

Studi Pengaruh Kenaikan Kekakuan *Metallic Damper* Terhadap Respon Seismik Struktur Rangka Baja dengan Energi Redaman Tambahan Peredam ADAS (*Added Damping and Stiffness*)

Lukman Murdiansyah

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132,
E-mail: lukman_murdiansyah@yahoo.com

Herlien D. Setio

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa No. 10 Bandung 40132,
E-mail: herlien@si.itb.ac.id

Abstrak

Manfaat alat pendisipasi energi tambahan dikenal baik dalam bidang rekayasa struktur untuk mendisipasi energi akibat gempa. Perilaku seismik struktur rangka baja dengan energi redaman tambahan ADAS dijadikan sebagai konsentrasi utama pada penelitian ini. Tiga model sampel ADAS didisain dan diuji secara eksperimental untuk memperoleh *metallic yielding damper* model baru. Tujuan utama studi ini adalah mengetahui rasio kekakuan optimum ADAS (KD) terhadap kekakuan struktur tiap lantai (KS). Program PERFORM 3D dan dua catatan gempa (*El Centro* dan *San Fernando*) digunakan untuk mengetahui respon seismik struktur. Metode analisis yang digunakan adalah analisis riwayat waktu nonlinear. Rasio energi histeresis struktur terhadap energi input yang dikerjakan gempa ke struktur juga dibahas pada studi ini. Hasilnya, untuk menaikkan kapasitas dan mengurangi kerusakan struktur akibat gempa sebanyak mungkin bisa dilakukan dengan menaikkan kekakuan peredam tambahan ADAS.

Kata-kata Kunci: ADAS, Peredam energi, *Metallic yielding damper*.

The benefit of extra energy absorber is well known in the field structural engineering to dissipate energy caused by earthquakes. Seismic behaviors of steel frame structure with additional damping energy ADAS are the main concentration in this study. Three samples ADAS models were designed and tested eksperimentally to obtain a new model of metallic yielding dampers. The main objective of this study is to determine the optimum stiffness ratio of ADAS (KD) to storey stiffness of stuctures (KS). PERFORM 3D software and two earthquake records (El Centro and San Fernando) were used to determine the seismic responses of structure. The analytical method used is the nonlinear time history analysis. The ratio of hysteretic energy of the structure to earthquake input energy is also discussed in this study. The result, increasing capacity and reducing structural damage caused by the earthquake as much as possible can be conducted by increasing additional ADAS damper stiffness.

Keywords: ADAS, Energy absorber, *Metallic yielding damper*.

1. Pendahuluan

Indonesia adalah negara yang terletak pada pertemuan sejumlah lempeng tektonik besar dan aktif bergerak. Hal ini memposisikan Indonesia ke dalam daerah yang rawan terhadap gempa bumi. Daerah rawan gempa tersebut membentang di sepanjang batas lempeng tektonik Australia dengan Asia, lempeng Asia dengan Pasifik dari timur hingga barat Sumatera sampai selatan Jawa, Nusa Tenggara, serta Banda. Catatan sejarah mengenai bencana gempa bumi yang pernah terjadi dijadikan sebagai catatan penting untuk adanya potensi gempa bumi yang dihasilkan oleh pergerakan lempeng tektonik secara periodik. Untuk mengantisipasi terjadinya gempa di masa yang akan datang, maka sangat penting untuk mengembangkan konsep disain tahan gempa yang komprehensif.

Konsep disain struktur yang komprehensif harus mampu mendisipasi energi yang bekerja pada struktur akibat gempa. Berdasarkan standar disain nasional Indonesia, konsep disain *collapse limit state* diizinkan dimana struktur diperbolehkan untuk berdeformasi secara struktur inelastis dan mengalami kerusakan pada tempat-tempat tertentu ketika gempa kuat terjadi namun tidak terjadi keruntuhan total. Hal ini bertujuan agar distribusi gaya yang terjadi pada struktur membentuk suatu mekanisme keruntuhan dalam rangka mendisipasi energi akibat beban gempa. Dengan mengandalkan disipasi energi melalui keruntuhan daktail pada elemen struktur, terutama balok, maka struktur akan mampu bertahan dari pengaruh gempa kuat dengan mengalami kerusakan hingga level tertentu. Pada satu sisi, konsep disain seperti ini memiliki

keuntungan seperti yang dijelaskan sebelumnya, akan tetapi pada sisi lain, memiliki kekurangan yaitu kerugian berupa kerusakan pada komponen utama struktur yaitu balok dan kolom. Dari masalah ini, maka perlu dilakukan upaya pencegahan terjadinya kerusakan pada komponen utama struktur tersebut dengan mengaplikasikan sistem redaman tambahan pada struktur. Penggunaan sistem redaman tambahan telah banyak dilakukan, beberapa diantaranya adalah Li dan Li, 2006; Chan dan Faris, 2007; Alehashem dan Kayhani, 2008; Oh dan Ryu, 2008; Bayat dan Abdollahzade, 2011.

Pada paper ini dibahas mengenai sistem redaman tambahan berupa peredam ADAS (*added damping and stiffness*). ADAS terbuat dari pelat baja bertegangan leleh rendah. Dalam mendisipasi energi ADAS mengandalkan kelelahan. Pemasangan ADAS pada struktur dapat dilihat pada **Gambar 1**. Kinerja ADAS dianalogikan seperti sekering pada listrik dimana sekering akan mengalami kerusakan ketika arus berlebihan sehingga alat-alat elektronik tidak rusak. Begitupun dengan ADAS, ADAS akan mengalami kerusakan ketika gempa kuat terjadi sehingga sistem disipasi energi yang sebelumnya terjadi pada elemen struktur bisa dipindahkan ke ADAS. Hasilnya adalah tidak terjadi kerusakan pada elemen struktur balok dan kolom serta memungkinkan struktur tetap berperilaku elastik ketika gempa kuat terjadi. Perlu dicatat bahwa ADAS bukanlah elemen struktural tetapi hanya elemen nonstruktural sehingga mudah diganti bila mengalami kerusakan.

