

Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* pada respons inelastik struktur SDOF akibat gempa

Widodo Pawirodikromo^{1,*}, Malik Mushthofa²

^{1,2} Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

Article Info

Article history:

Received: May, 9 2023

Revised: May, 29 2023

Accepted: May, 30 2023

Available online: May, 31 2023

Keywords:

Earthquake

Energy content

A/V ratio

Normalized hysteretic energy

Damage index

Abstract

The structure's response is no longer elastic at a relatively large earthquake ground acceleration. However, it is already in the inelastic phase, where hysteretic energy is one of the elements of the earthquake energy content. Structural damage cannot be avoided in this phase, generally expressed as damage index (DI). Studies on the contribution of the normalization of hysteretic energy to the SDOF structure have been carried out. The inelastic behavior of the structure is simulated according to the behavior of the Modified Takeda hysteretic model. In this study, two variables were used, namely the earthquake frequency content, expressed in terms of the A/V ratio and the vibration period of the structure (T). The results showed that the lower value of the A/V ratio tends to result in a more significant damage index for relatively rigid and flexible structures. The more flexible a structure tends to experience a greater damage index DI for high, medium, and low-frequency earthquakes. The contribution of hysteretic energy to the damage index ranges from 10-30%, and the more flexible the structure, the smaller the contribution of the hysteretic energy. Furthermore, there is also a tendency that the lower the earthquake frequency content, the smaller the contribution of normalized hysteretic energy will be accordingly.

Corresponding Author:

Widodo Pawirodikromo

widodo@uui.ac.id

Copyright © 2022 Universitas Islam Indonesia

All rights reserved

Pendahuluan

Setelah mengalami banyak perkembangan, penyediaan bangunan tahan gempa dihadapkan pada beberapa masalah. Masalah yang dimaksud adalah mulai dari penentuan *critical earthquake input*, penentuan kebutuhan kekuatan (*engineering demand parameter*) sampai dengan penentuan pemenuhan kebutuhan kekuatan (*strength demand*). Untuk itu sangat penting mengetahui distribusi *input energy* pada struktur atas *critical earthquake input* yang dipakai (Akbas dan Shen, 2003). Penentuan *critical earthquake input motions* paling tidak akan terkandung didalamnya aspek-aspek *engineering characteristics*, *seismic* atau

earthquake intensity measures (IMs) dan *earthquake energy contents*.

Studi tentang *earthquake energy contents* terhadap *earthquake ground motions* telah dilakukan sejak lama misalnya oleh Zahrah dan Hall (1982). Studi yang dilakukan mulai dari macam-macam formulasi berikut contoh *energy contents* baik pada struktur *single* maupun *multi degree of freedom* (SDOF, MDOF), pengaruh gempa frekuensi tinggi, frekuensi rendah, baik response elastik maupun *inelastic* dengan memakai beberapa *hysteretic models*. Setelah itu berkembang studi tentang *earthquake ground motions characteristics* oleh Sucuoglu dan Nurtug (1995). Ekplorasi yang dilakukan pada intinya menyajikan *input energy* per satuan

massa (E_i/m), hubungan antara E_i/m dengan V/A ratio dan plot antara *energy dissipation index* dengan *Housner intensity* (I_H). Sementara itu studi tentang *seismic* atau *earthquake Intensity Measures* (IMs) juga sudah banyak dilakukan di antaranya adalah Nguyen dkk (2021). Studi yang dilakukan memakai 19-jenis IMs berdasar 4-jenis rekaman gempa. Respons struktur *Lead Rubber Base* (LRB) diasumsikan mengikuti *Bilinear* dan *Non-linear Inelastic hysteretic models*.

Penjabaran *energy concept* yang merupakan *energy demand* untuk struktur dapat dilakukan melalui 2 metode, yaitu berdasar pada *absolute* dan *relative energy concepts* (Uang dan Bertero 1988; Amiri dkk, 2007; Kalkan dkk. 2008). Namun penelaahan komponen *energy content* pada struktur akibat gempa lebih banyak dilakukan berdasar *relative energy concept* (Khashae dkk, 2003, Mezgebo, 2015; Shiwua & Rutman, 2018; Ucar dan Merter 2018; Enduran 2020). Kalkan dkk (2008) mengevaluasi *seismic energy content* pada model struktur SDOF dan MDOF berdasar pada gempa-gempa *near* dan *far-faults*.

Kajian energi gempa juga dapat disajikan dalam bentuk *energy spectra* per satuan massa sebagaimana disajikan oleh Dindar dkk (2015), sementara itu normalisasi *hysteretic energy spectra* juga telah dilakukan oleh Ma dkk (2020). Studi tentang *seismic energy* juga dilakukan oleh Cheng dkk (2021) khususnya untuk *long period of earthquake ground motions* yang hasilnya disajikan dalam *energy spectra*. Pada sisi yang lain Jiang dkk (2015) telah memakai indeks kerusakan (*damage index*, DI) untuk menyatakan response *inelastic* struktur akibat gempa. Hal tersebut dilakukan karena terdapat korelasi antara disipasi *hystertic energy* dengan kerusakan struktur (Agrawal, 2020).

Beberapa modifikasi konsep *damage index* menurut Park dan Ang (1985) telah diusulkan. Namun demikian bahasan spesifik tentang kontribusi normalisasi *hysteretic energy* tidak/belum dilakukan. Penelitian-penelitian tersebut di atas pada hakekatnya adalah

perkembangan penelitan tentang *seismic energy contents* dan rentang bahasannya tergantung pada zamanya dan ketertarikan peneliti. Maksud penelitian dan tulisan ini adalah untuk melengkapi penelitian-penelitian sebelumnya khususnya yang ada dan berkaitan dengan *hysteretic energy* dan tujuannya adalah untuk menentukan seberapa besar kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap Park and Ang (1985) *damage index*. Lebih lanjut tulisan ini juga mengikutsertakan efek periode getar struktur (T) dan kandungan frekuensi (*frequency content*) gempa sebagai variabel studi.

Respons resonansi (*resonant response*)

Bahasan resonansi respons dapat diambil dari penyelesaian Persamaan diferensial struktur SDOF tanpa redaman akibat beban harmonik $P(t) = P_o \sin \Omega t$ (Widodo, 2018). Tampak pada penyelesaian tersebut bahwa simpangan dinamik struktur $y(t)$ akan dipengaruhi oleh frekuensi beban dinamik (Ω) dan frekuensi sudut (ω) dari struktur yang bersangkutan yang selengkapnya dapat ditulis menjadi,

$$y(t) = \frac{P_o}{k} \left[\frac{1}{1-r^2} \{ \sin(\Omega t) - r \sin(\omega t) \} \right] \quad (1)$$

yang mana P_o adalah beban akibat kerja mesin dan k adalah kekakuan struktur.

Selanjutnya Pers. (1) dapat ditulis menjadi.

$$y(t) = y_{st} \cdot DMF \quad (2)$$

Dengan y_{st} adalah simpangan statik, *DMF* adalah *dynamic magnification factor*, dan r adalah *frequency ratio* yang merupakan rasio antara frekuensi beban dinamik (Ω) dengan frekuensi sudut struktur (ω) atau,

$$r = \Omega/\omega \quad (3)$$

Tampak pada Pers. (1) bahwa apabila frekuensi getaran beban dinamik (Ω) adalah sama atau dekat sekali dengan frekuensi sudut struktur (ω), maka *frequency ratio* $r \approx 1$, dan akibatnya simpangan struktur $y(t)$ akan menjadi sangat besar. Dengan demikian *frequency ratio* tersebut akan menjadi parameter penting didalam analisis dinamik struktur atau teknik kegempaan.

