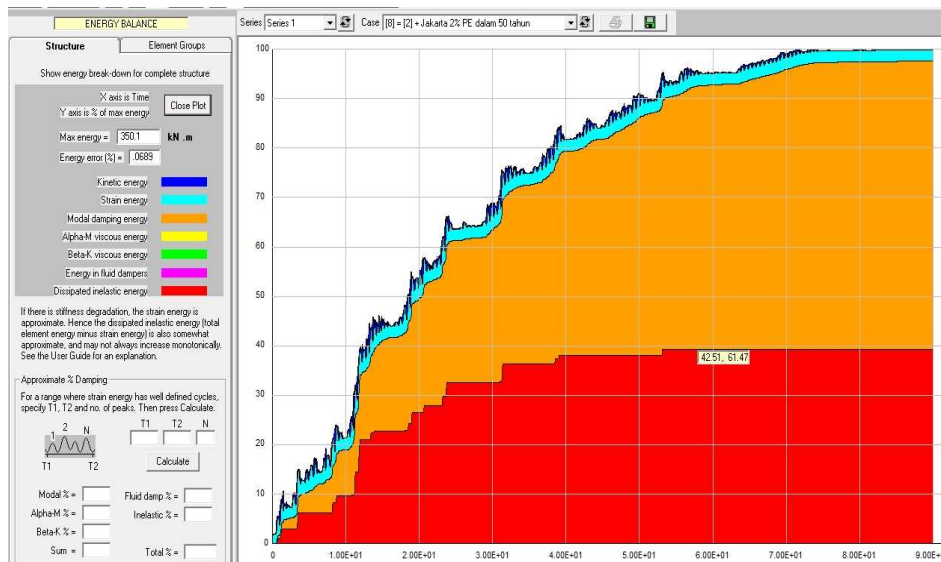
**Table 1:** Hasil analisis MRF.  $T_n = 1.017$  detik, *base shear* = 239.8 kN dan  $\Delta_y = 70.84$  mm

Peak Ground Acceleration (PGA)	Perpindahan relatif vs Waktu	Perpindahan relatif maks. $\Delta_u$ (mm)	Residu perpindahan (mm)	$\mu_{\Delta} = \Delta_u / \Delta_y$
PGA 0.2g		100.1	13.7	1.41
PGA 0.4g		204.4	74.58	2.88
PGA 0.6g		334.4	142.3	4.72
PGA 0.75g (putus)		679.7	-	-

Demand parameters/ Acceptance criteria/ Performance level/ Energy dissipation	PGA 0.2g	PGA 0.4g	PGA 0.6g	PGA 0.75g (putus)
All strength	Ok	Ok	Ok	-
Drift arah X	Tepat 2.5%, LS/CP	Sedikit keluar CP	Diluar CP	-

Deformasi	Rotasi sendi plastis balok <math>< 2\theta_y </math>. (IO)	Rotasi sendi plastis balok antara <math>2\theta_y</math> dan <math>7\theta_y</math>. (LS)	Rotasi sendi plastis balok antara <math>2\theta_y</math> dan <math>7\theta_y</math>. (LS)	-
Energi input maks. (kN.m)	85.1	350.1	789.5	662.7
Inelastic dissipated energy	6.48	137.6	468.2	490.6
Kinerja struktur	LS	CP	Beyond collapse	Collapse

