

RESPONS STRUKTUR BANGUNAN BERDASARKAN SPEKTRA GEMPA INDONESIA UNTUK IBUKOTA PROVINSI DI PULAU SUMATERA

Hendra Jingga¹, Reni Suryanita², dan Enno Yuniarto³

*1, 2, dan 3 Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau
hendra.jingga.4362@gmail.com*

ABSTRAK

Sumatera Island is a very active seismic area in Indonesia, which is crossed by the infamous Pacific Ring of Fire. The western side of Sumatera Island suffers more from the ground shaking due to its closer distance to the epicenter. Combined with huge coverage of soft soil, building structures built on this island may experience excessive deformation and eventually collapse in a brittle way. For high-rise reinforced concrete (RC) building, the impact is even more devastating and may endanger its occupants. Due to these facts, this study aims to analyze the deformation characteristic (story-drift) of high-rise RC building under earthquake loading in Sumatera Island. Modal response spectrum analysis is performed to compute the maximum story-drift of three RC building models (10 story, 15 story, and 20 story) used in this study. The seismic acceleration response spectrum function is derived from the latest Indonesia's Seismic Hazard Map (2010) and SNI 1726-2012. Eight capital cities in Sumatera Island and three soil conditions (soft, medium, and hard soil) are selected to generate 24 seismic acceleration response spectrum functions. Combined with three RC building model variations, 72 story-drift data are obtained for each X and Y horizontal direction. Based on the analysis result, taller buildings in soft soil condition are at greater risk to experience excessive deformation due to seismic loading. Seismic locations in the western side of Sumatera Island is also observed to exhibit higher seismic hazard compared to central and eastern side of Sumatera Island.

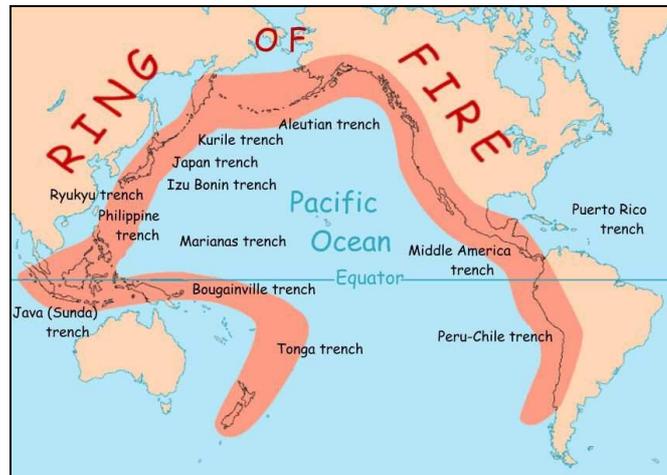
Keywords: *artificial neural network (ANN), earthquake, modal response spectrum analysis, structural response, Sumatera Island*

1. PENDAHULUAN

Kepulauan Indonesia khususnya Pulau Sumatera merupakan salah satu daerah yang paling rawan gempa di dunia. Seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1, Indonesia dilewati oleh Lingkaran Api Pasifik yang sangat rentan terhadap aktivitas tektonik dan vulkanik. Akibatnya, gempa dengan intensitas sangat kuat seringkali mengguncang Pulau Sumatera. Pada tahun 2004, Kota Banda Aceh dihantam dengan gempa kuat berintensitas 9,3 SR. Kemudian pada tahun 2009, gempa berintensitas 7,9 SR terjadi di Kota Padang. Kota-kota yang terletak di sisi Barat Pulau Sumatera umumnya lebih rentan terhadap gempa kuat karena lebih dekat dengan garis patahan kerak bumi di dasar Laut Hindia. Selain bahaya gerakan tanah yang kuat di daratan, kota-kota di sisi Barat Pulau Sumatera juga memiliki risiko yang tinggi terhadap bahaya bencana tsunami yang ditimbulkan gerakan patahan kerak bumi di dasar laut.

