Numerical Analysis Based on Finite Element Method to Determine A Stiffness of U-Shaped Steel Damper in Variation of Loading Direction

Eka Satria^{1,*}, Lovely Son², Mulyadi Bur³ dan Muhammad Dzul Akbar⁴

^{1,2,3}Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas Padang
⁴Prodi Sarjana, Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Andalas Padang
*Corresponding author: ekasatria@eng.unand.ac.id

Abstract. This paper presents how to determine the stiffness and damping value of U-steel damper in variation of loading directions. The steel dampers are applied in a place between roof and supporting structure of the building with the aim to control displacement of the roof under earthquake. If a heavy earthquake occurred, yielding of the damper can be also used to absorb the seismic energy and hopefully it is able to localize the occurred damages around the damper only. To achieve this purpose, several numerical models of U-steel damper are prepared and then subjected by a cyclic horizontal load as a representing of the earthquake. Due to a random direction of earthquake, the cyclic horizontal load is varied in several directions. The analysis is statically given based on concept of nonlinear finite element. From the analysis, the graphs that show the relationship between the given load and the occurred displacement (P- δ) are presented. Then, from each graph, two parameters are determined. The first is a structural stiffness, and the second is structural energy dissipation. The given stiffness is approached by tri-linear model and structural energy dissipation is calculated from the area of P- δ through application of the trapezoidal rule. Later, from the energy dissipation, the damping value is determined. Both, the structural stiffness and the damping value, can be used in dynamic analysis of the building structure in form of the simplest model, that is a spring-mass model.

Keywords: steel damper, finite element method, loading direction, stiffness, energy dissipation

Abstrak. Makalah ini membahas analisis kekakuan suatu peredam baja berbentuk pelat-U dalam variasi arah pembebanan. Peredam baja ini diterapkan pada suatu bagian struktur ruang dengan tujuan sebagai peredam sekaligus penyerap energi jika struktur tersebut menerima suatu beban gempa. Ketika gempa besar terjadi, maka proses plastisitas yang terjadi pada pelat-U diharapkan mampu menyerap energi beban gempa sehingga kerusakan dapat dilokalisir pada bagian peredam saja. Untuk mencapai tujuan tersebut, beberapa model peredam baja yang disusun dari sekumpulan pelat-U dimodelkan secara numerik untuk kemudian dianalisa secara statik dengan menggunakan sebuah program komputasi yang telah dikembangkan yang berbasiskan konsep elemen hingga nonlinear. Model ini kemudian dibebani secara berulang dalam arah horizontal. Kemudian, arah pembebanan secara horizontal ini juga dibuat bervariasi untuk melihat perbedaan kekakuan peredam jika gempa terjadi dalam arah yang acak. Hasil akhir yang diharapkan adalah diperolehnya suatu kurva beban terhadap perpindahan (P-δ) untuk berbagai variasi arah pembebanan. Suatu pendekatan trilinear diterapkan terhadap kurva P-δ yang dihasilkan untuk pemodelan kekakuan dari peredam. Di sisi lain, untuk mendapatkan nilai energi dissipasi dari peredam, luas kurva P-δ dihitung dengan menggunakan integrasi numerik berupa aturan trapesium. Harga yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung nilai redaman dari model.

Kata kunci: peredam baja, pelat-U, metode elemen hingga. arah pembebanan, kekakuan, energi dissipasi

© 2018. BKSTM-Indonesia. All rights reserved

Pendahuluan

Letak geografis Indonesia yang terletak diantara dua benua dan dua samudera menyebabkan Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif, karena tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya saling bertemu di wilayah Indonesia dan membentuk jalur-jalur pertemuan lempeng yang kompleks. Pertemuan antara beberapa lempengan ini menempatkan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang sangat rawan terhadap gempa bumi. Menurut data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), selama beberapa dekade terakhir, setiap tahunnya masyarakat Indonesia merasakan aktivitas gempa yang terjadi di nusantara [1]. Gempa bumi dengan

