

Eksplorasi rekaman gempa-gempa di Indonesia dan karakteristik diri yang dinyatakan dalam *acceleration based seismic intensity measures (SIMs)*

Widodo Pawirodikromo^{1,*} dan Astriana Hardawati²

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

Article Info

Article history:

Received: May 27, 2022

Revised: May 31, 2022

Accepted: May 31, 2022

Available online:

Jun 15, 2022

Keywords:

Earthquake

Subduction

Ground Acceleration

Digitalization

Seismic Intensity Measure

Earthquake Power

Arias Intensity

Housner Intensity

Potential Destructiveness

Abstract

Indonesia is a prone country to earthquake hazards. This situation is indicated by the number of earthquakes ranging from small to significant events. However, digital earthquake ground motion data are not available, making it difficult for further research. This paper aims to explore recordings of earthquakes that occurred in Indonesia, which are then presented in digital data and used to identify their damage potential in the form of Seismic Intensity Measures (SIMs). After being traced, it turned out that there were only six earthquakes whose ground acceleration time history was found through the papers published by researchers. The earthquakes were the Mw 6.2 Yogyakarta (2006), the Mw7.6 Padang (2009), the Mw6.1 Bener Meriah Central Aceh (2013), and the Mw6.5 Pidie Jaya Aceh (2016), the Mw7.5 Palu (2018) and the Mw6.1 Malang (2021) earthquakes. The manual digitization and processing to obtain ground acceleration data every 0.01s time step are required. Eight aspects based on acceleration and two aspects based on response spectrum have been used as parameters for Seismic Intensity Measures SIMs. The exploration results show that the source of the earthquake in Sumatra is still relatively shallow, getting more profound in the Java and Nusa Tenggara subduction. The P.G.A. of the Yogyakarta earthquake is 0.272g with a total duration of more than 50 seconds. In general, according to SNI 1726, 2019, the spectrum has covered all ground acceleration time histories. The Yogyakarta earthquake has the highest Earthquake Power, Arias Intensity, and Potential Destructiveness values, namely PE = 0.255 and IA = 2.201, and P.D. = 0.166.

Corresponding author:

Widodo Pawirodikromo
785110201@uii.ac.id

Copyright © 2022 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Engineering seismic demand dalam perancangan struktur bangunan gedung sudah didiskusikan sejak lama. *Seismic demand* yang dimaksud adalah kebutuhan kekuatan sehubungan fungsi bangunan dengan segala macam kombinasi pembebanan yang didasarkan atas *life time*, *hazard level* dan *performance level* yang diinginkan. Masa layan atau *life time* bangunan gedung standar pada umumnya adalah 50 tahun. *Hazard level* pada SNI 1726: 2019 adalah 2/3 dari 2% *probability of exceedance* (PE) selama masa layan bangunan yang dimaksud. Sementara itu *performance level* adalah tingkat kinerja

bangunan terbaik selama kemungkinan terjadinya *hazard level* yang dikehendaki. Studi yang dilakukan oleh Widodo (2019) dengan *hazard level* tersebut *performance level* yang dicapai berada diantara *life-safety* dan *collapse prevention*.

Menurut Medina dan Krawinkler (2004) penelitian *engineering seismic demand* sangatlah kompleks, yang salah satunya adalah pemilihan *ground motion parameters* yang dipengaruhi oleh banyak hal apabila *ground motion records* (GMR) tersedia di situs. Pengaruh yang dimaksud mulai dari mekanisme gempa, magnitudo *M*, adakah *backward* atau *forward directivity effects*, durasi total rekaman gempa, durasi efektif

D595, nilai-nilai percepatan (PGA), kecepatan (PGV), simpangan (PGD), *frequency content*, jarak episenter, kedalaman sumber gempa, *site effects*, *basin effect* dan *fling effect* jika ada. Persoalan akan lebih kompleks apabila di suatu kawasan baik regional maupun nasional tidak tersedia GMR atau data tidak dapat diakses oleh publik secara mudah baik untuk kepentingan kajian/penelitian sebagaimana disampaikan oleh Wahyudi (2017).

Penelitian kegempaan di Indonesia telah dilakukan oleh Nguyen (2015), namun dalam bentuk sejarah kejadian. Sementara itu Megawati dan Pan (2009) menyajikan rekaman beberapa gempa tetapi masih dalam bentuk gambar. Papatotiriou dan Athanatopoulou (2021) mengatakan bahwa rekaman gempa akan mempunyai karakteristik diri yang kemudian disebut sebagai *Seismic Intensiy Measures*, SIMs yang dapat mengakibatkan respons struktur dan kerusakan bangunan. Respons struktur yang dimaksud juga dapat disebut sebagai kebutuhan kekuatan atau *engineering demand parameter* (EDP). Penelitian tentang optimalisasi hubungan antara SIPs dengan EDP salah satunya dilakukan oleh Nguyen (2021).

Persoalan yang ada adalah di Indonesia rekaman gempa dalam bentuk digital yang dapat dipakai untuk penelitian lebih lanjut tidak tersedia. Akselerogram gempa yang terdapat pada beberapa publikasi hanya tersedia dalam bentuk gambar. Karena data digital rekaman gempa tidak tersedia, maka tujuan tulisan ini adalah mengeksplorasi data digitasi beberapa gempa di Indonesia. Karena terbatasnya waktu dan tempat, maka tulisan ini hanya mengidentifikasi SIMs berdasarkan data digital rekaman gempa pada arah *East-West Component* (EWC) sedangkan arah *North-South Component* (NSC) tidak disajikan. Hasil digitasi rekaman gempa akan sangat bermanfaat untuk keperluan analisis khususnya untuk analisis dinamik struktur.

Metode digitasi rekaman gempa

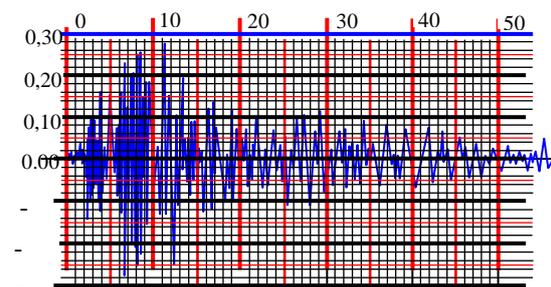
Rekaman gempa-gempa yang terjadi di Indonesia menjadi pokok masalah pada tulisan ini. Walaupun telah terjadi banyak

gempa mulai dari gempa-gempa kecil, menengah maupun gempa kuat namun rekaman gempa yang dipublikasikan masih sangat sedikit. Di samping jumlah, data rekaman gempa dalam bentuk digital juga tidak tersedia dan seandainya tersedia pun juga belum dapat diakses oleh para peneliti dengan berbagai sebab/alasan.

Proses digitasi manual dimulai dengan membuat grid-grid seperti pada Gambar 1 untuk menentukan waktu t dan percepatan tanah a untuk setiap titik/data point. Representasi pencatatan data *point* dinyatakan dalam notasi NL_i dan NL_{i+1} termasuk percepatan a_i , a_{i+1} dan waktu t_i dan t_{i+1} misalnya adalah seperti yang disajikan pada Gambar 2. Pada rentang tersebut maka durasi dan selisih percepatan yang tercatat adalah,

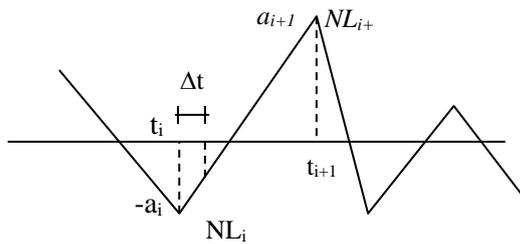
$$\Delta t_i = t_{i+1} - t_i \quad (1)$$

$$\Delta a_i = a_{i+1} - a_i \quad (2)$$



Gambar 1. Proses digitasi manual

Sementara itu, berdasarkan Gambar 2, dengan dipakainya *time step* $\Delta t = 0,01$ dt, dan dengan diketahuinya data percepatan tanah a_i , rentang waktu Δt_i maka jumlah titik percepatan pada rentang waktu tersebut adalah $n = (\Delta t_i / \Delta t)$. Dengan demikian pada rentang waktu tersebut akan terdapat percepatan tanah sejumlah n -buah. Proses digitasi dapat dilakukan dengan interpolasi linier dengan memakai program QUAKE, dengan anggapan bahwa percepatan tanah dari titik i ke titik $i+1$ berubah secara linier. Proses digitasi akan berlangsung dari nilai $NL = 1$ sampai $NL = m$.



