

PEREDAM PASIF UNTUK PILON JEMBATAN GANTUNG TERHADAP BEBAN GEMPA PADA TAHAP KONSTRUKSI (*PASSIVE DAMPER FOR SUSPENSION BRIDGE PYLON UNDER EARTHQUAKE LOAD DURING CONSTRUCTION PHASE*)

Winarputro Adi Riyono¹⁾ dan Tommy Virlianda Warganegara²⁾

^{1),2)}Puslitbang Jalan dan Jembatan
Jl A.H Nasution No. 264 Bandung 40294
e-mail: ¹⁾winarputro.adi@pusjatan.pu.go.id, ²⁾tommy.virlianda@pusjatan.pu.go.id
Diterima: 5 Februari 2018; direvisi: 16 Juni 2018; disetujui: 25 Juni 2018

ABSTRAK

Vibrasi jembatan merupakan fenomena yang tidak dapat dihindari akibat interaksi antara beban dan struktur. Vibrasi jembatan tidak hanya terjadi pada saat jembatan beroperasi, namun juga dapat terjadi saat masa konstruksi akibat beban transien. Jika vibrasi tersebut terlalu berlebih baik dari sisi magnitudo maupun frekuensi, maka dapat mengakibatkan gangguan pada saat masa konstruksi termasuk saat tahap pembangunan pylon. Vibrasi yang berlebih pada jembatan dapat dikendalikan dengan menggunakan sistem kontrol pasif. Pada kajian ini dibahas kontrol pasif dengan menggunakan sistem peredam untuk membatasi vibrasi lateral pada bagian pylon jembatan pejalan kaki tipe penggantung saat masa konstruksi. Peredam yang digunakan yaitu peredam tipe viscous dan peredam massa. Untuk skema pertama, peredam viscous diletakkan di bawah level lantai dan puncak pylon, sedangkan untuk skema kedua, peredam massa hanya diletakkan pada puncak pylon. Analisis struktur dilakukan dengan menggunakan analisis riwayat waktu dengan gempa masukan Imperial Valley 1940 yang telah diskalakan terhadap target spektra wilayah Jakarta berdasarkan SNI 2833:2016. Berdasarkan analisis diperoleh hasil nilai maksimum reduksi simpangan untuk sistem pylon dengan peredam viscous yaitu sebesar 20% sedangkan untuk peredam massa yaitu sebesar 56%. Nilai drift dan gaya geser dasar per tiang juga menunjukkan pylon dengan menggunakan peredam massa memiliki respon yang lebih baik dibandingkan pylon dengan peredam viscous. Hal ini menggambarkan penggunaan peredam massa pada puncak pylon lebih efektif dalam mereduksi vibrasi akibat gempa dibandingkan peredam viscous.

Kata kunci: vibrasi, kontrol pasif, peredam viscous, peredam massa, analisis riwayat waktu

ABSTRACT

Bridge vibration is an inevitable phenomenon due to interaction between load and structure. Bridge vibration is not only occur during operational period, but also during construction period due to transient actions. If the vibration excessively arise in terms of magnitude or frequency, it will gives disturbances during bridge construction stage include pylon construction stage. Bridge excessives vibration can be controlled by using passive control system. In this study, the used of damper system to limit the lateral vibration of suspension pedestrian bridge pylon is explored. The damper system used are viscous damper and mass damper. For the first scheme, the viscous damper is positioned beneath the deck level and at the top of pylon level, whereas for the second scheme, the mass damper is placed only on the top of the pylon level. Structural analysis is then carried out by using time history analysis with acceleration input from Imperial Valley 1940 ground motion which is scaled to the target spectra of Jakarta based on SNI 2833:2016. From analysis, it is found that there exists a maximum displacement reduction of 20% for pylon with viscous damper and 56% for pylon with mass damper. In addition drift ratio and the maximum shear force per column also shows that pylon with mass damper has a better responses than pylon with viscous damper. This results shows the used of mass damper is more effective in limiting pylon vibration due to seismic loads compare to the viscous damper.

Keywords: vibration, passive control, viscous damper, mass damper, time history analysis

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur penting yang turut berkontribusi dalam menunjang perekonomian di Indonesia. Dalam beberapa tahun terakhir, pembangunan jembatan terus diupayakan guna membuka atau memperluas aksesibilitas suatu lokasi. Pembangunan jembatan tersebut tidak hanya terbatas pada jembatan bentang pendek, namun juga termasuk jembatan bentang panjang.

Di dalam perencanaan jembatan, beberapa aspek perlu diperhatikan seperti kriteria kekuatan (*strength*), lelah (*fatigue*), dan layan (*service*) (SNI 1725: 2016). Disamping beberapa kriteria tersebut terdapat aspek lain yang perlu untuk ditinjau khususnya untuk jembatan bentang panjang yaitu tinjauan terhadap perilaku vibrasi struktur. Vibrasi tersebut dapat ditimbulkan oleh beberapa eksitasi dinamik antara lain; pejalan kaki, kendaraan bermotor, angin, ataupun gempa. Vibrasi yang terjadi dapat memberikan efek ketidaknyamanan hingga katastrofik. Sebagai contoh efek ketidaknyamanan adalah saat pejalan kaki berjalan di atas jembatan pejalan kaki yang relatif langsing. Misalnya, kasus jembatan Millenium di Inggris yang bergetar saat kerumunan massa berada secara bersamaan di jembatan tersebut. Hal ini dapat terjadi karena frekuensi alami struktur sangat berdekatan dengan frekuensi eksitasi yaitu pejalan kaki serta fenomena sinkronisasi beban pejalan kaki (Fujino et al. 1993). Contoh lain pengaruh vibrasi yaitu dapat menimbulkan ketidakstabilan aerodinamik pada jembatan seperti yang terjadi pada jembatan Tacoma Narrows (Matsumoto et al. 2003).