magnitudo besar terjadi setiap tahunnya di beberapa wilayah Indonesia. Rata-rata magnitudo gempa bumi yang terjadi yaitu 7,4 SR. Gempa-gempa tersebut tergolong ke dalam gempa dengan getaran yang kuat. Hal ini dibuktikan dari timbulnya ribuan korban jiwa, luka-luka, dan kerusakan infrastruktur dan bangunan, serta triliunan rupiah untuk rehabilitasi dan rekonstruksi [2]. Dengan tingginya resiko gempa bumi yang terjadi sehingga dibutuhkanlah suatu sistem struktur yang dapat mengurangi deformasi struktur yang ditimbulkan oleh gempa bumi.

Salah satu solusi yang dipertimbangkan dapat digunakan untuk mengontrol deformasi struktur akibat gempa adalah melalui penggunaan peredam Peredam baja ini dipilih karakteristiknya yang mampu menyimpan energi gaya yang cukup tinggi, memiliki kapasitas deformasi yang cukup besar, dan performa fatique siklus rendah yang baik [3]. Pemasangan peredam baja pada struktur bangunan telah banyak diteliti oleh peneliti-peneliti sebelumnya. Suzuki pada tahun 2005 menggunakan peredam baja berbentuk-U, yang stabil dalam merespon beban siklik [4]. Kemudian, Sang-Hoon (2012) menganalisis respon peredam baja berbentuk-U yang dipasang pada sistem isolasi dasar dalam menahan beban siklik [5], dan Bagheri (2015) meneliti peredam baja berbentuk-U kemudian dibandingkan dengan peredam gesek [6].

Makalah ini kembali mendiskusikan penggunaan peredam histerisis baja yang mampu mereduksi perpindahan dan sekaligus mampu menyerap energi akibat beban gempa. Peredam ini disusun dari dua atau lebih pelat baja berbentuk-U, yang kemudian ditempatkan pada beberapa tempat antara struktur atap dan struktur penopang bangunan. Beberapa penelitian pendahuluan telah dilakukan. Studi pertama ditujukan untuk melihat karakteristik mekanik pelat-U ketika dikenai beban cyclic dalam berbagai variasi geometri. Tujuannya adalah untuk melihat bentuk geometri seperti apa yang mampu memberikan energi dissipasi terbesar ketika dibebani oleh beban cyclic dalam harah horizontal. Parameter lainnya yang turut dihitung adalalah kekakuan peredam serta harga beban maksimum dalam arah horizontal yang mampu ditahan oleh peredam. Kemudian untuk melihat efektifitas penerapan pelat baja-U ini dalam mereduksi perpindahan akibat suatu beban gempa, maka suatu struktur bangunan dimodelkan sebagai suatu model pegas-massa sederhana 2-DOF, dimana parameter kekakuan dan redaman diambil

dari analisa sebelumnya. Hasil akhir yang diberikan memperlihatkan bagaimana pelat baja-U tersebut mampu mereduksi perpindahan dan cukup efektif berperan sebagai peredam pada bangunan akibat gempa [7].

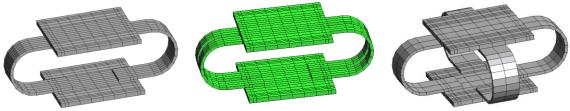
Studi berikutnya dilanjutkan dengan menggunakan model yang lebih komplek, dibuat mendekati bentuk praktek di lapangan, dimana peredam baja disusun dengan menggunakan dua buah atau lebih pelat baja berbentuk-U. Beban cyclic horizontal kembali diterapkan kepada model peredam tersebut untuk melihat harga kekakuan, beban maksimum dan energi dissipasi model tersebut [8].

