

# PENGARUH FAKTOR R DAN GEMPA BERULANG YANG MENGANDUNG *PULSE* TERHADAP DEFORMASI SRPM BETON BERTULANG

Ade Faisal<sup>1</sup>, Afiful Anshari<sup>1</sup>, Ridho Elfayed<sup>1</sup>, Bambang Hadibroto<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

<sup>2</sup>Fakultas Teknik, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia

e\_mail : adefaisal@umsu.ac.id

*Abstrak* — Bangunan dapat mengalami kehancuran karena magnituda yang besar dan kedekatan lokasi gedung dengan sumber gempa. Kehancuran juga bisa terjadi akibat gempa yang datang lebih dari sekali. Oleh karena itu perlu adanya studi untuk mengetahui akibat pengaruh gempa berulang pada struktur beton bertulang. Studi ini bertujuan untuk mencari tahu bagaimana respon struktur gedung bertingkat terhadap getaran gempa berulang yang mengandung efek pulse. Terdapat 5 model struktur dengan sistem yang berbeda yaitu sistem rangka pemikul momen (SRPM) khusus, menengah dan biasa. SRPM yang dievaluasi adalah SRPM berlantai 5, 10, 15, 20 dan 30 lantai. Analisa yang dipakai adalah metode respon spektrum untuk fase desain dan analisa riwayat waktu tidak linear tidak elastic untuk fase evaluasi. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa respon interstory drift (ID) atau simpangan antar tingkat pada SRPM yang mengalami gempa berulang adalah lebih besar dibanding respon akibat gempa tunggal. Respon ID maksimum akibat gempa berulang dapat mengalami kenaikan mencapai 194% bila dibandingkan dengan respon ID akibat gempa tunggal.

*Kata kunci:* interstory drift, analisa tidak linear, analisa riwayat waktu.

*Abstract* — The damage can occur to the building due to the big magnitude and distance the building to the source of the earthquake. Building damage could also occur due to earthquakes that are not singly exhibited. Therefore the study is needed to find out the effect of repeated earthquakes on the reinforced concrete structures. This study aims to define the response of multistory buildings affected by repeated earthquake with pulse effect. Five models of structures are taking into account as special, moderate and ordinary moment resisting frame systems (MRF). The MRF with 5, 10, 15, 20 and 30 floors are evaluated. The spectrum response method is employed for the design phase and the inelastic nonlinear time history analysis is used for the evaluation phase. The results obtained show that the interstory drift (ID) of MRF due to repeated earthquakes is greater than the response due to the single earthquake. The increment of ID due to repeated earthquakes can be achieving of 194% compared to the MRF response due to the single earthquake.

*Keywords:* interstory drift, nonlinear analysis, time history analysis.

## I. PENDAHULUAN

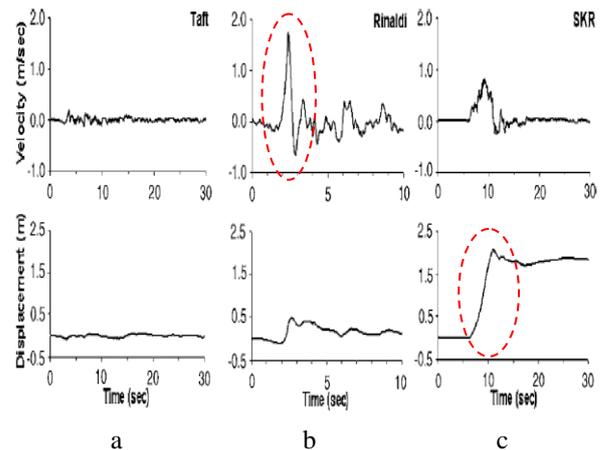
Indonesia merupakan negara yang mempunyai potensi gempa yang besar. Peristiwa gempa dapat menyebabkan semua yang ada di atas bumi termasuk infrastruktur bergerak ke segala arah. Pergerakan ini akan menyebabkan kerusakan bagi struktur dan membahayakan manusia yang berada di dalamnya. Penyelidikan empiris dan studi yang terkait dengan struktur rangka beton bertulang dibebani getaran gempa yang kuat menunjukkan sebuah hubungan yang sangat jelas antara simpangan antar tingkat (*interstory drift*) dan potensi kegagalan struktur. Harga kritis simpangan antar tingkat sebesar 2% terjadi pada lantai 7 pada bangunan beton