2. Persamaan Gerak SDOF dan MDOF

Sebuah sistem struktur berderajat kebebasan tunggal (SDOF) **Gambar 2** dengan massa m , redaman c dan kekakuan k . Persamaan gerak dinamis struktur tersebut adalah:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = -m\ddot{x}_g \quad (1)$$

dengan \ddot{x} , \dot{x} dan x masing-masing adalah percepatan, kecepatan dan perpindahan relatif struktur. Persamaan gerak struktur SDOF dengan peredam ADAS bisa diperoleh dengan memodelkan sistem struktur dengan ADAS pada **Gambar 1** seperti **Gambar 3**. Simbol G pada gambar di atas mewakili operator integrodiferensial sehingga gaya yang bersesuaian dengan peredam ADAS ditulis dengan Gx . Sehingga persamaan gerak sistem SDOF dengan ADAS ditulis sebagai (Soong dan Dargus, 1997):

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + Gx = -(m + \dot{m})\ddot{x}_g \quad (2)$$

dengan \dot{m} adalah massa ADAS. Persamaan tersebut bisa diuraikan menjadi persamaan yang lebih sederhana yaitu dengan menguraikan komponen Gx menjadi:

$$\dot{m}\ddot{x} + \dot{c}\dot{x} + \dot{k}x = Gx \quad (3)$$

dimana \dot{m} , \dot{c} dan \dot{k} adalah massa, redaman dan kekakuan ADAS. **Persamaan (2)** bisa ditulis sebagai

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -M\ddot{x}_g \quad (4)$$

dimana M , C dan K adalah massa, redaman dan kekakuan struktur SDOF dengan peredam ADAS.

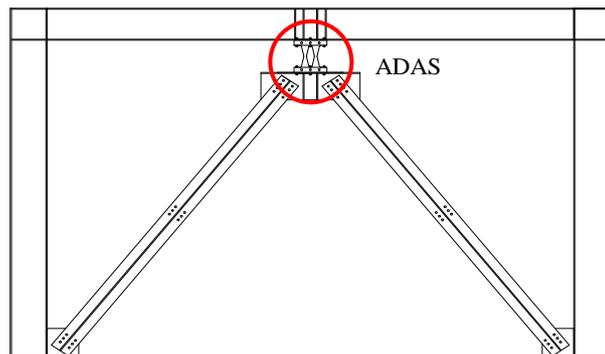
Persamaan gerak sistem struktur berderajat kebebasan banyak MDOF identik dengan sistem struktur SDOF. Persamaan sistem struktur MDOF tanpa peredam ADAS ditulis sebagai

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x = -[m]\ddot{x}_g \quad (5)$$

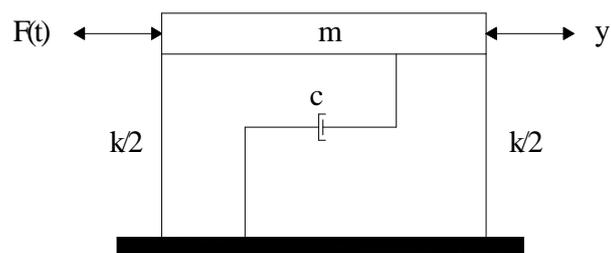
Dengan $[m]$, $[c]$ dan $[k]$ merupakan matriks massa, redaman dan kekakuan struktur. Persamaan gerak sistem struktur MDOF dengan peredam ADAS identik dengan **Persamaan 4** dan ditulis sebagai

$$[m]\ddot{x} + [c]\dot{x} + [k]x + [G]x = -[m + \dot{m}]\ddot{x}_g \quad (6)$$

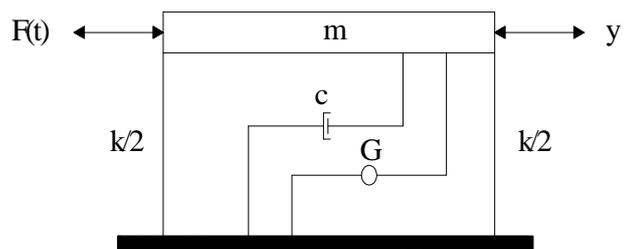
dengan $[m]$, $[c]$ dan $[k]$ adalah matriks massa, redaman dan kekakuan sistem struktur MDOF dan $[G]x$ matrik properti peredam ADAS.



Gambar 1. Sistem struktur SDOF dengan ADAS



Gambar 2. Model struktur SDOF tanpa peredam ADAS



Gambar 3. Model struktur SDOF dengan peredam ADAS

3. Konsep Dasar Energi SDOF dan MDOF

Energi dinamis yang bekerja pada struktur terdiri dari energi kinetik (E_K), energi redaman (E_D) dan energi regangan (E_S). Ketiga energi tersebut merupakan usaha dalam sebagai respon usaha luar akibat beban gempa. Dalam hal ini, energi yang dihasilkan usaha luar dinamakan sebagai energi *input* (E_I). Agar struktur tetap seimbang, jumlah energi kinetik, redaman dan regangan harus sama dengan energi *input*. Energi sistem SDOF diperoleh dengan mengintegrasikan **Persamaan (1)** terhadap perpindahan relatif struktur (Chopra, 2001; Christopoulos dan Filiatrault, 2006). Hasilnya menjadi:

Dimana

$$E_k + E_D + E_S = E_I \quad (7)$$

$$E_k = \int m\dot{x} dx = \frac{m(\dot{x})^2}{2} \quad (8)$$

$$E_D = \int c\dot{x} dx = \int c\dot{x}^2 dt \quad (9)$$

$$E_S = \int kx dx = \frac{kx^2}{2} \quad (10)$$

$$E_I = - \int m\ddot{x}_g dx \quad (11)$$

Pada kondisi nyata, gempa yang terjadi menyebabkan gaya *input* yang bekerja pada struktur sangat besar. Sehingga struktur yang didesain secara tradisional, struktur tanpa peredam luar tambahan, akan berdeformasi inelastis. Pada kondisi seperti ini, energi regangan **Persamaan (10)** akan terdiri dari energi regangan elastis (E_{SE}) dan energi regangan inelastis (E_{SI}). Energi regangan inelastis disebut juga dengan energi histeresis. Sehingga Persamaan energi untuk struktur berdeformasi dapat ditulis sebagai

$$E_k + E_D + E_{SE} + E_{SI} = E_I \quad (12)$$

Keuntungan system energy pada struktur SDOF dengan peredam ADAS diperoleh dengan mengintegrasikan semua suku pada **Persamaan (2)** terhadap perpindahan relatif struktur sehingga persamaan keseimbangan tersebut dapat ditulis menjadi

$$E_k + E_D + E_S + E_{ADAS} = E_I \quad (13)$$

dengan energi yang terjadi pada ADAS adalah

$$E_{ADAS} = \int Gx dx \quad (14)$$

Suku-suku persamaan yang berkaitan dengan Gx telah diuraikan sebelumnya.

Konsep persamaan keseimbangan energy pada sistem MDOF dapat ditentukan dengan cara yang sama dengan konsep energi SDOF. Persamaan energi yang mewakili respon struktur MDOF bisa dibentuk dengan mengintegrasikan tiap-tiap komponen gaya pada **Persamaan (6)** terhadap perpindahan relatif struktur sehingga diperoleh persamaan skalar (Soong dan Dargus, 1997):

$$E_k = \frac{1}{2} \dot{x}^T [m] \dot{x} \quad (15)$$

$$E_D = \int \dot{x}^T [c] \dot{x} dt \quad (16)$$

$$E_S = \int x^T [k] dx \quad (17)$$

$$E_{ADAS} = H H G x H^T dx \quad (18)$$

$$E_I = - \int [\ddot{x}_g]^T [m + \dot{m}] dx \quad (19)$$

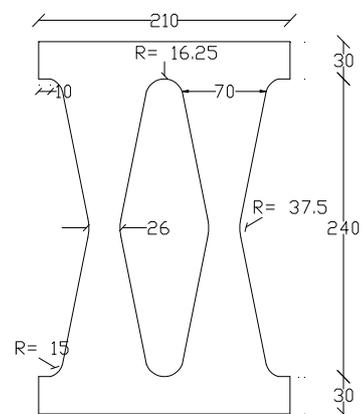
4. Uji Quasi Statik ADAS

Uji quasi statik dilakukan untuk mengetahui kemampuan ADAS dalam mendisipasi energi berdasarkan hubungan gaya dan perpindahan. Kemampuan disipasi energi ADAS adalah luasan di bawah kurva histeresis yang terbentuk dan didefinisikan sebagai kapasitas energi yang mampu diserap ADAS *set up* pengujian di laboratorium dapat dilihat pada **Gambar 4**. Model ADAS yang diuji terdiri dari tiga tipe yaitu tipe lurus (tipe I), cembung (tipe II) dan cekung (tipe III). Pengujian dilakukan dengan metode *displacement control*. Pembebanan diberikan searah sumbu kuat.

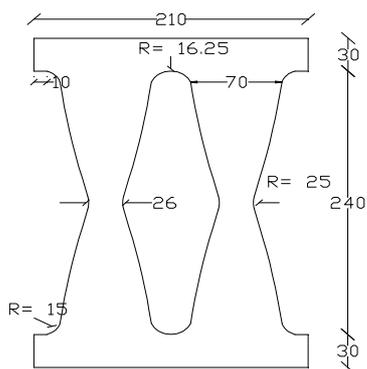
Setiap ADAS yang diuji diberi perpindahan bolak-balik. Besar perpindahan dinaikkan secara bertahap. Hasil pengujian menunjukkan bahwa keruntuhan



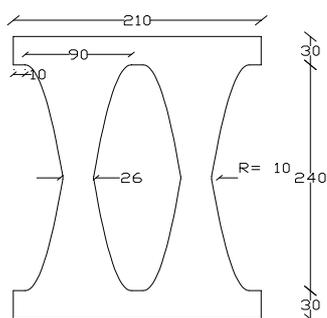
Gambar 4. Set up pengujian



Gambar 5. ADAS tipe I



Gambar 6. ADAS tipe II



Gambar 7. ADAS tipe III

ADAS tipe I berbeda dengan keruntuhan ADAS tipe II dan III. ADAS tipe II dan III mengalami torsi. Sedangkan pada ADAS tipe I mengalami keruntuhan lentur. Pada ADAS II deformasi maksimum yang terjadi adalah 50 mm, karena terjadi torsi yang cukup besar, meskipun sampel belum mengalami keretakan, pengujian harus dihentikan. ADAS tipe III memiliki deformasi yang lebih kecil, 38 mm. Pengujian juga dihentikan karena sampel mengalami torsi. Keruntuhan akibat lentur terjadi pada ADAS tipe I. Keretakan terjadi pada sepertiga dan dua pertiga tinggi ADAS. Perpindahan maksimum ADAS I adalah 50 mm. Foto kegagalan ADAS tipe I, II dan III beserta kurva histeresisnya dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