Risiko gempa kuat di Pulau Sumatera sangat mempengaruhi bangunan yang berdiri di atasnya. Kondisi tanah di Pulau Sumatera secara umum merupakan tanah lunak dan organik (gambut). Tanah gambut dapat ditemukan hingga kedalaman puluhan meter di bawah permukaan tanah. Hal ini berdampak terhadap proses perencanaan dan pembangunan infrastruktur khususnya bangunan tingkat tinggi. Bangunan tinggi sangat rentan terhadap pergerakan tanah kuat, yaitu dapat menimbulkan deformasi yang berlebihan atau bahkan keruntuhan mendadak. Deformasi yang berlebihan dapat merusak komponen non-struktural bangunan seperti pintu dan jendela sehingga akses evakuasi menjadi terhambat. Apabila bangunan tinggi terbuat dari beton bertulang yang tidak didesain dengan baik, keruntuhan yang getas dapat membahayakan penghuni bangunan karena berat struktur yang besar dan tidak tersedia waktu yang cukup untuk evakuasi. Oleh karena itu, desain bangunan tinggi yang daktail sangat penting khususnya di daerah rawan gempa seperti Pulau Sumatera.

Desain bangunan yang daktail sangat erat kaitannya dengan pengetahuan perencana terhadap respons struktur yang ditimbulkan gempa.



Gambar 1. Lingkaran Api Pasifik (National Geographic)

Analisis struktur yang baik akan sangat mendukung perencanaan bangunan terhadap beban gempa. Pada SNI 1726-2012 tercantum beberapa metode analisis yang tepat dan efisien untuk jenis struktur yang dipilih. Salah satu metode yang paling populer di kalangan praktisi adalah metode analisis spektrum respons ragam. Metode ini cukup mudah diterapkan dan dapat digunakan untuk bangunan tinggi yang beraturan. Jika bangunan terlalu kompleks dan tidak beraturan, metode analisis riwayat waktu harus digunakan.

Sebelum melakukan analisis spektrum respons ragam, analisis ragam (*modal analysis*) perlu dilakukan untuk mengetahui karakteristik dinamis dari struktur gedung, seperti periode getar dan partisipasi massa ragam. Periode getar (T) diperlukan untuk menentukan besarnya percepatan gempa yang dialami struktur (S_a) berdasarkan grafik spektrum respons gempa (S_a vs. T). Persamaan dasar untuk melakukan analisis ragam dapat dilihat pada Persamaan (1).

$$[[K] - \omega^2[M]]\{a\} = \{0\} \quad (1)$$

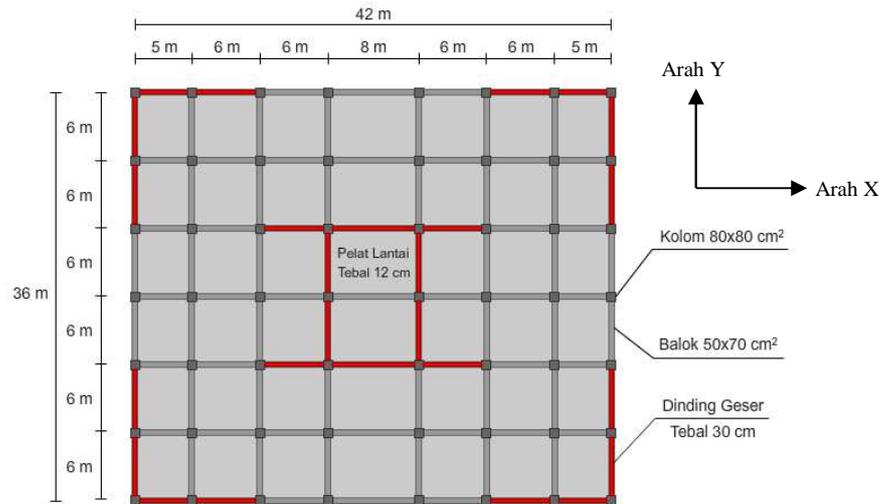
dengan:

- $[K]$: matriks kekakuan struktur,
- $[M]$: matriks massa,
- ω : frekuensi sudut getaran struktur,
- $\{a\}$: matriks amplitudo getaran struktur.

Metode analisis spektrum respons ragam dapat diterapkan pada bangunan tinggi untuk memperoleh besaran respons struktur, yaitu simpangan horizontal lantai bangunan. Parameter simpangan lantai sangat penting untuk keperluan perencanaan karakteristik dinamis struktur dan membantu proses perencanaan awal bangunan. Penelitian terdahulu yang melakukan analisis spektrum respons ragam berdasarkan spektra gempa Indonesia dapat ditemukan pada Nasution dan Teruna (2014) dan Faizah dan Widodo (2013). Pada penelitian ini, pengaruh kondisi tanah, tinggi struktur, dan parameter beban gempa terhadap simpangan lantai akan dipaparkan. Metode analisis spektrum respons ragam dilakukan dengan bantuan *software* elemen hingga.