Gambar 2. Interpolasi linier

Data rekaman gempa

Sebagaimana yang disampaikan sebelumnya bahwa rekaman gempa-gempa di Indonesia yang dipublikasikan jumlahnya sangat terbatas. Oleh karena itu rekaman gempa yang berhasil didigitalisasi juga sangat terbatas. Setelah dilakukan penelusuran dari berbagai publikasi maka rekaman gempa yang dapat dihimpun dari berbagai publikasi adalah sebagai berikut ini.

1. Rekaman gempa Yogyakarta 2006 arah EWC), NSC) oleh Elnashai (2006).
2. Rekaman gempa Padang 2009 arah NSC oleh Putra (2017).

3. Rekaman gempa Bener Meriah 2013 arah EWC dan NSC oleh Hasan (2021).
4. Rekaman gempa Pidie Jaya 2016 arah EWC dan NSC oleh Hasan (2021).
5. Rekaman gempa Palu 2018 arah EWC dan NSC oleh Sahadewa (2019).
6. Rekaman gempa Malang 2021 arah EWC dan NSC oleh Pramono (2021).

Seismic intensity measures (SIMs)

Seismic intensity measures (SIMs) dapat didefinisikan sebagai karakteristik diri gempa atau potensi internal suatu gempa yang dapat mengakibatkan kerusakan bangunan. Dengan demikian SIMs dan EDP merupakan hubungan sebab dan akibat. Cheng (2013) telah membuat kategorisasi SIMs yang secara umum dapat dibedakan menjadi 4-kelompok besar: *acceleration, velocity, displacement dan spectrum-based*. Mengingat terbatasnya tempat dan waktu maka 8-parameter *acceleration based SIMs* dan 2-parameter *spectral based* dipakai pada tulisan ini. Karena *velocity time history* tidak tersedia maka penggunaan *spectral-based SIMs* hanya dapat dilakukan secara terbatas.

Table 1. Acceleration based seismic intensity parameter (SIPs)

Intensity Parameter	Definisi/Formulasi	Unit	Kategori	Pers.
Peak Ground Acceleration	P.G.A.	g	Acc.-Based SIPs	(3)
Significant Duration, D ₅₉₅	$t_e = D_{595} = \int_{0,05}^{0,95} \ddot{y}_g^2 dt$	s	Acc.-Based SIPs	(4)
Earthquake Power, P _{E,1}	$P_{E,1} = \frac{1}{T_t} \int_0^{T_t} \ddot{y}_g^2 dt$	(cm/s ²) ²	Acc.-Based SIPs	(5)
Roots Mean Square, RMSA	$RMS_{A1} = \sqrt{P_{E,1}}$	(cm/s ²)	Acc.-Based SIPs	(6)
No. Of Zero Crossing per s	$f_{0,1} = N_C/T_t$ $f_{0,2} = \epsilon \rightarrow N_C/t_e$	s ⁻¹	Acc.-Based SIPs	(7)
Earthquake Power, P _{E,2}	$P_{E,2} = \frac{1}{te} \int_{0,05}^{0,95} \ddot{y}_g^2 dt$	(cm/s ²) ²	Acc.-Based SIPs	(8)
Arias Intensity, I _A	$I_A = \epsilon \rightarrow \frac{\pi}{2.g} \int_0^{t_t} \ddot{y}_g^2 dt$	(cm/s)	Acc.-Based SIPs	(9)
Pot. Destructiveness, PD	$P_D = \frac{I_a}{f_o^2}$	(cm.s)	Acc.-Based SIPs	(10)
Peak Acc. Spectrum, PSA	PSA	g	Spectra Based SIPs	(11)
Housner Intensity, I _H	$I_H = \int_{0,1}^{0,95} SVdt$	(cm)	Spectra Based SIPs	(12)

Selanjutnya parameter, formulasi, dan unit SIMs yang dipakai adalah seperti yang disajikan pada Tabel 1 sebagaimana disajikan oleh Cheng (2013). Makna tiap-tiap parameter SIMs yang dipakai dapat diperoleh di banyak publikasi.

Metode penelitian

Waktu, tempat dan data penelitian

Waktu penelitian dilakukan pada awal tahun 2022, sedangkan tempat penelitian adalah di Yogyakarta. Penelitian ini sebenarnya tidak dipengaruhi oleh waktu yang mana data akan bebas dari pengaruh kondisi waktu misalnya musim kemarau ataupun musim hujan. Data yang diperlukan adalah akselerogram kejadian gempa di Indonesia yang dalam hal ini dalam bentuk gambar yang dipublikasikan oleh para peneliti. Akselerogram dalam bentuk gambar kemudian didigitalisasi secara manual lalu diproses lebih lanjut.

Instrumen penelitian

Beberapa komputer program telah disiapkan dan dipakai untuk penelitian ini yaitu: 1) Program QUAKE untuk melakukan proses digitasi data manual; 2) Program SPECTRA untuk membuat respons spektrum.

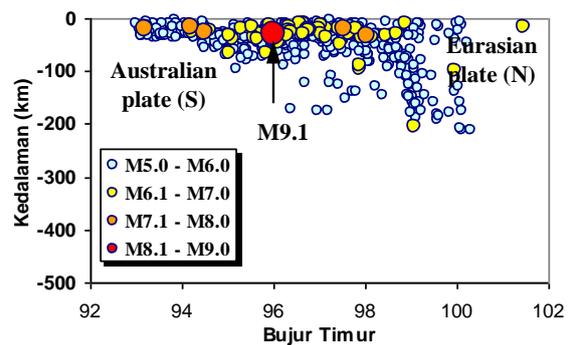
Metode analisis

Sebelum digitalisasi rekaman gempa dilakukan, maka sumber-sumber gempa di Indonesia perlu diidentifikasi dengan memakai data USGS melalui web: ANSS Search Catalog. Data yang diunduh kemudian diolah menjadi potongan episenter-episenter gempa di beberapa daerah yang ditinjau. Setelah waktu dan percepatan tanah tiap *data point* sebagaimana diilustrasikan di Gambar 2 diperoleh, maka proses digitalisasi rekaman gempa dapat diperoleh dengan memakai program QUAKE. Setelah data digital percepatan tanah akibat gempa diperoleh, maka analisis diteruskan dengan menentukan nilai-nilai parameter SIMs menurut pers.3 sampai pers.10 pada Tabel 1. Parameter *sepctral-based* SIMs yang dipakai hanyalah *potential destructiveness* P_D menurut pers.11 dan Housner Intensity I_H menurut pers.12.