Pada kedua studi di atas, pemberian beban gempa dilakukan hanya dalam pembebanan. Sehingga kekakuan, beban maksimum serta energi dissipasi yang diperoleh juga hanya berlaku dalam satu arah pembebanan. Dalam prakteknya beban gempa dapat terjadi dalam berbagai variasi arah, sehingga tentu saja akan mempengaruhi nilai kekakuan, beban maksimum dan energi dissipasi dari peredam tersebut. Maka pada makalah ini, studi lanjutan untuk melihat karakteristik mekanik suatu peredam berbentuk-U dilanjutkan dengan melihat pengaruh variasi arah pembebanan terhadap nilai kekakuan dan redaman dari peredam. Tujuan akhirnya yang hendak dicapai adalah mendapatkan model peredam yang mampu mereduksi perpindahan sekaligus mampu menyerap energi ketika gempa besar teriadi.

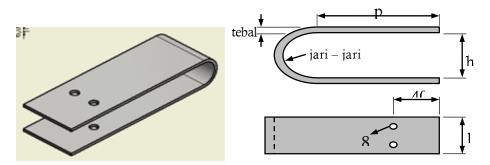
Metode Penelitian

Ada tiga model bentuk peredam yang digunakan sebagai mana diperlihatkan pada Gambar 1. Model (diperlihatkan pada Gambar pertama memperlihatkan dua buah pelat-U yang dipasang secara berhadapan pada sisi kiri dan kanan dari dua buah pelat datar. Model kedua, diperlihatkan oleh Gambar 1b, memperlihatkan peredam memiliki empat buah pelat-U dengan dimensi yang lebih kecil yang dipasang secara berhadapan pada sisi kiri dan kanan dari dua buah pelat datar. Terakhir, model letiga (diperlihatkan oleh Gambar 1c), memperlihatkan model peredam yang memiliki dua plat baja berbentuk pelat-U yang dipasang pada ke empat sisi peredam secara berhadapan.

Geometri Pelat-U. Geometri berbentuk pelat-U yang dipergunakan diperlihatkan pada Gambar 2 dengan nilai yang diberikan oleh Tabel 1.



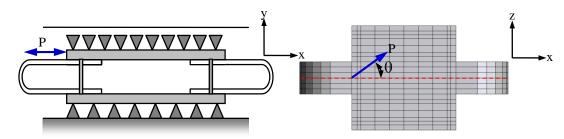
Gambar 1. Tiga buah model peredam yang digunakan (a). Model 1 (kiri), (b). Model 2 (tengah) dan (c). Model 3 (kanan)



Gambar 2. Geometri Plat U

Tabel 1. Dimensi Komponen Peredam Baja U

Komponen	Dimensi	Model 1	Model 2	Model 3			
	Panjang (p)	125	125	125			
Plat U	Lebar (l)	90	45	90			
	Tinggi (h)	150	150	150			
	Jari-jari	75	75	75			
	Tebal	10	10	10			
•	Panjang (p)	290	290	290			
Plat Datar	Lebar (l)	290	290	290			
	Tebal (h)	15	15	15			



Gambar 3.(a). Pemodelan beban dan kondisi batas, (b), Variasi arah pembebanan θ

Jenis Material. Jenis material yang digunakan pada pelat baja berbentuk U diperlihatkan pada Tabel 2 berikut.

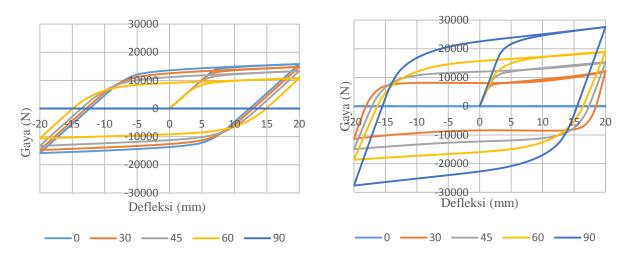
Tabel 2. Sifat Material

Modulus Elastisitas	210000 MPa
Tegangan Luluh	270.1 MPa
Poison ratio	0.3
Model tegangan-Regangan	Bilinear