Hal lain yang menjadi pertimbangan khusus adalah evaluasi getaran yang timbul saat terjadi gempa pada masa konstruksi, termasuk goyangan yang ditimbulkan akibat beban gempa saat pekerjaan pylon jembatan berlangsung. Hal tersebut memberikan gambaran bahwa tahapan konstruksi pylon dalam kondisi *free standing cantilever* dapat menjadi suatu tahapan yang kritis dalam suatu proyek konstruksi. Sehingga untuk pembangunan pylon pada jembatan bentang panjang harus memperhitungkan beban gempa saat masa konstruksi. Sebagai contoh gempa dengan magnitudo 7.2 skala Richter mengguncang jembatan Akashi Kaikyo pada

17 Januari 1995. Pada saat itu jembatan masih berupa pylon dan kabel utama. Akibat gempa tersebut, fondasi jembatan mengalami pergeseran dan elongasi pada bagian bentang utama (Saeki et al. 1996). Gambar 1 memperlihatkan jembatan Akashi Kaikyo pada masa konstruksi.



Gambar 1. Jembatan Akashi Kaikyo pada masa konstruksi (Saeki et al. 1996)

Beberapa cara dapat digunakan untuk mereduksi vibrasi yang terlalu besar, antara lain dengan memberikan penambahan kekakuan struktur. Penambahan kekakuan akan menggeser frekuensi resonansi struktur di atas frekuensi eksitasi (Widarda dan Zulkifli 2013). Metode tersebut dapat dilakukan misalnya dengan cara pemberian bresing pada portal atau penambahan diafragma diantara girder jembatan.

Reduksi vibrasi juga dapat dilakukan dengan menambahkan peredam pada struktur. Peredam tersebut akan mengurangi vibrasi dengan memanfaatkan karakteristik material yang dapat mendisipasi energi vibrasi. Teknik tersebut dikenal dengan kontrol pasif vibrasi. Adapun teknik lain yaitu kontrol aktif vibrasi yang melibatkan penggunaan gaya luar untuk mereduksi vibrasi yang ada. Pada sistem ini, dibutuhkan sensor-sensor respon (misalnya: regangan, defleksi, percepatan), aktuator, serta algoritma yang dapat secara otomatis memberikan gaya pada struktur berdasarkan respon struktur. Beberapa kajian tentang kontrol aktif pada struktur dapat dilihat pada (Setio, Widarbo, dan Patta 2008) atau (Arfiadi 2010).

Sistem kontrol yang lain yaitu sistem kontrol semiaktif dan hibrida. Sistem semi aktif membutuhkan energi eksternal tidak untuk secara langsung menahan gaya gempa, namun untuk merubah karakteristik struktur. Keuntungan sistem semi aktif adalah tidak dibutuhkan gaya eksternal yang terlalu besar

untuk melawan gaya dinamik. Sistem hibrida merupakan gabungan sistem aktif dan pasif dimana energi luar dibutuhkan untuk meningkatkan efek redaman dari sistem kontrol pasif. Keuntungan sistem ini adalah apabila gaya kontrol tidak tersedia maka sistem pasif yang akan bekerja.

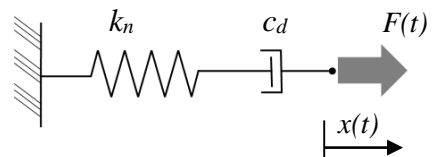
Kajian ini difokuskan pada aplikasi kontrol pasif pada perencanaan bagian pylon jembatan gantung untuk pejalan kaki pada masa konstruksi dengan menggunakan peredam *viscous* dan peredam massa. Sebagaimana diketahui seringkali pylon jembatan tidak hanya memikul beban gravitasi, tetapi juga turut memberikan kontribusi yang besar dalam memikul beban lateral seperti beban angin atau beban gempa termasuk saat masa konstruksi dimana struktur lantai belum terbangun. Kajian ini dilakukan untuk melihat seberapa jauh efektivitas kontrol pasif dengan menggunakan sistem peredam *viscous* dan peredam massa pada struktur pylon secara numerik. Analisis struktur pylon dilakukan dengan bantuan piranti lunak CSi Bridge ver. 2015.

KAJIAN PUSTAKA

Kontrol pasif yaitu sistem kontrol untuk mengurangi vibrasi struktur dengan menggunakan karakteristik redaman bahan. Teknik ini dapat dilakukan misalnya dengan menggunakan peredam *viscous*, peredam massa, atau dengan sistem isolasi. Ketiganya dijelaskan secara ringkas sebagai berikut.

Peredam *Viscous*

Peredam *viscous* terdiri atas tabung yang berisi pegas dan berisikan fluida dengan viskositas tertentu. Peredam *viscous* umum digunakan sebagai peredam vibrasi pada kendaraan bermotor (*shock absorber*). Aplikasi pada jembatan umumnya digunakan pada balok atau pilar jembatan sebagai alat untuk membatasi perpindahan balok atau girder saat terjadi gempa (*lock-up devices*). Sebagai contoh penggunaannya yaitu peredam *viscous* yang terhubung di antara *box girder* dan pilar Jembatan Chun-Su di Korea Selatan (Infanti, Kang, dan Castellano 2004). Keberadaan peredam tersebut adalah untuk menahan gaya gempa longitudinal sekaligus mendisipasi energi yang masuk ke jembatan akibat gempa.



Gambar 2. Model rheologi peredam *viscous*

Di dalam analisis struktur, Peredam *viscous* dimodelkan dengan menggunakan pegas dan redaman yang disusun secara seri seperti terlihat pada Gambar 2. Model tersebut dikenal dengan nama Model Maxwell. Pada Gambar 2, pegas (k_n) mewakili kekakuan elastik sedangkan redaman (c_d) mewakili disipasi energi.

Pada Model Maxwell, tegangan pada tiap elemen adalah sama besar dan sesuai dengan tegangan kerja. Sedangkan regangan total sistem merupakan penjumlahan dari regangan pada tiap elemen tersebut. Sehingga pada Model Maxwell berlaku hubungan sebagai berikut:

$$\sigma = \sigma_s = \sigma_d \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s + \varepsilon_d \quad \dots \dots \dots (2)$$

Keterangan :

- σ_s : tegangan pada pegas (Pa)
- σ_d : tegangan pada peredam (Pa)
- ε_t : regangan total sistem
- ε_s : regangan pegas
- ε_d : regangan pada peredam