bertulang 10 lantai yang dibebani gempa sangat kuat (Kappos dan Manafpour, 2001). Negro dkk. (1996) melakukan uji sampai hancur dengan menggunakan beban dinamis tiruan pada bangunan beton bertulang 4 lantai yang menghasilkan harga kritis simpangan antar tingkat sebesar 7,18%. Bangunan beton bertulang berlantai 10 hasil studi Dymiotis dkk. (1999) menunjukkan kolom pertama kali hancur terjadi seketika setelah simpangan mencapai 3%. Semua studi di atas didasarkan pada getaran gempa tunggal, sehingga dipastikan kehancuran akan dialami bangunan tersebut bila gempa berikutnya yang lebih kuat atau sama kuat terjadi lagi kemudian.

Studi-studi tentang perilaku struktur akibat gempa berulang menunjukkan bahwa kerusakan yang lebih parah dapat dialami struktur bila gempa berulang terjadi (Amadio dkk., 2003). Hal yang sama juga dijelaskan oleh Hatzigeorgiou and Liolios (2010) dan Faisal dkk. (2013) dimana berbagai jenis bangunan bertingkat yang dimodelkan sebagai sistem rangka pemikul momen (SRPM) mengalami gempa berulang akan mengalami kerusakan yang lebih banyak dibanding bila mengalami gempa tunggal. Studi terkini yang membahas tentang topik perilaku struktur akibat gempa berulang adalah Zhai dkk. (2015a, 2015b) yang meneliti kerusakan yang terjadi pada struktur single degree of freedom (SDOF) dan juga faktor reduksi yang diperlukan. Kemudian Hatzivassiliou dan Hatzigeorgiou (2015) membahas lebih detail pengaruh gempa berulang terhadap gedung beton bertulang yang dianalisa secara 3 dimensi untuk mengetahui peningkatan kerusakan SRPM beton bertulang akibat gempa berulang. Sedangkan studi yang dilakukan Jalayer dan Ebrahimian (2016) memasukkan isu akibat gempa berulang ke dalam evaluasi resiko gempa untuk struktur gedung. Studi tentang kurva kerentanan SRPM beton bertulang akibat gempa berulang dilakukan oleh Hosseinpour dan Abdelnaby (2017). Dengan kurva ini akan lebih mudah diketahui seberapa jauh SRPM beton bertulang dapat menahan gempa berulang.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

Berdasarkan pola getaran gempa yang terekam, getaran gempa secara umum dapat dibagi kepada gempa jauh dan gempa dekat. Menurut Kalkan dan Kunnath (2006), gempa dekat dapat dikategorikan ke dalam dua perbedaan pola riwayat perpindahan yang bergantung pada proses kehancuran bantuan dan efek *directivity* yang sesuai dengan proses kehancuran batuan. Efek *directivity* tersebut terbagi ke dalam *forward directivity* (Gambar 2.1b) yang mengandung *pulse*, *backward directivity* (tanpa *pulse*) (Gambar 2.1a) yang mirip seperti getaran gempa jauh, dan efek *fling-step* (Gambar 2.1c). Kalkan dan Kunnath (2006) juga menjelaskan bahwa rekaman getaran gempa dekat adalah gempa yang direkam  $\leq 15$  km dari patahan (*fault rupture*).