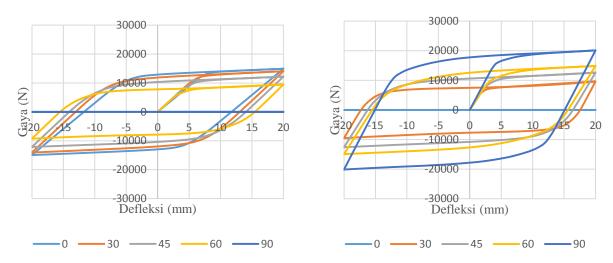
Kondisi Pembebanan. Pembebanan diberikan berupa pembebaban *cyclic* hingga defleksi maksimum peredam mencapai 20 mm. Pembebanan dilakukan dalam arah horizontal dalam arah koordinat X. Pembebanan *cyclic* yang diberikan berupa beban terdistribusi merata di

sepanjang permukaan kiri bagian atas dari plat datar (lihat pada Gambar 3a). Untuk kodisi tumpuan, desain peredam dibuat sedemikan rupa yang mengizinkan peredam hanya dapat berpindah dalam arah koordinat X-Z pada pelat atas dan *fixed* pada pelat bawah. Kondisi tersebut dimodelkan dengan menjadikan pelat datar bagian bawah sebagai tumpuan engsel dan plat datar bagian atas sebagai tumpuan rol.

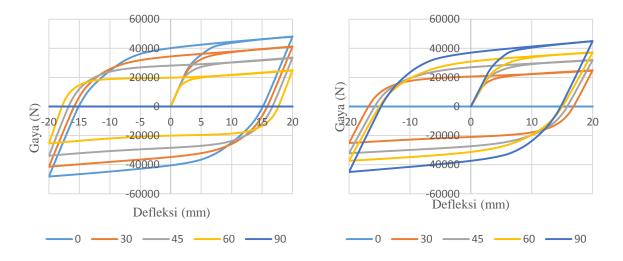
Variasi Sudut Pembebanan. Hubungan pembebanan *cyclic* dan kondisi pembebanan yang dirancang menjadikan sudut pembebanan θ sebagai variasi dari penelitian ini. Variasi sudut pembebanan yang dipilih mengacu kepada sudut berikut: 0° , 30° , 45° , 60° , 90° .



Gambar 4 Kurva histerisis peredam baja Model 1 dalam variasi sudut pembebanan dalam arah (a). Sumbu X (kiri), dan (b). Sumbu Z (kanan)



Gambar 5 Kurva histerisis peredam baja Model 2 dalam variasi sudut pembebanan dalam arah (a). Sumbu X (kiri), dan (b). Sumbu Z (kanan)



Gambar 6 Kurva histerisis peredam baja Model 3 dalam variasi sudut pembebanan dalam arah (a). Sumbu X (kiri), dan (b). Sumbu Z (kanan)

Tabel 3. Nilai Kekakuan Elastis, Beban Maksimum dan Energi Dissipasi Peredam Baja Variasi Sudut Pembeban	nan
---	-----