Energy demand

Formulasi atau Persamaan matematik *energy demand* pada struktur SDOF sudah dibahas oleh beberapa referensi. *Energy demand* pada hakekatnya adalah suatu kerja atau usaha yang masuk (*imparted energy*) pada suatu struktur akibat guncangan suatu guncangan gempa. Sebagaimana diketahui bahwa akibat gempa suatu struktur akan mengalami goyangan (*displacement*). Karena struktur yang bergoyang adalah akibat gaya dinamik, maka selama pembebanan akan terjadi akumulasi produk antara gaya dinamik $P(t)$ dengan simpangan massa $y(t)$. Akumulasi produk antara keduanya itulah yang kemudian disebut *input energy* atau *imparted energy* pada struktur. Terhadap suatu struktur, maka *imparted energy* tersebut akan menjadi respons yang harus ditahan oleh struktur dan oleh karenanya akan menjadi kebutuhan *energy* atau *energy demand*.

Untuk membahas *energy demand* pada struktur SDOF, maka dimulai dengan

$$\int_0^{t_d} m\ddot{y}dy + \int_0^{t_d} c\dot{y}dy + \int_0^{t_d} kydy = -\int_0^{t_d} m.\ddot{y}_b dy \tag{5}$$

Yang mana t_d adalah durasi gempa, mengingat $dy = \dot{y} dt$, maka Pers. (5) dapat ditulis menjadi,

$$\int_0^{t_d} m\dot{y}\ddot{y}dt + \int_0^{t_d} c\dot{y}\dot{y}dt + \int_0^{t_d} ky\dot{y}dt = -\int_0^{t_d} m.\dot{y}_b \dot{y}dt \tag{6}$$

Berdasarkan Pers. (6) tampak bahwa durasi gempa (t_d) menjadi parameter yang sangat penting karena berhubungan langsung dengan energi, baik input energi maupun pelepasan energi yang berfungsi sebagai redaman (Uang

Ruas pertama pada Pers. (5) dapat ditulis menjadi,

$$\int_0^{t_d} m.\dot{y}dy = \int_0^{t_d} m \frac{d\dot{y}}{dt} dy = \int_0^{t_d} m.\dot{y}d\dot{y} = \frac{m.\dot{y}^2}{2} \tag{7}$$

Pers. (7) adalah bentuk energi kinetik, sehingga ruas pertama Pers. (8) pada hakekatnya adalah energi kinetik, sehingga,

$$E_k = \frac{1}{2} m.\dot{y}^2 \tag{8}$$

Persamaan diferensial struktur SDOF akibat gempa yang dinyatakan dalam Persmaan,

$$m.\ddot{y} + c.\dot{y} + k.y = -m.\ddot{y}_b \tag{4}$$

Yang mana m , c dan k berturut-turut adalah massa, koefisien redaman dan kekakuan struktur, sementara itu \ddot{y} , \dot{y} , y berturut-turut adalah percepatan, kecepatan dan simpangan massa dan \ddot{y}_b adalah percepatan tanah akibat gempa.

Untuk menjabarkan secara matematis rincian *energy demand* pada struktur maka terdapat dua cara yaitu melalui *Absolute Energy* dan *Relative Energy Equations* (Uang dan Bertero 1988). Namun demikian metode yang pertama jarang dipakai (Clough & Penzien, 1975), dengan demikian yang sering dipakai adalah *relative energy equations*. Pers. (4) pada hakekatnya adalah Persamaan gaya-gaya. Dengan demikian dalam bentuk kerja atau usaha maka Pers. (4) dapat ditulis menjadi,

& Bertero 1988). Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin lama durasi gempa (t_d), maka input energi semakin besar dan dengan demikian akan semakin berpotensi mengakibatkan kerusakan bangunan.

Sementara itu ruas kanan Pers. (5) adalah *relative input energy* atau E_i , sehingga,

$$E_i = -\int_0^{t_d} m.\ddot{y}_b.d\dot{y} \tag{9}$$

Input energy (E_i) pada hakekatnya adalah "the work done" oleh gaya geser pada fondasi akibat *displacement time history* selama

pembebanan (Uang & Bertero, 1998). Sedangkan ruas kedua Pers. (5) adalah

redaman *viscous energy* (E_v) yang dapat ditulis menjadi,

$$E_v = \int_0^{t_d} c \cdot \dot{y} \cdot dy = \int_0^{t_d} c \cdot \dot{y} \cdot \dot{y} \cdot dt = \int_0^{t_d} c \cdot \dot{y}^2 dt \quad (10)$$

Kemudian ruas ketiga Pers. (5) pada hakekatnya adalah *absorbed energy* (E_a) pada struktur yang terdiri atas *strain energy* (E_s) dan *hysteretic energy* (E_h), yang dapat ditulis menjadi,

$$E_a = \int_0^{t_d} k \cdot y \cdot dy = \int_0^{t_d} F_{ss} \cdot dy = E_s + E_h \quad (11)$$

Menurut Uang dan Bertero (1998) energi regangan (*strain energy*) dinyatakan dalam,

$$E_s = \frac{F_s^2}{2 \cdot k} \quad (12)$$

Berdasarkan penjabaran di atas, maka jelaslah bahwa energi gempa yang masuk/terkandung pada struktur akan diubah menjadi *irrecoverable energy* yaitu energi kinetik (E_k)

dan *viscous energy* (E_v), energi regangan (E_s) dan energi histeretik (E_h). Energi regangan dan energi kinetik termasuk *recoverable energy* (Dindar dkk, 2015), artinya akan bernilai nol apabila posisi struktur kembali ke tempat semula atau $y = 0$. Persamaan keseimbangan antara input energi dan pelepasan energi selengkapnya dapat ditulis menjadi,

$$E_i = E_k + E_v + E_s + E_h \quad (13)$$

Ruas sebelah kiri Pers. (5) adalah input energi gempa yang mempunyai dimensi ,

$$\int_0^{t_d} m \ddot{y} dy = F \cdot T^2 \cdot L^{-1} \cdot LT^{-2} \cdot L = F \cdot L (\text{misal } kg \cdot cm) \quad (14)$$

Energi per unit massa adalah ruas kiri Pers. (6) dibagi dengan m , adalah $\int \dot{y}_t dy = \int \dot{y}_t \dot{y} dt$ dan mempunyai dimensi,

$$\int_0^{t_d} \dot{y}_b \cdot \dot{y} dt = L \cdot T^{-2} \cdot L \cdot T^{-1} \cdot T = L^2 \cdot T^{-2} (\text{misal } \frac{cm^2}{dt^2}) \quad (15)$$

Kategorisasi kandungan frekuensi gempa

Sehubungan dengan kemungkinan terjadinya *resonant response*, studi tentang *earthquake frequency content* telah banyak dilakukan misalnya yang disajikan oleh Craifaleanu (2011). Kandungan frekuensi suatu rekaman gempa diidentifikasi melalui beberapa konsep periode getar T . Namun demikian konsep-

konsep tersebut belum dapat mengklasifikasikan kandungan frekuensi, misalnya frekuensi tinggi, medium, atau rendah. Konsep A/V ratio yang diusulkan oleh Tso dkk (1992) dipakai sebagai variabel pertama pada tulisan ini karena telah secara jelas mengklasifikasikan kandungan frekuensi. Kasifikasi tersebut adalah,

$$A/Vratio > 1,20g \cdot dt/m \text{ frekuensitinggi} \quad (16.a)$$

$$1,20g \cdot dt/m > A/Vratio > 0,80g \cdot dt/m \text{ frekuensimenengah} \quad (16.b)$$

$$A/Vratio < 0,80g \cdot dt/m \text{ frekuensirendah} \quad (16.c)$$

Konsep tersebut telah banyak diadopsi oleh para peneliti mulai dari Widodo (1995), Ajit

& Rajesh (2016), hingga Razaemanesh (2022).