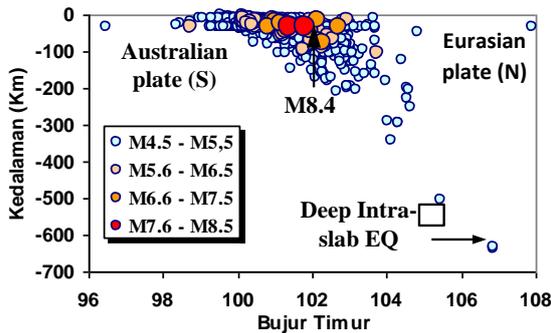
Hasil dan pembahasan

Potongan sumber-sumber gempa

Pada Gambar 3 disajikan episenter gempa-gempa memotong pulau Simeuleu Sumatera dengan orientasi potongan timur-barat. Pada gambar tersebut, gempa Aceh 26 Desember 2004 dengan M9.1 pada kedalaman 30 km terjadi pada koordinat 4.25N; 96.98E. Juga tampak pada gambar tersebut bahwa gempa-gempa yang terjadi mempunyai mekanisme *Megathrust* dimana Australian Plate menyusup (*subducted*) di bawah Eurasian Plate dengan kedalaman subduksi masih relatif dangkal yaitu sekitar 200 km. Hasil ini senada seperti yang disajikan oleh Haridhi (2018). Hal ini terjadi karena gerakan Australian Plate terhadap Eurasian Plate bukan murni subduksi tetapi *decouple-faulting* yaitu *reverse dip-slip* atau *reverse oblique*. Semua potongan yang disajikan tersebut berdasar pada data ANSS Search Catalog USGS. Pada Gambar 4 disajikan potongan episenter gempa di Bengkulu, dan tampak bahwa subduksi Australia Plate di Eurasian Plate sudah semakin dalam yaitu sudah mencapai 700 km, sudah tampak *deep intra-slab earthquake* walaupun belum signifikan. Gempa terbesar pada zona tersebut adalah M8.4 pada 12 September 2007 dengan koordinat -4.43S; 101.37E kedalaman 34 km.

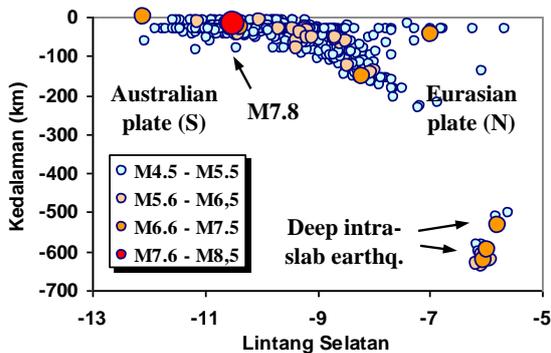


Gambar 3. Gempa Subduksi Aceh



Gambar 4. Gempa Subduksi Bengkulu

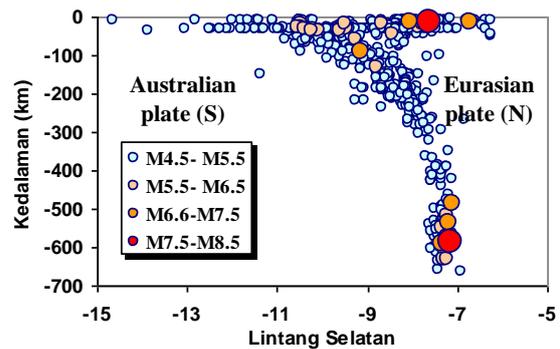
Subduksi di Jawa Timur yang memotong sekitar kota Surabaya disajikan pada Gambar 5 dengan orientasi potongan utara-selatan. Tampak bahwa subduksi di Jawa Timur sudah mencapai kedalaman 700 km, yang ditunjukkan oleh *deep intra-slab earthquakes*, hasil ini senada dengan hasil penelitian Listyaningrum (2016). Hal ini terjadi karena gerakan lempeng Australia membentuk sudut hampir 90° terhadap *plate boundary* di selatan pulau Jawa dan akibatnya seluruh *tectonic energy* direpresentasikan sebagai *subduction force*. Pada gambar tersebut juga tampak magnitudo gempa terbesar adalah M7.8 yang terjadi pada tanggal 21 Juni 1994, kedalaman 18.4km dan koordinat -10.48S; 112.83E



Gambar 5. Gempa Subduksi Jawa Timur

Potongan berikutnya adalah episenter-episenter gempa yang melintang pulau Flores. Hasilnya adalah seperti yang disajikan pada Gambar 6 dengan orientasi masih tetap utara-selatan. Pada gambar tersebut tampak bahwa aktivitas gempa subduksi semakin signifikan yang ditunjukkan oleh gempa *deep intra-slab* yang semakin banyak. Di samping itu juga

tampak bahwa sudut penunjaman subduksi semakin besar dan membentuk sudut hampir 90°. Hal ini berarti bahwa *tectonic force* sepenuhnya direpresentasikan sebagai *subduction force*, sehingga kedalaman sub-duksi menjadi maksimum. Sesuatu yang menarik adalah bahwa gempa-gempa akibat aktivitas *Flores back-arc* semakin nyata. Pada potongan ini gempa terbesar terjadi pada 17 Juni 1996 pada koordinat -7.2S; 122.6E dengan M7.9 dan justru terjadi pada *deep-intra slab earthquake* pada kedalaman -587 km. Hasil tersebut senada dengan hasil penelitian Setyana (2021). Potongan lain yang menarik adalah potongan di laut Banda dan Halmahera. Namun, karena terbatasnya tempat, maka potongan di kedua tempat tersebut tidak disajikan.