Mr. 1.1	Sudut	K _{LIN} -X	K _{LIN} –Z	P _Y -X	P _Y –Z	Е-Х	E–Z	C–X	C-Y
Model	deg.	N.mm	N.mm	N	N	$N.mm \times 10^3$	$N.mm \times 10^3$	N.s/mm	N.s/mm
1	0	1991.47	0.00	13701.7	0.00	669.28	0.00	5328631	0.00
	30	1965.14	4095.74	12563.5	7167.5	657.38	656.09	5233941	5223639
	45	1902.41	4366.95	10177.9	9607.3	606.90	840.77	4832038	6694053
	60	1842.60	4547.21	6799.1	11140.7	533.35	1009.52	4246401	8037540
	90	0.00	5578.09	0.00	18407.7	0.00	1395.08	0.00	11107285
Model	Sudut	K _{LIN} -X	K _{LIN} –Z	P _Y -X	P _Y –Z	Е-Х	E–Z	C–X	С-Ү
	deg.	N.mm	N.mm	N	N	$N.mm \times 10^3$	$N.mm \times 10^3$	N.s/mm	N.s/mm
2	0	1941.90	0.00	12541.7	0.00	632.23	0.00	4993861	0.00
	30	1910.66	3035.99	10986.3	6071.9	628.65	528.66	5005183	4209084
	45	1842.87	3050.27	9030.1	8083.2	571.75	675.74	4552174	5380064
	60	1832.84	3006.11	6048.4	9769.9	473.71	747.75	3771568	5953392
	90	0.00	3760.81	0.00	15607.4	0.00	1043.68	0.00	8309514
37.11	Sudut	K _{LIN} -X	K _{LIN} –Z	P _Y -X	P _Y –Z	Е-Х	E–Z	C-X	С-Ү
Model	deg.	N.mm	N.mm	N	N	$N.mm \times 10^3$	$N.mm \times 10^3$	N.s/mm	N.s/mm
3	0	8770.52	0.00	28942.7	0.00	2340.51	0.00	18634634	0.00
	30	8714.20	6652.25	25706.9	15300.2	2118.78	1345.57	16869244	10713121
	45	8166.08	6510.43	22048.4	20833.4	1809.99	1643.17	14410772	13082564
	60	8421.23	6129.40	14737.2	25436.9	1373.52	1800.42	10935669	14334514
	90	0.00	7592.14	0.00	28850.1	0.00	2157.36	0.00	17176417

Hasil dan Pembahasan

Analisis statik peredam baja berbentuk U dilakukan berdasarkan konsep metode elemen hingga yang melibatkan ketidaklinearan geometri dari material. Sebuah program komputasi *in-house* telah dikembangkan untuk keperluan tersebut. Hasil dari analisis menggunakan program disajikan dalam bentuk kurva histerisis. Gambar 4 sampai 6 memperlihatkan kurva-kurva histerisis dari peredam ketika dibebani dengan beban *cyclic* dalam variasi arah pembebanan.

Tabel 3 memperlihatkan harga kekakuan linear, K_{LIN}, dalam arah sumbu X dan Z untuk ketiga model yang digunakan. Secara umum dapat dilihat bahwa untuk Model 1, penambahan sudut θ , akan menurunkan kekakuan linear dalam arah sumbu X, tetapi sebaliknya akan menaikan harga kekakuan dalam arah sumbu Z. Pada saat beban linear diberikan dalam arah sumbu X, harga K_{LIN}-X adalah 1991,47 N.mm dan tidak ada kekakuan dalam arah sumbu-Z, K_{LIN}-Z=0. Sebaliknya pada θ =90° atau arah pembebanan dalam arah sumbu Z, harga K_{LIN}-Z adalah 5578,09 N.mm dan tidak ada kekakuan dalam arah sumbu-X, K_{LIN}-X=0. Kecendrungan yang sama juga berlaku untuk Model 2. Terjadi sedikit perbedaan pada harga K_{LIN}-X dan K_{LIN}-Z, dimana dengan penambahan

satu buah pelat baja-U di sisi kiri dan kanan pelat datar, harga K_{LIN}-Z akan mengalami penurunan sedangkan harga K_{LIN}-X hampir sama dengan Model-1. Sebagai contoh harga K_{LIN} -Z pada θ =90° untuk Model 1 adalah adalah 5578,09 N.mm. Maka harga ini akan turun menjadi sekitar 3760.81 N.mm pada Model-2. Sedangkan untuk Model-3, karena tambahan pelat-U diberikan pada sisi atas dan bawah pelat datar, maka konfigurasi peredam yang terbentuk hampir simetri, sehingga harga kekakuan linear yang diberikan juga seharusnya. Hanya saja pada Tabel 3 terdapat sedikit perbedaan harga, hal ini disebabkan karena terdapat sedikit perbedaan pemasangan pelat-U pada sisi atas dan bawah dibandingkan cara pemasangan pelat pada sisi kiri dan kanan seperti yang diberikan oleh Model 1.