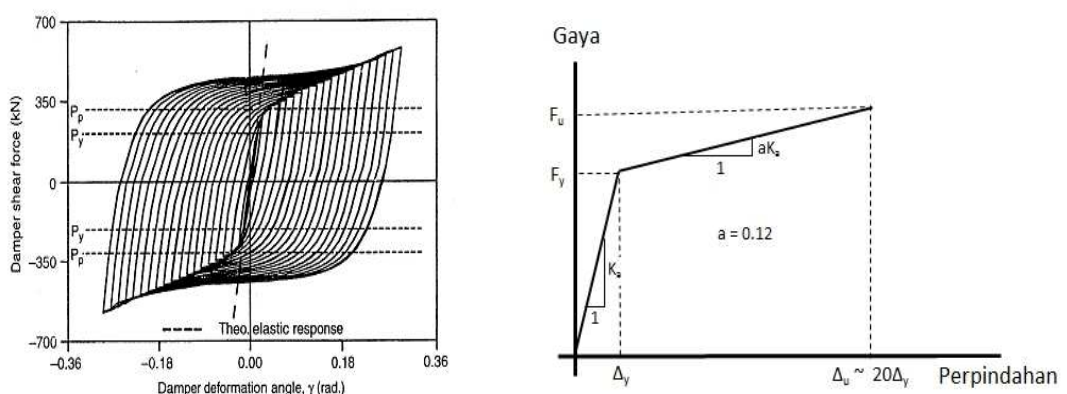
Perform-3D memberi informasi *energy balance* struktur seperti ditunjukkan oleh **Gambar 5** berikut. Daerah bagian bawah kanan menunjukkan besarnya energi yang didisipasi inelastik melalui rotasi sendi plastis balok.



**Gambar 5.** Energy balance struktur

### 3.2. Passive-Damped Moment Frame

*Damper* ditempatkan pada ujung *Chevron brace* dengan bresing HSS 5x5x5/16 sehingga terbentuk struktur hibrid (**Gambar 3**). *Damper*, yang berfungsi sebagai energi dissipater, efektif untuk mengurangi perpindahan relatif ( $\Delta_u$ ) pada MRF. Dalam tulisan ini dipilih TADAS *damper* yang perilaku nonliniernya (**Gambar 6**) dapat disimulasi dengan kurva *backbone* bilinear (Bayat dan Abdollahzade, 2011). Data TADAS *damper* sebagai berikut:  $h=12.7$  cm (tinggi),  $b=6.35$  cm (lebar atas dan bawah),  $B=1.27$  cm (lebar tengah),  $t=0.64$ cm (tebal),  $\Delta_y=0.2794$  cm,  $F_y=306$ kg,  $K_a=1094$  kg/cm.



**Gambar 6.** Hubungan gaya geser dan perpindahan TADAS *damper*




Kekakuan struktur ( $K_p$ ) didapat dari kurva *push over*. Jumlah *damper* dirancang agar  $K_p/(K_f+K_a) \geq 0.25$  (Bruneau et al. 2009) dan  $\mu_\Delta$  antara 3 – 5. Sesuai ketentuan ini, jumlah *damper* yg dipakai 15 buah dan  $\mu_\Delta$  didapat dari hasil *nonlinear time-history dynamic analysis*.

Drift : 0.7% (IO), 2.5% (LS) dan 5% (CP)

Acceptance criteria:  $\Delta_u \sim 10 \Delta_y$  (Christopoulos dan Filiatrault, 2006), meskipun *damper* masih tetap stabil saat mengalami rotasi plastik 0.4 rad. yang ekuivalen dengan  $20\Delta_y$ .

Hasil analisis pada **Tabel 2** menunjukkan bahwa perpindahan relatif ( $\Delta_u$ ) jauh berkurang sehingga adanya *damper* memberikan proteksi seismik terhadap struktur dan elemen-elemen nonstruktur meskipun kekakuan struktur meningkat yang diikuti peningkatan *base shear*. Namun saat rangka mengalami perpindahan akibat gempa, rotasi plastik pada *damper* diamplifikasi oleh rotasi dasar kolom. *Plastic rotational demand* yang besar ini akhirnya tidak dapat dipenuhi oleh *damper* saat struktur dilanda gempa dengan PGA=0.45g.

