

Evaluasi struktur gedung Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia berdasarkan percepatan gempa menggunakan konsep probabilistik

Wisnu Erlangga¹, Lalu Makrup^{2,*}, Malik Mushthofa³ dan Suharyatmo⁴

¹Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Jakarta

^{2,3,4} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

Article Info

Article history:

Received: Jan 26, 2022

Revised: May 31, 2022

Accepted: May 31, 2022

Available online:

Jun 15, 2022

Keywords:

Gerakan tanah gempa

Time history

Probabilistik

Respon struktur

Abstract

Earthquake shocks generally cause the biggest shocks in building structures. Earthquake waves, generated by an earthquake event, are the main cause of this shaking. A new building of the Faculty of Law, Islamic University of Indonesia, was selected for this research to evaluate the effect of earthquake shaking on the structural response. A developed time history-based artificial earthquake ground motion was used in the structural analysis. Furthermore, the time history was developed based on spectral matching with target spectra derived from a probabilistic seismic hazard analysis. This analysis results in the building structure's seismic response, which is then evaluated based on the parameters set by the earthquake standards/regulations for buildings. This building is relatively safe against design earthquake shocks based on the results.

Corresponding Author:

Lalu Makrup
lalu.makrup@uii.ac.id

Copyright © 2022 Universitas Islam Indonesia
All rights reserved

Pendahuluan

Beban gempa untuk bangunan bertingkat banyak dapat dikembangkan secara *deterministic* maupun secara *probabilistic*. Kejadian gempa di permukaan bumi adalah disebabkan oleh pergerakan lempeng tektonik. Gempa bumi yang terjadi di dalam *fault* tektonik atau yang terjadi di dalam *slab* dari *plat* tektonik akan dirambatkan ke segala arah di permukaan bumi. Gelombang gempa ini akan sampai di tempat tertentu yang didefinisikan sebagai *site* (*site* tempat studi). Untuk evaluasi struktur gedung terhadap beban gempa maka diperlukan gerakan tanah gempa pada *site* (tempat) dari gedung untuk studi. Gerakan tanah gempa dari sebuah *site* dapat diturunkan secara *deterministic* ataupun secara *probabilistic*. Untuk Gedung Fakultas Hukum UII Jalan Kaliurang KM 14.5 (Gambar 1) akan dikembangkan *time history* gerakan tanah gempa secara *probabilistic*.

(Gambar 2) adalah contoh dari gerakan tanah sebuah gempa yang disebut sebagai *time history* gerakan tanah gempa atau dapat disebut *time history* saja.

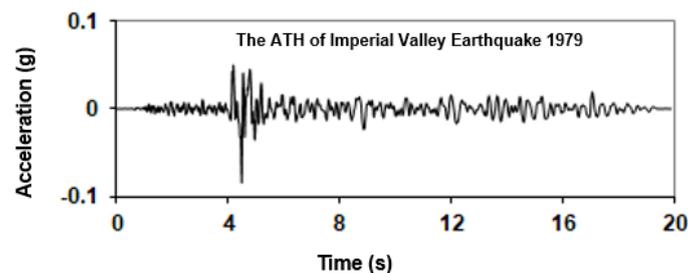


Gambar 1. Gedung Fakultas Hukum UII
(sumber: <https://law.uui.ac.id/>)

Berkaitan dengan pengembangan *time history* gerakan tanah gempa dan evaluasi struktur, beberapa ahli dibidang kegempaan dan analisis struktur telah melakukan penelitian tentang topik ini. Saputro (2016) telah melakukan analisis untuk mengembangkan

time history artifisial di batuan dasar berdasarkan analisis *seismic hazard probabilistic*. *Time history* hasil analisis ini kemudian dirambatkan ke permukaan tanah. *Time history* di permukaan tanah ini kemudian digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis struktur untuk melihat bagaimana respons struktur terhadap *time history* yang bersangkutan. Berkaitan dengan penurunan gerakan tanah gempa (*time history* gerakan tanah gempa) dan evaluasi struktur, beberapa ahli telah melakukan riset tentang topik ini. Saputro (2016) melakukan analisis untuk mengembangkan *time history* artifisial di batuan dasar berdasarkan PSHA. *Time history* kemudian dirambatkan dari batuan dasar ke permukaan tanah. *Time history* di permukaan tanah digunakan sebagai dasar

untuk melakukan analisis struktur untuk melihat bagaimana respon struktur di permukaan tanah. Secara *deterministic* Carlson et al (2014) merubah karakteristik frekuensi dari 28 *time history* sebelum digunakan sebagai input dalam analisis sistem SDOF bilinear. Ergun dan Ates (2013) merubah karakteristik frekuensi dari beberapa *time history* untuk mengembangkan *time history* yang baru. Wood dan Hutchinson (2012) memilih *time history* percepatan gempa menggunakan PSHA dan merubah karakteristik frekuensi dari *time history* tersebut dengan *spectra* target tertentu. Bayati dan Sultoni (2016) merubah karakteristik frekuensi dari *time history* secara deterministik dan menggunakan *time history* tersebut untuk desain seismik *RC frame*.