Tabel 3 juga memperlihatkan harga beban maksimum (beban yield) P_Y untuk ketiga model yang digunakan. Secara umum kecendrungan yang diberikan sama dengan kekakuan linear, dimana akibat penambahan sudut θ akan menurunkan P_Y dalam arah sumbu X, tetapi sebaliknya akan menaikan P_Y dalam arah sumbu Z. Harga P_Y dalam arah sumbu Z berharga maksimum pada sudut θ =0° yaitu 13701,7 N untuk Model 1, 12541,7 N untuk Model 2 dan 28942,7 N untuk Model 3. Sedangkan harga P_Z dalam arah sumbu Z berharga maksimum pada sudut θ =90° yaitu 13407,7 N

untuk Model 1, 15607,4 N untuk Model 2 dan 28850,1 N untuk Model 3.

Terakhir Tabel 3 juga memperlihatkan harga energi dissipasi E-X dan E-Z untuk ketiga model yang digunakan. Secara umum kecendrungan yang diberikan sama dengan kekakuan linear, dimana akibat penambahan sudut θ akan menurunkan energi dissipasi dalam arah sumbu X, tetapi sebaliknya akan menaikan harga energi dissipasi dalam arah sumbu Z. Dikarena kekakuan linear vang berbeda pada Model 1 dan Model 2, tentu akan menyebabkan harga energi dissipasi yang diberikan juga berbeda. Dalam arah pembebanan sumbu Z, pada Model 1 dan Model 2, batas kekuatan luluh lebih cepat dicapai karena kekakuannya yang cukup besar. Jika kurva histerisis tetap diambil sampai harga yang sama δ =20 mm, maka luas kurva histerisis dalam arah pembebanan sumbu Z akan lebih besar dari kurva histerisis dalam arah pembebanan sumbu X. Ini berarti energi dissipasi dalam arah pembebanan sumbu Z akan jauh lebih besar dari energi dissipasi dalam arah pembebanan sumbu X. Sebagai contoh untuk Model 1, harga E-Z pada θ =90° berharga 1395,08 N.mm jauh lebih besar dari E-X pada θ =00 dengan harga 669,28 N.mm. Hal yang sama juga berlaku pada Model 2. Hanya saja untuk Model 3, kembali kesimetrian konfigurasi peredam memberikan harga kekakuan linear yang sama, sehingga luas kurva histerisispun dipertimbangkan sama. Dari Tabel 3 diperlihatkan bahwa energi dissipasi E-Z pada pada θ =90° berharga 2157,36 N.mm hampir sama dengan E-X pada θ =0° dengan harga 2340,51 N.mm.

Nilai redaman dari peredam baja ini diperoleh dari harga energi dissipasi yang telah dihitung sebelumnya dari luas kurva P-δ. Pers.(1) berikut dapat digunakan untuk menghitung nilai redaman:

$$c = \frac{E}{\pi \omega \Delta X^2} \tag{1}$$

dimana E adalah energi dissipasi, w adalah frekuensi pembebanan, ΔX adalah perpindahan maksimum. Dengan mengasumsikan frekuensi pembebanan, misal ω=0,1 Hz, maka diperoleh nilai redaman seperti yang ditampilkan pada Tabel 3. C-X adalah nilai redaman struktur dalam arah sumbu-X, sedangkan C-Z adalah nilai redaman struktur dalam arah sumbu-Z. Setelah dua buah parameter dinamik ini: kekakuan linear, K_{LIN}, dan redaman, C. diperoleh, maka analisa dinamik dapat dilaksanakan untuk melihat respon dinamik struktur ketika dibebani beban dinamik seperti gempa. Makalah ini difokuskan pada analisa statik untuk mendapatkan kedua nilai parameter dinamik tersebut. Analisa dinamik struktur peredam tidak dibahas dalam makalah ini.