Peredam Massa

Peredam massa (*mass damper*) banyak digunakan untuk mengurangi pengaruh vibrasi pada struktur termasuk jembatan. Peredam massa juga dikenal umum dengan istilah *Tuned Mass Damper (TMD)*. Konsep peredam massa yaitu mereduksi vibrasi dengan menambahkan suatu massa kecil dengan kekakuan dan redaman tertentu pada struktur. Pada awal perkembangannya sistem ini digunakan untuk mengurangi pengaruh vibrasi pada struktur berderajat kebebasan tunggal yang dikenai beban harmonik pada massa utama. Seiring dengan perkembangan zaman, sistem ini juga telah dikembangkan untuk mengurangi pengaruh vibrasi pada sistem berderajat kebebasan majemuk seperti pada gedung atau jembatan yang dikenai beban gempa. Sebagai contoh aplikasi peredam massa yaitu pada pylon

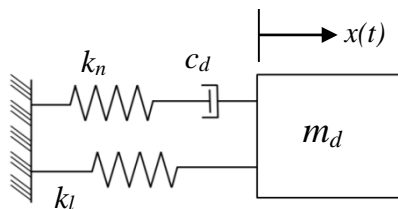
jembatan Gerald Desmond di California. TMD dengan total berat 3 ton terpasang pada 2 pilon jembatan tersebut sebagai kontrol getaran terhadap angin maupun gempa (Gambar 3). Peredam massa selaras (TMD) juga dapat dipasang dibawah lantai jembatan pejalan kaki seperti di Malta Center, Polandia (Fiebig 2010).

Komponen peredam massa terdiri atas pegas (k_n dan k_l), redaman (c_d), serta massa tambahan (m_d) dengan konfigurasi seperti pada Gambar 4. Penggunaan nilai k_n dan k_l tergantung dari analisis yang dilakukan. Untuk analisis linier, maka hanya nilai k_l yang akan diperhitungkan dalam analisis. Sedangkan untuk analisis nonlinier, nilai k_n yang diperhitungkan dalam analisis.



Gambar 3. TMD pada puncak pilon jembatan Gerald Desmond Bridge, California (www.gerbusa.com 2018)

Perancangan awal TMD dapat dibuat sedemikian sehingga diperoleh rasio redaman ekuivalen dengan nilai tertentu. Hubungan tersebut dapat dilihat pada Persamaan 3 sebagai berikut (Hartog 1985).



Gambar 4. Model rheologi peredam massa

$$\frac{\bar{m}}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{2\xi}{\bar{m}} + \frac{1}{2\xi_d} \right)^2} = \xi_e \dots\dots\dots(3)$$

Dengan \bar{m} adalah rasio massa peredam dengan struktur utama, ξ , ξ_d , dan ξ_e masing-masing adalah rasio redaman struktur utama, redaman peredam, dan redaman ekuivalen. Kemudian

batasan simpangan TMD ditentukan berdasarkan persamaan berikut:

$$u_d = \left(\frac{1}{2\xi_d} \right) u \dots\dots\dots(4)$$

Dengan mengkombinasikan Persamaan 3 dan 4 dan dengan anggapan $u_d \gg u$ maka diperoleh

$$\frac{\bar{m}}{2} \left(\frac{u_d}{u} \right) \approx \xi_e \dots\dots\dots(5)$$

Jika direncanakan redaman sistem ekuivalen sebesar 10% dan dengan $u_d = 10u$, maka didapat rasio massa peredam dengan massa struktur utama \bar{m} sebesar 2%.

Sistem Isolasi

Sistem isolasi memisahkan struktur terhadap bangunan bawah. Pemisahan ini memberikan tambahan derajat kebebasan bangunan atas yang kemudian dapat meningkatkan kinerja struktur terhadap beban gempa. Kemudian tambahan redaman dapat mengurangi energi gempa yang masuk ke struktur karena sebagian terserap oleh sistem isolasi. Sistem ini dapat diaplikasikan dengan menempatkan struktur pada isolasi landasan. Sistem isolasi bersifat fleksibel pada arah lateral. Oleh karena fleksibilitas ini, sebagian besar pergerakan lateral akan dialami sistem isolasi. Sehingga, perpindahan struktur dan gaya dalam yang terjadi menjadi lebih kecil dibandingkan dengan struktur tanpa sistem isolasi. Umumnya isolasi landasan digunakan pada tumpuan balok atau pada dasar bangunan tinggi. Pada jembatan, isolasi landasan biasanya diletakkan pada tumpuan gelagar. Isolasi landasan tidak diletakkan pada dasar pilon untuk pertimbangan keamanan. Sehingga pada kajian ini, aplikasi isolasi landasan pada pilon jembatan tidak digunakan.

HIPOTESIS

Penggunaan sistem peredam pasif dapat mengurangi vibrasi pilon jembatan. Penggunaan peredam *viscous* di setiap level pada pilon jembatan lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan peredam massa yang hanya dipasang pada puncak pilon.

METODOLOGI

Beberapa langkah yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian yaitu sebagai berikut. Tahap pertama yaitu melakukan pemodelan struktur pylon. Dengan menggunakan perangkat lunak analisis struktur dilakukan pemodelan tiga buah pylon jembatan (Gambar 5) secara dua dimensi (tanpa struktur lantai) dengan pertimbangan jembatan masih dalam masa konstruksi. Pylon pertama adalah pylon tanpa sistem kontrol (Gambar 5a), pylon kedua dengan peredam *viscous* pada level pedestal dan puncak pylon (Gambar 5b), dan pylon ketiga dengan satu buah peredam massa pada puncak pylon (Gambar 5c). Adapun dimensi penampang kolom (tiang) dan balok pengikat serta karakteristik bahan seperti tersaji pada Tabel 1. Perlu diperhatikan bahwa dimensi pylon serta balok pengikat merupakan estimasi dimensi awal (bukan merupakan hasil perencanaan yang rinci). Namun, demikian