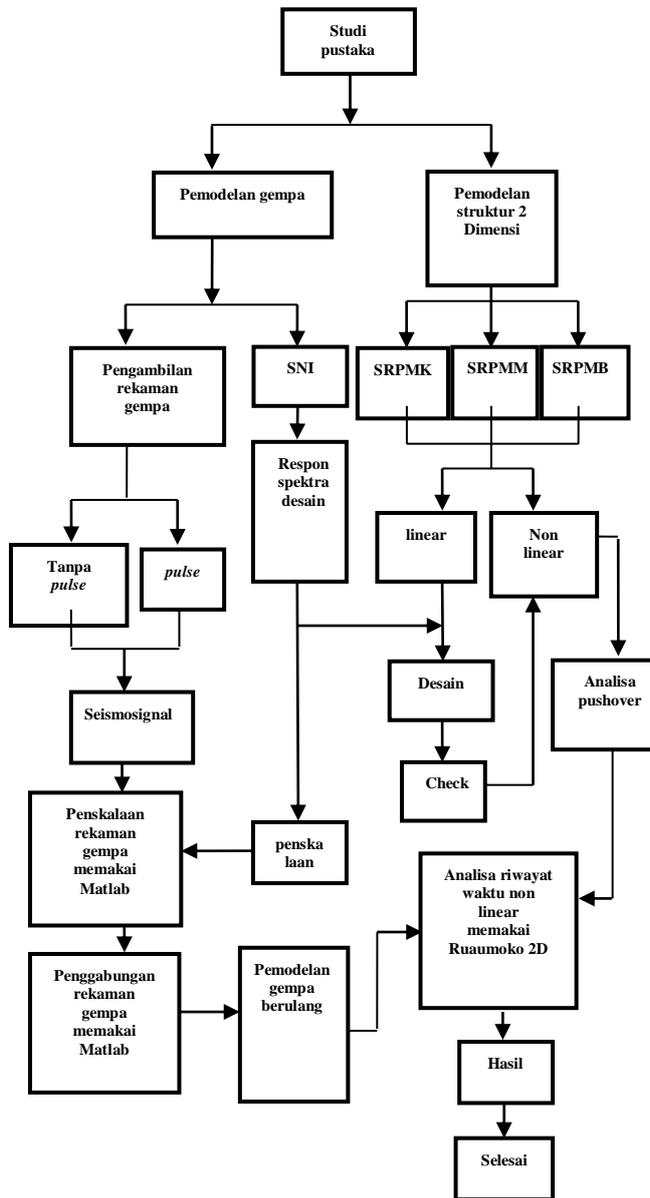
Gambar 1: Ciri khas rekaman getaran gempa dekat dalam bentuk riwayat waktu kecepatan dan perpindahan (a) gempa jauh, (b) gempa dekat mengandung pulse (*forward-directivity*), and (c) gempa dekat (*fling-step*) (Kalkan dan Kunnath, 2006).

Adiyanto dkk. (2011) dan Zahid dkk. (2012) menjelaskan pengaruh gempa dekat lebih signifikan pada struktur bangunan bertingkat banyak (SRPM) beton bertulang, baik itu yang bidang lantai simetris maupun yang tidak (Majid dkk., 2010; Faisal dan Halim, 2017), dibanding akibat gempa jauh diakibatkan adanya konten efek pulse dan/atau fling. Studi-studi ini juga menjelaskan bahwa gempa dekat yang berulang jauh lebih signifikan pengaruhnya. Namun demikian studi-studi ini tidak menjelaskan berapa kali getaran gempa dekat yang berulang terjadi, sehingga pengaruhnya terhadap SRPM (sistem rangka pemikul momen) belum didapati secara lengkap. Untuk itu makalah ini bertujuan untuk mendapatkan informasi tentang deformasi (simpangan antar tingkat) yang terjadi pada bangunan bertingkat beton bertulang, dalam hal ini SRPM, bila mengalami getaran gempa yang mengandung efek pulse secara berulang kali.