Gambar 2. *Time history* dari gempa Imperial Valley 1979 (contoh rekaman gempa)

Pavel dan Vacareanu (2016) merubah karakteristik frekuensi dari *time history* dengan respon spektra yang tepat untuk mengembangkan *time history* yang baru. Makrup dan Jamal (2016) merubah kuantitas dari *time history* untuk menemukan *time history* yang baru tanpa merubah karakteristik frekuensinya. Makrup (2017) mengembangkan *time history* di batuan dasar berdasarkan *Proababilistic Seismic hazard Analysis (PSHA)* dan *seismic code* dan *time history* tersebut kemudian dirambatkan ke permukaan untuk mendapatkan *time history* di permukaan tanah. Makrup dan Muntafi (2016) mengembangkan *time history* artifisial untuk kota Semarang dan Solo, Indonesia sebagai dasar untuk mendesain dan melakukan evaluasi terhadap bangunan bertingkat di kedua kota tersebut. Irsyam, Hendriyawan,

Dangkua (2003) mengembangkan *time history* percepatan gempa di batuan dasar dan *time history* tersebut lalu dirambatkan dari batuan dasar ke permukaan tanah untuk melakukan asesemen terhadap tangki penyimpanan gas PLN di teluk Banten. Widodo (2018) menggunakan PSHA dan prosedur *spectral matching* untuk mengembangkan gerakan tanah gempa untuk observasi *directional and directivity effect* dari gerakan tanah sintetik pada sebuah *site* di Yogyakarta.

Dalam penelitian ini akan dikembangkan *time history* Gerakan tanah gempa pada permukaan tanah dengan PSHA dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun dan prosedur *spectral matching*. *Time history* ini lalu digunakan sebagai dasar untuk melakukan analisis struktur untuk evaluasi

struktur Gedung Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia Jalan Kaliurang Km 14.5 Yogyakarta.

Gelombang gempa dan analisis struktur

Gelombang gempa yang dimaksud di sini adalah gelombang *time history* percepatan dari sebuah gempa yang terjadi pada sebuah *site*. Untuk melihat efek dari respon struktur terhadap gelombang percepatan gempa digunakan teori analisis struktur. Untuk tujuan ini diperlukan satu set *time history* yang direkam pada sebuah *site* berupa tanah atau kondisi *site* adalah tanah. *Time history* ini kemudian digunakan sebagai data input pada analisis struktur untuk gedung 4 lantai dari Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia. Persamaan yang berkaitan dengan analisis struktur adalah Persamaan (1).

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = -[M]a_G \quad (1)$$

dengan $[M]$, $[C]$, dan $[K]$ berturut-turut adalah matrik massa, damping dan kekakuan. $\{\ddot{X}\}$, $\{\dot{X}\}$, dan $\{X\}$ adalah vektor percepatan, kecepatan dan *displacement*, dan a_G adalah

time history percepatan dari sebuah kejadian gempa, yang dihitung berdasarkan prosedur probabilistik. Persamaan (1) sudah dikembangkan menjadi program komputer dengan nama *Structure Analysis Program (SAP)*. SAP yang digunakan dalam studi ini adalah SAP2000.

Analisis seismic hazard probabilistik

Konsep probabilistik menerima ketidakpastian dari *site*, lokasi dan laju kejadian gempa per tahun dan juga berkaitan dengan variasi dari karakteristik gerakan dengan ukuran gempa dan lokasinya secara eksplisit dipertimbangkan dalam evaluasi *seismic hazard*. Analisis *seismic hazard* probabilistik menyediakan kerangka dimana ketidakpastian ini dapat diidentifikasi, dikuantifikasi dan dikombinasikan dengan cara rasional untuk menyediakan gambaran lengkap tentang *seismic hazard*. Untuk kejadian gempa tertentu (Kramer, 1996), probabilitas dari sebuah parameter gerakan tanah A akan melampaui nilai a tertentu dimana dapat dihitung menggunakan teorema probabilitas total (Persamaan (2)).

$$P_A(a) = \int_M \int_R P(A > a | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm \quad (2)$$

dengan $P(A > a | m, r)$ adalah distribusi probabilitas dari nilai a tertentu akan dilampaui sebuah parameter gerakan tanah A (dianggap terdistribusi log normal), $f_M(m)$ adalah distribusi probabilitas dari *magnitude* gempa yang secara umum digunakan distribusi eksponensial yang pertama kali dikembangkan oleh Gutenberg-Richter (1944), $f_R(r)$ adalah distribusi probabilitas dari jarak. Persamaan (2) sangat sulit di selesaikan secara analitik bahkan tidak mungkin diselesaikan secara analitik. Oleh karena itu persamaan tersebut harus diselesaikan secara numerik.

Distribusi probabilitas magnitude

Distribusi *magnitude* $f_M(m)$ diperlukan dalam PSHA dan distribusi ini awalnya dikembangkan berdasarkan hukum Gutenberg-Richter (1944), Persamaan (3).

$$\lambda_m = 10^{a-bm} \quad \text{or} \quad \lambda_m = e^{\alpha-\beta m} \quad (3)$$

dengan λ_m adalah jumlah kejadian gempa pertahun, a dan b konstanta regresi yang dapat diperoleh dengan prosedur statistik dan parameter $\alpha \approx 2.303a$, $\beta \approx 2.303b$.