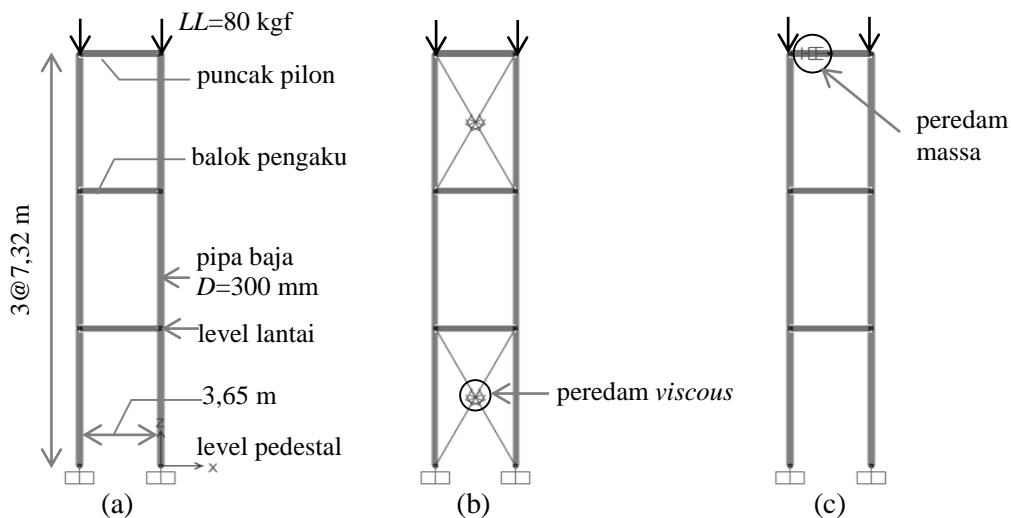
dimensi tersebut sebanding dengan dimensi beberapa tiang Jembatan Penyeberangan Orang (JPO) di Jakarta ataupun Jembatan untuk Desa Asimetris ($D=10''$).

Pada analisisnya digunakan analisis nonlinier riwayat waktu dengan gempa masukan yang sudah diskalakan dengan target spektra wilayah Jakarta berdasarkan SNI 2833:2016. Untuk memperhitungkan keberadaan pekerja saat masa konstruksi, sepasang beban hidup sebesar 80 kgf diletakkan pada puncak pylon. Separuh dari beban tersebut diperhitungkan sebagai sumber massa pada analisis dinamik. Melalui analisis struktur kemudian dibandingkan respons struktur untuk ketiga pylon tersebut (simpangan pada puncak pylon dan gaya geser dasar) guna melihat seberapa jauh reduksi vibrasi yang dapat dihasilkan antara peredam *viscous* dan peredam massa. Simpangan juga akan dibandingkan terhadap ketentuan berdasarkan FEMA 1997.

Tabel 1. Karakteristik bahan dan struktur pylon tanpa sistem kontrol dan dengan sistem kontrol

Struktur Utama	Pipa baja : $D=300$ mm, $t=12$ mm Balok baja berongga : $b=300$ mm, $h=400$ mm, $t=12$ mm Mutu baja $f_y=340$ MPa, $f_u=450$ Mpa		
	Model 1 (pylon tanpa kontrol)	Model 2 (pylon + <i>viscous</i>)	Model 3 (pylon + <i>TMD</i>)
k_n (kN/m)	-	198000	198000
c_d (kN dtk/m)	-	16	16
m_d (kg)	-	-	10*

* : 2% massa struktur utama (berdasarkan $\xi_e = 10\%$)



Gambar 5. Model pylon jembatan (a): pylon tanpa peredam (b): pylon dengan peredam *viscous* (c): pylon dengan peredam massa (*TMD*)

Link Element

Peredam *viscous* dimodelkan dengan menggunakan Model Maxwell (Gambar 2) dengan nilai koefisien redaman c_d sebesar 16 kN dtk/m. Nilai tersebut berada dalam rentang rekomendasi untuk redaman tipe *viscous* (Scheller dan Constantinou 1999). Kemudian nilai kekakuan pegas (k_n) diberikan berdasarkan nilai waktu karakteristik (τ) sesuai dengan Persamaan 6. Perlu diperhatikan bahwa nilai τ didefinisikan tidak lebih dari 1/100 hingga 1/1000 nilai $1/\omega_n$ agar tidak terjadi permasalahan numerik saat dilakukan simulasi (Computers and Structures Inc. 2015).

$$\frac{c_d}{k_n} = \frac{1/\omega_n}{1000} = \tau \dots\dots\dots(6)$$

dengan $\omega_n = 2\pi f_n$

Keterangan :

- c_d : koefisien redaman (kN dtk/m)
- k_n : kekakuan pegas(kN/m)
- ω_n : frekuensi angular struktur (rad/dtk)
- f_n : frekuensi alami struktur (Hz)

Berdasarkan analisis modal untuk struktur tanpa sistem kontrol (Gambar 5a), diperoleh nilai frekuensi alami f_n sebesar 1,97 Hz ($T_n=0,51$ detik). Sehingga dengan menggunakan Persamaan 6 diperoleh nilai kekakuan pegas k_n sebesar 198.000 kN/m.

Selanjutnya untuk peredam massa dimodelkan dengan menggunakan kombinasi pegas, redaman, dan massa tambahan seperti pada Gambar 5c. Nilai kekakuan pegas (k_n) dan redaman diambil sama dengan pada peredam *viscous*. Sedangkan pendefinisian massa tambahan didasarkan pada rasio massa tambahan terhadap struktur utama (\bar{m}). Pada kajian ini diambil nilai \bar{m} sebesar 2%. Nilai tersebut diambil berdasarkan asumsi redaman ekuivalen sistem sebesar 10%. Berat sendiri struktur pylon yaitu sebesar 5.136 kgf, sehingga diperoleh perkiraan nilai massa tambahan (m_d) yaitu sebesar 10 kg.

Eksitasi Dinamik

Analisis struktur akibat gempa dilakukan dengan metode analisis riwayat waktu (*time history analysis*) dimana digunakan Gempa Imperial Valley 1940 sebagai gempa masukan. Gempa Imperial Valley adalah gempa pertama yang tercatat secara lengkap *history* percepatannya.

Sehingga penggunaan gempa tersebut cukup representatif untuk digunakan sebagai referensi gempa masukan. Namun, gempa tersebut tidak dapat secara langsung digunakan pada analisis struktur karena diperlukan proses penskalaan gempa masukan ke spektra target wilayah sesuai dengan lokasi jembatan di Indonesia. Penskalaan ini dikenal dengan istilah *spectral matching*.

Spektra Target (SNI 2833: 2016)

Spektra target didasarkan pada lokasi rencana jembatan serta kondisi tanah dimana jembatan direncanakan akan dibangun. Struktur pylon rencana jembatan terletak di daerah Ancol Timur, Jakarta Utara dengan kondisi tanah termasuk tanah lunak. Penentuan kondisi tanah lunak didasarkan atas rata-rata berbobot N_{SPT} hingga kedalaman 30 m (Tabel 2). Berdasarkan Tabel 2, N_{SPT} berbobot memiliki nilai 2,55 (<15). Nilai tersebut mengindikasikan tanah di wilayah Ancol Timur termasuk tanah lunak berdasarkan SNI 2833: 2016.