Engineering Demand Parameter (EDP)

Terdapat banyak jenis *engineering demand parameter (EDP)* yang dapat dipakai mulai dari simpangan horizontal, *drift-ratio (DR)* atau *damage index*. Indeks kerusakan seperti yang diusulkan oleh Park & Ang (1985) dipakai sebagai *EDP* pada penelitian ini dan yang dinyatakan dalam,

$$DI = \frac{y_m}{y_u} + \beta \frac{\int dE_h}{F_y \cdot y_u} \quad (17)$$

Yang mana y_m dan y_u adalah simpangan maksimum dan simpangan ultimit, β adalah *deterioration factor*, E_h adalah *dissipated hysteretic energy*, F_y adalah *yield force*.

Metode penelitian

Model struktur

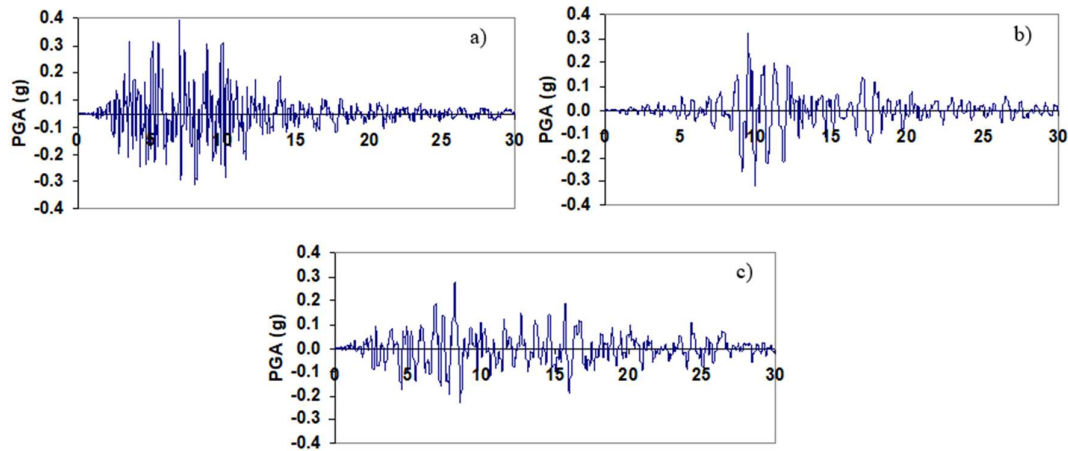
Sebagaimana pada penelitian penelitian sebelumnya, bahwa pada studi *energy demands* pada struktur akibat gempa pada umumnya dipakai model struktur *Single Degree of Freedom (SDOF)*. Karena struktur yang dipakai adalah SDOF, maka penyelesaian persamaan diferensial didasarkan atas *lumped mass* dan *stick model*. Kekakuan struktur didasarkan atas kekakuan kolom dengan tinggi 3,5 m, ukuran kolom 45/55 cm dengan penulangan 2% dan dipakai beton bertulang dengan $f_c' = 25$ MPa atau 255 kg/cm². Massa struktur $m = 51,0$ kg.dt/cm² dan kekakuan kolom akan bergantung pada periode getar (T) struktur yang dipakai.

Pada penelitian ini dipakai 3 (tiga) jenis periode getar struktur yaitu $T = 0,25$ dt, $T = 0,48$ dt dan $T = 0,75$ dt yang kesemuanya representasi dari struktur bangunan yang relatif pendek. Berdasar pada ke-3 periode getar tersebut, maka kekakuannya berturut-turut adalah $k = 32240,33$ kg/cm ($T = 0,25$ dt), $k = 8735,0$ kg/cm ($T = 0,48$ dt) dan $k = 3582,26$ kg/cm.

Berdasar beban aksial ultimit kolom, ukuran kolom, rasio tulangan dan properti bahan seperti disebut di atas, maka kolom mempunyai *column axial load ratio* $P_u/(f_c' \cdot A_g) = 0,09 < 0,10$. Dengan demikian menurut ketentuan kolom akan lebih berperilaku seperti balok yang didominasi oleh momen lentur (bukan didominasi oleh gaya aksial). Oleh karena itu, *hysteretic loops* yang dipakai disesuaikan dengan perilaku lentur balok yaitu *Modified Takeda* atau Otani *hysteretic model*.

Beban gempa

Beban gempa yang dipakai pada penelitian ini dikelompokkan menjadi gempa dengan kandungan frekuensi tinggi, menengah dan rendah, dengan ketentuan seperti yang disajikan sebelumnya. Pada tulisan ini gempa dengan frekuensi tinggi diwakili oleh rekaman gempa Kobe 15 Januari 1995, dengan kode rekaman KobeKak yang mempunyai *peak ground acceleration* $PGA = 0,345g$, *peak ground velocity* $PGV = 27,663$ cm/dt sehingga mempunyai rasio $A/V = 1,2471 > 1,20$ g.dt/m, sehingga termasuk gempa dengan kandungan frekuensi tinggi. Sementara itu frekuensi menengah diwakili oleh gempa Loma Prieta 17 Oktober 1988 dengan kode rekaman LPrGmr dengan $PGA = 0,323g$ dan $PGV = 33,049$ cm/dt, sehingga mempunyai rasio $A/V = 0,9761$ g.dt/cm² dan berdasarkan kriteria sebagaimana disebut sebelumnya gempa LPrGmr termasuk gempa dengan kandungan frekuensi medium/menengah. Selanjutnya gempa dengan kandungan frekuensi rendah adalah rekaman gempa El Centro 15 Oktober 1979 yang diwakili oleh kode rekaman EL79Cal yang mempunyai $PGA = 0,275g$ dan $PGV = 42,414$ cm/dt. Dengan demikian gempa EL79Cal ini mempunyai rasio $A/V = 0,648 < 0,80g$.dt/m dan termasuk gempa dengan kandungan frekuensi rendah.



Gambar 1. (a). Gempa KobeKak, frekuensi tinggi; (b) Gempa Loma Prieta, LPrGmr, frekuensi menengah; (c) Gempa El Centro; EL79Cal, frekuensi rendah

Program komputer

Mengingat percepatan tanah akibat gempa yang dipakai relatif besar, maka respons struktur tidak lagi bersifat elastik tetapi sudah mencapai respons inelastik. Pada umumnya percepatan tanah diawal rekaman masih relatif kecil, sehingga dalam periode itu respons struktur masih elastik. Namun demikian percepatan tanah kemudian membesar, dan pada saat respons inelastik sudah tidak dapat dihindarkan yang ditandai dengan lelehnya elemen. Karena percepatan tanah sifatnya fluktuatif, maka kekakuan elemen akan berubah-ubah tergantung dari percepatan tanah. Untuk mengakomodasi perilaku seperti itu, maka dibuat/ditulislah program komputer **MTKDin**. Dengan memakai program tersebut, maka parameter-parameter respons inelastik struktur SDOF dapat dihitung lebih mudah.

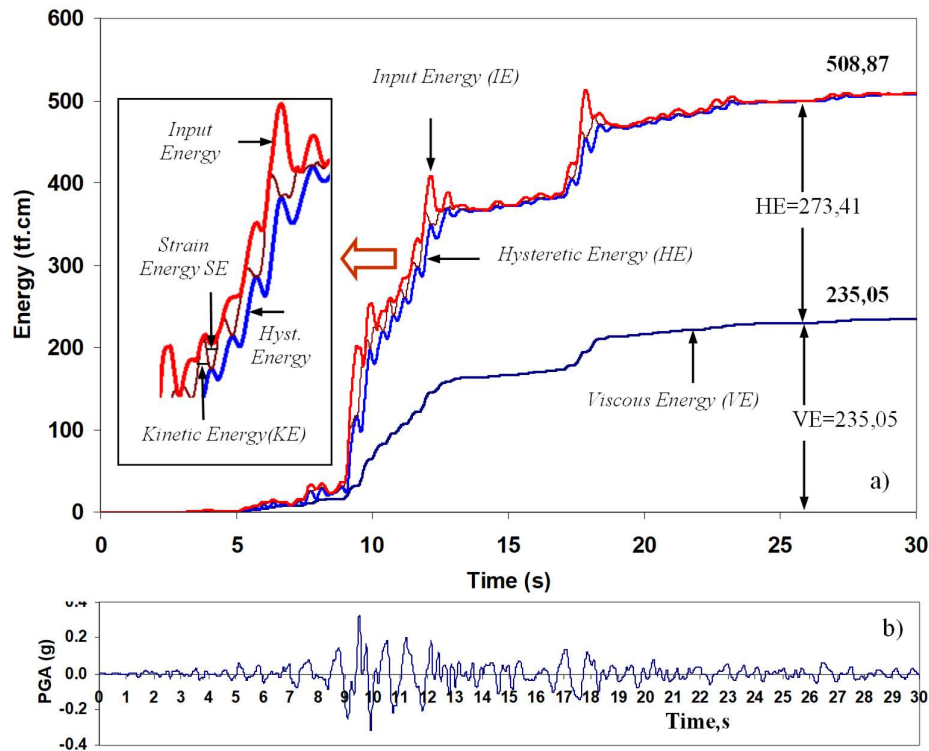
Hasil dan pembahasan

Representasi Energy Demand Time History (EDTH)