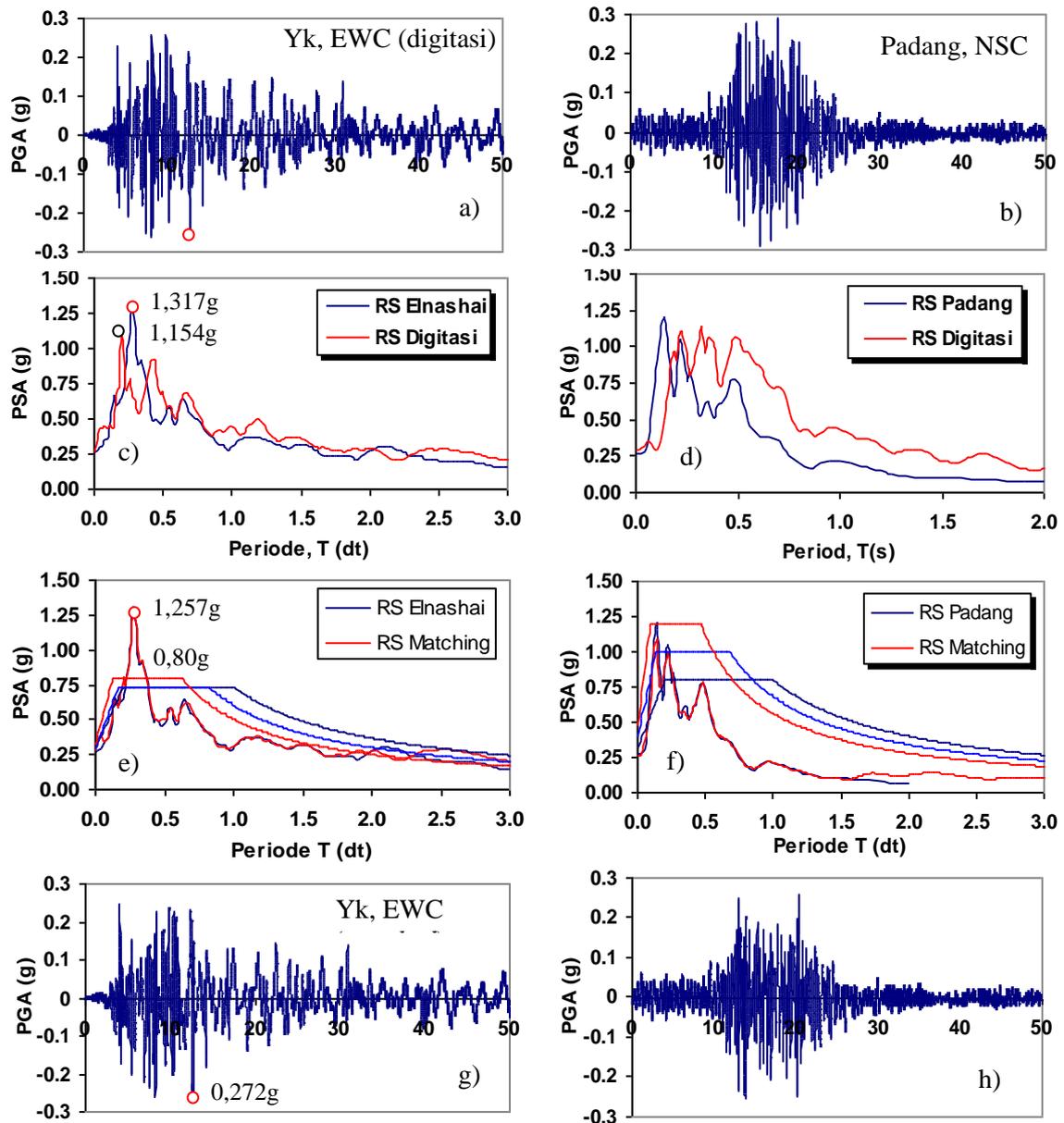


Gambar 6. Gempa Subduksi Flores

Hasil digitasi dan plot rekaman gempa indonesia

Gempa Yogyakarta 27 Mei 2006

Rekaman gempa Yogyakarta Mw6.2 27 Mei 2006 sebetulnya telah dipublikasikan oleh Elnashai (2006) tetapi hanya dalam bentuk gambar, sehingga tidak ada data digitasinya. Dengan tata cara digitasi seperti disampaikan sebelumnya, maka hasil digitasi manual gempa Yogyakarta untuk *East-West Component* (EWC) dan setelah diposes dengan memakai program *QUAKE* adalah seperti yang disajikan pada Gambar 7.a. Durasi gempa Yogyakarta arah EWC yang disajikan oleh Elnashai (2006) adalah selama 80 detik, namun demikian digitasi yang dibuat seperti yang disajikan pada Gambar 7.a hanya



Gambar 7. Gempa asli, digitasi dan *matched* untuk gempa Yogyakarta 2006 dan Padang 2009

selama 50 detik. Hal ini dilakukan karena pada bagian-bagian akhir rekaman, percepatan tanah akibat gempa sudah relatif kecil. Tampak pada gambar tersebut bahwa percepatan tanah maksimum adalah sebesar 0.262g.

Gambar 7.c adalah perbandingan respons spektrum yang asli yang disampaikan oleh Elnashai (2006) dan respons spektrum digitasi

olahan program SPECTRA masing-masing untuk arah EWC. Tampak pada gambar tersebut bahwa respons spektrum hasil digitasi memang tidak cocok/*match* dengan respons spektrum aslinya walaupun sudah relatif dekat. Dengan demikian, rekaman gempa digitasi harus diproses lagi atau dilakukan *spectral matching*, sehingga *match* dengan spektrum aslinya. Proses *spectral matching* dilakukan dengan memakai program

Seismomatch. Hasil *spectral matching* adalah seperti yang disajikan pada Gambar 7.e. Tampak tersebut bahwa antara 2-spektrum secara umum sudah saling *match*.

Pada Gambar 7.e tersebut juga dicantumkan hubungan/perbandingan antara *Elastic Design Reponse Spektrum* (EDRS) berdasar SNI 1726 (2019) di kota Yogyakarta untuk tanah lunak (hitam), sedang (biru), dan keras (merah) dengan spektrum aslinya. Tampak pada gambar bahwa EDRS di Yogyakarta dengan nilai maksimum 0,80g secara umum sudah dapat menutup (mengakomodasi) *matching response spectrum* untuk periode $T > 0,30$ detik. Adanya EDRS yang masih belum dapat mencakup sebagian respons spektrum aslinya (umumnya untuk periode T yang kecil) adalah sesuatu yang biasa terjadi.

Setelah respon spektrum rekaman gempa hasil digitasi *match* dengan respons spektrum yang asli, maka rekaman gempa digitasi berubah menjadi *matched ground acceleration* (MGA). *Matching* spektrum yang dipakai adalah *frequency domain*, sehingga baik percepatan maupun kandungan frekuensi MGA sudah berubah dari hasil digitasi aslinya. *Matched ground acceleration* untuk arah EWC disajikan pada Gambar 7.g. Tampak pada gambar tersebut bahwa percepatan tanah maksimum arah EWC sebesar 0,272g lebih besar dari aslinya yaitu 0,262g.

Perubahan kandungan frekuensi gempa tidak dapat diidentifikasi lagi karena rekaman kecepatan tanah aslinya tidak tersedia dan setelah *spectral matching* percepatan tanah yang diperoleh kebanyakan sudah sangat berubah dan cenderung sudah rusak.

Gempa Padang 30 September 2009

Percepatan tanah akibat Gempa Padang Mw7,6 30 September 2009 telah dipublikasikan oleh EERI Special Earthquake Report (2009). Menurut EERI Report (2009), hanya terdapat 1 buah rekaman akselerogram yang direkam pada tanah keras, berjarak 12 km dari pantai. Akselerasi dari digitasi yang diproses dengan program QUAKE adalah seperti di Gambar 7.b.

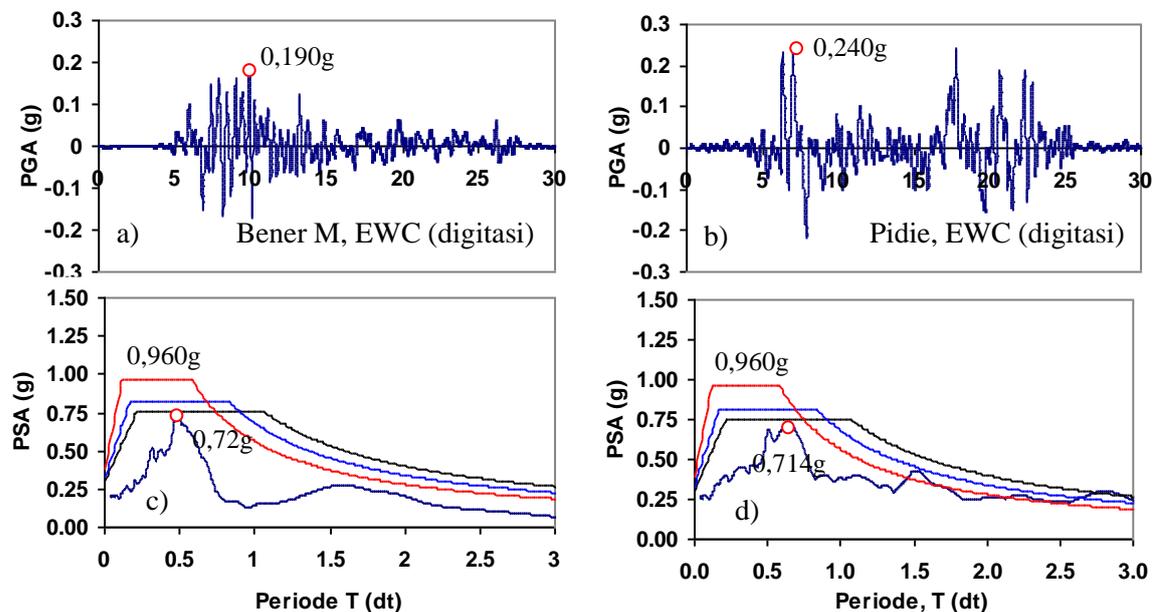
Gambar 7.d adalah perbandingan respons spektrum asli dengan respons spektrum akselerogram digitasi oleh program SPECTRA. Tampak pada gambar tersebut bahwa respons spektrum tiruan tampak mirip dengan yang asli tetapi nilai PSA lebih besar terutama pada periode T yang relatif besar. Gambar 7.f adalah *matching response spectrum* dan perbandingannya dengan EDRS kota Padang berdasar SNI 1726 (2019) untuk tanah keras (merah), tanah sedang (biru), dan tanah lunak (hitam). Tampak pada gambar bahwa EDRS dapat menutup *response spectra*, dan *matched accelerogram* adalah seperti di Gambar 7.h.