Parameter *magnitude* m_0 dapat digunakan dalam formulasi awal (Persamaan (3)) untuk menghindari terlibatnya *magnitude* kecil yang untuk kepentingan *engineering* dapat diabaikan karena tidak akan membahayakan struktur. m_0 mempunyai nilai dari 3-5 (EPRI, 1986). Oleh karena itu dari Persamaan (3) dapat diturunkan fungsi kerapatan distribusi probabilitas menjadi:

$$f_M(m) = \beta e^{-\beta(m-m_0)} \quad (4)$$

Persamaan (4) memberi *argument* bahwa probabilitas dapat dihitung bahkan dengan *magnitude* yang cukup besar (*magnitude* yang

tidak realistis). Untuk mengatasi hal ini maka *magnitude* batas atas m_u diikutsertakan. *Magnitude* ini didefinisikan sebagai gempa besar kemungkinan dapat terjadi di sepanjang sumber-sumber yang aktif (Nicolaou, 1998). Cornell dan Vanmarcke (1969) mengusulkan adanya modifikasi terhadap kurva Gutenberg-Richter yang asli, untuk memasukkan m_u sebagaimana dilakukan terhadap m_o . Nilai aktual dari m_u harus ditentukan berdasarkan investigasi geologi dari suatu wilayah yang akan menyediakan informasi tentang *fault rupture* maksimum sehingga akan didapatkan energi maksimum dan rentang *magnitude* ditunjukkan oleh:

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_o)}}{1-e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad (5)$$

dengan $m_o < m < m_u$

Persamaan (5) dikenal dengan sebutan fungsi distribusi eksponensial terpancung. Studi geologi dan seismologi pada sejumlah *fault* telah menunjukkan bahwa sumber-sumber gempa condong untuk mengulangi kejadian gempa besar yang dekat dengan *magnitude* maksimum. *Magnitude* ini dikenal dengan *magnitude* karakteristik. Hal ini dapat dijelaskan dengan observasi bahwa segmen *fault* bergerak dengan jarak yang sama dalam tiap kejadian gempa (slip rate fault konstan). Model eksponensial yang digambarkan pada *paragraph* sebelumnya didasarkan pada data historis semata dan menjadi *underestimate* untuk laju kejadian gempa besar yang didasarkan informasi geologi. Youngs dan Coppersmith (1985) mengusulkan hukum keberulangan alternatif untuk menentukan seismisitas dan laju kejadian gempa besar. Model dari mereka disebut sebagai *hukum keberulangan gempa karakteristik*. Dengan pendekatan ini maka fungsi distribusi kumulatif menjadi datar untuk yang dekat dengan *magnitude* maksimum. Fungsi kepadatan distribusi yang dihasilkan dari model ini adalah kombinasi antara distribusi eksponensial terpancung dari model Gutenberg-Richter pada *magnitude* kecil dan distribusi seragam untuk yang dekat dengan *magnitude* maksimum. Oleh karena itu fungsi

pada Persamaan (5) berubah menjadi Persamaan (6) dan (7).

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-m_o)}}{1-e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad (6)$$

dengan $m_o < m < m_u - 1/2$

$$f_M(m) = \frac{\beta e^{-\beta(m-\frac{3}{2}m_o)}}{1-e^{-\beta(m_u-m_o)}} \quad (7)$$

dengan $m_u - 1/2 < m < m_u$

Hukum keberulangan untuk keduanya Gutenberg-Richter (1944) serta Youngs dan Coppersmith (1985) digunakan dalam PSHA untuk menjelaskan ketidakpastian *aleatory* dalam distribusi *magnitude*.

Penyelesaian teorema probabilitas total dan distribusi probabilitas jarak

Kejadian *rupture* dan *magnitude*-nya dapat terjadi pada waktu yang berbeda dan dimana saja pada bidang *fault*. Karena itu kemungkinan kejadian dari *rupture* dapat digambarkan luas *rupture* yang saling *overlap* pada seluruh bidang *fault*. Semua persamaan yang berkaitan dengan teorema probabilitas total harus dihitung pada bidang *fault* (dalam tiap bidang *rupture*). Probabilitas relatif dari sebuah *rupture* yang mungkin terjadi pada bidang *fault* akan sama dengan probabilitas relatif $f_R(r)$ dari jarak *rupture* ke *site* (Persamaan 8).

$$f_R(r) = \frac{a \text{ rupture area}}{\text{total rupture area}} \quad (8)$$

Dalam PSHA para ahli menggunakan lebar *rupture* sama dengan panjang *rupture* (McGuire, 2005). Karena itu untuk *magnitude* yang sama berkaitan dengan Persamaan (8), maka panjang dan lebar *rupture* yaitu sama dengan L . Berdasarkan paragraf ini, maka semua kejadian yang mungkin akan terjadi di masa depan pada *fault* dengan nilai *magnitude* tertentu akan memberikan distribusi probabilitas jarak yang *flat* (datar).

Probabilitas dari parameter akan terlampaui

Probabilitas dari parameter gerakan tanah A akan terlampaui oleh nilai a tertentu $P(A > a | m, r)$, diasumsikan terdistribusi log normal atau logaritma dari data berdistribusi normal (mengikuti distribusi Gauss). Ber-

kaitan dengan analisis *seismic hazard probabilistic*, maka variable normal standar (z^*) dari parameter gerakan tanah adalah:

$$z^* = \frac{\ln a - \ln A}{\sigma_{\ln A}} \quad (9)$$

dengan A parameter gerakan tanah yang akan terlampaui nilai a tertentu. Probabilitas dari “ A ” terlampaui “ a ” adalah $P(A > a | m, r) =$

$$\lambda_A(a) = \sum_{i=1}^n \{v_i \int_M \int_R P(A > a) | m, r) f_M(m) f_R(r) dr dm\} \quad (10)$$

dengan R adalah jarak *rupture-ke-site*, dan M adalah *magnitude* gempa. Hubungan antara percepatan a dan $\lambda(A > a)$ disebut sebagai kurve *seismic hazard* (Gambar 3a).