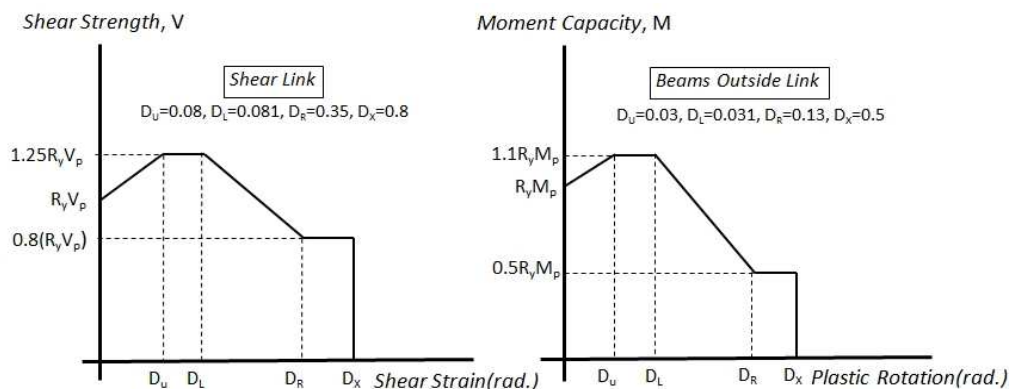
**Tabel 2:** Hasil analisis MRF dengan *damper*.  $T_n=0.2653$  detik, *base shear* = 517.5 kN dan  $\Delta_y = 2.77$  mm

Peak Ground Acceleration (PGA)	Perpindahan relatif vs Waktu	Perpindahan relatif maks. $\Delta_u$ (mm)	Residu perpindahan (mm)	$\mu_\Delta$
PGA 0.2g		10.44	0.75	3.77
PGA 0.4g		28.35	0.9	10.23
PGA 0.45g (putus)		49.82	49.82	17.98

Demand parameters/ Acceptance criteria/ Performance level/ Energy dissipation	PGA 0.2g (10% PE dalam 50 tahun)	PGA 0.4g (2% PE dalam 50 tahun)	PGA 0.45g (putus)
All strength	Ok	Ok	-
Drift arah X	< 0.7%. (IO)	Antara 0.7% dan 2.5%. (LS)	-
Deformasi	Deformasi geser <i>damper</i> antara 0.005 dan 0.022. (LS)	Deformasi geser <i>damper</i> antara 0.022 dan 0.04. (CP)	-
Energi input maks. (kN.m)	37.03	81.11	122.7
Inelastic dissipated energy. (kN.m)	19.6	54.97	80.59
Kinerja struktur	LS	CP	Collapse

### 3.3. Eccentric Braced Frame (EBF)

Pada kedua struktur yang telah dianalisis, disipasi energi melalui mekanisme lentur. EBF dipilih karena *shear-link* mendisipasi energi melalui mekanisme berbeda yaitu geser. Dari pradesain diperoleh dimensi *shear link* dan balok diluar *link* W8x31, bresing HSS 8x8x5/16 dan kolom W14x43. Untuk Perform-3D, *strength envelope* untuk *shear link* dan balok diluar *link* (Furukawa et al. 2008) seperti pada **Gambar 7** berikut:








**Gambar 7.** Strength envelope untuk *shear link* dan balok diluar *link*

Drift (FEMA 356): 0.5% (IO), 1.5% (LS) dan 2% (CP)

Acceptance criteria (FEMA 356): Geser pada *link* IO = 0.005 , LS = 0.11 dan CP = 0.14

**Tabel 3:** Hasil analisis EBF.  $T_n = 0.1526$  detik,  $base\ shear = 1366$  kN dan  $\Delta_y = 10.18$  mm

Peak Ground Acceleration (PGA)	Perpindahan relatif vs Waktu	Perpindahan relatif maks. $\Delta_u$ (mm)		Residu perpindahan (mm)		$\mu_\Delta$
		Arah X	Arah Z	Arah X	Arah Z	
PGA 0.2g		3.356	1.7	-	0.3	-
PGA 0.4g		5.793	2.7	-	0.3	-
PGA 0.6g		9.92	4.9	-	0.2	-
PGA 0.8g		23.14	15.54	13.08	10.4	2.27
PGA 1.0g		42.84	31.55	29	23.4	4.2