Pada umumnya respons dinamik struktur adalah simpangan horizontal, kemudian dapat dilanjutkan dengan *drift-ratio*, daktilitas simpangan, daktilitas lengkung, jumlah sendi plastis ataupun kekakuan rata-rata. Namun demikian karena tempat yang terbatas, maka pada tulisan ini lebih difokuskan pada *energy*

demands. Seperti yang tampak pada Gambar 2.(a) adalah *energy demand time history* (EDTH) struktur SDOF akibat gempa Loma Prieta kode LPrGmr (frekuensi menengah), untuk struktur dengan periode getar $T = 0,75dt$.

Pada Gambar 2.(a) tampak bahwa *time history* yang pertama adalah *viscous energy time history* yang secara matematis disajikan oleh Pers. (10). Sementara itu Gambar 2.(b) adalah rekaman gempa Loma Prieta Kode LPrGmr. Tampak pada gambar tersebut bahwa sampai dengan detik ke-5 percepatan tanah masih relatif kecil sehingga EDTH juga masih relatif kecil. Dari detik ke-5 sampai detik ke-9 tampak EDTH sudah mulai membesar. Laju *viscous energy* (VE) paling besar terjadi pada detik ke-9 sampai dengan detik ke-13. Hal ini terjadi karena *strong part record* terjadi pada rentang tersebut. Pada detik ke-13 sampai dengan detik ke-16,5 laju *viscous energy* tampak kecil dan hal ini sesuai dengan rekaman gempa pada Gambar 2.(b). Pada detik ke-16,5 sampai dengan detik ke-19 terdapat percepatan tanah yang sedikit membesar, sehingga hal ini berpengaruh terhadap laju *viscous energy*. Setelah detik ke-19 sampai detik ke-30 *viscous energy* secara pelan meningkat sampai dengan nilai $VE = 235,05 \text{ t.cm}$.



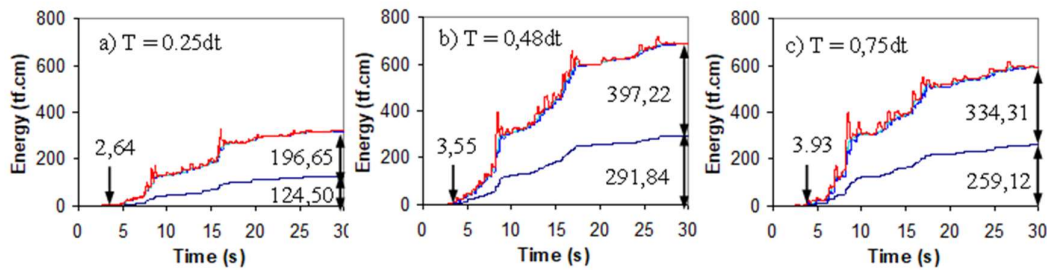
Gambar 2. (a) *Energy demand time history (EDTH)*; (b) gempa Loma Prieta 17 Oktober 1989, LPrGmr

Grafik yang ke-2 dari kiri pada Gambar 2.(a) pada *EDTH* adalah *hysteretic energy time history (HE)* sebagaimana secara matematik disajikan pada Pers. (11). Disamping *hysteretic energy (HE)* sebetulnya pada Pers. (11) terkandung didalamnya adalah *strain energy (SE)* yang secara grafis dapat dilihat pada Gambar 2.(a) pada penjelasan di bagian kotak. Tampak pada gambar tersebut bahwa secara umum pola laju *HE* adalah mirip dengan laju *VE*, laju kenaikan akan membesar apabila berada pada rentang percepatan tanah di Gambar 2.(b) yang membesar. Di akhir pembebanan, jumlah *VE* dan *HE* adalah 508,87 t.cm, sehingga *hysteretic energy demand HE* = 273,41 t.m. Diakhir detik ke-30 masih terdapat 0,41 t.cm yang merupakan gabungan antara *kinetic energy KE* dan *strain*

energy (SE). Diakhir pembebanan *kinetic energy KE* dan *strain energy* akan sama dengan nol karena pertambahan simpangan $y = 0$ dan kecepatan $\dot{y} = 0$. Normalisasi *hysteretic energy* pada akhirnya akan berkontribusi terhadap *damage index* sebagaimana disajikan di suku ke-2 pada Pers. (17).

Pengaruh periode getar T pada EDTH

Sebetulnya terdapat 2 variabel yang dapat disajikan yaitu pengaruh variabel periode getar T dan kandungan frekuensi terhadap *EDTH*. Namun demikian karena tempat yang terbatas, maka yang disajikan dalam tulisan ini adalah pengaruh periode getar T terhadap *EDTH* seperti yang disajikan pada Gambar 3.



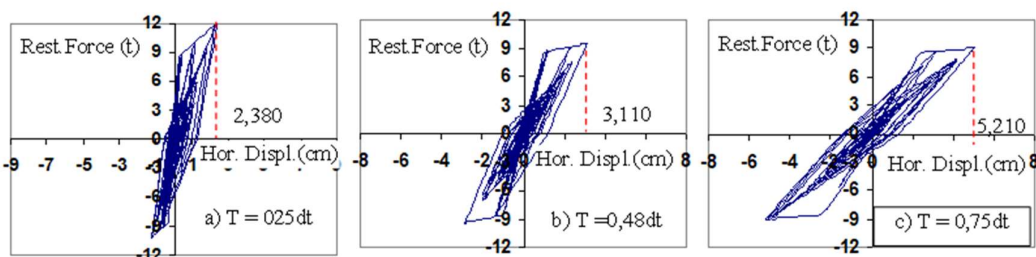
Gambar 3. *Energy demand time history* gempa EL79Cal; (a) $T = 0,25dt$; (b) $T = 0,48 dt$, (c) $T = 0,75 dt$

Pada Gambar 3.(a) adalah *EDTH* struktur kaku dengan periode getar $T = 0,25dt$, sementara untuk Gambar 3.(c) untuk struktur relatif fleksibel dengan periode getar $T = 0,75dt$. Tampak pada gambar tersebut bahwa *EDTH* untuk struktur dengan periode menengah $T = 0,48dt$ justru yang paling tinggi. Hal ini terjadi karena tingkat/derajat pengaruh *frequency content* beban gempa (dalam hal ini gempa frekuensi rendah) dengan frekuensi getaran struktur. Tampak pada gambar bahwa struktur dengan $T = 0,75dt$ baru mulai terjadinya sendi plastis pada detik ke-3,93 atau pada simpangan horisontal 2,45 cm, sedangkan struktur dengan $T = 0,48dt$ sudah mulai terjadi sendi plastis pada detik ke-3,55 atau pada simpangan horisontal 1,04 cm. Pada struktur kaku $T = 0,25 dt$, sendi plastis mulai terjadi pada detik ke-2,64 atau pada simpangan horisontal 0,28 cm. *Hysteretic energy* selanjutnya akan berpengaruh terhadap *damage index*.