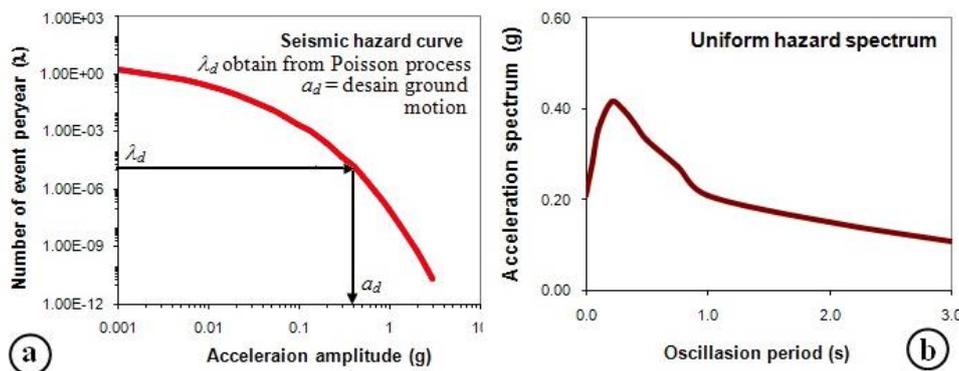
Berkenaan dengan hubungan prediksi gerakan tanah (*Ground Motion Prediction*

$p(z^*)$, lihat Gambar 3, dapat dicari di dalam tabel distribusi normal.

Kurve seismic hazard

Frekuensi dari sebuah kejadian *seismic*, $\lambda(A > a)$, untuk n jumlah sumber gempa adalah ditentukan dengan fungsi:

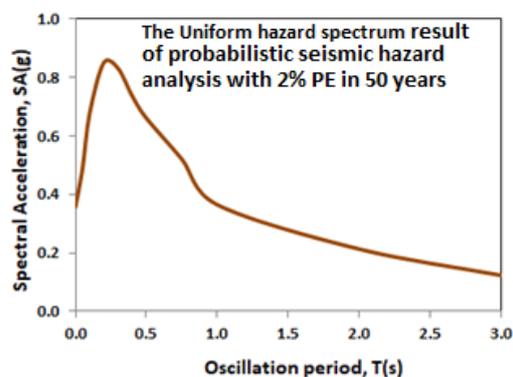
Equation/GMPE) dan periodenya maka berdasarkan Persamaan (9) dan (10) dapat ditentukan spektrum dari parameter gerakan tanah (contohnya percepatan gerakan tanah) dalam kerangka probabilistik sebagai sebuah kurva. Kurva ini disebut sebagai *spectra hazard seragam* (Gambar 3b).



Gambar 3. Contoh kurve *seismic hazard* (a) dan spectra hazard seragam (b)

Hasil perhitungan seismic hazard

Perhitungan *seismic hazard* dengan prosedur PSHA di permukaan tanah dilakukan pada *site* lokasi riset yaitu gedung Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia Jalan Kaliurang Km 14.5 pada titik koordinat *site* 7° 10' 20" LS; 110° 24' 49" BT. Perhitungan dilakukan berdasarkan *site* berupa tanah (*site* berada di permukaan tanah) dan sumber gempa termasuk parameternya dapat dilihat di dalam Tabel 1 dan 2. Hasil dari analisis *seismic hazard* probabilistik di permukaan tanah dengan data dari Tabel 1 dan 2 berkaitan dengan Persamaan (10) dapat dilihat dalam Gambar 4.



Gambar 4. *Spectra hazard* seragam pada *site*

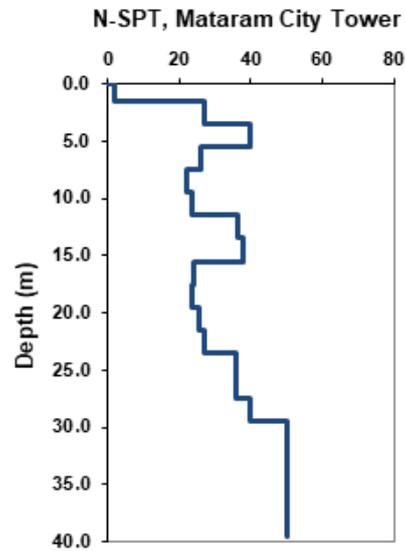
Gambar 4 disebut sebagai respon spektra *hazard* seragam (*Uniform Hazard Spectrum/UHS*). Respon spektra ini digunakan sebagai

spektra target dalam perhitungan *spectral matching*.

Kondisi site

Kondisi tanah pada lokasi riset (*research site*) ditentukan berdasarkan ASCE Code 2013 (ASCE 7-10) dan hasil bor-log. ACSE code 7-10 memberikan sebuah tabel yang merupakan hubungan antara kelas *site* vs kecepatan gelombang geser (V_s), *Normal-Soil Penetration Test (N-SPT)*, dan kekuatan geser *undrained* (S_u), lihat Tabel 3.

Pada lokasi riset yaitu gedung Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia tidak ditemukan hasil investigasi tanah, sehingga akan digunakan hasil investigasi tanah yang dalam hal ini adalah hasil bor log yang terdekat dengan lokasi riset. Hasil bor log Mataram City Tower Gambar 5 merupakan hasil investigasi tanah yang paling dekat dengan lokasi riset.



Gambar 5. Hasil bor log dari Mataram City Tower

Berdasarkan hasil bor-log Gambar 5 diperoleh bahwa kelas tanah *site* untuk Mataram City Tower adalah kelas D dengan nilai rata-rata N-SPT adalah 15,4. Oleh karena itu kondisi tanah *site* untuk lokasi riset diasumsikan juga memiliki kelas situs kelas D.