## III. METODE PENELITIAN

Secara umum, studi ini memakai metode seperti yang tampak pada Gambar 2 yaitu berdasarkan simulasi model. Ada 2 jenis pemodelan yang dipakai yaitu pemodelan gempa (mulai dari respon spektra, pemilihan rekaman gempa, penskalaan dan penggabungan rekaman) dan pemodelan struktur (model linear dan model

nonlinear). Hasil akhir studi ini adalah membandingkan respon struktur gedung akibat getaran gempa tunggal dan akibat gempa berulang, dan kemudian masing-masing akibat gempa jauh dan gempa dekat.

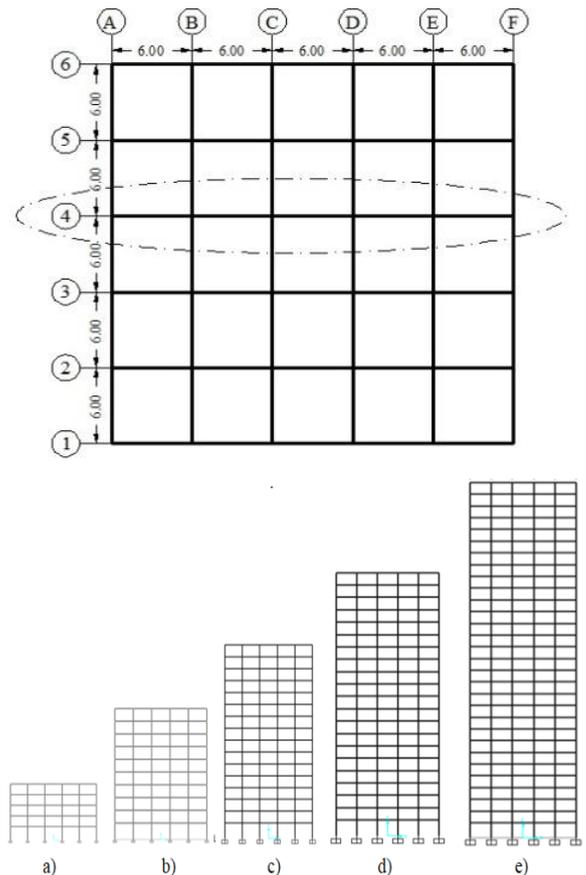


Gambar 2: Bagan alir penelitian.

Pemodelan Struktur Gedung dan Elemennya

Dalam studi ini, struktur bangunan yang dievaluasi adalah struktur beton bertulang dengan sistem rangka pemikul momen (SRPM) berbentuk persegi simetri (*regular building*) yang terletak di Kota Banda Aceh di atas tanah lunak, seperti yang terlihat pada Gambar 3.

Kondisi ini dipilih untuk mendapatkan keadaan bahaya gempa yang tinggi agar pengaruhnya kepada struktur tampak dengan jelas. Struktur gedung dimodelkan sebagai SRPM sebanyak 15 model yaitu Model 1 (5 lantai), Model 2 (10 Lantai), Model 3 (15 Lantai), Model 4 (20 Lantai), dan Model 5 (30 Lantai), seperti pada Gambar 3. Masing-masing model memiliki faktor modifikasi respon  $R=3$ ,  $R=5$  dan  $R=8$  untuk mewakili SRPMB, SRPMM dan SRPMK. Panjang bentang SRPM adalah tipikal sebesar 6 m dan seluruh tinggi lantai juga tipikal 3,5 m kecuali tinggi lantai 2 sebesar 4.5 m. Beton yang dipakai bermutu  $f_c'40$  MPa sedangkan mutu baja tulangan yang dipakai  $f_y 400$  MPa.



Gambar 3: Denah struktur gedung yang ditinjau dengan lima model SRPM interior sebagai struktur yang dievaluasi.