Gempa Bener Meriah, 2 Juli 2013

Satu-satunya rekaman gempa Bener Meriah Mw6,1 2 Juli 2013 yang dipublikasikan adalah oleh Hasan (2021). Gempa tersebut kemudian digitasi dan diproses dengan program QUAKE yang hasilnya seperti yang tampak pada Gambar 8.a untuk komponen EWC dengan maksimum $PGA = 0,19g$. Sementara itu respon spektra akselerogram digitasi oleh program SPECTRA adalah seperti yang disajikan pada Gambar 8.c untuk arah EWC. Di samping itu, pada gambar yang sama juga disajikan perbandingannya dengan EDRS berdasar SNI 1726 (2019) di Bener Meriah. Tampak pada gambar secara keseluruhan respons spektrum gempa Bener Meriah arah EWC sudah terakomodasi dengan baik oleh EDRS.

Gempa Pidie Jaya 6 December 2016

Senada dengan gempa Bener Meriah 2013, satu-satunya akselerogram gempa Pidie Jaya 2016 yang dipublikasikan adalah seperti yang disajikan oleh Hasan (2021). Karena tidak ada data digitasi, maka hasil program QUAKE atas digitasi dari gempa Pidie Jaya 2016 adalah seperti yang tampak di Gambar 8.b untuk arah EWC dengan $PGA = 0,24g$. Sementara itu pada Gambar 8.d disajikan respons spektrum untuk arah EWC hasil olahan program SPECTRA. Nilai maksimum arah EWC dengan $PSA = 0,71g$. Juga tampak pada gambar-gambar tersebut disajikan



Gambar 8. Akselerogram gempa Pidie Jaya dan Palu arah EWC

perbandingannya dengan EDRS berdasar SNI 1726, 2019 untuk kota Pidie Jaya. Tampak pada gambar bahwa secara umum EDRS telah mampu mencakup respons spektrum gempa Pidie Jaya arah EWC.

Gempa Palu 28 September 2018

Gempa Palu 28 September 2018 termasuk gempa yang fenomenal karena telah mengakibatkan tsunami dan likuifaksi yang sangat hebat. Sebagaimana disampaikan sebelumnya mekanisme gempa Palu adalah *left lateral strike-slip* yang secara teori kecil kemungkinannya akan mengakibatkan tsunami. Namun demikian sebagaimana dilaporkan oleh Nagai (2018) bahwa setelah gempa maka telah terjadi *massive submarine landslides* akibat percepatan tanah yang besar pada sesar bawah laut. Gerakan *massive submarine landslides* ini mencerminkan terjadinya mekanisme *dip-slip* yang menjadi penyebab terjadinya tsunami.

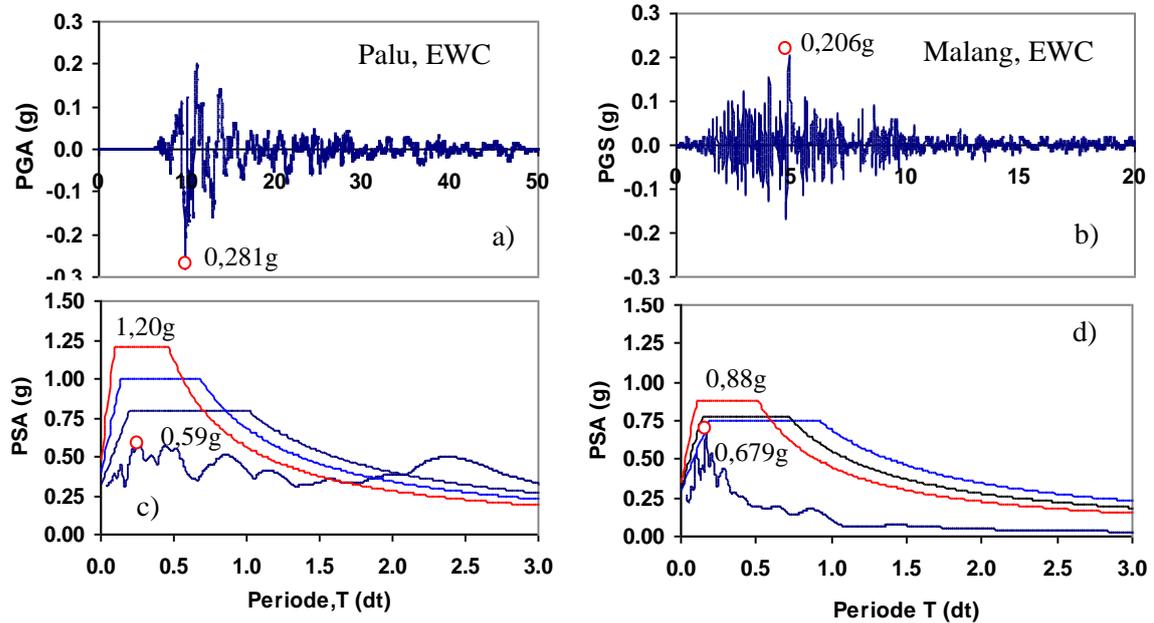
Data digitasi asli akselerogram gempa Palu juga tidak tersedia. Oleh karena itu diperlukan usaha untuk mendigitasi secara manual yang hasilnya setelah diolah dengan program QUAKE adalah seperti yang disajikan pada Gambar 9.a untuk arah EWC dengan $PGA =$

$0.281g$. Sementara itu respons spektrum hasil olahan program SPECTRA pada arah EWC disajikan pada Gambar 9.c. Pada gambar-gambar tersebut juga disajikan EDRS berdasar SNI 1726 (2019) yang secara keseluruhan telah mampu mencakup respons spektrum gempa Palu 2018.

Gempa Malang 10 April 2021

Gempa Malang 10 April 2021 dapat dikategorikan sebagai gempa Benioff karena kedalaman pusat gempa adalah 80 km dan telah dipublikasikan oleh Pramono (2021). Sama dengan gempa-gempa sebelumnya, data digital akselerogram gempa malang tersebut juga tidak tersedia, sehingga harus dilakukan digitasi manual. Hasil digitasi manual dan setelah diproses dengan memakai program QUAKE adalah seperti yang tampak pada Gambar 9.b untuk arah EWC. Percepatan tanah maksimum yang terjadi yaitu $PGA = 0.206g$ arah EWC yaitu direkam pada jarak 118 km dari episenter gempa.

Respons spektrum hasil olahan program SPECTRA pada arah EWC adalah seperti yang ditunjukkan di Gambar 9.d. Pada gambar-gambar tersebut juga disajikan EDRS di stasiun PJJR dimana gempa direkam dan



Gambar 9. Akselerogram gempa Palu dan Malang arah EWC

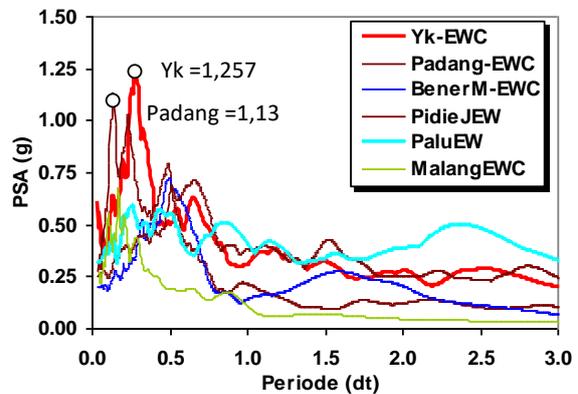
berdasar atas SNI 1726 (2019) pada gambar tersebut tampak bahwa respons spektrum EDRS telah mampu mencakup respons spektrum gempa Malang 10 April 2021.