Tabel 1. Zona sumber subduksi dan parameternya

Nama sumber gempa subduksi	Magnitude (M_{max})	Rate (v) (kejadian/th)	Parameter	
			a	B
Sumatra interface	8.2	3.2359	5.76	1.05
Java interface	8.2	3.2359	5.76	1.05
NTBT interface	8.1	4.3652	6.14	1.10
Sumatra intraslab	8.1	4.3652	6.14	1.10
Java intraslab	7.8	6.4565	6.81	1.20
NTBT intraslab	7.8	6.4565	6.81	1.20

NTBT = Zone subduksi Nusa Tenggara Bimur dan Timur

Tabel 2. Sumber gempa *fault* dan parameternya

Nama <i>fault</i>	Slip-rate (mm/th)	Magnitude (M_{max})	Rate (v) (kejadian/th)	Parameter	
				b	A
Sunda	5.0	7.2	0.2851	1	4.4550
Cimandiri	4.0	7.5	0.2583	1	4.4121
Lembang	1.5	6.5	0.0640	1	3.8061
Pati	0.5	6.8	0.0242	1	3.3830
Lasem	0.5	6.5	0.0213	1	3.3290
Opak-Jogja	2.4	6.8	0.1159	1	4.0642
Flores Back-arc	28	7.8	2.0472	1	5.3112

Tabel 3. Klasifikasi *site*

Kelas <i>Site</i>	V_s	N	S_u
A Batuan keras	>5000 ft/s >1500 m/s	Tidak dapat Diaplikasikan	Tidak dapat Diaplikasikan
B Batuan	2500 to 5000 ft/s 760 to 1500 m/s	Tidak dapat Diaplikasikan	Tidak dapat Diaplikasikan
C Tanah sangat padat dan batuan lunak	1200 to 2500 ft/s 370 to 760 m/s	>50	>2000 psf >100 kPa
D Tanah Sedang	600 to 1200 ft/s 180 to 370 m/s	15 to 50	1000 to 2000 psf 50 to 100 kPa
E Tanah lunak	<600 ft/s <180 m/s	<15	<1000 psf <50 kPa
F Tanah yang memerlukan evaluasi <i>site-specific</i>	Profil dengan lebih dari 10 ft (3 m) dari tanah dengan karakteristik * Indeks plastisitas $PI > 20$ *Kadar air, $w > 40\%$ *Tegangan geser <i>undrained</i> , $S_u < 500$ psf a. Tanah rentan terhadap potensi gagal atau runtuh b. Tanah gambut dan/atau lempung dengan kandungan organik tinggi c. Lempung dengan plastisitas sangat tinggi d. Lempung lunak/medium yang sangat tebal		

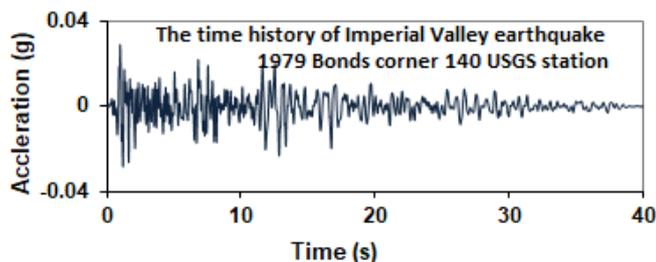
Time history aktual

Untuk mengembangkan *time history* artifisial pada lokasi riset diperlukan *time history* aktual yaitu *time history* hasil pengukuran. Karena lokasi riset adalah tanah kelas D maka *time history* aktual yang digunakan di sini harus di-record pada tempat dengan kondisi *site* adalah tanah kelas D. Oleh karena itu rekaman gerakan tanah yang tepat untuk lokasi riset adalah gempa Imperial Valley USA 1951 (Gambar 6) yang direkam pada *site* dengan kondisi tanah adalah kelas D.

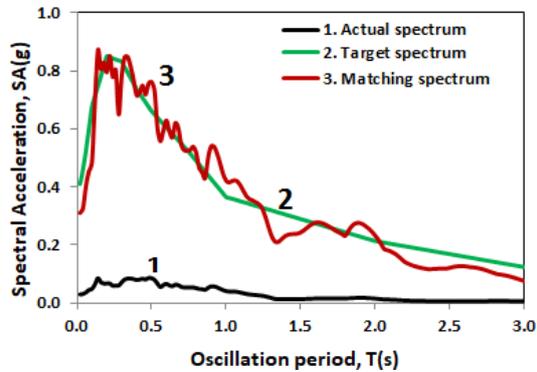
Spectral matching

Berdasarkan respon spektra (Gambar 4) dan *time history* (Gambar 5) akan dilakukan *spectral matching* untuk memperoleh *time*

history artifisial (Nicolaou, 1998). Makrup (2017) telah mengembangkan program komputer dengan nama SPECMATCH untuk melakukan *spectral matching* berkaitan dengan prosedur yang dilakukan oleh Nicolaou (1998). Program komputer tersebut digunakan dalam studi ini untuk merubah *time history* dari gempa Imperial Valley 1951 USA (Gambar 6) agar menjadi *time history* yang baru dengan spektra target (Gambar 4). Hasil dari *spectral matching* adalah Gambar 7 dan Gambar 8. *Time history* (Gambar 8) dinyatakan sebagai *time history* yang diturunkan dengan prosedur probabilistik karena target spektra yang digunakan dalam proses *spectral matching* dikembangkan dengan PSHA.