Kekuatan elemen struktur SRPM dimodelkan berdasarkan metoda FEMA dimana gaya momen hasil desain elastis dijadikan sebagai momen leleh ( $M_y$ ). Desain kekuatan lentur leleh elemen-elemen SRPMM dan SRPMB didasarkan kepada pembesaran

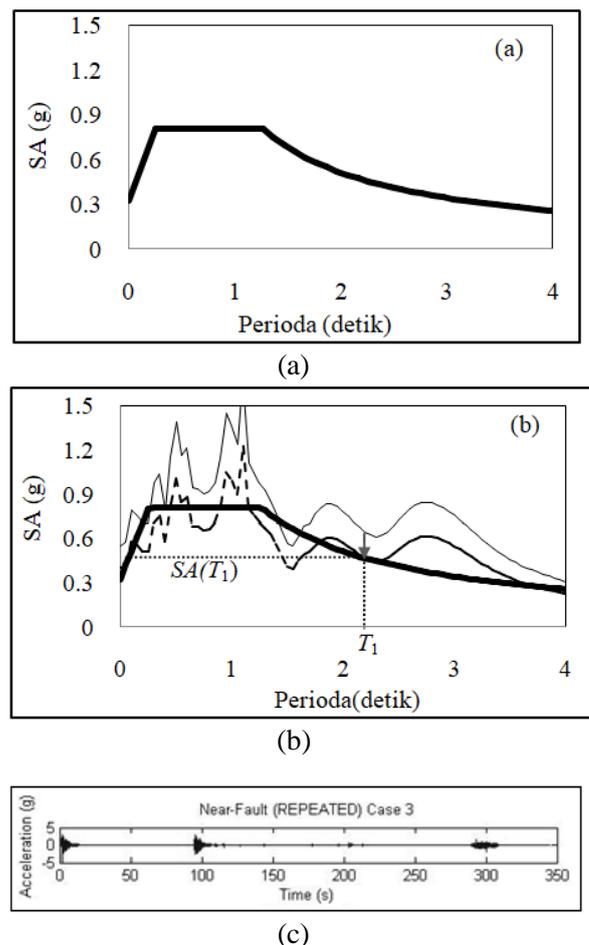
langsung dari kekuatan lentur leleh elemen-elemen yang dimiliki SRPMK, setelah terlebih dahulu dipastikan kondisi balok lemah kolom kuat telah terpenuhi pada model SRPMK pasca desain elastis. Sehingga ukuran penampang balok dan kolom milik SRPMM dan SRPMB adalah sama dengan milik SRPMK. Hal ini dibuat agar memperkecil faktor ketidakpastian (*uncertainty*) pemodelan dalam melakukan studi perbandingan.

Elemen balok dan kolom dimodelkan memakai balok Giberson atau lebih dikenal sebagai *lumped plasticity model*. Kapasitas sendi plastis (momen-rotasi) pada ujung-ujung elemen balok dan kolom dibuat memakai cara Haselton dkk. (2010) dengan pola hysteresis menggunakan model Takeda. Berdasarkan hasil  $M_y$  di atas kemudian dapat ditentukan rotasi leleh ( $\theta_y$ ). Kapasitas rotasi pasca leleh dan kapasitas momen maksimum yang dipakai disini adalah hasil studi Haselton dkk. (2010). Kapasitas rotasi pasca leleh menengah sebesar 0.04 rad digunakan untuk SRPMK, dan kapasitas rotasi pendek sebesar 0,02 rad untuk SRPMB dan SRPMM. Kapasitas momen maksimum elemen pada studi ini adalah  $M_{maks} = 1,13M_y$  yang didasarkan kepada data sejumlah hasil eksperimental di dunia terhadap elemen balok dan kolom beton bertulang (Haselton dkk., 2010).