Respons spektrum

Selain PGA, puncak *spectral acceleration* (SA) juga sering dipakai sebagai parameter SIMs yaitu sebagai indikator kerusakan bangunan akibat gempa. Pengembangan respons spektrum sebagai indikator kerusakan kemudian dikembangkan oleh banyak peneliti mulai dari Cordova (2001) sampai dengan pengembangan lebih lanjut oleh Deng (2017).

Selain itu SV juga dipakai pada Houser intensity I_H sebagai salah satu parameter SIMs sebagaimana disajikan pada pers.12. Tampak pada Gambar 10 bahwa gempa Yogyakarta arah EWC mempunyai *spectral acceleration* yang paling tinggi yaitu $PSA = 1,257g$, kemudian disusul oleh gempa Padang dengan $PSA = 1,13g$. Namun demikian puncak *spectral velocity* SV gempa Palu justru yang paling besar yaitu $SV = 188,35$ cm/dt disusul gempa Pidie Jaya dengan $SV = 170,02$ cm/dt dan kemudian gempa Yogyakarta dengan $SV = 114,16$ cm/dt seperti yang ditunjukkan pada

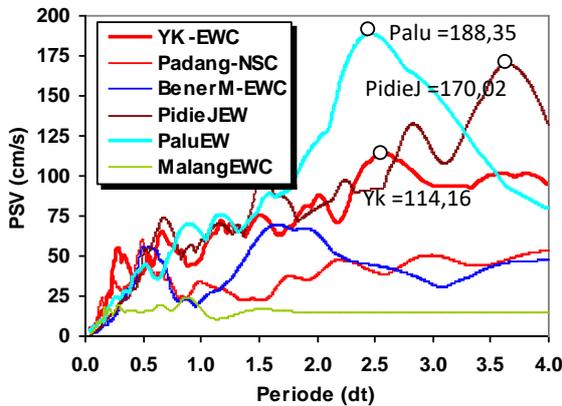
Gambar 11. Untuk keperluan tersebut diperlukan suatu analisis lebih lanjut mengenai gempa mana yang akan mengakibatkan kerusakan yang lebih besar.



Gambar 10. Spectral Acceleration (S.A.)

Earthquake power $P_{E,1}$ dan arias intensity I_A

Earthquake Power PE sebagaimana disajikan pada pers.5 pada awalnya diusulkan oleh Housner pada tahun 1975 sebagaimana disampaikan oleh Uang dan Bertero (1988), sementara itu Arias intensity I_A diusulkan oleh Arias (1970). Kedua parameter tersebut tetapi

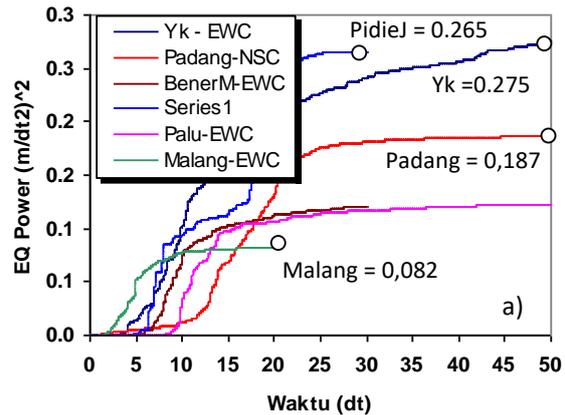


Gambar 11. Spectral velocity (S.V.)

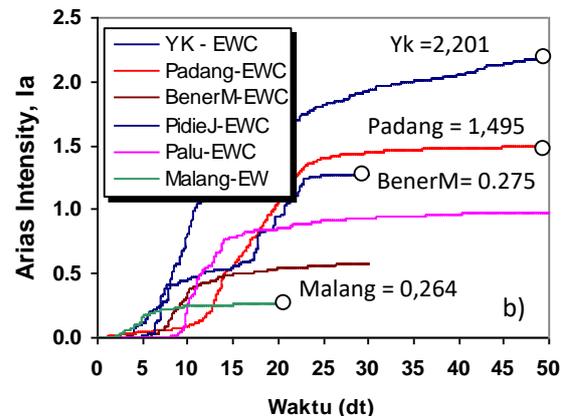
masih tetap digunakan sampai sekarang misalnya oleh Nguyen (2021) dan Alzate (2021). *Earthquake Power* dimaksudkan untuk menunjukkan daya rusak (*damage potential*) gempa terhadap kerusakan struktur. Sebagaimana disajikan pada Gambar 12, gempa Yogyakarta mempunyai nilai yang paling tinggi yaitu $P_{E,1} = 0,275$, kemudian gempa Pidie Jaya dengan $P_E = 0,265$ dan disusul oleh gempa Padang dengan $P_{E,1} = 0,187$. Namun demikian sebagaimana disajikan pada Tabel 2, nilai *Earthquake Power* $P_{E,2}$ yang paling besar adalah gempa Padang dengan $P_{E,2} = 0,499$, gempa Pidie Jaya dengan $P_{E,2} = 0,466$ dan kemudian gempa Yogyakarta dengan $P_{E,2} = 0,333$. Nilai-nilai tersebut merupakan fungsi lurus dengan percepatan tanah dan fungsi terbalik dengan durasi gempa.

Sementara itu grafik Arias intensity I_A gempa-gempa yang dimaksud adalah seperti yang disajikan pada Gambar 13. Pada Gambar tersebut tampak bahwa gempa Yogyakarta mempunyai nilai Arias intensity yang paling besar yaitu $I_A = 2,201$ tcm, gempa Padang dengan $I_A = 1,495$ tcm. Tampak pada Gambar 12 dan Gambar 13 bahwa gempa Malang mempunyai nilai P_E dan I_A yang paling rendah. Hal ini terjadi karena keduanya merupakan fungsi langsung atau lurus dengan percepatan tanah. Berdasarkan hasil-hasil di atas ternyata tidak ada satu gempa pun yang paling dominan yang menghasilkan nilai-nilai maksimum untuk semua parameter. Namun demikian, gempa Yogyakarta sering me-

nempati nilai-nilai atas. Pada Tabel 2 disajikan rangkuman nilai-nilai maksimum setiap parameter SIMs gempa-gempa di Indonesia hasil digitasi khususnya pada arah EWC. Gempa-gempa arah NSC tidak disajikan pada tulisan ini karena keterbatasan tempat.



Gambar 12. Earthquake Power, $P_{E,1}$



Gambar 13, Arias Intensity, I_A

Potential destructiveness P_D dan housner intensity I_h

Araya dan Saragoni (1980) mensuskan Potential destructiveness P_D yaitu suatu konsep untuk mengetahui destructiveness potential suatu gempa terhadap kemungkinan kerusakan pada struktur Sementara itu Housner intensity I_H diusulkan oleh Housner (1952) yang pada awalnya untuk mengetahui dampak gempa terhadap tegangan atau kerusakan struktur.