Hysteretic loops akibat gempa frekuensi tinggi

Gempa frekuensi tinggi yang dipakai sebagai beban dinamik adalah rekaman gempa Kobe Jepang 15 Januari 1995 dengan kode rekaman KobeKak dengan *peak ground acceleration* $PGA = 0.345g$ dan *peak ground velocity* $PGV = 27,663 \text{ cm/dt}$, sehingga nilai A/V ratio adalah $1,247 \text{ g.dr/m}$. Karena nilai $A/V > 1,20 \text{ g.dr/m}$ maka gempa KobeKak ini termasuk gempa dengan kandungan frekuensi tinggi.

Sebagaimana disampaikan sebelumnya bahwa terdapat variabel struktur masing-masing dengan periode getar $T = 0,25, 0,48$ dan $0,75dt$. *Hysteretic loops* untuk struktur-struktur tersebut gempa KobeKak adalah seperti yang disajikan pada Gambar 4. Tampak jelas pada gambar bahwa simpangan maksimum terjadi pada struktur yang paling fleksibel yaitu struktur dengan $T = 0,75 dt$ seperti yang disajikan di Gambar 4.(c), kemudian disusul dengan struktur $T = 0,48dt$ (Gambar 4.(a)) dan struktur dengan $T = 0,25dt$ (Gambar 4.(b)). Hal tersebut wajar karena struktur yang paling fleksibel akan berdeformasi paling besar dan sebaliknya.



Gambar 4. *Hysteretic Loops* akibat gempa frekuensi tinggi, Kobekak

Dalam penelitian ini, *hysteretic loops* akibat beban gempa dengan frekuensi menengah (gempa Loma Prieta, LPrGmr) dan gempa frekuensi rendah (El Centro 1979 dengan kode rekaman EL79Gal) tidak disajikan secara visual. Namun demikian, hasil keseluruhan menunjukkan semakin rendah frekuensi gempa, maka akan mengakibatkan simpangan horisontal dan luasan *hysteretic loops* yang lebih besar.D

Kontribusi normalisasi hysteretic energy terhadap damage index (gempa frek. tinggi)

Pada Gambar 5 disajikan pengaruh gempa frekuensi tinggi terhadap *damage index* struktur yang mempunyai periode getar struktur T yang berbeda-beda. Sebagaimana secara matematis disajikan di Pers. (17) bahwa, indeks kerusakan atau *damage index* merupakan gabungan/kombinasi antara normalisasi simpangan/deformasi (suku pertama) dan normalisasi *hysteretic energy* (suku ke dua).

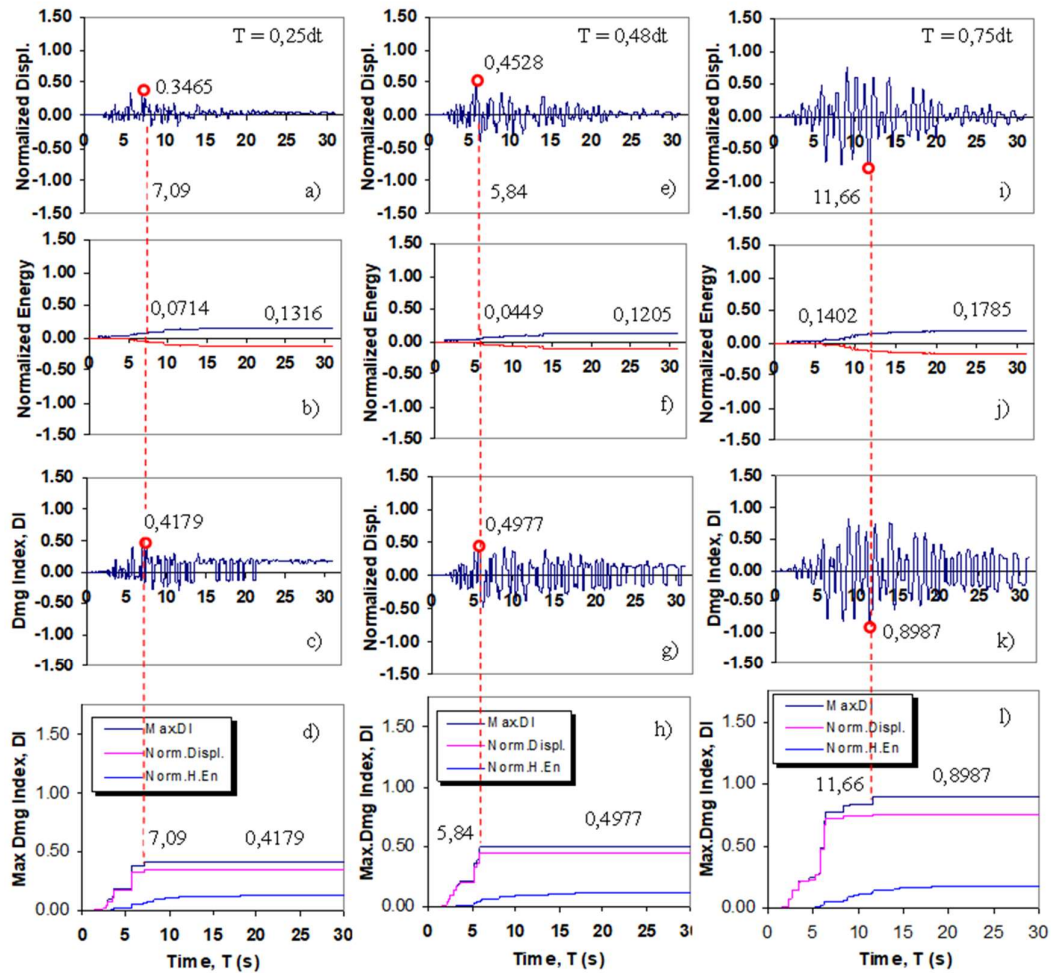
Gambar 5.(a) adalah normalisasi simpangan horisontal struktur $T = 0,25dt$ terhadap simpangan ultimit akibat gempa (KobeKak) yang secara matematis disajikan di suku pertama di Pers. (17). Pada gambar tersebut tampak bahwa normalisasi-simpangan terbesar/maksimum terjadi pada detik ke-7,09 sebesar 0,3465 sebagai kontribusi ke indeks kerusakan/*damage index* struktur. Kontribusi normalisasi simpangan terus menurun sesuai dengan simpangan struktur yang menurun juga.

Pada Gambar 5.(b) disajikan normalisasi *hysteretic energy* pada beban gempa dan struktur yang sama yang secara matematis disajikan pada suku kedua di Pers. (17). Mengingat simpangan struktur berubah-ubah positif ke negatif dan sebaliknya, maka normalisasi *hysteretic energy* disajikan dalam 2-nilai yaitu positif dan negatif. Kontribusinya terhadap indeks kerusakan mengikuti tanda simpangan horisontal yang

terjadi. Tampak jelas pada gambar tersebut bahwa pada saat normalisasi-simpangan mencapai nilai terbesar pada detik ke-7,09, nilai normalisasi *hysteretic energy* di saat itu sebesar 0,0714. Karena normalisasi *hysteretic energy* bersifat kumulatif (integral), maka di akhir pembebanan nilai normalisasi *hysteretic energy* mencapai 0,1316. Pada normalisasi simpangan struktur, setelah mencapai maksimum kemudian terus turun sampai titik nol, tetapi pada normalisasi *hysteretic energy* justru mencapai nilai maksimum pada akhir pembebanan.