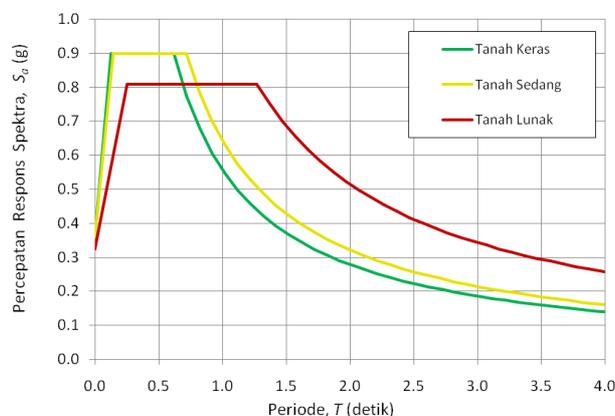
2. METODOLOGI

Pada penelitian ini, model bangunan yang digunakan adalah struktur gedung beton bertulang (mutu K-300) setinggi 10 lantai (Model 1), 15 lantai (Model 2), dan 20 lantai (Model 3). Tinggi gedung Model 1, Model 2, dan Model 3 adalah 40,5 meter, 60,5 meter, dan 80,5 meter, secara berurutan. Denah lantai ketiga model gedung tersebut dapat dilihat pada Gambar 2. Elemen struktur yang dipilih adalah balok berukuran 50x70 cm², kolom persegi 80x80 cm², dan pelat lantai dengan ketebalan 12 cm. Dinding geser yang digunakan memiliki ketebalan 30 cm dengan konfigurasi seperti yang ditunjukkan oleh garis merah pada Gambar 2.



Gambar 2. Denah Lantai Gedung

Variasi beban gempa diperoleh dari 8 lokasi gempa yang merupakan ibukota provinsi di Pulau Sumatera, yaitu Kota Banda Aceh, Medan, Padang, Pekanbaru, Jambi, Bengkulu, Palembang, dan Bandar Lampung. Delapan lokasi gempa tersebut dianggap dapat mewakili kondisi beban gempa lemah, sedang, dan kuat di Pulau Sumatera dari ujung Utara hingga Selatan. Untuk menambah variasi beban gempa, digunakan 3 jenis kondisi tanah, yaitu kondisi tanah lunak, tanah sedang, dan tanah keras. Dengan variasi-variasi tersebut, diperoleh 24 kemungkinan beban gempa yang kemudian dinyatakan dalam bentuk grafik spektrum respons gempa agar dapat digunakan pada analisis spektrum respons ragam. Grafik spektrum respons gempa diperoleh dari situs www.puskim.pu.go.id yang telah mengacu pada Peta Gempa Indonesia tahun 2010 dan SNI 1726-2012. Contoh grafik spektrum respons ragam untuk Kota Banda Aceh dengan ketiga kondisi tanah dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik Spektrum Respons Gempa di Kota Banda Aceh

Setelah mengumpulkan data beban gempa, dilakukan analisis spektrum respons ragam dengan bantuan *software* elemen hingga untuk mengetahui respons struktur Model 1, Model 2, dan Model 3. Prosedurnya adalah sebagai berikut.

1. Memodelkan seluruh komponen struktur gedung dalam *software* elemen hingga (balok, kolom, pelat lantai, dinding geser, dan tumpuan). Untuk mengantisipasi terhadap kemungkinan kondisi tanah lunak, digunakan tumpuan sendi.
2. Memasukkan beban mati tambahan per satuan luasan pada pelat lantai dan beban lajur dinding batu bata per satuan panjang pada balok perimeter yang tidak memiliki dinding geser.
3. Menetapkan 100% beban mati (berat sendiri dan beban mati tambahan) sebagai *mass source* untuk analisis dinamik.
4. Mendefinisikan dan melakukan analisis ragam untuk memperoleh karakteristik getaran bebas struktur (periode getar dan partisipasi massa). Analisis ragam dilakukan hingga bentuk ragam ke-20

menggunakan *ritz vectors*. *Ritz vectors* dipilih karena mampu menghasilkan partisipasi massa yang lebih tinggi dibandingkan *eigen vectors* dengan jumlah ragam yang sama.