Menurut SNI 2833: 2016 dalam hal penyesuaian gempa masukan terkait dengan kondisi wilayah yang ditinjau, maka perlu dilakukan suatu penskalaan input percepatan. Penskalaan dilakukan dengan minimal tiga rekaman gempa yang perlu dimasukkan dalam analisis.

Tabel 2. Data N_{SPT} tanah wilayah Ancol Timur

Depth (m)	t_i (m)	N	t_i/N
0	11	1	11.00
11	13	2	0.20
13	16	3	0.20
16	19	3	0.12
19	22	3	0.07
22	30	8	0.16
			30
			11.75
$SPT_{berbobot} = \sum t_i / \sum (t_i/N) = 2.55$			

Sumber: PT. CMNP tbk 2011

Pada kajian ini, tiga gempa masukan tersebut adalah Imperial Valley 1940, San Fernando 1971, dan Northridge 1994. Ketiga data percepatan tersebut diambil dari katalog gempa yang tersedia pada *Pacific Earthquake Engineering Research Center* (PEER 2016). Metode penskalaan dilakukan dalam dua tahap berdasarkan ASCE 7-10 (Charney 2010). Tahap pertama yaitu penskalaan yang dilakukan pada periode struktur (T_n) yang ditinjau untuk masing-masing gempa. Pada tahap ini akan dihasilkan nilai faktor skala F_p .

Kemudian, tahap kedua yaitu penskalaan pada rentang periode $0,2T_n$ hingga $1,5T_n$ yang akan menghasilkan nilai faktor skala S . Dengan mengalikan nilai F_p dan S diperoleh faktor skala akhir sebesar C . Faktor C inilah yang akan digunakan untuk penskalaan gempa masukan dalam analisis. Pada

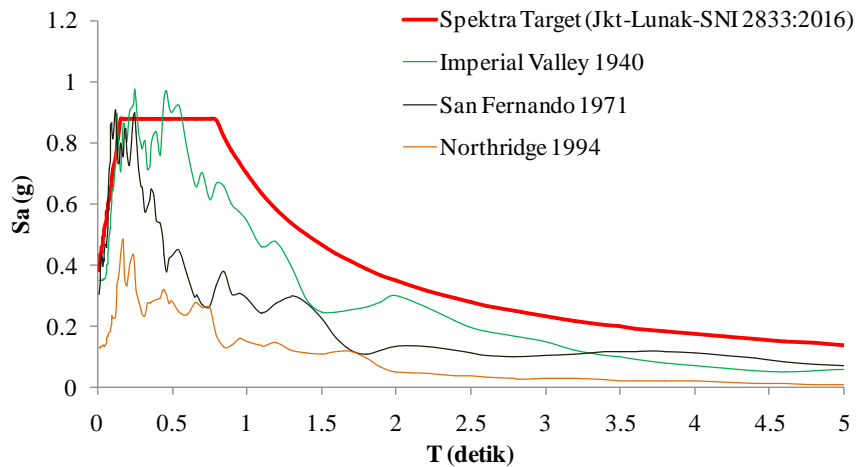
Tabel 3 disajikan nilai faktor skala untuk masing-masing gempa. Perlu diperhatikan bahwa gempa masukan yang akan diinput pada analisis struktur yaitu Gempa Imperial Valley 1940 yang sudah

diskalakan. Sehingga nilai faktor skala (C) yang digunakan dalam kajian ini yaitu 1,4. Pada Gambar 6 diperlihatkan perbandingan antara spektra target wilayah Jakarta – tanah lunak serta spektra awal dari tiga sumber gempa yang berbeda. Sedangkan Gambar 7 memperlihatkan spektrum gempa yang telah diskalakan ke spektra target wilayah Jakarta. Kemudian Gambar 8 menunjukkan riwayat percepatan gempa masukan sebelum dan setelah diskalakan.

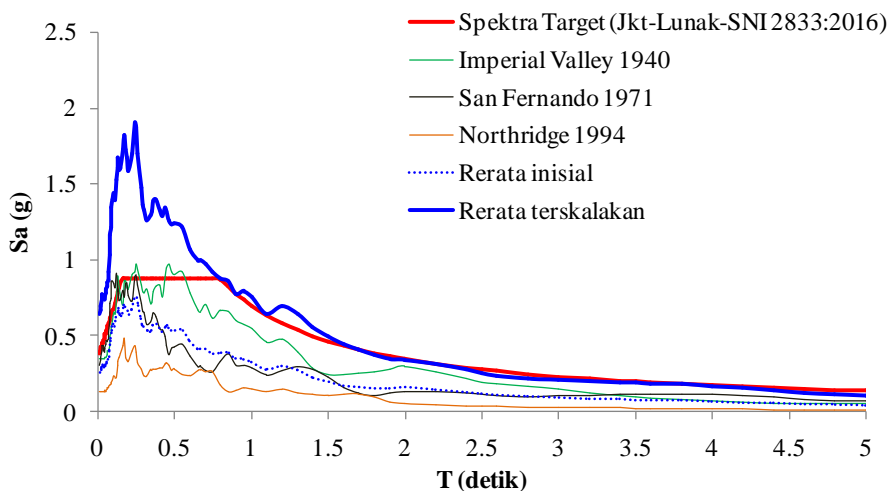
Tabel 3. Faktor skala gempa masukan

Gempa	F_p	S	C
Imperial Valley 1940*	1.11	1.26	1.40
San Fernando 1971	2.21	1.26	2.79
Northridge 1994	3.54	1.26	4.47

* Gempa yang digunakan dalam analisis



Gambar 6. Perbandingan spektra target wilayah Jakarta – tanah lunak dan spektra awal dari 3 sumber gempa yang berbeda



Gambar 7. Penskalaan gempa masukan (*spectral matching*)