Demand parameters/ Acceptance criteria/ Performance level/ Energy dissipation	PGA 0.2g	PGA 0.4g	PGA 0.6g	PGA 0.8g	PGA 1.0g
All strength	Ok	Ok	Kuat geser link $> R_y V_p$ (leleh)	Kuat geser link $> R_y V_p$ (lebih leleh)	Kuat geser link $> R_y V_p$ (makin leleh)
Drift arah X	$< 0.5\%$ . (IO)	$< 0.5\%$ . (IO)	$< 0.5\%$ . (IO)	Antara 0.5% dan 1.5%. (LS)	Antara 0.5% dan 1.5%. (LS)
Deformasi	Deformasi geser link $< 0.005$ . (IO)	Deformasi geser link $< 0.005$ . (IO)	Deformasi geser link $< 0.005$ . (IO)	Deformasi geser link antara 0.005 dan 0.11. (LS)	Deformasi geser link antara 0.005 dan 0.11. (LS)
Energi input maks. (kN.m)	14.53	25.34	88.71	160.5	267
Inelastic dissipated energy	-	-	-	18.51	63.26
Kinerja struktur	IO	IO	IO	LS	LS

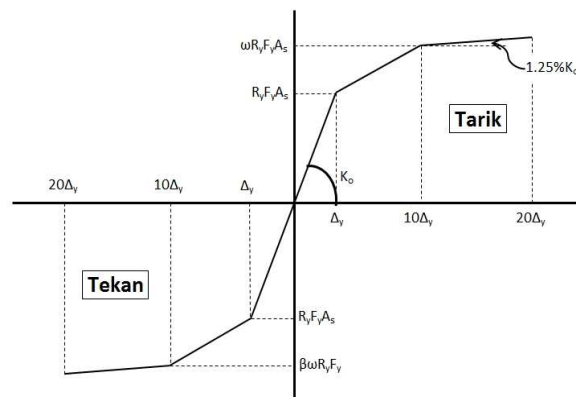
Hasil analisis menunjukkan kinerja EBF sangat bagus, namun EBF kaku sehingga  $base\ shear$  struktur sangat besar yang dapat berpengaruh terhadap biaya struktur bawah.

#### 3.4. Buckling Restrained Braced Frame (BRBF)

Pradesain CBF menghasilkan dimensi balok W24x229, kolom W14x74 dan bresing HSS 5x5x5/16. Ada pinalti dalam AISC 341 untuk CBF dengan Chevron brace yang kalau diikuti akan menghasilkan balok W24x229 yang sangat berat. Dalam CBF tekuk pada bresing tidak terhindarkan dan menyebabkan terjadinya degradasi kekakuan dan kekuatan pada bresing. Kekurangan dari CBF dapat diatasi bila bresing dapat leleh baik saat menahan tarik ataupun desak tanpa mengalami tekuk. Rangka dengan bresing anti tekuk dikenal sebagai BRBF yang akan dianalisis dalam tulisan ini.

Bresing anti tekuk dipilih untuk dianalisis karena sesungguhnya bresing ini bekerja sebagai aksial *damp*. Beda dengan bresing pada CBF yang kekuatannya dirancang dengan memasukkan pengaruh beban gravitasi, bresing pada BRBF dirancang tanpa memasukkan pengaruh beban gravitasi (Bruneau et al. 2011). Keuntungan lain dari BRBF adalah kekuatan dan kekakuan bresing dapat *tuned* sesuai dengan hasil uji spesimen (melalui rangka satu lantai seperti rangka ini) untuk memodelkan perilaku siklik bresing untuk analisis inelastik. *Nonlinear backbone curve of BRB* yang dipakai untuk analisis ditunjukkan oleh **Gambar 8**.

Pada **Gambar 8**:  $\beta = compression\ strength\ adjusted\ factor = 1.2$  dan  $\omega = strain\ hardening\ adjusted\ factor = 1.6$  (Bruneau et al. 2011). Hasil pradesain BRBF: balok W14x34, kolom W14x34 dan BRB dengan luas tampang inti  $A_{sc} = 70.5\ mm^2$  (sangat kecil dan dibawah minimum, tetap dipakai untuk analisis untuk melihat kinerjanya).