Gambar 6. *Time history* dari gempa Imperial Valley USA 1951

Time history (Gambar 8) harus diubah menjadi *time history* desain sehingga dapat digunakan dalam keperluan *engineering*.

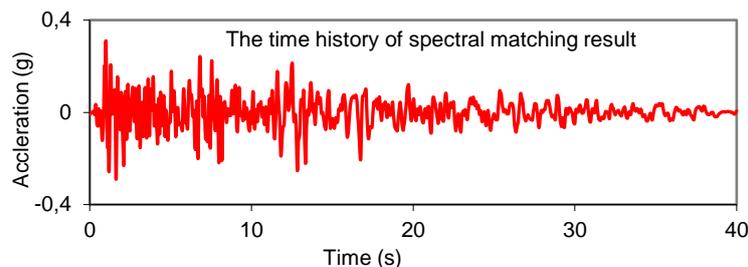


Gambar 7. Hasil *spectral matching*

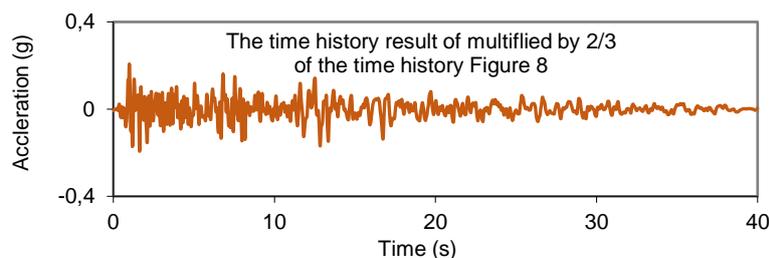
Karena itu *time history* (Gambar 8) dapat dikalikan dengan $2/3$ untuk menjadi *time history* desain (ASCE code 7-10, 2013). Hasil perkalian *time history* (Gambar 8) dengan $2/3$ dapat dilihat di dalam Gambar 9. *Time history* (Gambar 9) disebut sebagai *time history* desain dan akan digunakan sebagai dasar dalam analisis struktur untuk melihat respon struktur dari gedung Fakultas Hukum Universitas Islam Indonesia.

Structural analysis

Analisis struktur elastik digunakan untuk melakukan evaluasi respon struktur dari gedung Fakultas Hukum UII Yogyakarta (Gambar 10) terhadap gelombang percepatan gempa yaitu *time history* (Gambar 9).



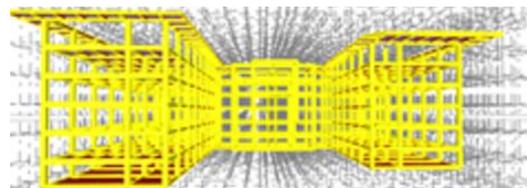
Gambar 8. *Time history* hasil *spectral matching* berdasarkan *time history* (Gambar 6) dan respon spektra target (Gambar 4)



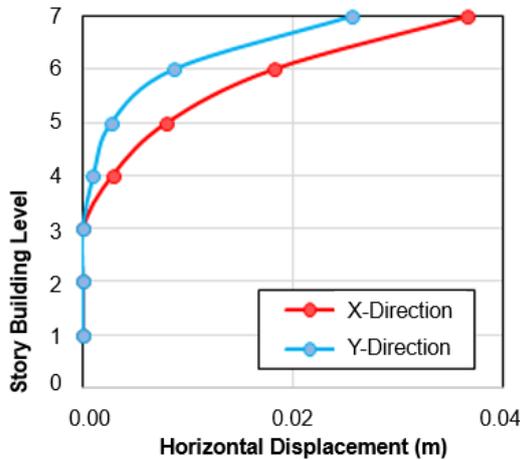
Gambar 9. *Time history* hasil perkalian antara *time history* (Gambar 8) dengan $2/3$

Struktur gedung Gambar 10 termasuk dalam kelompok gedung katagori C_1 karena strukturnya adalah frame beton bertulang (FEMA 310, 1998 dan 356, 2000).

Tipe gedung termasuk dalam gedung kuliah yang di dalamnya banyak orang berkegiatan. Hasil dari respon struktur terhadap *time history* (Gambar 9) dapat dilihat di dalam Gambar 11.

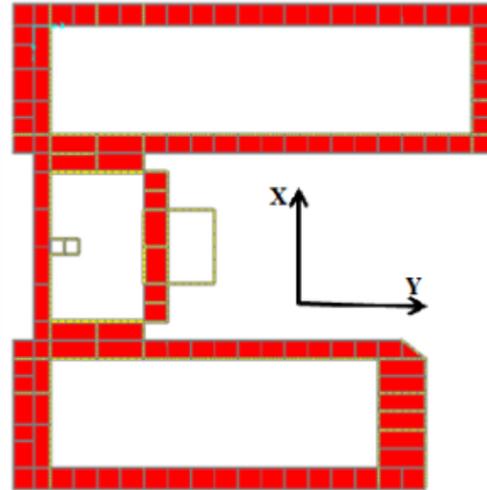


Gambar 10. Tampak depan struktur gedung Fakultas Hukum UII



Gambar 11. Displacement struktur dalam arah-X dan dalam arah-Y

Untuk arah-X dan arah-Y displacement memiliki hasil perhitungan mendekati sama karena panjang gedung dalam arah-X maupun arah-Y relatif sama. Dengan kata lain hal yang mempengaruhi tingkat atap (lihat Gambar 12) memiliki displacement yang besar adalah karena struktur atap yang mempunyai ruang yang cukup besar. Kondisi ini menyebabkan adanya perbedaan kekakuan yang relatif besar dengan tingkat di bawahnya.