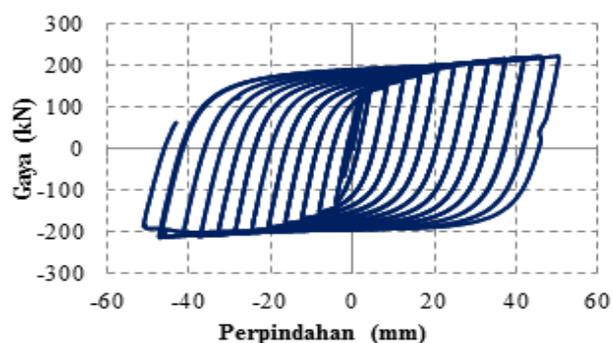
Gambar 8. Keruntuhan ADAS tipe I



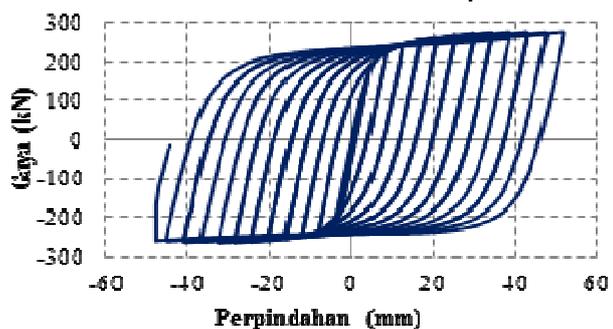
Gambar 9. Keruntuhan ADAS tipe II



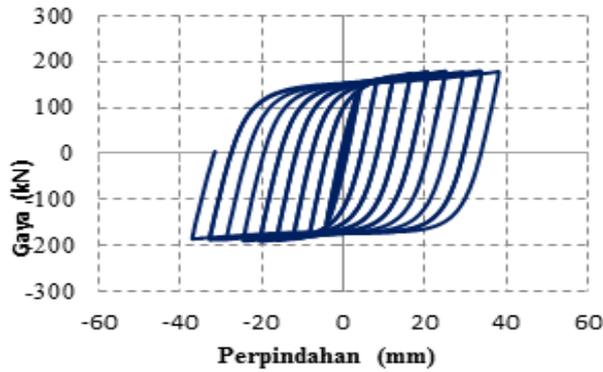
Gambar 10. Keruntuhan ADAS tipe III



Gambar 11. Histeresis ADAS tipe I



Gambar 12. Histeresis ADAS tipe III



Gambar 13. Histeresis ADAS tipe III

Kurva histeresis ADAS tipe I menunjukkan bahwa kekakuan *hardening* tetap stabil hingga keruntuhan terjadi. ADAS tipe II memiliki histeresis yang lebih besar dari pada ADAS tipe I. hal ini disebabkan karena bentuk sisinya yang cembung sehingga ADAS tipe II lebih kaku. Karena terjadi torsi, pada saat perpindahan 24 mm terjadi degradasi kekuatan. Akan tetapi degradasi yang terjadi kecil. ADAS tipe III juga mengalami torsi. Mulai pada saat perpindahan 20 mm, degradasi kekuatan terjadi hingga perpindahan 38 mm. Karena bentuk sisinya yang cekung, sehingga ADAS tipe III memiliki kekakuan yang lebih kecil dari pada ADAS tipe I dan II. Nilai propertis mekanik ADAS dapat dilihat pada Tabel 1 sampai 3.

5. Respon Seismik Struktur dengan ADAS

ADAS yang telah diketahui peopertis mekaniknya akan diaplikasikan ke struktur. Struktur yang dipasang ADAS adalah sistem struktur rangka baja pemikul momen khusus lima lantai yang difungsikan sebagai kantor. Lebar gedung 22 m, panjang 36 m, tinggi lantai satu 3.8 m dan empat lantai tipikal 3.6 m (termasuk lantai atap). Struktur tiga dimensi dianalisis menggunakan program PERFORM 3D versi 5.

Tabel 1. Gaya leleh dan ultimit ADAS

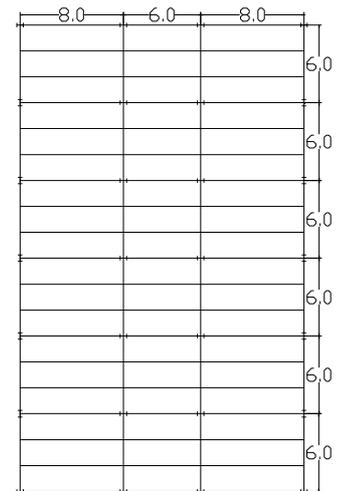
TYPE	Py (kN)	Pu (kN)	Px (kN)
ADAS I	122.7	202.53	223.48
ADAS II	140.948	256.87	275.06
ADAS III	104.495	170.22	178.37

Tabel 2. Perpindahan leleh dan ultimit ADAS

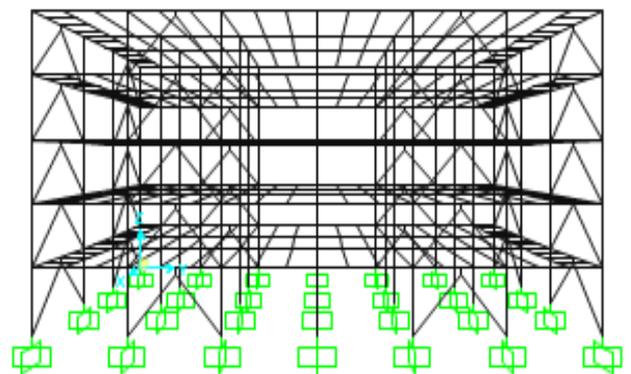
TYPE	δ_y (mm)	δ_u (mm)	δ_x (mm)
ADAS I	2.53	21.04	50.21
ADAS II	2.59	9.49	51.49
ADAS III	2.47	7.13	38.17