**Pemodelan Getaran Gempa**

Getaran gempa (*ground motion*) pada studi ini diambil dari rekaman gempa yang terjadi di negara lain yang tersedia di <http://peer.berkeley.edu> milik *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Next Generation Attenuation (NGA)* dan database *COSMOS Strongmotion Data Center (http://strongmotioncenter.org)*. Pemilihan rekaman didasarkan kepada kriteria gempa terdekat dengan lokasi yang ditinjau, magnitude gempa, mekanisme patahan dan jenis tanah yang sesuai dengan jenis tanah di lokasi gedung. Rekaman gempa dekat (mengandung efek *pulse*) dan gempa jauh (tanpa efek *pulse*) yang terpilih ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2. Rekaman ini kemudian diskalakan kepada nilai spektrum percepatan desain elastis (Gambar 4c) pada saat periodanya sama dengan perioda alami struktur gedung,  $SA(T_1)$ . Alasan metode penskalaan ini

dipilih, bukan metode *spectral matching*, adalah agar konten *pulse* pada rekaman gempa dekat tidak hilang. Spektrum percepatan desain elastis yang dipakai untuk gempa 2500 tahun ditunjukkan pada Gambar 4a. Getaran gempa tunggal hasil penskalaan kemudian dirangkai menjadi satu riwayat waktu sebagai gempa berulang, dengan memakai percepatan nol sebagai pemisah untuk memberikan waktu kepada struktur melakukan getaran bebas pasca getaran gempa, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4c. Pada studi ini gempa berulang yang digunakan adalah gempa berulang 2 kali dan 3 kali. Pengaruh kedua jenis gempa ini kepada struktur SRPM dibandingkan dengan pengaruh gempa tunggal.



Gambar 4: a) Spektra desain elastik Kota Banda Aceh, b) penskalaan rekaman gempa, (c) hasil penggabungan rekaman gempa untuk memodelkan gempa berulang 3 kali.

**Analisa Struktur**

Analisa struktur yang digunakan pada studi ini adalah metode respon spektrum (fase

desain) dan analisa respon riwayat waktu nonlinear tidak elastik (fase evaluasi).

Tabel 1: Rekaman getaran gempa jauh (tanpa *pulse*) dari PEER NGA.

Gempa	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun Gempa	Magnituda
1	San Fernando	2011	LA - Hollywood Stor FF	6.61
2	San Fernando	1999	Palmdale Fire Station	6.61
3	Santa Barbara	2004	Cachuma Dam Toe	5.92
4	Imperial Valley-06	1999	Calipatria Fire Station	6.53
5	Irpinia_Italy-01	1997	Brienza	6.9
6	Taiwan SMART1(5)	1992	SMART1 M07	5.9
7	Coalinga-02	1997	ALP (temp)	5.09
8	Whittier Narrows-01	1997	Burbank - N Buena Vista	5.99
9	Northridge-01	2004	LA - Baldwin Hills	6.69
10	Chi-Chi_Taiwan	2011	CHY046	7.62

Tabel 2: Rekaman getaran gempa *Pulse* dari PEER NGA dan COSMOS.

Gempa	Nama Gempa	Tahun	Nama Stasiun Gempa	Magnituda
1	Christchurch New Zealand	2011	CBGS	6.1
2	Chi-Chi Taiwan	1999	TCU129	6.2
3	Niigata japan	2004	NIG020	6.6
4	Chi-Chi Taiwan	1999	TCU129	7.6
5	Northwest China	1997	Jianshi	5.8
6	Mendocino cape	1992	Petrolia CA	6.6
7	Nocera Umbra	1997	NCR	5.4
8	Nocera Umbra	1997	NCR	5.7
9	Hokkaido japan	2004	HKD071	7.0
10	Tohoku japan	2011	MYG001	7.1

Alat bantu yang dipakai untuk melakukan analisa struktur adalah Ruaumoko 2D versi 4.0 (Carr, 2010). Semua hasil analisa struktur linear untuk desain telah diperiksa dan telah memenuhi apa yang disyaratkan di dalam SNI 1726:2012 sebelum dilakukan analisa tidak linear.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Perioda alami masing-masing model yang diperoleh dari analisis ragam getar adalah 0,41 detik untuk Model 1 (5 lantai), 0,80 detik untuk Model 2 (10 lantai), 1,16 detik untuk Model 3 (15 lantai), 1,58 detik untuk Model 4 (20 lantai) dan 2,23 detik untuk Model 5 (30 lantai). Hasil analisa riwayat waktu tidak linear tidak elastik yang ditinjau adalah simpangan antar tingkat atau *interstory drift* (disingkat dengan *ID*).