Sementara itu Gambar 5.(c) adalah *damage index time history (DITH)* pada struktur dan beban gempa yang sama sebagai kombinasi antara normalisasi-simpangan horisontal dan normalisasi *hysteretic energy*. *Damage index* yang dimaksud adalah seperti yang disajikan secara matematis di Pers. (17). Tampak jelas pada gambar tersebut bahwa pada detik ke-7,09 telah terjadi kerusakan dengan nilai indeks kerusakan maksimum sebesar $DI = 0,4179$. Nilai DI tersebut merupakan kombinasi normalisasi simpangan sebesar 0,3465 dan normalisasi *hysteretic energy* sebesar 0,0714. Setelah indeks kerusakan mencapai maksimum nilainya terus menurun tetapi tidak drastis karena masih terdapat kontribusi normalisasi *hysteretic energy* yang justru semakin besar sampai di akhir pembebanan.

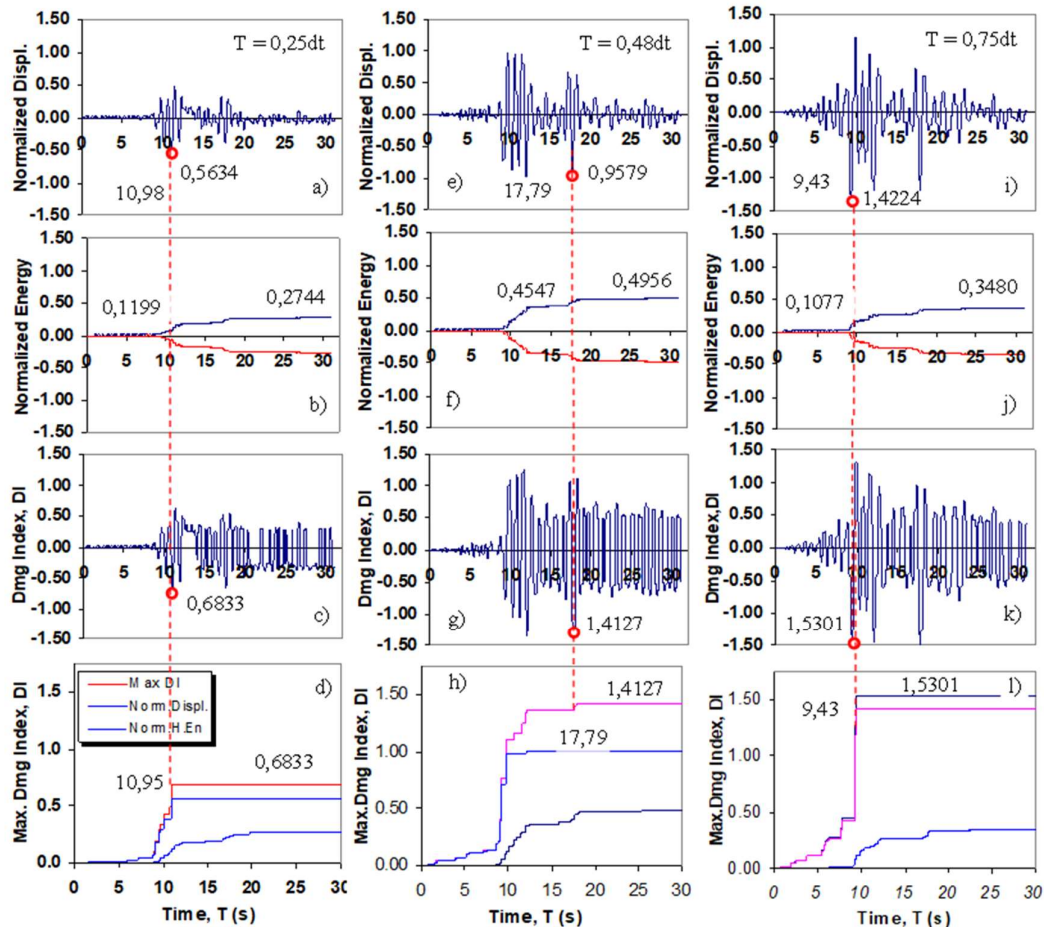
Berdasar pada gambar-gambar sebelumnya, maka dapat digambarkan perkembangan nilai indeks kerusakan sampai pada nilai maksimum. Nilai indeks kerusakan maksimum menunjukkan nilai tertinggi dan tetap nilainya sampai akhir pembebanan. Hal tersebut adalah seperti yang disajikan pada Gambar 5.(d). Pada gambar tersebut tampak bahwa nilai indeks kerusakan maksimum terjadi pada detik ke-7,09. Disamping itu juga disajikan sejarah/*history* normalisasi simpangan horisontal dan normalisasi *hysteretic energy*.



Gambar 5. Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* pada *damage index* (gempa frek. tinggi)

Pada Gambar 5.(e) sampai dengan Gambar 5.(h) adalah senada dengan Gambar 5.(a) sampai dengan Gambar 5.(d) yaitu sejarah normalisasi simpangan horisontal, sejarah normalisasi *hysteretic energy*, sejarah indeks kerusakan dan sejarah nilai indeks kerusakan sampai dengan nilai maksimum. Gambar 5.(e) sampai dengan Gambar 5.(h) adalah respons struktur untuk periode getar $T = 0,48dt$ akibat gempa yang sama yaitu KobeKak. Selanjutnya Gambar 5.(a) sampai dengan Gambar 5.(i) adalah respons struktur akibat gempa yang sama tetapi untuk struktur yang

lebih fleksibel yaitu struktur dengan $T = 0,75dt$. Berdasarkan gambar-gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa akibat gempa KobeKak, struktur yang lebih fleksibel telah mengalami indeks kerusakan yang lebih besar dan indeks kerusakan maksimum terjadi pada detik-detik yang berbeda. Apabila diperhatikan kontribusi normalisasi *hysteretic energy* untuk gempa frekuensi tinggi hanya 17,1%, 9,0 % dan 15,6 % berturut-turut untuk struktur dengan periode getar $T = 0,25dt$, $T = 0,48dt$ dan $T = 0,75dt$.



Gambar 6. Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* pada *damage index* (gempa frek. menengah)

Kontribusi normalisasi hysteretic energy terhadap damage index (gempa frek. menengah)

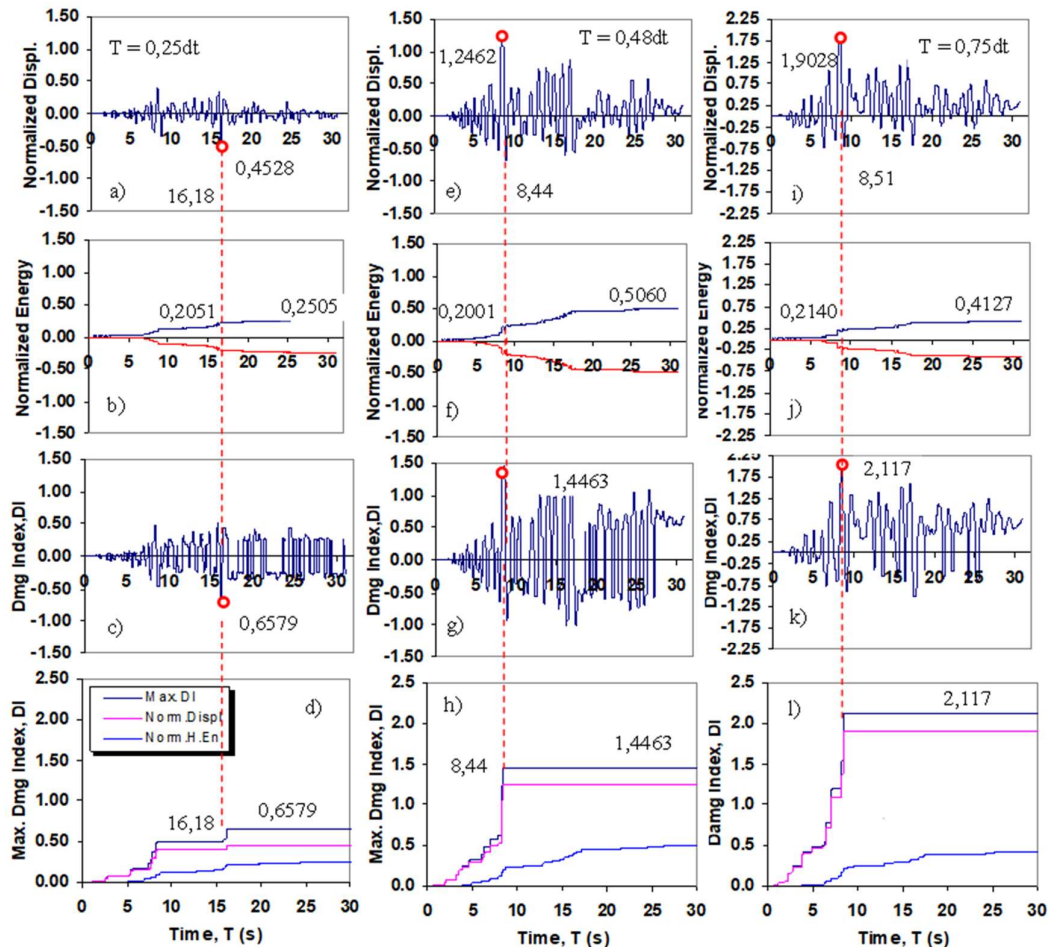
Hasil penelitian berikutnya adalah respons struktur akibat gempa dengan frekuensi menengah terhadap struktur dengan periode $T = 0,25dt$, $T = 0,48dt$ dan struktur dengan $T = 0,75dt$. Gempa dengan frekuensi menengah yang dimaksud adalah gempa Loma Prieta dengan kode rekaman LPrGmr dan nilai A/V ratio 0,977 sebagaimana disajikan di Gambar 1.(b). Hasilnya adalah seperti yang disajikan pada Gambar 6. Secara umum penjelasannya senada dengan penjelasan sebelumnya, namun yang akan dibandingkan adalah respons struktur akibat kandungan frekuensi yang berbeda yaitu antara frekuensi tinggi dan