Tabel 3. Kekakuan elastis dan *hardening*

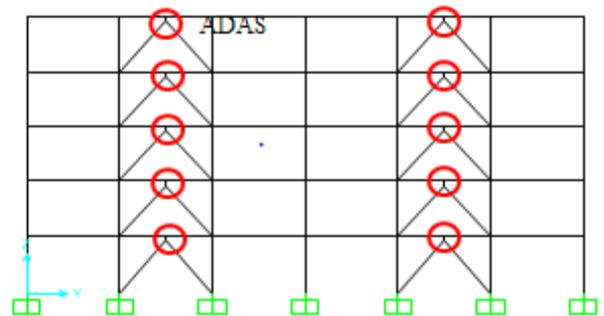
TYPE	k_e (kN/m)	k_{h1} (kN/m)	k_{h2} (kN/m)
ADAS I	48498.02	4312.80	718.07
ADAS II	54420.08	16792.99	433.10
ADAS III	42305.67	14091.98	262.63



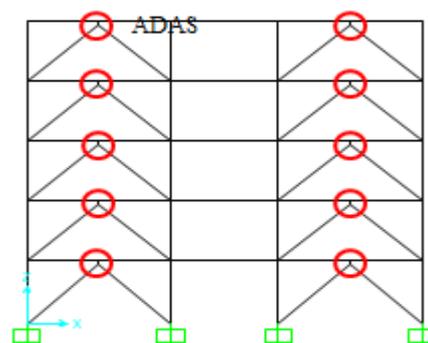
Gambar 14. Denah bangunan



Gambar 15. Model 3D Struktur SRPMK-ADAS



Gambar 16. Tampak samping struktur SRPMK-ADAS



Gambar 17. Tampak samping struktur SRPMK-ADAS

Jumlah ADAS yang dibutuhkan tiap lantai untuk mendisipasi energi ditentukan berdasarkan rasio kekakuan elastis ADAS (KD) **Tabel 1** dan rasio kekakuan elastis kolom tiap lantai. Kekakuan kolom tiap lantai ditentukan dari analisis nonlinear *pushover* pada struktur SRPMK tanpa ADAS.

Pada paper ini, ADAS yang digunakan untuk analisis hanya ADAS tipe I. Kekakuan ADAS dinaikkan secara bertahap mulai KD = KS hingga KD = 6KS. Respon seismik struktur ditinjau pada setiap kenaikan kekakuan ADAS untuk mengetahui kekakuan efektif ADAS yang dibutuhkan untuk meredam energi. Karena ADAS merupakan peredam pasif yang mengandalkan kelelahan, ADAS hanya mampu mereduksi perpindahan, gaya geser dan menaikkan energi histeresis. Oleh karena itu, respon seismik yang ditinjau pada tulisan ini hanya perpindahan, gaya geser, rasio energi histeresis terhadap energi *input*. Metode analisis untuk mengetahui respon seismik struktur dengan peredam ADAS adalah analisis riwayat waktu nonlinear (*nonlinear time history analysis*) dengan menggunakan percepatan gempa El Centro 0,35g dan San Fernando 1,0g. Struktur diberi beban percepatan gempa pada arah H1 (arah X) dan H2 (arah Y).

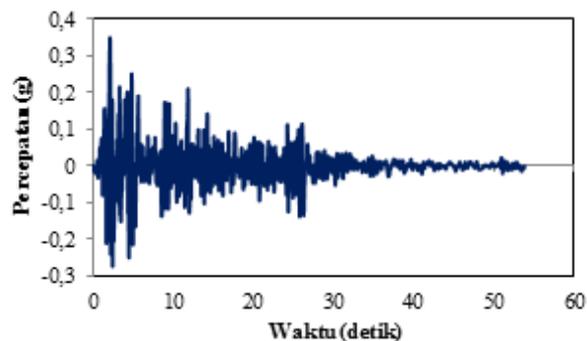
Pada paper ini, ADAS yang digunakan untuk analisis hanya ADAS tipe I. Kekakuan ADAS dinaikkan secara bertahap mulai KD = KS hingga KD = 6KS. Respon seismik struktur ditinjau pada setiap kenaikan kekakuan ADAS untuk mengetahui kekakuan efektif ADAS yang dibutuhkan untuk meredam energi. Karena ADAS merupakan peredam pasif yang mengandalkan kelelahan, ADAS hanya mampu mereduksi perpindahan, gaya geser dan menaikkan energi histeresis. Oleh karena itu, respon seismik yang ditinjau pada tulisan ini hanya perpindahan, gaya geser, rasio energi histeresis terhadap energi *input*. Metode analisis untuk mengetahui respon seismik struktur dengan peredam ADAS adalah analisis riwayat waktu nonlinear (*nonlinear time history analysis*) dengan menggunakan percepatan gempa El Centro 0,35g dan San Fernando 1,0g. Struktur diberi beban percepatan gempa pada arah H1 (arah X) dan H2 (arah Y).