Gambar 12. Denah lantai atap gedung

Berdasarkan hasil perhitungan service performance control direction (Gambar 13) maka dari gambar tersebut, dapat dinyatakan bahwa gedung aman terhadap beban time history percepatan gempa dalam arah-X maupun arah-Y sebab deviasi antar tingkat yang terjadi masih dalam batas ijin.

Tabel 4. ATC-40

Displacement	Level kinerja struktur			
	Immediate Occupancy	Damage control	Life safety	Structure Stability
Antar tingkat	0.01	0.01-0.02	0.02	0.33 V_i/P_i
Maximum drift total	0.005	0.005-0.015	no limit	no limit

dengan V_i tegangan geser total dan P_i tegangan gravitasi total pada lantai ke-i

Tabel 5. Simpangan antar lantai tingkat ijin (Δa) (SNI 03-1726-2012)

Struktur	Kategori risiko		
	I atau II	III	IV
Struktur, selain dari struktur dinding geser batu bata, 4 tingkat atau kurang dengan dinding interior, partisi, langit-langit dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi simpangan antar lantai tingkat.	0,025 h_{sx}	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}
Struktur dinding geser kantilever batu bata	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}	0,010 h_{sx}
Struktur dinding geser batu bata lainnya	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}	0,007 h_{sx}
Semua struktur lainnya	0,020 h_{sx}	0,015 h_{sx}	0,010 h_{sx}

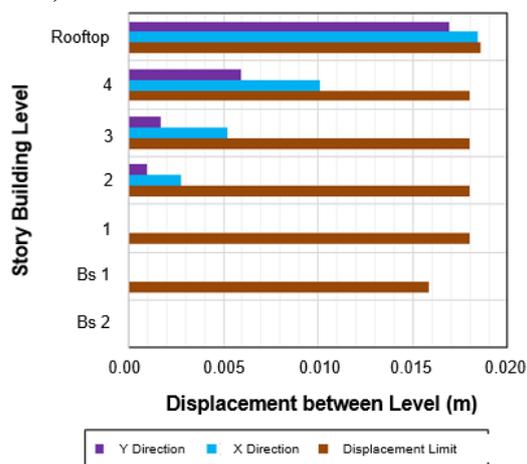
Keterangan : h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat x

Hasil perhitungan displacement (Gambar 11) memberikan bahwa batas ultimit deviasi kinerja yang terjadi untuk tiap tingkat, masih dalam kriteria batas ijin. Level kinerja gedung

berkaitan dengan drift ratio (Gambar 14) dan ATC Provision 40, 1996 and 1997 (Tabel 4) menunjukkan bahwa gedung Fakultas Hukum adalah immediate occupancy (IO).

Salah satu parameter untuk menentukan kinerja struktur gedung adalah nilai kinerja servis (*service performance value*). Berdasarkan *service performance control direction* (Gambar 13) pada arah-X dan arah-Y dapat dinyatakan bahwa gedung Fakultas Hukum UII aman terhadap beban *time history* gempa. Ini berkenaan dengan deviasi antar dua tingkat yang terjadi masih dalam batas yang diterima. Kontrol grafik dari *service performance limit* berkaitan dengan beban *time history* yang sudah diberikan, dapat dilihat pada Gambar 15.

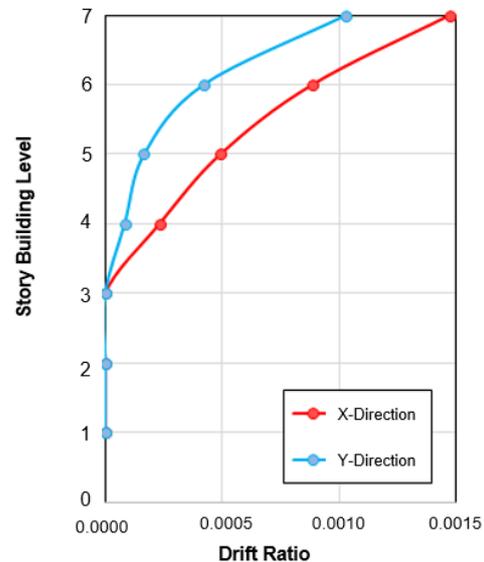
Berdasarkan SNI (Standar Nasional Indonesia) 03-1726-2012 kinerja batas ultimit telah dihitung. Berdasarkan kontrol kinerja batas ultimit dalam arah-X dan arah-Y, deviasi dari tiap lantai yang terjadi masih tetap dalam batas kriteria batas ijin pada kinerja batas ultimit. Kontrol grafis dari kinerja batas ultimit (*ultimate limit performance*) berkaitan dengan beban *time history* gempa dapat dilihat pada Gambar 14. Level kinerja dari gedung berkaitan ATC-40 diukur berdasarkan drift maksimum dari gedung (ATC-40, 1996 dan 1997).