frekuensi menengah. Pada periode getar T yang sama, Gambar 6 akan dibandingkan dengan Gambar 5.

Apabila diperhatikan pada struktur dengan periode getar $T = 0,25dt$, maka indeks kerusakan akibat gempa frekuensi tinggi adalah $DI = 0,4179$ dan akibat gempa frekuensi menengah adalah $DI = 0,6833$, sehingga terdapat kenaikan 60,5 %. Selanjutnya pada struktur dengan periode getar $T = 0,48dt$ akibat gempa frekuensi tinggi mengakibatkan indeks kerusakan $DI = 0,4977$ sedangkan pada gempa frekuensi menengah mempunyai $DI = 1,4127$, sehingga ada kenaikan sebesar 183,8 %. Akhirnya pada struktur dengan periode getar $T = 0,75dt$, akibat gempa frekuensi tinggi mempunyai DI

= 0,8987 dan untuk gempa frekuensi menengah mengakibatkan $DI = 1,5301$, sehingga terjadi kenaikan indeks kerusakan sebesar 70,3 %. Apabila diperhatikan kontribusi normalisasi *hysteretic energy*

terhadap indeks kerusakan untuk gempa frekuensi menengah adalah 17,5%, 32,2% dan 7,03% untuk struktur dengan $T=0,25dt$, $T = 0,48dt$ dan $T=0,75dt$.



Gambar 7. Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* pada *damage index* (gempa frek. rendah)

Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* (gempa frek. rendah)

Untuk gempa frekuensi rendah dipakai rekaman gempa El Centro 1979 USA dengan kode rekaman EL79Cal sebagaimana disajikan di Gambar 1.(c). Sebagaimana disampaikan sebelumnya gempa EL79Cal tersebut mempunyai $PGA = 0,275g$ dan $PGV = 42,388 \text{ cm/dt}$ sehingga mempunyai nilai $A/V = 0,648 < 0,80$, sehingga termasuk gempa dengan frekuensi rendah. Respons struktur

khususnya indeks kerusakan untuk periode getar $T = 0,25dt$, $T = 0,48dt$ dan $T = 0,75dt$ adalah seperti yang disajikan di Gambar 7.

Secara umum respons struktur $T = 0,75dt$ akibat gempa EL79Cal di Gambar 7 lebih besar dari pada respons struktur $T = 0,48dt$ sebagaimana disajikan di Gambar 6. Hal ini terjadi karena struktur dengan $T = 0,75dt$ merupakan struktur yang lebih fleksibel apalagi digoncang dengan gempa yang mempunyai frekuensi rendah. Pada struktur dengan $T = 0,48dt$ indeks kerusakan akibat

gempa frekuensi rendah (Gambar 7.(g)) hanya 2,38 % lebih besar daripada struktur yang sama akibat gempa frekuensi menengah. Sementara itu pada struktur dengan periode getar $T = 0,75dt$, indek kerusakan yang terjadi 34,8% lebih besar daripada struktur yang sama akibat gempa frekuensi menengah. Sebaliknya indeks kerusakan struktur $T = 0,25dt$ akibat frekuensi rendah justru lebih kecil 3,7% dibanding dengan struktur yang sama akibat gempa frekuensi menengah. Hal-hal ini terjadi karena gempa frekuensi rendah

EL79Cal hanya memiliki $PGA = 0,275g$ jauh lebih kecil daripada gempa frekuensi menengah LPrGmr dengan $PGA = 0,337g$. Namun dari semua hasil penelitian di atas diperoleh suatu fakta bahwa efek gempa frekuensi rendah berpengaruh signifikan hanya pada struktur yang relatif fleksibel atau struktur dengan frekuensi getaran yang rendah pula. Hal ini sudah sesuai dengan prinsip *resonant response* seperti disajikan sebelumnya.

Tabel 1. Perbandingan *damage index* struktur berdasar variabel T dan A/V rasio

Frekuensi	Gempa	PGA	$T=0,25dt$ DI	Selisih	$T=0,48dt$ DI	Selisih	$T=0,75dt$ DI
Frek. Tinggi	KobeKak	0,345g	0,4179	19 %	0,4977	80,6 %	0,8987
	Selisih	-	-2,3%	63,5%	183,6%	-	70,3%
Frek. Menengah	LPrGmr	0,337g	0,6833	106,7%	1,4127	8,3%	1,5301
	Selisih	-	-18,4%	-3,7%	2,38%	-	38,4%
Frek. Rendah	EL79Cal	0,275g	0,658	119,7%	1,4463	46,5%	2,117

Pada Tabel 1 tersebut tampak bahwa baik periode getar struktur T dan kandungan frekuensi gempa yang dinyatakan dalam A/V ratio berpengaruh terhadap nilai indeks kerusakan. Semakin rendah kandungan frekuensi gempa (A/V ratio rendah) maka akan mengakibatkan *damage index* yang semakin besar. Tampak juga bahwa semakin fleksibel suatu struktur (periode T besar) maka *damage index* yang terjadi juga semakin besar. Berdasar tabel tersebut *damage index* yang paling besar akan terjadi pada struktur yang semakin fleksibel dan dibebani dengan gempa dengan frekuensi yang semakin rendah.

Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* struktur berdasar pada variabel periode getar struktur T dan A/V ratio yang dinyatakan dalam gempa frekuensi tinggi, menengah dan rendah dapat dilihat di Gambar 7. Berdasar pada Gambar 7 tersebut, kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* berturut-turut adalah 31,2 % untuk struktur dengan periode getar $T = 0,25dt$, 13,8% untuk struktur dengan $T = 0,48dt$ dan hanya sebesar 10,1% untuk struktur dengan $T = 0,75dr$. Selanjutnya kontribusi normalisasi *hysteretic energy* untuk ke-3 jenis kandungan frekuensi gempa dan untuk ke-3 periode getar T struktur disajikan di Tabel 2.