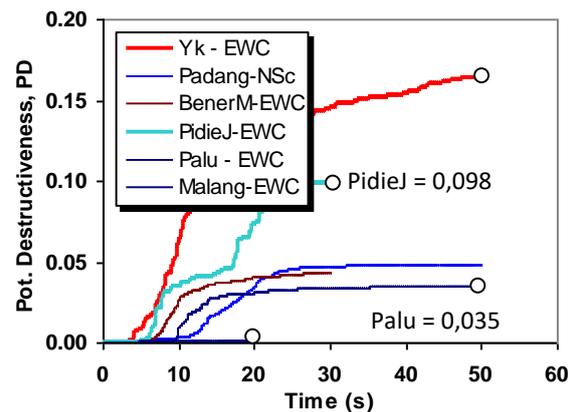
Tabel 2 *Seismic Intensity Measures (SIMs) tipikal gempa-2 di Indonesia*

No	Gempa	Seismic Intensity Parameters (S.I.P.s)									
		PGA	D ₅₉₅	P _{E1}	RMSA1	f ₀	P _{E2}	I _A	P _D	PSA	I _H
		Intensity Values (IVs)									
1	Yogya 2006-EWC	0.272	37,1	0.275	0.525	3.644	0.333	2.20	0.166	1.258	152.4
2	Padang 2009-EWC	0.257	16,82	0.187	0.432	5.536	0.499	1.495	0.048	1,133	82.39
3	Bener M-2013-EWC	0.190	14.43	0.119	0.346	3.633	0.224	0.575	0.043	0,721	104.3
4	Pidie J, 2016-EWC	0.240	16.44	0.265	0.515	3.594	0.436	1.276	0.098	0.714	160.8
5	Palu, 2018-EWC	0.281	19.08	0.123	0.35	5.263	0.289	0.981	0.035	0.591	199.5
6	Malang 2021-EWC	0.206	8.49	0.082	0.287	13.518	0.174	0.264	0.001	0,679	37.49

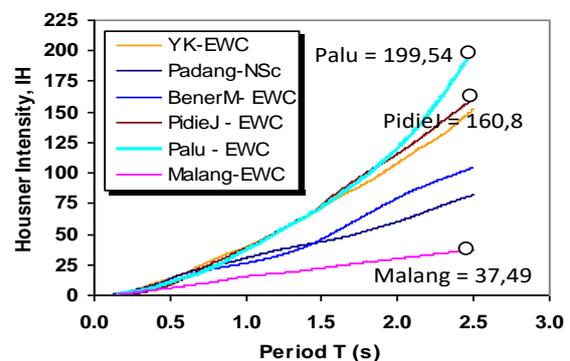
Tampak pada Gambar 14, ternyata gempa Yogyakarta mempunyai *potential destructiveness* yang paling tinggi yaitu $P_D = 0,166$, kemudian baru disusul oleh gempa Pidie Jaya dengan $P_D = 0,098$. Tampak bahwa nilai P_D gempa Malang sangat kecil yaitu hanya mempunyai $P_D = 0,001$. Nilai P_D akan bergantung pada energi gempa yang ditunjukkan langsung oleh Arias *intensity* I_A dan berbanding terbalik dengan kuadrat *number of zero crossing* f_0 tiap unit waktu. Dengan demikian semakin tinggi nilai *earthquake frequency content* yang dalam hal ini ditunjukkan oleh nilai f_0 , maka nilai *potential destructiveness* P_D akan semakin kecil.

Selanjutnya Housner *intensity* I_H yang secara formulasi disajikan di pers.12, maka grafik nilai-nilainya adalah seperti yang disajikan pada Gambar 15. Pada gambar tersebut tampak bahwa gempa Palu 2018 justru mempunyai nilai Housner *intensity* yang paling besar yaitu $I_H = 199,54$ cm. Hal ini terjadi karena I_H diperoleh dari luasan *spectrav velocity* (SV) dengan nilai SV gempa Palu 2018 menurut Gambar 11 adalah yang paling besar. Nilai I_H berikutnya adalah gempa Pidie Jaya yang mempunyai $I_H = 160,8$ cm. Hasil ini wajar karena menurut Gambar 11, nilai SV gempa Pidie Jaya memang cukup besar dan berada sedikit di bawah gempa Palu 2018. Tampak pada gambar tersebut bahwa gempa Malang arah EWC mempunyai nilai Housner *intensity* I_H yang paling kecil. Hasil ini juga berkesesuaian dengan SV yang disajikan pada Gambar 11. Hasil penelitian

Nguyen (2021) juga menunjukkan bahwa PGV mempunyai peran penting dalam penentuan respons struktur. Penelitian lebih lanjut masih sangat diperlukan.



Gambar 14. Potential Destructiveness, P_D .



Gambar 15. Housner intensity I_H

Berdasarkan hasil di atas, jelas bahwa di antara parameter SIMs yang dipakai, tidak ada satu pun gempa yang semua nilai-nilainya paling

tinggi. Namun demikian gempa Yogyakarta 2006 dan gempa Pidie Jaya 2016 di beberapa parameter cenderung menempati peringkat-peringkat teratas. Hal ini juga didukung oleh fakta bahwa kedua gempa tersebut mempunyai percepatan tanah maksimum yang cukup besar dengan kandungan frekuensi gempa (ditunjukkan nilai f_0) yang relatif rendah. Namun demikian gempa-gempa tersebut masih perlu dikoreksi, perlu ditingkatkan keakuratannya. Gempa Yogyakarta 2006 misalnya bukanlah hasil rekaman asli, tetapi menurut Elnashai (2006). Akselerogram tersebut adalah akselerogram sintesis hasil dari *back-analysis* runtuhnya Gedung Olahraga Amongrogo. Tampak bahwa bangun *Earthquake Power* P_E , *potential destructiveness* P_D , dan *Arias intensity* I_A hampir sama, hal ini disebabkan ketiga-tiganya berbasis pada *ground acceleration time history*.

Kesimpulan

Tulisan ini adalah hasil penelitian yang bersifat eksploratif, artinya rekaman gempa yang diperoleh adalah hasil digitasi manual karena data digital gerakan tanah akibat gempa tidak tersedia/tidak dapat diakses. Terhadap hasil penelitian ini, maka dapat disimpulkan menurut butir-butir sebagai berikut ini.

1. Berdasarkan potongan sumber-sumber gempa subduksi, diperoleh informasi bahwa kedalaman subduksi di Sumatera khususnya di Aceh masih relatif dangkal yaitu hanya ± 200 km, tetapi semakin ke selatan, misalnya di Bengkulu, subduksi semakin dalam, gempa-gempa *deep-intra-slab* semakin banyak. Subduksi di pulau Jawa yang berorientasi utara-selatan dan sudah semakin dalam karena arah gerakan lempeng Australia hampir tegak lurus terhadap Jawa. Sudut penunjaman semakin besar dan gempa *deep intra-slab* semakin banyak utamanya di kepulauan Nusa Tenggara.
2. Terdapat 6 rekaman gempa yang berhasil didigitasi yaitu gempa Yogyakarta 2006, gempa Padang 2009, gempa Bener Meriah Aceh Tengah 2013, gempa Pidie Jaya 2016, gempa Palu 2018 dan gempa Malang 2021. Hanya gempa Yogyakarta dan gempa Padang yang dapat dilakukan *matching* spektrum respons karena spektrum target keduanya telah tersedia. Gempa Yogyakarta ternyata adalah gempa yang mempunyai PGA relatif tinggi yaitu 0,272g dengan durasi total yang paling panjang yaitu lebih dari 50 detik. Secara umum EDRS menurut SNI 1726 (2019) telah mampu menutup/mencakup semua *ground acceleration time history* di tempat dimana gempa direkam. Hanya rekaman gempa dengan arah EWC yang disajikan karena keterbatasan tempat dan waktu.
3. Sepuluh parameter SIMs telah dipakai untuk mengidentifikasi karakteristik diri atau potensi rekaman gempa yang dapat menimbulkan kerusakan pada struktur. Mengingat begitu banyaknya jenis parameter SIMs yang diusulkan oleh para peneliti, parameter yang bersifat *acceleration-based* adalah yang paling banyak dipakai dan sebagian yang lain adalah *spectral-based* parameter. Gempa Yogyakarta mempunyai PSA tertinggi yaitu 1,257g, tetapi gempa Palu yang mempunyai PSV tertinggi yaitu sebesar 188,35 cm/dt. Hal itulah yang selanjutnya mengakibatkan gempa Palu 2018 mempunyai nilai Housner *intensity* yang paling besar yaitu $I_H = 199,54$ cm.
4. Gempa Yogyakarta mempunyai nilai *Earthquake Power* yang paling tinggi yaitu $P_E = 0,255$ dan *Arias intensity* yang paling tinggi juga yaitu $I_A = 2,201$ tcm, baru disusul oleh gempa Pidie Jaya dengan $P_E = 0,265$ dan gempa Padang dengan $I_A = 1,495$. Pada sisi yang lain gempa Yogyakarta juga mempunyai nilai *potential destructiveness* paling tinggi yaitu $P_D = 0,166$ baru disusul dengan gempa Pidie Jaya dengan $P_D = 0,098$ cm.dt. Diduga gempa Yogyakarta 2006 akan mengakibatkan kerusakan yang paling besar di antara gempa-gempa yang ditinjau. *Earthquake Power* P_E , *Potential*