5. Mendefinisikan fungsi spektrum respons percepatan desain (S_a vs T) berdasarkan grafik spektrum respons gempa yang telah ditetapkan sebelumnya untuk 8 kota dan 3 kondisi tanah.
6. Memasukkan beban gempa spektrum respons berupa percepatan (*acceleration*) yang besarnya ditentukan oleh fungsi spektrum respons percepatan desain yang telah dimasukkan pada langkah ke-5. Percepatan gempa diberikan pada kedua arah horizontal yang tegak lurus (X dan Y). Untuk menggabungkan respons individual dari tiap ragam (hasil analisis ragam), digunakan Metode Kombinasi Kuadrat Lengkap (CQC). Rasio redaman diambil sama dengan 5% untuk struktur beton bertulang (Wight & MacGregor, 2012).
7. Menjalankan analisis spektrum respons ragam dan menganalisis keluaran *software* elemen hingga, yaitu simpangan lantai untuk total 72 kasus (24 variasi beban gempa dan 3 variasi model gedung). Selain itu dari analisis ragam, karakteristik dinamik lainnya dari struktur dapat ditentukan, yaitu partisipasi massa, dan periode getar.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis spektrum respons ragam yang ditampilkan pada sub-bagian berikutnya mencakup karakteristik getaran bebas struktur dan respons simpangan lantai struktur terhadap beban gempa.

ANALISIS RAGAM

Hasil analisis ragam sebanyak 20 *modes*, yaitu berupa periode getar struktur dan partisipasi massa ragam kumulatif ditabulasikan dalam Tabel 1. Berdasarkan tabel tersebut, dapat dilihat bahwa Model 3 memiliki periode getar yang paling besar dibandingkan Model 1 dan Model 2. Hal ini disebabkan gedung Model 3 lebih tinggi sehingga kekakuan lateralnya lebih rendah dibandingkan Model 1 dan Model 2. Kemudian pada *mode* ke-20, dapat disimpulkan bahwa partisipasi massa ragam kumulatif seluruh model struktur sudah melebihi 90%, sehingga sudah memenuhi syarat SNI 1726-2012.

Tabel 1. Periode Getaran Bebas dan Partisipasi Massa Struktur

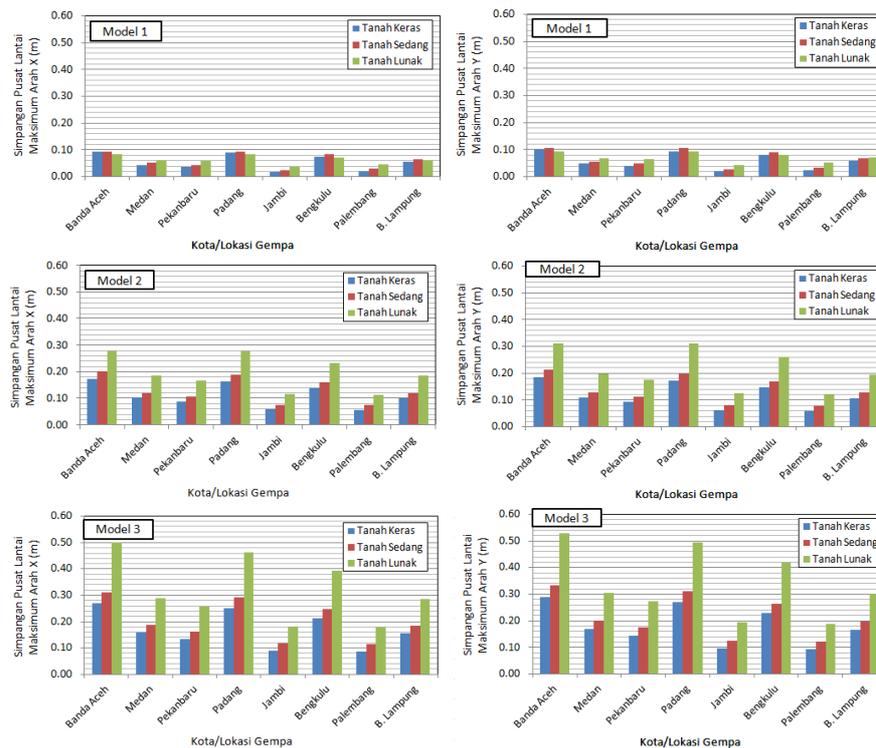
Mode ke-	Periode Getaran Bebas Struktur (detik)			Partisipasi Massa Ragam Kumulatif (%)					
	Model 1	Model 2	Model 3	Model 1		Model 2		Model 3	
				Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
1	0,65	1,16	1,77	0,0	70,7	0,0	68,6	0,0	67,6
2	0,61	1,10	1,67	70,2	70,7	68,2	68,6	67,3	67,6
3	0,36	0,82	1,24	70,2	70,7	68,2	68,6	67,3	67,6
4	0,20	0,32	0,46	70,2	87,4	68,2	86,8	67,3	86,0
5	0,18	0,30	0,43	87,4	87,4	86,7	86,8	85,8	86,0
6	0,17	0,19	0,23	87,4	87,4	86,7	86,9	85,8	90,8
7	0,16	0,17	0,22	87,4	87,5	86,7	86,9	85,8	91,4
8	0,14	0,17	0,21	87,4	87,5	86,7	91,5	90,8	91,4
9	0,14	0,16	0,20	87,5	87,5	86,7	91,6	91,3	91,4
10	0,13	0,16	0,18	87,6	87,5	87,0	91,6	91,3	91,4
11	0,12	0,15	0,17	87,6	91,1	91,6	91,6	91,3	91,4
12	0,11	0,12	0,16	88,5	91,1	91,8	91,6	91,3	93,7
13	0,10	0,12	0,14	91,5	91,1	91,8	93,6	93,8	93,7
14	0,09	0,11	0,12	91,5	92,6	93,9	93,6	93,8	94,9
15	0,08	0,10	0,11	91,7	93,6	93,9	95,1	94,9	95,3
16	0,08	0,08	0,10	93,5	93,7	95,4	95,1	95,5	95,9
17	0,05	0,07	0,08	94,5	93,7	95,4	96,0	96,1	96,7
18	0,05	0,06	0,07	94,5	94,5	96,2	96,0	97,0	96,9
19	0,02	0,03	0,03	94,5	98,4	96,2	98,5	97,5	98,0
20	0,02	0,02	0,03	98,5	98,4	98,9	98,5	98,7	98,7