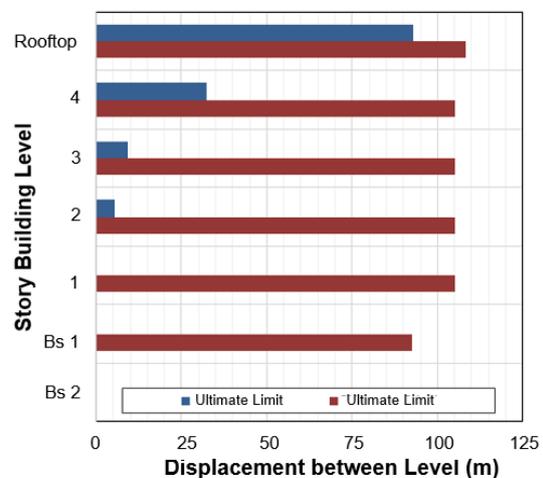
Gambar 13. *Service performance control direction*

Drift ratio (Gambar 13) didefinisikan sebagai rasio deviasi antara level *displacement* dari titik kinerja melawan tinggi permukaan. Hasil analisis menunjukkan pada level kinerja *time history* dalam arah-X dan arah-Y memberikan nilai drift maksimum kurang dari 1% (0,01) dan nilai *elastic drift* maksimum kurang dari

0,5% (0,005). Berdasarkan hasil analisis dapat dikatakan bahwa level kinerja dari gedung kuliah FH UII berkenaan dengan Tabel 5 adalah *Immediate Occupancy* (IO).



Gambar 14. Kurva *drift ratio*



Gambar 15. Kinerja batas ultimit

Kesimpulan

Berdasarkan beberapa tolak ukur respon seismik yang ditetapkan oleh standar seismik untuk gedung, Gedung Fakultas Hukum UII secara keseluruhan aman berdasarkan tinjauan terhadap *time history* percepatan gerakan tanah gempa yang diperoleh dengan metode probabilistic dan metode *spectral matching*.

Daftar pustaka

- ASCE. (2013). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, Published by the American Society of Civil Engineers 1801 Alexander Bell Drive Reston, Virginia 20191-4400.
- ATC-40. (1996). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Vol 1, Applied Technology Council*. Redwood City, California, USA
- ATC-40. (1997). *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings, Vol 2, Applied Technology Council*. Redwood City, California, USA
- Bayati Z, Soltani M. (2016). Ground motion selection and scaling for seismic design of RC frames against collapse. *Earthquakes and Structures, Volume 11, Issue 3*, pp.445-459.
- Carlson C. Pp., Zekkos D., McCormick J. P. (2014). Impact of time and frequency domain ground motion modification on the response of a SDOF system. *Earthquakes and Structures, Volume 7, Issue 6*, pp.1283-1301.
- Cornell, C.A. dan Vanmarcke, E.H. (1969). The Major Influences on Seismic Risk, *Proc. Of the 4th World Conf. on Earthquake Engineering*, Santiago, Chile.
- Ergun M. and Ates S. (2013). Selecting and scaling ground motion time histories according to Eurocode 8 and ASCE 7-05, *Earthquakes and Structures, Volume 5, Issue 2*, pp.129-142.
- EPRI. (1986). *Seismic hazard methodology for the central and eastern United States*. July. Report NP-4726, 1, Methodology, Section 4. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
- FEMA 310. (1998). *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, USA.
- FEMA 356. (2000) *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C
- Gutenberg, B. dan Richter, C. F. (1944). Frequency of Earthquake in California, *Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.34, No. 4*, pp. 1985-1988.
- Irsyam M., Hendriyawan, Dangkoa, A.D (2003). Seismic hazard Assessment LNG Storage Tank Terminal Teluk Banten, *Report of Seismic hazard Study*, Bandung.
- Kramer S.L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall :New Jersey.
- Makrup, L. and Jamal A. U. (2016). The Earthquake Ground Motion and Response Spectra Design for Sleman, Yogyakarta, Indonesia with Probabilistic Seismic hazard Analysis and Spectral Matching in Time Domain, *American Journal of Civil Engineering*, 4(6): 298-305.
- Makrup, L., and Muntafi, Y. (2016) Artificial Ground Motion for the Cities of Semarang and Solo Indonesia Generated Based on Probabilistic Seismic hazard Analysis and Spectral. *Geotechnical Engineering, Vol. 21*, Bund. 21.
- Makrup, L. (2017) Generating Design Ground Motion by Probabilistic Seismic hazard Analysis and Code, *EJGE (Electronic Journal of Geotechnical Engineering)*, Vol. 22, Bund. 5.
- Nicolaou.A.S. (1998), *A GIS Platform for Earthquake Risk Analysis*. A dissertation submitted to the Faculty of the Graduate School of State University of New York at Buffalo USA in partial fulfillment of the requirement for the degree of Doctor of Philosophy, August.
- Pavel F., Vacareanu R. (2016), Scaling of ground motions from Vrancea (Romania) earthquakes. *Earthquakes and Structures, Volume 11, Issue 3*, pp.505-516.
- Saputro I.T. (2016) Evaluasi respon struktur gedung bertingkat banyak menggunakan time history berdasarkan metode PSHA dengan sumber gempa shallow crustal, Tesis Master, Magister Teknik Sipil Univesitas Islam Indonesia Yogyakarta.
- SNI (Standar Nasional Indonesia). (2002). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)*. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.

- Widodo, Makrup L., Teguh M., Arifudin, A. M. (2018). Bidirectional and Directivity Effect Identifications of Synthetic Ground Motions at Selected Site in Yogyakarta City, Indonesia, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, Volume 9, Issue 6, June 2018, pp. 637–648.
- Wood, R.L., Hutchinson, T.C. (2012). Effects of ground motion scaling on nonlinear higher mode building response, *Earthquakes and Structures*, Volume 3, Issue 6, pp.869-887.
- Youngs, R. R. dan Coppersmith, K. J. (1985), Implications of Fault Slip Rates and Earthquake Recurrence Models to probabilistic Seismic hazard Estimates, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 75, No. 4, pp. 939-964.