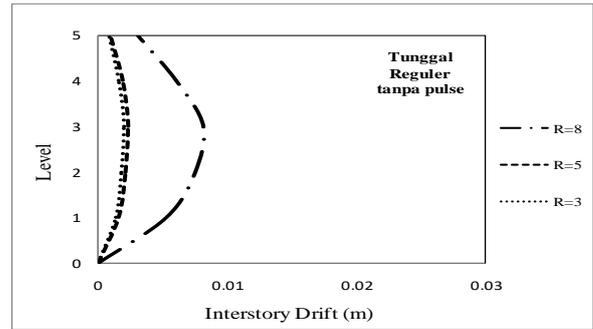
Gambar 5 menunjukkan variasi respon *ID* terhadap gempa tunggal dan gempa berulang untuk masing-masing faktor R pada Model 1. Tampak dengan jelas bahwa perbedaan respon SRPM yang memiliki R=5 dengan R=3 adalah tidak signifikan, bila dibandingkan dengan perbedaan respon keduanya dengan SRPM yang memiliki R=8 yang mencapai hampir 4 kali lipat. Respon SRPM terhadap getaran gempa jauh (tanpa *pulse*) juga tampak jelas lebih kecil dari respon SRPM terhadap gempa dekat (mengandung *pulse*) (lihat Gambar 5b dan 5a). Pada Model 1 tampak bahwa respon gempa berulang tidak begitu signifikan seperti ditunjukkan Gambar 5d dan 5c dengan Gambar 5b. Posisi lantai yang mengalami respon *ID* maksimum tampak tidak berubah, baik itu akibat gempa tunggal maupun gempa berulang. Pengaruh adanya efek *pulse* menyebabkan kenaikan respon *ID* mencapai 16% untuk gempa tunggal, sedangkan untuk gempa berulang kenaikan respon *ID* dapat mencapai 29% bila dibandingkan terhadap gempa tunggal.

Respon *ID* Model 2 akibat gempa tunggal dan gempa berulang ditunjukkan pada Gambar 6. Tampak pada gambar ini bahwa posisi respon *ID* maksimum masih di lantai pertengahan, walaupun sudah tampak perubahan bentuk pola *ID* secara jelas. Perbedaan respon antara SRPM yang memiliki R=5 dengan R=3 juga mulai tampak jelas dan signifikan. Pada kasus Model 2 diperoleh perbedaan respon *ID* maksimum mencapai 47% yaitu untuk respon akibat gempa tunggal mengandung efek *pulse*. Sedangkan respon akibat gempa berulang mengandung *pulse* dapat menyebabkan kenaikan respon mencapai 2 kali lipat lebih.

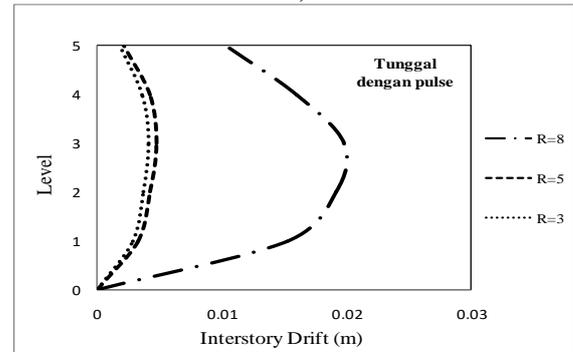
Gambar 7 menunjukkan respon ID pada Model 3 terhadap gempa tunggal dan berulang. Tampak dengan jelas bahwa posisi lantai yang mengalami respon *ID* maksimum adalah berbeda antara SRPM yang memiliki R=5 dan R=3 dengan SRPM yang memiliki R=8. SRPM dengan R=5 dan R=3 cenderung memiliki *ID* maksimum pada bagian lantai atas, sedangkan SRPM dengan R=8 memiliki respon *ID* maksimum pada lantai bawah. Perbedaan respon *ID* untuk SRPM akibat gempa dekat tunggal mencapai 73% bila dibandingkan dengan respon SRPM akibat gempa jauh tunggal. Untuk respon akibat gempa berulang, kenaikan respon dapat mencapai 160% bila dibandingkan dengan respon akibat gempa tunggal.