**Gambar 8.** Kurva *backbone* BRB

*Acceptance criterium:* deformasi aksial BRB  $\sim 10\Delta_y$  (Dutta dan Hamburger, 2010).

**Tabel 4:** Hasil analisis BRBF.  $T_n = 0.5693$  detik, *base shear* = 341.4 kN dan  $\Delta_y = 4.08$  mm

Peak Ground Acceleration (PGA)	Perpindahan relatif vs Waktu	Perpindahan relatif maks. $\Delta_u$ (mm)	Residu perpindahan (mm)	$\mu_\Delta$
PGA 0.2g		38.71	0.4	9.5
PGA 0.4g		69.45	2.46	17.02
PGA 0.5g		130.6	43.55	32
PGA 0.55g		155.9	69.19	38.21
PGA 0.6g (putus)		116.5	116.5	28.55

<i>Demand parameters/ Acceptance criteria/ Performance level/ Energy dissipation</i>	PGA 0.2g	PGA 0.4g	PGA 0.5g	PGA 0.55g	PGA 0.6g (putus)
<i>All strength</i>	Ok	Ok	Ok	Ok	-
<i>Drift arah X</i>	antara 0.5% dan 2%. (LS)	antara 0.5% dan 2%. (LS)	> 3%. ( <i>beyond collapse</i> )	> 3%. ( <i>beyond collapse</i> )	-
Deformasi	Deformasi aksial BRB antara 0.02 dan 0.08. (LS)	Deformasi aksial BRB antara 0.02 dan 0.08. (LS)	Deformasi aksial BRB antara 0.08 dan 0.14. (CP)	Deformasi aksial BRB antara 0.08 dan 0.14. (CP)	-
Energi input maks. (kN.m)	78.31	162.7	569.8	694.3	424.2
<i>Inelastic dissipated energy</i> (kN.m)	42.25	105.3	395.5	484.6	273.5
Kinerja struktur	LS	LS	<i>Beyond collapse</i>	<i>Beyond collapse</i>	<i>Collapse</i>

Hasil analisis pada **Tabel 4** menunjukkan kinerja BRBF tidak bagus karena perpindahan relatif ( $\mu_\Delta$ ) yang besar. Namun tidak dapat serta merta diambil kesimpulan bahwa semua BRBF pasti menghasilkan perpindahan besar.

Ada kebiasaan di US kalau  $A_{sc} \leq 6 \text{ in}^2$  maka  $A_{sc}$  dibulatkan kelipatan 0.5 in<sup>2</sup> (Bruneau et al. 2011). Bila luas inti BRB diambil  $A_{sc}$  minimum = 0.5 in<sup>2</sup> (332.58 mm<sup>2</sup>) dan struktur dianalisis lagi maka hasilnya adalah:  $T_n = 0.3215$  detik, *base shear* = 743.5 kN,  $\Delta_y = 8.38$  mm.  $\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y = 1.85$  (10% PE dalam 50 tahun),  $\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y = 2.5$  (2% PE dalam 50 tahun),  $\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y = 7.2$  (PGA=0.6g),  $\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y = 12.42$  (PGA=0.8g) dan  $\mu_{\Delta} = \Delta_u/\Delta_y = 18.57$  (PGA=1.0g). Hasil ini menunjukkan struktur BRBF menjadi lebih kaku sehingga perpindahan relatif ( $\mu_{\Delta}$ ) jauh berkurang dan kinerja BRBF menjadi sangat baik. (tidak putus sampai PGA=1.0g)