Destructiveness P_D dan Arias intensity I_A mempunyai bangun yang serupa karena semuanya dihitung berdasarkan parameter yang sama yaitu *ground acceleration time history*. Diperlukan penelitian lebih lanjut tentang hubungan antara SIMs dan EDP.

Daftar Pustaka

- Alzate Y.F.V, Hurtado Y.E, Pujades L.G. (2022). New Insight into the relationship between seismic intensity measures and non linear structural response. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol, 20, hal. 2329-2365.
- Araya R, Saragoni G.R. (1980). *Earthquake Accelerogram Destructiveness Potential Factor*. Proceeding of the 8th World Conference on Earthquake Engineering Istanbul Turkey, Vol.8, hal 483-490.
- Arias A. (1970). A Measure of Earthquake Intensity, Seismic Design for Nuclear Power Plant, Massachusetts Institutes of Technology, Ed. R.J Hansen hal. 438-469
- BSN. (2019). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, Standar Nasional Indonesia SNI 1726, 2019.
- Cheng Y, Intensity Measure for Seismic Response Prediction and associated Ground Motion Selection and Modification, 2013, PhD Thesis Department of Structural Engineering and Geotechnics, Sapienza University of Rome, 178 p.
- Cordova P.P, Deierlein G.G, Mahanny S.S.F, Cornel C.A, 2001, Development of two parameter seismic intensity measure and probabilistic assessment procedures, Pacific Earthquake Engineering Research Center, hal,1 – 20.
- Deng P. Pei S, Hartzell S, Luco N, Rezaeian S, 2017, A response spectrum based indicator for structural damage prediction, *Engineering Structures*, Vol. 166, hal. 546-555.
- EERI. 2009, Learning from earthquake, The Mw7.6 Western Sumatra Earthquake September 30, 2009, The EERI Special earthquake Report.
- Elnashai A.S, Kim J.S, Yun J.G, an. Sidarta D, 2006, The Yogyakarta Earthquake of May 27, 2006, Yogyakarta, 2006., Mid America Earthquake Center, M.A.E. Report 07-02, University of Illinois at Urbana Champaign.
- Hasan M, Saidi T, Afifudin M, Stiawan B, 2021, The assessment and strengthening proposal of building structure after the Pidie Jaya earthquake in December 2016, *Journal of King Saud University, Engineering Science*, hal 1-aa.
- Haridhi H.A, Huang B.S, Wen K.L, Denzema D, Prasetyo R.A, Lee C.S, 2018, A study of large earthquake sequence in Sumatra subduction zone and its possible implications, *Terr. Atmos, Ocean Sci*, Vol.29, No.6, hal.635-652.
- Housner A, 1952, Spectrum Intensities of Strong Motion Earthquakes, Division of Engineering, California Institute of Technology, hal..21-36.
- Listyaningrum R, Muhlis F, Soesilo J, Palupi I.R, 2016, Subduction Zone in java Island Using Primary Wave Tomography from Jacobian Relocation Method Based on ak135 Velocity Model, International Symposium on Earthquake Hazard and Disaster Mitigation, hal 020011-1-6.
- Medina R.A, Krawinkler H, 2004, Seismic Demand for Non-deteriorating Frame Structure and Their Dependence on Ground Motions, Pacific Earthquake Engineering Research Institute Report, 335-hal.
- Megawati K, Pan T.C, 2009, Regional Seismic Hazard Posed by the Mentawai Segment of the Sumatran Megathrust, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.99, No,2A, hal. 566-584.
- Nagai K, Muhari A, Pakoksung K, Watanabe M, Suppasri A, Arikawa T, Imamura F, 2021, Consideration of submarine

- landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay, *Coastal Engineering Journal*, Taylor and Francis, Vol.3, No.4, hal. 446-466.
- Nguyen N, Griffin J, Cipta A, Cummins P.R, 2015, Indonesia's Historical Earthquakes, *Australian Geoscience*, 78 hal.
- Nguyen D.D, Lee T.H, Phan V.T, 2021, Optimal Seismic Intensity Measures for Probabilistic Seismic Demand Models for Based-Isolated Nuclear Power Plant Structures, *Energies*, Vol.14, hal. 1-19.
- Papasotiriou A and Athanatopoulou A, 2021, Seismic Intensity Measures Optimized for Low-rise Reinforced Concrete Frame Structures, *Journal of earthquake Engineering*, hal 1-39.
- Pramono S, Habibah F, Ardian F.A, Audi K, Karnawati D, Sadly M, Rahmat T, Permana D, Syukur F, 2021, Preliminary Engineering Seismology Report from Strong Motion Records for Malang Earthquake East Java Indonesia, 10th April 2021, Indonesia Agency of Meteorology, Clymatology and Geophysics.
- Putra R.R, 2017, Reconnaissance Report of the September 30, 2009 Padang Earthquake, West Sumatra Province of Indonesia, *Proceeding of 4th International Conference of Technical and Vocation Education and Training Padang*, hal 986-994.
- Sahadewa A, Irsyam M, Hanifa R, Mikhail R, Pamumpuni A, Nazir R, Pramono R, Sabarudin A, Faisal , Ridwan M, Himawan A, Simatupang P, Alatas I.M, Harminto D.S, Djarwadi D, Kartawiria A, Djumaidi M, Suhendra I, Kawanda A, Widodo Y, 2019, Overview f the 2018 Palu Earthquake, *Proceeding of the Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, Rome Italy, 857-869.
- Setyana A.H, 2021, Megathrust Jawa and Nusa Tenggara, Interplate Jawa Timur dan Back-arc Thrust Bali-Flores, *Web Webinat Institut Sepuluh Nohangvember Surabaya*.
- Uang C.M, Bertero V.V, 1988, Implication of Recorded Ground Motions on Seismic Design of Building Structures, *Earthquake Engineering Reerach Center, University Of Berkeley U.S.A.*
- Wahyudi D.I, 2017, Pemilihan dan Penskalaan Akselerogram Gempa Nyata agar Sesuai dengan Spektrum Respons SNI 1726, 2012, *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, Vol.15, No.2, hal. 67-72.
- Widodo P, Makrup L, Teguh M, Suryo B, 2019, Comparison of 10% and 2/3 of 2% PE for 50 years seismic hazards at Yogyakarta Special Province (Y.S.P.) Indonesia, *Constructed from Probabilistic Seismic Hazard Analysis, International Journal of Civil Engineering and Technology*, Vol.9, Issue 9, hal.1593-1620.