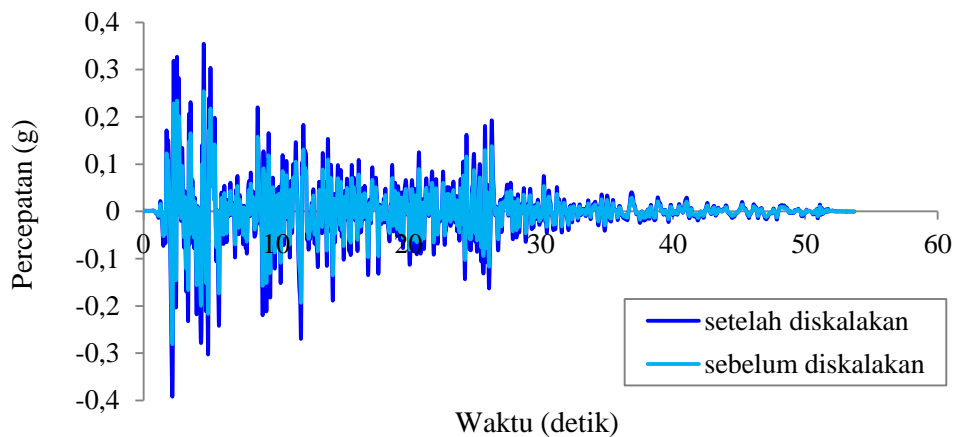
HASIL DAN ANALISIS

Simpangan Antar Level Pilon

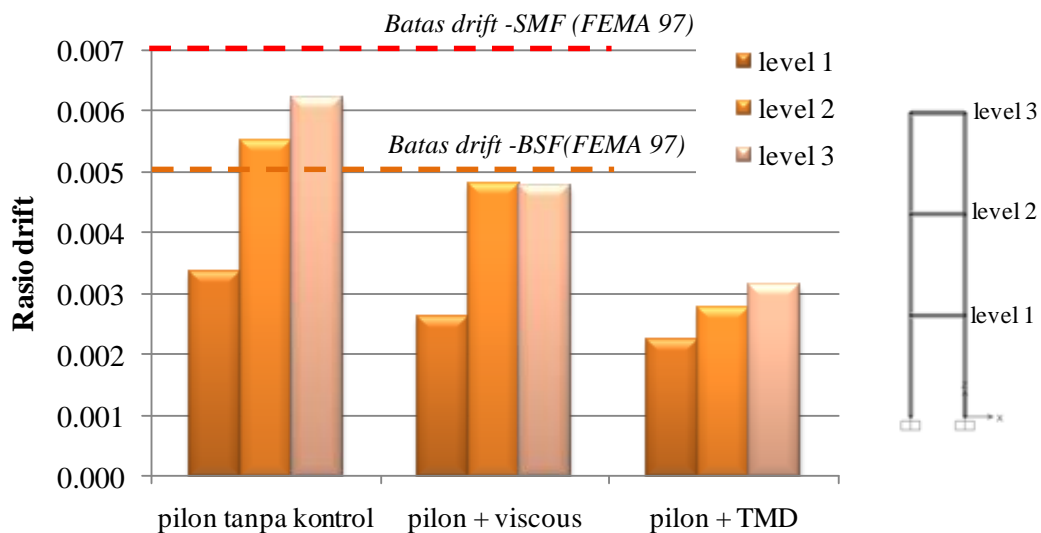
Gambar 9 memperlihatkan simpangan antar level pada pilon (*drift*) untuk ketiga model. Nampak secara umum untuk ketiga sistem memberikan *drift* pada level pertama (level lantai pada Gambar 5) lebih kecil dibandingkan dua level lainnya. Namun demikian, untuk sistem tanpa sistem kontrol memiliki rasio *drift* antar level puncak dengan level pertama yang terbesar (sebesar 2). Perbedaan tersebut dapat direduksi untuk sistem pilon dengan peredam *viscous* dan *TMD* masing-masing dengan (1,8 dan 1,5).

Jika dibandingkan terhadap ketentuan berdasarkan FEMA 1997 yg mensyaratkan rasio *drift* sebesar 0,7% untuk pembebanan

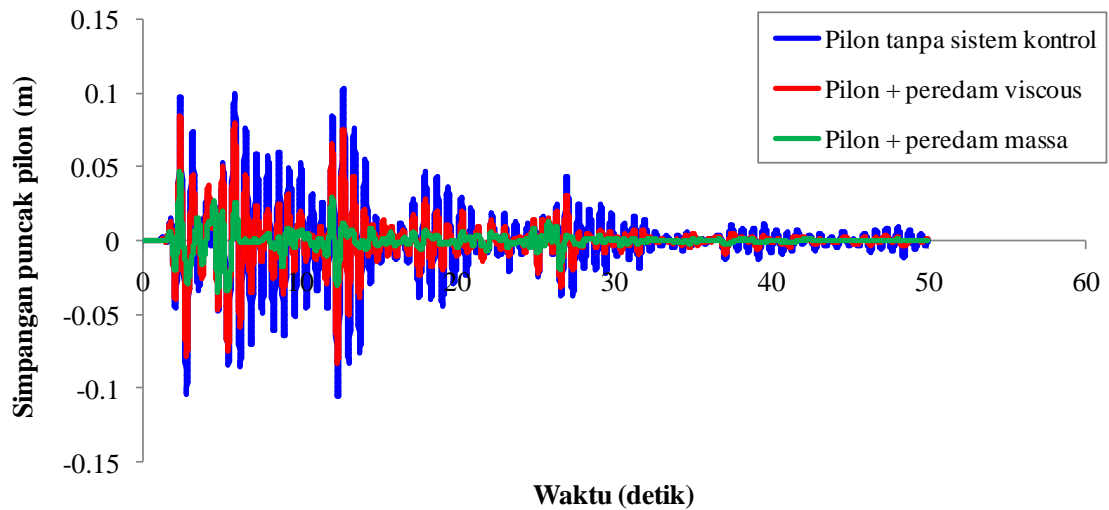
transien pada sistem rangka pemikul momen baja (*Steel Moment Frame*), maka sebetulnya untuk ketiga model masih memenuhi ketentuan tersebut. Namun, jika model dianggap sebagai sistem pemikul momen (*Braced Steel Frame*) dengan batang pengaku (bresing) baja dengan batasan rasio *drift* sebesar 0,5%, maka sistem pilon dengan tanpa sistem kontrol melampaui batas persyaratan tersebut. Penanganan getaran dengan peredam pasif baik dengan peredam *viscous* maupun peredam massa mampu membatasi *drift* untuk kedua batasan tersebut. Penggunaan peredam massa memberikan nilai rasio *drift* yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan ketentuan FEMA 1997.