Tabel 2. Kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index*

Frekuensi	Gempa	PGA	Kontribusi normalisasi <i>hysteretic energy</i>		
			$T = 0,25dt$	$T = 0,48dt$	$T = 0,75dt$
Frek. tinggi	KobeKak	0,345g	17,1%,	9,0 %	15,6 %
Frek. menengah	LPrGmr	0,337g	17,5%,	32,2%	7,03%
Frek. rendah	EL79Cal	0,275g	31,2 %	13,8%	10,1%

Pada Tabel 2 tersebut tampak bahwa kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* berkisar antara 10-30 %, berarti *damage index* lebih banyak

ditentukan oleh normalisasi simpangan horisontal. Terdapat kecenderungan bahwa kontribusi normalisasi *hysteretic energy* akan semakin kecil pada struktur yang semakin

fleksibel apalagi dibebani dengan gempa yang mempunyai kandungan frekuensi yang semakin rendah. Namun demikian simpulan tersebut akan semakin jelas dan signifikan apabila dipakai jumlah gempa yang lebih banyak.

Kesimpulan dan Saran

Studi tentang kontribusi normalisasi *hysteretic energy* terhadap *damage index* DI telah dilakukan pada respons inelastik struktur SDOF. Dua jenis variabel telah dipakai yaitu variabel periode getar struktur T dan kandungan frekuensi gempa dalam A/V ratio. Perilaku inelastik struktur diasumsikan mengikuti Modified Takeda *hysteretic model*. Berdasarkan pada studi tersebut maka dapatlah disimpulkan sebagai berikut ini.

Sebagaimana disampikan sebelumnya bahwa kandungan frekuensi gempa yang dinyatakan dalam nilai A/V ratio adalah sebagai variabel pertama. Berdasarkan hasil yang disajikan pada Tabel 1. tampak bahwa semakin rendah nilai A/V ratio cenderung mengakibatkan *damage index* yang semakin besar, baik untuk struktur yang relatif kaku dengan periode getar T yang relatif kecil maupun untuk struktur yang relatif fleksibel yaitu struktur dengan periode getar T yang semakin besar.

Variabel yang kedua adalah periode getar struktur T . Hasil penelitian dan juga disajikan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa semakin fleksibel suatu struktur yaitu struktur dengan periode getar T semakin besar, cenderung akan mengalami *damage index* yang semakin besar baik untuk gempa frekuensi tinggi, menengah maupun frekuensi rendah. Struktur yang semakin fleksibel akan mengalami simpangan atau normalisasi deformasi yang lebih besar. *Damage index* akan semakin besar pada struktur yang semakin fleksibel dan dibebani dengan gempa yang mempunyai kandungan frekuensi yang lebih rendah (A/V ratio rendah).

Damage index menurut Park dan Ang (1985) adalah kombinasi antara normalisasi simpangan dan normalisasi *hysteretic energy*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontribusi normalisasi *hysteretic energy*

terhadap *damage index* berkisar antara 10-30%, dan berdasar Tabel 2 dapat disimpulkan bahwa semakin fleksibel struktur (T besar) kontribusi normalisasi *hysteretic energy* akan semakin kecil. Disamping itu juga ada kecenderungan bahwa semakin rendah kandungan frekuensi gempa (A/V ratio rendah) akan mengakibatkan kontribusi normalisasi *hysteretic energy* yang semakin kecil.

Daftar Pustaka

- Agrawal A, (2020), Correlation of Structural Damage with Energy Dissipation, Master Thesis in Building Science, International Institute of Information Technology Hyderabad, India, 64 hal.
- Ajit B G, Rajesh D.P, (2016), The effects of earthquake frequency content on the seismic behavior of regular RCC Building, International Journal of Innovative Research in Science and Technology, Vol.2, Issue 11, hal.578-585.
- Akbas B, Shen J, (2003), Earthquake Resistant Design and Energy Concept, IMO Teknik Dergi, hal. 2877-2901
- Amiri G.G, Darzi G.A, Khanzadi K, (2007), Earthquake Duration and Damping Effects on Input Energy, International Journal of Civil Engineering, Vol.5, No.1, hal.14-29
- Cheng Y, Dong Y.R, Qin L, Wang Y.Y, Li Y.X, (2021), Seismic Energy Response of SDOF Systems Subjected to Long Period of Earthquake Ground Motions, Advanced in Civil Engineering, Vol.2021, hal.1-20.
- Clough R.W, Penzien J, (2003) Dynamics of Structures, Computer and Structures Inc, Berkeley USA, 572 hal.
- Craefaluanu I.G, (2011), Investigation of the frequency content of ground motions recorded during strong Vancea earthquake, based on deterministic and stochastic indices, Proceeding of the 8th International Conference on Structural Dynamics, Belgium, hal.2893-2898.

- Dindar A.A, Yalcin C, Yuksel E, Ozkaynak H, Buyukozturk O, (2015) Development of Earthquake Energy Demand Spectra, *Earthquake Spectra* Vol.31, No.3, hal. 1667- 1689.
- Enduran E, (2020), Hysteretic Energy Demand in Multi Degree of Freedom Systems Subjected to Earthquakes, *Buildings*, Vol.10, No.220, hal.1-17.
- Jiang H, Fu B, Lu X Chen L, (2015), Seismic Damage Assessment of RC Member by a Modified Park and Ang Model, *Advanced in Structural Engineering*, Vol.18, No.3, hal.353-364.
- Kalkan E, Kunnath S K, (2008), Relevance of Absolute and Relative Energy Content in Seismic Evaluation of Structures, *Advance in Structural Engineering*, Vol.11, No.1, hal.1-18.
- Khashae P, Mohraz B, Sadek F, Lew H.S, Gross J.L, (2003), Distribution of Earthquake Input Energy in the Structures, *Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standard and Technology USA*, 70 hal.
- Ma C, Chen C, Lv C, Bian J, Feng Y, Liu H, (2020), A Normalized Hysteretic Energy Spectrum for Energy Based Seismic Design, *ISCEG E3S Web Conference2*, 198, hal.1-7.
- Nguyen D.D, Lee T.H, Phan V.T (2021), Optimal Earthquake Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Models of Base-Isolated Nuclear Power Plant Structures, *Energies*, Vol.14, hal.1-19.
- Park Y.J, Ang A.H.S, (1985), Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforce Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111, No.4, pp. 722-739
- Rezaeemanesh M, Mashyayekhi M, (2022), Investigating the Correlation between the Parameter of Ground Motion Intensity Measures for Iranian data, *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 6-2, hal. 58-82.
- Shiwua A.J, Rutman Y, (2018), Assessment of Seismic Input Energy by means of New Definition and the Application in Seismic Resistant Design, *Architecture and Engineering*, Vol.1, Issue 4, hal. 26-35.
- Sucuoglu H, Nurtug A, (1995), Earthquake Ground Motion Characteristics and Seismic Energy Dissipation, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol 24, hal.1195-1213.
- Tso W.K, Zhu T.J, Heidebrecht A.C (1992), Engineering implication of ground motion A / V ratio, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 11, hal. 133–144.
- Uang C.M, Bertero V.V, (1988), Use of Energy as a Design Criterion in Earthquake Resistant Design, *Earthquake Engineering Research Center, Report No.18 UCB/EERC-88*, Colege og Engineering University of California at Berkeley, 46 hal.
- Ucar T, Merter O, (2018) Hysteretic Energy Demand in SDOF Structure Subjected to an earthquake Excitation: Analytical and Empirical Results, *Journal of Natural and Applied Sciences*, Vol.22, Issue 2, hal.364-374.
- Widodo P, (1995) *Rocking of Multistorey Buildings*, PhD Thesis Department of Civil Engineering University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 400 hal.
- Widodo P, (2018), Analisis Dinamik Struktur, *Pustaka Pelajar*, 517 hal.
- Zahrah T.F, Hall W.J, (1982), Seismic Energy Absorption in Simple Structure, *Civil Engineering Studies*, College of Engineering University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana Illinois USA, 200 hal.