Kesimpulan

Makalah ini membahas analisa numerik penghitungan kekakuan linear, beban maksimum dan energi dissipasi dari suatu peredam baja berbentuk-U yang dikenai beban horizontal *cyclic* dalam variasi arah pembebanan. Beberapa poin yang dapat disimpulkan dari makalah ini adalah:

- 1. Pemberian variasi arah pembebanan dari arah sumbu X (θ = 0^0) ke arah sumbu Z (θ = 90^0) akan menurunkan harga kekakuan linear dalam arah sumbu-X (K_{LIN} -X), beban maksimum dalam arah sumbu-X (E-X), enerdi dissipasi dalam arah sumbu-X (E-X) di satu sisi, akan tetapi akan menaikan harga kekakuan linear dalam arah sumbu-X (X-X), beban maksimum dalam arah sumbu-X (X-X), enerdi dissipasi dalam arah sumbu-X (X-X), enerdi dissipasi dalam arah sumbu-X (X-X) di sisi lainnya.
- 2. Penambahan jumlah pelat-U berukuran sama dalam arah sumbu-X dengan jarak antara yang kecil (Model 2) tidak terlalu berpengaruh terhadap harga kekakuan linear K_{LIN}-X, beban $P_{Y}-X$, maksimum energi dissipasi (perbedaan harga parameter-parameter tersebut dengan Model 1 tidak terlampau besar), akan tetapi memiliki pengaruh yang cukup signifikan linear terhadap kekakuan Klin-Z. maksimum P_{Y} -Z, energi dissipasi E-Z(perbedaan harga parameter-parameter tersebut dengan Model 1 cukup signifikan) untuk setiap arah pembebanan.
- 3. Penambahan jumlah pelat untuk ke seluruh sisi (Model 3) akan meningkatkan kekakuan linear peredam dalam ke dua arah horizontal, K_{LIN}-X dan K_{LIN}-Z, meningkatkan beban maksimum P_Y-X dan P_Y-Z, dan meningkatkan energi dissipasi E-X dan E-Z untuk setiap arah pembebanan.
- 4. Penghitungan nilai redaman (C-X dan C-Z) dapat dilakukan dari harga energi dissipasi yang diperoleh, hanya saja harga redaman ini juga dipengaruhi oleh besarnya frekuensi pembebanan *cyclic* yang diberikan.

Penghargaan

Makalah ini merupakan salah satu luaran dari skim Penelitian Dasar Unggulan Perguruan Tinggi (PDUPT) Tahun 2018 yang dibiayai oleh Kemenristek Dikti Indonesia, dan Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Jurusan Teknik Mesin atas dana pembiayaan penelitian dosen Teknik Mesin tahun 2018 yang digunakan untuk membiayai perjalanan seminar nasional ini.

Referensi

- [1] http://repogempa.bmkg.go.id/repository.php?id=10 1&session_id=QlUhYXgZ (diakses pada 05-06-2018)(Data Online Pusat Database – BMKG)
- [2] http://dibi.bnpb.go.id/dibi (diakses pada 05-06-2018)(DIBI BNPB)
- [3] Deng, K. Pan, P., Wang, C., 2013. *Development of Crawler Steel Damper for Bridges*. Journal of Contructional Steel Research, Vol.85, pp140=150.
- [4] Suzuki, K. Atsushi, W., Saeki, E., 2005. Development of U-Shaped Steel Damper for Seismic Isolation System. Nippon Steel Technical Support No.92. pp56-61.
- [5] Oh, SH., Song SH., Lee-SH., Kim, HJ., 2012. Seismic Response of Base Isolating Systems with U-shaped Hystetic Dampers. International Journal of Steel Structures, Vol.12, Issue 2, pp.285-298.
- [6] Bagheri, S. Barghian, M. Saieri, F. Farzinfar, A., 2015. *U-shaped Metallic Yielding Damper in Building Structures: Seismic Behavior and Comparison with a Friction Damper*. Structures, Vol.3, pp163-171.
- [7] Satria, E., Son, L., Haris, S., Saputri, R., 2018. Static and Dynamic Analysis of Steel U-Damper for Space Structures. International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology, Vol.8 No.1 pp.212-218
- [8] Satria, E., Son, L., Raffi, HM., 2017. Analisa Kekakuan Peredam Histerisis Baja Berbentuk U akibat Pembebanan Berulang. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XVI, Surabaya.