ANALISIS SPEKTRUM RESPONS RAGAM

Hasil analisis spektrum respons ragam diberikan pada Tabel 2 dan Gambar 4. Nilai simpangan lantai tersebut merupakan simpangan lantai maksimum pada lantai atap untuk ketiga model gedung. Pada Gambar 4 dapat dilihat lebih jelas variasi simpangan lantai yang ditimbulkan oleh variasi kondisi tanah, tinggi model struktur, dan lokasi gempa, yang dapat diuraikan sebagai berikut.

Tabel 2. Simpangan Pusat Lantai Maksimum

No.	Lokasi Gempa	Kondisi Tanah	Simpangan Pusat Lantai Maksimum (m)					
			Model 1		Model 2		Model 3	
			Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
1.	Banda Aceh	Keras	0,093	0,100	0,175	0,185	0,271	0,286
		Sedang	0,093	0,105	0,201	0,213	0,312	0,330
		Lunak	0,084	0,095	0,278	0,312	0,498	0,527
2.	Medan	Keras	0,043	0,049	0,102	0,108	0,158	0,167
		Sedang	0,050	0,057	0,121	0,128	0,187	0,198
		Lunak	0,060	0,068	0,186	0,197	0,288	0,304
3.	Pekanbaru	Keras	0,036	0,040	0,087	0,092	0,135	0,143
		Sedang	0,043	0,049	0,106	0,112	0,163	0,172
		Lunak	0,057	0,065	0,166	0,175	0,256	0,271
4.	Padang	Keras	0,089	0,093	0,163	0,172	0,252	0,267
		Sedang	0,093	0,105	0,188	0,199	0,291	0,308
		Lunak	0,084	0,094	0,277	0,311	0,465	0,491
5.	Jambi	Keras	0,018	0,020	0,058	0,062	0,090	0,095
		Sedang	0,023	0,026	0,076	0,080	0,117	0,123
		Lunak	0,037	0,041	0,117	0,124	0,181	0,192
6.	Bengkulu	Keras	0,075	0,079	0,138	0,146	0,214	0,227
		Sedang	0,082	0,091	0,160	0,169	0,247	0,261
		Lunak	0,070	0,079	0,232	0,261	0,394	0,417
7.	Palembang	Keras	0,022	0,025	0,056	0,060	0,087	0,093
		Sedang	0,029	0,033	0,074	0,078	0,114	0,121
		Lunak	0,045	0,051	0,114	0,120	0,176	0,187
8.	Bandar Lampung	Keras	0,055	0,058	0,101	0,107	0,156	0,165
		Sedang	0,064	0,069	0,120	0,127	0,185	0,196
		Lunak	0,063	0,071	0,185	0,195	0,285	0,301