Melalui *fragility analysis* potensi kerapuhan struktur dapat dievaluasi. Terbuka peluang bagi perencana struktur untuk menentukan kinerja struktur yang diinginkan dengan mengubah parameter-parameter rencana dan mengevaluasi dampak perubahan terhadap kinerja struktur. Perform-3D V5.0 dapat memunculkan informasi yang berguna, misal hasil analisis EBF pada **Tabel 3** menunjukkan bahwa struktur masih dapat bertahan sampai gempa artifisial Jakarta dengan PGA=1.g namun perpindahan vertikal (arah Z pada **Gambar 2**) pada ujung-ujung *shear link* sebesar 31.55 mm akan menyebabkan kerusakan lokal pada lantai yang menyulitkan perbaikan. Bila BRBF mempunyai luas tampang inti ( $A_{sc}$ ) yang cukup, hasil analisis menunjukkan kinerja yang sangat baik. *Nonlinear time-history dynamic analysis* dilakukan tidak hanya dengan satu rekaman gempa seperti tulisan ini sehingga analisis dengan rekaman gempa lain harus dilakukan. Rata-rata dari tujuh rekaman gempa atau maksimum dari tiga rekaman gempa diperlukan untuk analisis dinamik nonlinier struktur dengan *damper* (Symans et al. 2008).

#### 4. KESIMPULAN

Dari **Gambar 1** tampak bahwa *damper* efektif memberi proteksi seismik bangunan tingkat rendah sampai sedang dengan waktu getar natural  $T_n$  yang tidak panjang. Dari *fragility analysis* pada **Tabel 2** dan **Tabel 4** tampak bahwa level kinerja struktur dengan *damper* perlu diperiksa dengan analisis dinamik nonlinier untuk mendapat level kinerja yang diinginkan. Dari jumlah energi yg terdisipasi inelastis *damper* memang efektif mendisipasi energi dari gempa. Keuntungan utama dengan memasang *damper* pada lokasi-lokasi strategis adalah *damper* efektif mengurangi perpindahan relatif ( $\mu_{\Delta}$ ) dan *damper* (dalam tulisan ini: TADAS dan BRB) kalau rusak akibat gempa dapat diganti dengan mudah dan perpindahan residu akan hilang. Analisis struktur dengan *damper* memerlukan analisis dinamis nonlinier (Symans et al. 2008) yang bentuk paling sederhananya ditunjukkan dalam tulisan ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- AISC. 2010a., *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings ANSI/AISC 341-10*, Chicago: American Institute of Steel Construction.
- Bayat, M. and Abdollahzade, G.R. (2011), "Analysis of the Steel Braced Frames Equipped With ADAS Devices Under the Far Field Records", *Latin American Journal of Solids and Structures*(8), 163-181
- Bruneau, M., Uang, C.M. and Sabelli, R. (2011), *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw-Hill Companies, Inc., United States of America
- Chao, S.H. and Goel, S.C. (2005), "Performance Based Seismic Design of EBF Using Target Drift and Yield Mechanism as Performance Criteria", *Research Report UMCEE 05-05*, University of Michigan, Ann Arbor.
- Christopoulos, C. and Filiatrault, A.(2006), *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*, IUSS Press, Parvia-Italy.
- Dutta, A. and Hamburger, R.O. (2010) , *Case Study of a 40 Story BRBF Building Located in Los Angeles*, Simson Gumpertz and Herger on behalf of Pacific Engineering Research Center (PEER).
- FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington DC: Federal Emergency Management Agency, November 2000.
- PEER/ATC 72-1, *Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Building*, Pacific Earthquake Engineering Research Center and Applied Technology Council, California, 2010.
- Powel, G. H. (2011), *User Guide Perform-3D Version 5 – Nonlinear Analysis and Performance Assesment for 3D Structures*, Computer and Structures Inc., California.
- Furukawa, S., Goel, S.C. and Chao, S.H. (2008), *Seismic Evaluation of Eccentrically Braced Steel Frames Design by Performance-Based Plastic Design Method*, The 14<sup>th</sup> Conference World Conference on Earthquake Engineering, Beijing China, October 12-17, 2008
- 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", *Journal of Structural Engineering*, ASCE.