Tabel 4. Kekakuan elastis struktur SRPMK arah H1

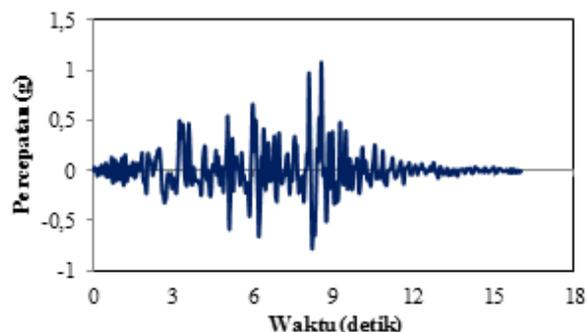
Lantai	Kekakuan (kN/m)
1	372487.55
2	372172.32
3	318740.63
4	233091.03
5	121007.99

Tabel 5. Kekakuan elastis struktur SRPMK arah H2

Lantai	Kekakuan (kN/m)
1	316982.63
2	314908.78
3	267174.93
4	193179.40
5	99008.99



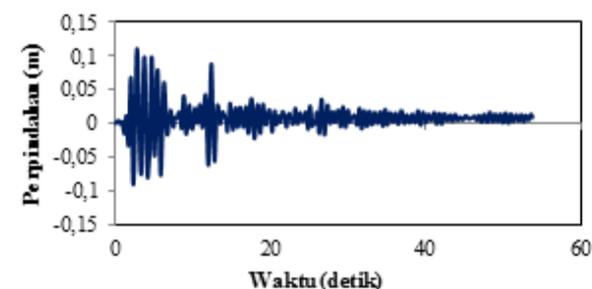
Gambar 18. Percepatan gempa El Centro 0,35g



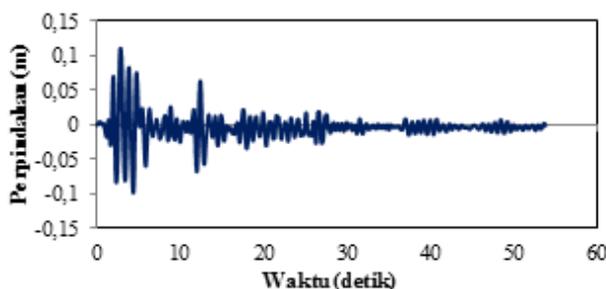
Gambar 19. Percepatan gempa San Fernando 1,0g

Pada analisis ini, balok dan kolom dimodelkan sebagai elemen balok kolom dengan model bilinear, *bracing* dudukan ADAS dianggap sebagai elemen *truss* dan dianggap kaku. ADAS dimodelkan sebagai balok prisma ekivalen, rasio redaman struktur 2% dan dianggap konstan.

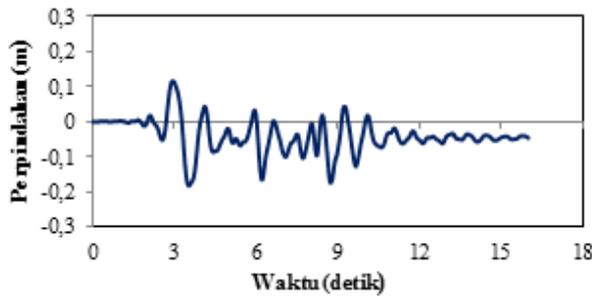
Gambar di bawah ini memperlihatkan respon perpindahan struktur terhadap waktu pada kondisi pembebanan gempa El Centro dan San Fernando arah H1 dan H2.



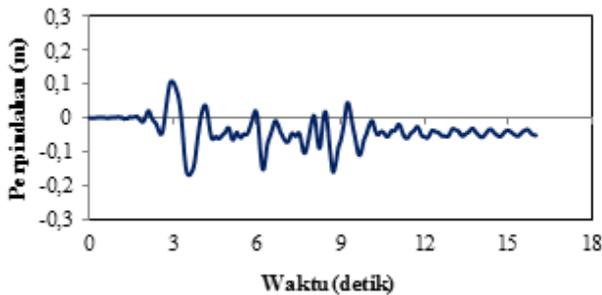
Gambar 20. Perpindahan atap H1 El Centro (KD = KS)



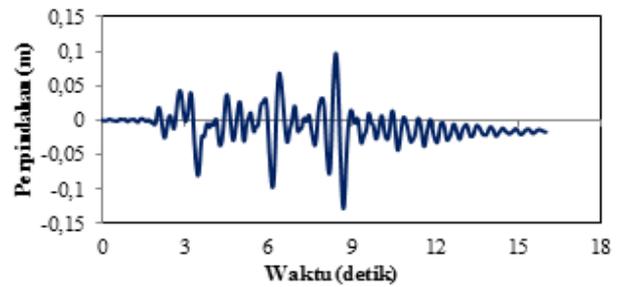
Gambar 21. Perpindahan atap H2 El Centro (KD = KS)



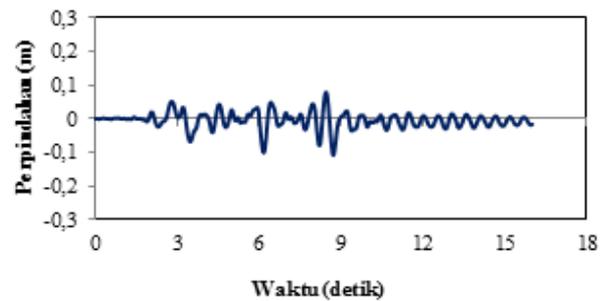
Gambar 22. Perpindahan atap H1 San Fernando (KD = KS)



Gambar 23. Perpindahan atap H2 San Fernando (KD = 2KS)



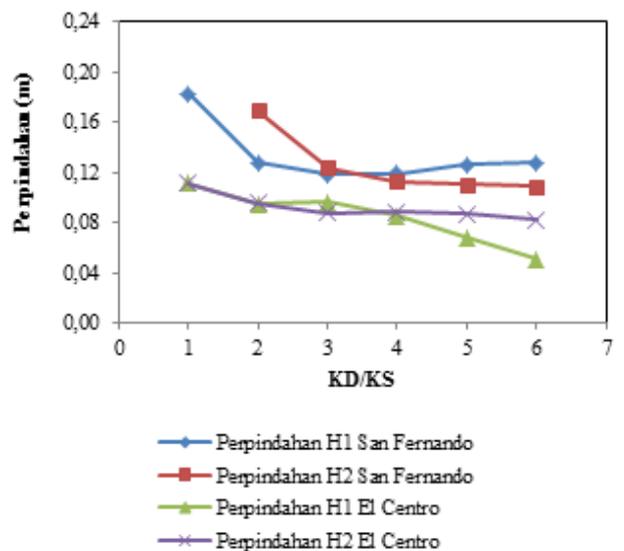
Gambar 24. Perpindahan atap H1 San Fernando (KD = 6KS)