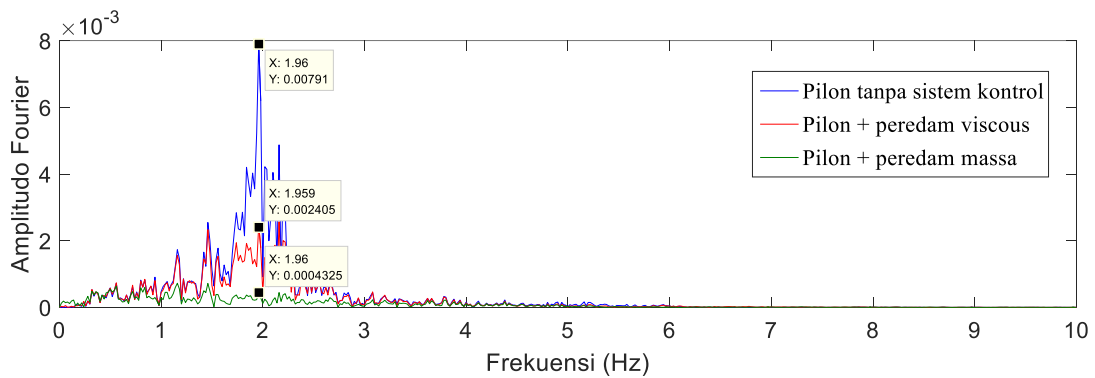
Gambar 8. Gempa Imperial Valley 1940 sebelum dan setelah diskalakan



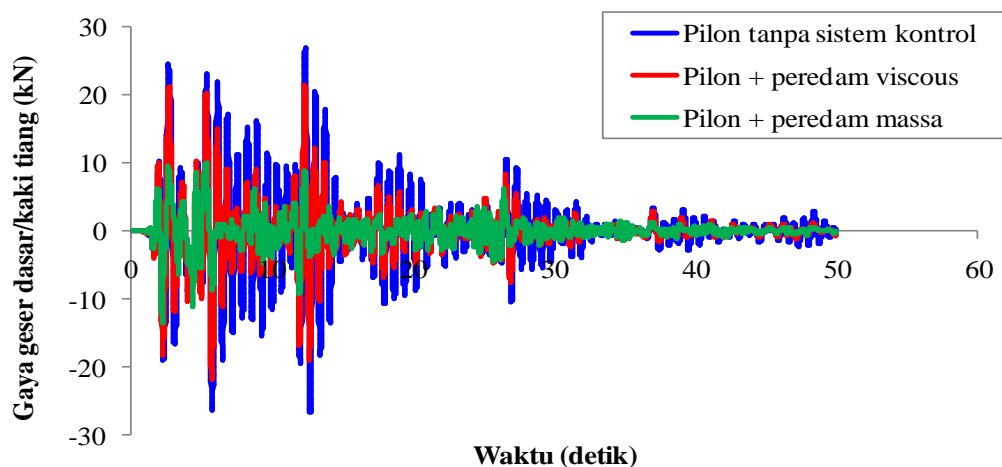
Gambar 9. Perbandingan simpangan antar level (*drift*) pada pilon tanpa sistem kontrol dan dengan sistem kontrol



Gambar 10. Riwayat simpangan horizontal pada puncak pylon



Gambar 11. Hasil transformasi *Fourier* untuk simpangan pada puncak pylon



Gambar 12. Riwayat gaya geser dasar/tiang

Simpangan Pada Puncak Pylon

Gambar 10 memperlihatkan riwayat simpangan lateral pada bagian puncak pylon. Berdasarkan Gambar 10 dapat ditunjukkan bahwa simpangan lateral maksimum untuk pylon tanpa sistem kontrol, pylon dengan

peredam *viscous*, dan pylon dengan peredam massa masing-masing adalah sebesar 0,106 m, 0,084 m, dan 0,047 m. Sehingga dapat dikatakan bahwa reduksi simpangan pada pylon dengan sebuah peredam massa pada puncak pylon lebih besar dibandingkan dengan

pilon dengan peredam *viscous* di setiap level pilon. Selanjutnya pada Gambar 11 diperlihatkan hasil transformasi *Fourier* untuk melihat seberapa jauh pengaruh kontrol pasif terhadap frekuensi struktur. Berdasarkan Gambar 11, keberadaan peredam *viscous* dan peredam massa relatif tidak merubah frekuensi, namun merubah secara signifikan amplitudo *Fourier* untuk simpangan. Hal ini oleh karena sebagian energi kinetik terdisipasi oleh sistem peredam massa.

Gaya Geser Dasar Per Tiang

Selain simpangan, pengaruh kontrol pasif terhadap gaya geser dasar disajikan pada kajian ini. Gaya geser dasar dalam hal ini adalah reaksi horizontal yang dipikul oleh satu tiang pada masing-masing pilon. Riwayat gaya geser dasar/tiang ditunjukkan pada Gambar 12. Terlihat bahwa gaya geser/ tiang maksimum untuk pilon tanpa sistem kontrol, pilon dengan peredam *viscous*, dan pilon dengan peredam massa masing-masing adalah sebesar 26,95kN, 21,88 kN, dan 13,62 kN. Sehingga diperoleh reduksi gaya geser pada pilon dengan peredam *viscous* dan peredam massa adalah sebesar 19% dan 49%.

PEMBAHASAN

Penggunaan kontrol pasif dengan sistem peredam (baik tipe *viscous* maupun *TMD*) dapat diaplikasikan pada pilon jembatan baja yang relatif langsing. Penggunaannya tidak terbatas pada saat jembatan selesai dibangun, namun dapat juga diaplikasikan pada saat masa konstruksi (sistem lantai belum dibangun).

Pemanfaatan *link element* dengan properti kekakuan dan redaman tertentu dapat memberikan efek reduksi pada simpangan maupun gaya dalam struktur. Pada kajian ini dapat diperlihatkan bahwa meskipun jumlah peredam *viscous* lebih banyak serta dengan properti peredam (k_n dan c_d) yang sama dengan peredam massa pada puncak pilon, tidak berarti efek peredaman vibrasi menjadi lebih besar untuk tipe *viscous*.