Gambar 4. Grafik Simpangan Pusat Lantai Maksimum terhadap Variasi Model Struktur, Kondisi Tanah, dan Kota Lokasi Gempa

1. Untuk lokasi gempa dan kondisi tanah yang sama, simpangan pusat lantai maksimum yang paling besar dialami oleh Model 3, kemudian disusul oleh Model 2, dan yang paling kecil adalah Model 1. Hal tersebut disebabkan Model 3 merupakan model struktur yang paling tinggi dan kekakuannya paling rendah.

2. Simpangan pusat lantai pada arah Y lebih besar dari arah X, yaitu disebabkan oleh kekakuan struktur pada arah Y lebih kecil.
3. Untuk model struktur dan kondisi tanah yang sama, kekuatan gempa untuk 8 kota tersebut dapat dikelompokkan menjadi 3 grup berdasarkan simpangan pusat lantai yang dialami struktur, yaitu:
 - a. Gempa kuat, yaitu terletak pada Kota Banda Aceh, Padang, dan Bengkulu.
 - b. Gempa sedang, yaitu terletak pada Kota Medan, Pekanbaru, dan Bandar Lampung.
 - c. Gempa lemah, yaitu terletak pada Kota Jambi dan Palembang.
4. Untuk model struktur dan lokasi gempa yang sama, secara umum kondisi tanah lunak menghasilkan simpangan pusat lantai yang paling besar karena memiliki percepatan gempa yang besar dan rentang periode percepatan maksimum yang panjang (selisih T_s dan T_0). Akan tetapi untuk gedung yang sangat kaku (periode getar sangat kecil), tanah keras bisa menghasilkan simpangan pusat lantai maksimum yang lebih besar dibandingkan tanah lunak, seperti pada kasus lokasi gempa Banda Aceh. Agar lebih jelas, perbedaan grafik spektrum respons gempa untuk ketiga jenis kondisi tanah dapat dilihat pada Gambar 3.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Bangunan yang lebih tinggi memiliki periode getar yang lebih besar dibandingkan bangunan yang lebih rendah, sehingga simpangan lantai yang dialami bangunan tinggi relatif lebih besar.
2. Bangunan yang terletak di sisi Barat Pulau Sumatera seperti Kota Banda Aceh, Padang, dan Bengkulu memiliki risiko yang lebih besar terhadap gempa kuat dibandingkan kota-kota lain di tengah maupun sisi Timur Pulau Sumatera.
3. Kondisi tanah lunak umumnya menghasilkan simpangan pusat lantai yang lebih besar dibandingkan tanah keras. Namun untuk struktur yang sangat kaku pada kasus lokasi gempa tertentu, tanah keras bisa menghasilkan simpangan pusat lantai yang lebih besar dibandingkan tanah lunak.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. 2012. SNI 1726-2012: Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.
- Computer and Structures, Inc. 2013. *Modal Analysis*. <https://wiki.csiamerica.com/display/kb/Modal+analysis> [diakses pada tanggal 10 April 2015].
- Faizah, R., dan Widodo. 2013. Analisis Gaya Gempa Rencana Pada Struktur Bertingkat Banyak Dengan Metode Dinamik Respon Spektra. Disajikan pada *Konferensi Nasional Teknik Sipil 7*, Universitas Sebelas Maret (UNS-Solo).
- Nasution, F., dan Teruna, D. R. 2014. Perbandingan Analisis Statik Ekuivalen dan Analisis Dinamik Ragam Spektrum Respons pada Struktur Beraturan dan Ketidakteraturan Massa Sesuai RSNI 03-1726-201x. *Jurnal Teknik Sipil USU*, 3(1).
- National, G. t.t. *Ring of Fire*. http://education.nationalgeographic.com/education/encyclopedia/ring-fire/?ar_a=1 [diakses pada tanggal 15 Februari 2015]
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2006. Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis.
- Wight, J. K., dan MacGregor, J. G. 2012. *Reinforced Concrete Mechanics & Design*. United States of America: Pearson Education, Inc.