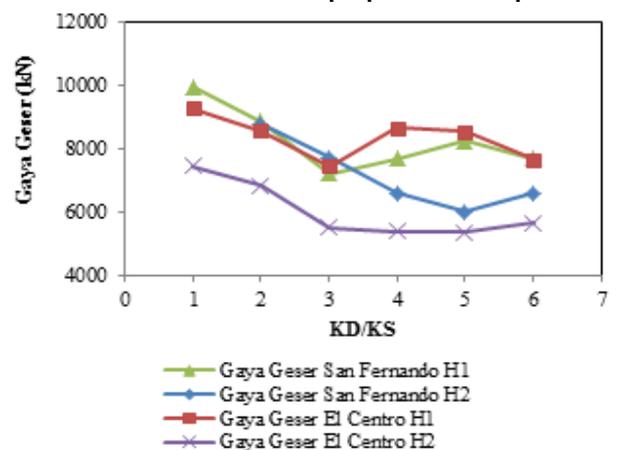
Gambar 25. Perpindahan atap H2 San Fernando (KD = 6KS)

Gambar 20 dan 21 memperlihatkan perpindahan lantai atap struktur arah H1 dan H2 pembebanan gempa El Centro 0,35g. Terlihat bahwa sistem struktur SRPMK-ADAS dengan KD = KS beresiliasi pada titik keseimbangan elastis pada arah H1 dan H2. Dengan demikian struktur tidak mengalami kegagalan. Gambar 22 dan 23 memperlihatkan perpindahan lantai atap arah H1 sistem struktur SRPMK-ADAS KD = KS dan H2 sistem struktur SRPMK-ADAS KD = 2KS pembebanan gempa San Fernando 1,0g. Pada arah H2, sistem struktur dengan rasio KD = KS terjadi kegagalan pada ADAS lantai dua sehingga analisis komputer terhenti. Kegagalan terjadi akibat terjadinya konsentrasi gaya yang berlebihan pada ADAS akan tetapi ADAS tidak memiliki kekakuan yang cukup untuk menahan gaya tersebut sehingga terjadi deformasi yang berlebihan. Sistem struktur yang mengalami kegagalan ADAS ini tidak dimasukkan ke dalam pembahasan selanjutnya. Gambar 22 dan 23 memperlihatkan bahwa sistem struktur SRPMK-ADAS KD = KS arah H1 dan KD = 2KS arah H2 berdeformasi inelastis. Kesimbangan osilasi struktur bergeser ke arah sumbu Y negatif. Kondisi seperti ini terjadi akibat terbentuknya sendi plastis pada elemen balok dan kolom sehingga kekakuan struktur berkurang. Jika kekakuan ADAS dinaikkan menjadi enam kali, maka deformasi struktur SRPMK-ADAS arah H1 dan H2 adalah seperti pada Gambar 24 dan 25.

Dari Gambar 24 dan 25 di atas terlihat bahwa kenaikan kekakuan ADAS berpengaruh terhadap reduksi deformasi struktur dan mampu menggeser keseimbangan osilasi struktur dari inelastis menjadi elastis. Nilai perpindahan struktur untuk semua rasio KD/KS pada pembebanan El Centro 0,35g dan San Fernando 1,0g arah H1 dan H2 diperlihatkan pada Gambar 26.



Gambar 26. Reduksi perpindahan atap



Gambar 27. Reduksi gaya geser struktur

Selain mampu mereduksi perpindahan, ADAS mampu mereduksi gaya geser struktur. Karena kekakuan ADAS dibuat minimum sama dengan kekakuan struktur, maka akan terjadi konsentrasi gaya horizontal pada ADAS ketika gempa terjadi. Sehingga gaya yang masuk ke kolom akan berkurang. Reduksi gaya geser struktur pada berbagai rasio KD/KS diperlihatkan pada **Gambar 27**.

Salah satu bagian terpenting dalam perencanaan struktur tahan gempa adalah energi yang bekerja pada struktur. Energi tersebut adalah energi histeresis (E_H), energi input (E_I) dan rasio energi histeresis terhadap energi input. Rasio energi histeresis terhadap energi input mewakili kerusakan yang terjadi pada struktur akibat beban gempa. Energi yang bekerja pada sistem struktur dengan peredam ADAS dihitung dengan **Persamaan 15** sampai **19**. Perlu dicatat bahwa energi yang bekerja pada struktur merupakan fungsi terhadap waktu dan nilai yang dipakai adalah nilai di akhir analisis. Pada **Tabel 6** sampai **9** dirangkum nilai energi histeresis dan input untuk elemen struktur dan ADAS untuk setiap rasio KD/KS.