Berdasarkan analisis struktur, diperoleh reduksi simpangan untuk sistem pilon dengan peredam *viscous* yaitu sebesar 20% sedangkan untuk peredam massa yaitu sebesar 56%. Hal ini menunjukkan penggunaan peredam massa pada puncak pilon lebih efektif dalam mereduksi vibrasi akibat gempa yang ditinjau pada kajian ini.

Reduksi ini dapat secara langsung mengurangi tegangan yang terjadi pada pilon yang kemudian dapat meningkatkan faktor keamanan bagi para pekerja yang sedang melaksanakan pekerjaan konstruksi di puncak pilon. Reduksi simpangan pada puncak pilon tersebut juga akan berpengaruh terhadap reduksi simpangan pada level lantai.

Pada kajian ini penggunaan massa tambahan sebesar 2% dari massa utama cukup baik dalam mereduksi vibrasi pada puncak pilon. Namun, penggunaan rasio tersebut tidak dapat digeneralisasi untuk semua problem struktur. Secara umum, bila perbandingan massa tambahan terhadap massa struktur membesar, maka akan memberikan reduksi respon vibrasi yang lebih baik. Tetapi, pada kasus tertentu, penambahan massa tambahan dapat memperbesar vibrasi yang terjadi (Wong Foek Tjong et al. 2003).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan studi numerik ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan sistem peredam mampu membatasi vibrasi yang berlebih dengan menggunakan prinsip disipasi energi kinetik. Melalui analisis, diperoleh hasil bahwa penggunaan peredam massa lebih efektif untuk meredam vibrasi akibat beban dinamik dibandingkan peredam *viscous*. Dengan hanya memberikan tambahan massa sebesar 2% terhadap massa struktur utama pada puncak pilon, peredam massa mampu memberikan reduksi simpangan lateral yang signifikan pada puncak pilon maupun gaya geser dasar struktur.

Saran

Adapun saran yang dapat diambil dari studi ini yaitu perlunya dilakukan pemeriksaan keamanan pilon jembatan semasa konstruksi pada daerah di Indonesia khususnya yang memiliki patahan aktif misalnya Sukabumi (prototipe jembatan beruji kabel Palibaja). Fabrikasi peredam massa dengan konten lokal juga perlu dikembangkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PEER NGA atas ketersediaan sumber gempa masukan yang digunakan dalam kajian

ini. Penulis juga mengapresiasi PT. Citra Marga Nusaphala Persada dalam penyediaan data tanah wilayah Ancol Timur.

DAFTAR PUSTAKA

- Arfiadi, Yoyong. 2010. "Optimasi letak dan sifat peredam massa selaras untuk mengurangi respons struktur akibat gempa." In *Konferensi Nasional Teknik Sipil 4 (KoNTekS 4)*, 409–16.
- Charney, F. Allan. 2010. *Seismic Loads, Guide to the Seismic Load Provisions of ASCE 7-10*. ASCE Press. <https://doi.org/10.1061/9780784413524.ch02#sthash.lnQhFYzm.dpuf>.
- Computers and Structures Inc. 2015. "CSI Bridge Manual." University Avenue Berkeley, California 94704 USA.
- FEMA. 1997. *NEHRP Guidelines for Seismic rehabilitation of buildings*. Washington DC.
- Fiebig, W. 2010. "Reduction of Vibrations of Pedestrian Bridges Using Tuned Mass Dampers (TMD)." *Archives of Acoustics* 35 (2): 165–74.
- Fujino, Y., Benito M Pacheco, Nakamura Shuni-chi, dan Pennung Warnitchai. 1993. "Synchronization of Human Walking Observed during Lateral Vibration of a Congested Pedestrian Bridge." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* 22: 741–58.
- Hartog, Den. 1985. *Mechanical Vibrations*. McGraw Hill Book Company.
- Infanti, Samuele, H.T. Kang, dan M.G. Castellano. 2004. "Retrofit of Bridges in Korea using Viscous Damper Technology." In *13th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Matsumoto, Masaru, Hiromichi Shirato, Tomomi Yagi, Rikuma Shijo, Akitoshi Eguchi, dan Hitoshi Tamaki. 2003. "Effects of aerodynamic interferences between heaving and torsional vibration of bridge decks: The case of Tacoma Narrows Bridge." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 91 (12–15): 1547–57. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2003.09.010>.
- PEER. 2016. "Ground Motion Database." *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. 325 Davis Hall - CA 94720-1792. <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- PT. CMNP tbk. 2011. "Laporan evaluasi kondisi fondasi jalan layang tol Ir. Wiyoto Wiyono MSc."
- Saeki, Shoichi, Kazuo Tada, Makoto Kitagawa, Atsushi Nitta, dan Toshihiro Kurihara. 1996. "Effects of the Hanshin-Awaji Great Quake Disaster on The Akashi Kaikyo Bridge." In *11th World Conference on Earthquake Engineering*. Elsevier Science Ltd.
- Scheller, Joern, dan Michael C Constantinou. 1999. "Response History Analysis of Structures with Seismic Isolation and Energy Dissipation Systems: Verification Examples for Program SAP2000 by." *MCEER, University at Buffalo, State University of New York*.
- Setio, Herlien D., Rahmat Widarbo, dan Pasca R. Patta. 2008. "Kontrol vibrasi aktif pada struktur yang mengalami beban dinamik dengan menggunakan jaringan saraf tiruan dan algoritma genetik." *Dinamika TEKNIK SIPIL* 8 (2): 137–48.
- SNI 1725. 2016. *Pembebanan untuk jembatan*. Badan Standarisasi Nasional (BSN). <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DetailSNI/10950>.
- SNI 2833. 2016. *Perencanaan Jembatan Terhadap Beban Gempa*.
- Widarda, Dina Rubiana, dan Ediansjah Zulkifli. 2013. *Penerapan Sistem Kontrol Struktur pada Jembatan*. Puslitbang Jalan dan Jembatan, Kementerian PU Pera.
- Wong Foek Tjong, Robby Sumendap, Freddy Gunawan, dan Takim Andriano. 2003. "Studi Efektifitas Penggunaan Tuned Mass Damper Pada Struktur Gedung Dalam Mereduksi Respons Dinamik Akibat Beban Seismik." *Civil Engineering Dimension* 5 (2): 51–62. <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/civ/article/view/15570>.
- www.gerbusa.com. 2018. "Gerald Desmond Bridge, Long Beach California USA." 2018.