Tabel 6. Energi histeresis dan input beban gempa El Centro H1

KD/ KS	Gempa	E_H (kN.m)		E_I (kN.m)
		Struktur	ADAS	
1	El Centro	99.40	1862.77	2742.44
2	El Centro	6.90	1817.12	2408.24
3	El Centro	4.50	1745.87	2384.98
4	El Centro	2.25	1826.73	2545.13
5	El Centro	0.00	1532.47	2244.94
6	El Centro	0.00	1264.26	2033.14

Tabel 7. Energi histeresis dan input beban gempa El Centro H2

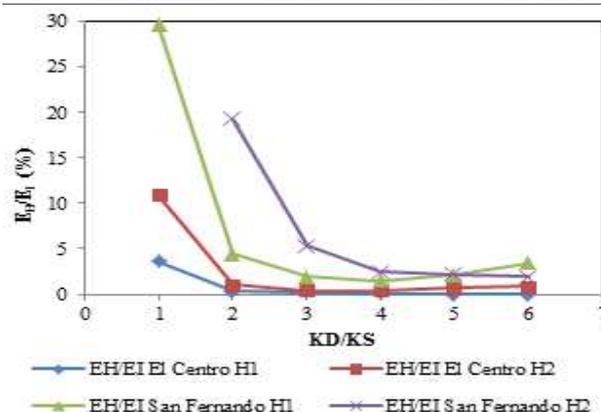
KD/ KS	Gempa	E_H (kN.m)		E_I (kN.m)
		Struktur	ADAS	
1	El Centro	247.60	1359.75	2270.65
2	El Centro	26.85	2024.97	2708.48
3	El Centro	9.82	1727.84	2319.53
4	El Centro	9.45	1737.31	2503.96
5	El Centro	15.94	1489.93	2360.10
6	El Centro	19.72	1410.86	2324.39

Tabel 8. Energi histeresis dan input beban gempa San Fernando H1

KD/ KS	Gempa	E_H (kN.m)		E_I (kN.m)
		Struktur	ADAS	
1	S. Fernando	1280.49	2125.86	4330.92
2	S. Fernando	178.33	3021.89	4016.99
3	S. Fernando	81.98	3390.69	4275.17
4	S. Fernando	67.31	3677.92	4564.01
5	S. Fernando	108.43	4108.40	5117.92
6	S. Fernando	197.01	4544.66	5741.33

Tabel 9. Energi histeresis dan input beban gempa San Fernando H2

KD/ KS	Gempa	E_H (kN.m)		E_I (kN.m)
		Struktur	ADAS	
1	S. Fernando	-	-	-
2	S. Fernando	846.89	444.20	4383.42
3	S. Fernando	216.64	2670.38	4090.05
4	S. Fernando	102.18	3061.79	4195.49
5	S. Fernando	93.67	3379.75	4348.01
6	S. Fernando	84.60	3443.34	4454.64



Gambar 28. Reduksi kerusakan struktur

Gambar 28 memperlihatkan rasio energi histeresis struktur (tidak termasuk ADAS) terhadap energi input. Rasio energi ini mewakili kerusakan yang terjadi pada struktur. Dari gambar terlihat bahwa dengan menaikkan kekakuan ADAS mampu mereduksi kerusakan yang terjadi pada struktur.

Pola reduksi perpindahan, gaya geser dan kerusakan struktur pada **Gambar 26, 27** dan **28** dijadikan sebagai patokan untuk menentukan rasio kekakuan optimum ADAS terhadap struktur (KD/KS optimum). Rasio kekakuan ini digunakan untuk analisis selanjutnya. Dari ketiga gambar tersebut terlihat bahwa pola reduksi terbesar terjadi pada rentang $KD = KS$ sampai $KD = 4KS$. Pada saat $KD = 5KS$ hingga $KD = 6KS$ reduksi respon tidak begitu signifikan. Perlu juga diketahui bahwa dengan menaikkan kekakuan maka jumlah ADAS juga akan bertambah. Dengan mempertimbangkan faktor reduksi respon seismik dan penggunaan material maka ditetapkan nilai rasio optimum $KD = 4KS$. Struktur SRPMK-ADAS dengan rasio $KD = 4KS$ akan dianalisis untuk mengetahui kinerja ADAS pada stiap kenaikan PGA. (*peak ground acceleration*).

6. Kesimpulan

Dari perhitungan dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Bahwa kenaikan kekakuan ADAS akan mereduksi perpindahan, gaya geser dan kerusakan struktur.
2. Rasio kekakuan optimum ADAS-struktur (KD/KS) untuk mendisipasi energi adalah $KD = 4KS$.

3. Kenaikan kekakuan ADAS akan meningkatkan kapasitas dan mengurangi kerusakan struktur.

5. Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada Bapak Daniel Teruna, ST., MT. atas kesempatan yang diberikan dan pengalaman dalam membantu pelaksanaan uji *dampers* (**Gambar 4** sampai **13**) dan membantu pengolahan data pada tanggal 18 Maret 2013 sampai 04 April 2013 di laboratorium Mekanika Struktur ITB.

Daftar Pustaka

- Alehashem, S.M.S., Kayhani, A., dan Pourmohammad, H., 2008, *Behavior and Performance of Structures Equipped with ADAS and TADAS Dampers*. China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering.
- Bayat, M. dan Abdollahzade, G.R., 2011, Analysis of Steel Braced Frames Equipped with ADAS Devices Under The far Field Records. *Latin American Journal of Solid and Structures*, 8, 163-181.
- Chan, R.W.K. dan Faris, A., 2007, *Experimental Study of Steel Slit Damper for Passive Energy Dissipation*. *Engineering Structures*, 30, 1058-1066.
- Chopra, A.K., 2001, *Dynamics of Structures Theory and Application to Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Christopoulos, C., dan Filiatrault, A., 2006, *Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press. Istituto universitario di studi superiori di pavia.
- Li, H.N dan Li, G., 2006, *Experimental Study of Structure with "Dual Function" Metallic Dampers*. *Engineering Structures*, 29, 1917-1928.
- Oh, S.H., Kim, Y.J., dan Ryu, H.S., 2008, *Seismic Performance of Steel Structures with Slit Dampers*. *Engineering structures*, **31**, 1997-2008.
- Soong, T.T., dan Dargush G.F., 1997, *Passive Energy Dissipation Sistem in Structural Engineering*. United States of America: John Wiley & Sons.