Perbedaan respon akibat gempa dekat tunggal dengan gempa jauh tunggal untuk Model 4 dapat mencapai 93%. Gempa berulang didapat dapat menyebabkan kenaikan respon *ID* sampai mencapai 185% dibandingkan dengan respon akibat gempa tunggal. Gambar 8 menjelaskan posisi *ID* maksimum untuk Model 4 mirip dengan Model 3, yaitu *ID* maksimum terjadi pada lantai atas untuk SRPM dengan R=5 dan R=3, sedangkan SRPM dengan R=8 memiliki *ID* maksimum pada lantai bawah.

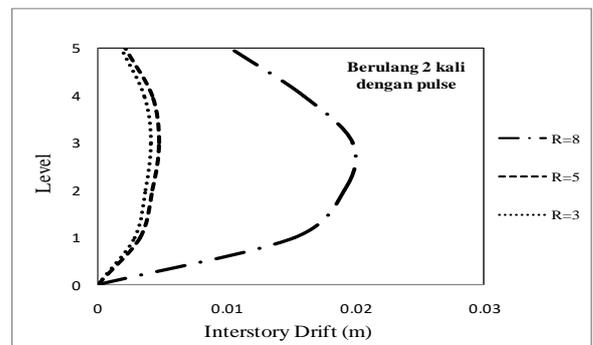
Respon *ID* terhadap gempa tunggal dan berulang untuk Model 5 ditunjukkan pada Gambar 9. Di sini respon *ID* pada SRPM akibat gempa dekat tunggal hanya mengalami kenaikan 56% dibandingkan dengan respon akibat gempa jauh. Ini lebih kecil 37% dari respon yang dialami Model 4. Respon terhadap gempa berulang juga diperoleh lebih kecil dibanding respon yang dialami Model 4, yaitu mencapai 194%. Pada kasus ini respon akibat gempa berulang 3 kali adalah lebih kecil dibanding respon akibat gempa berulang 2 kali. Kondisi ini terbalik dengan apa yang diperoleh pada Model 1 sampai dengan Model 4. Posisi *ID* maksimum pada Model 5 tampak sama dengan yang terjadi pada Model 4. Gambar 9 jelas sekali menunjukkan posisi *ID* maksimum terjadi pada lantai bawah untuk SRPM dengan R=8. Sedangkan untuk SRPM dengan R=5 dan R=3 posisi *ID* maksimum terjadi pada lantai atas.



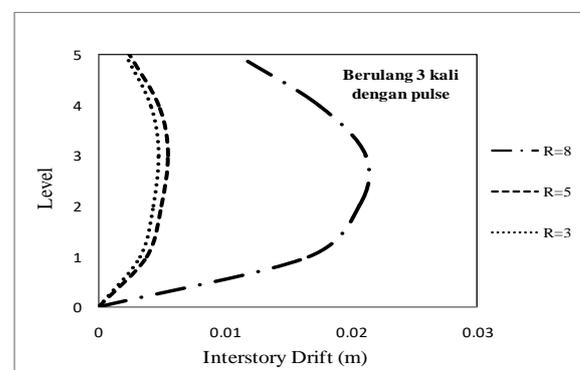
a)



b)

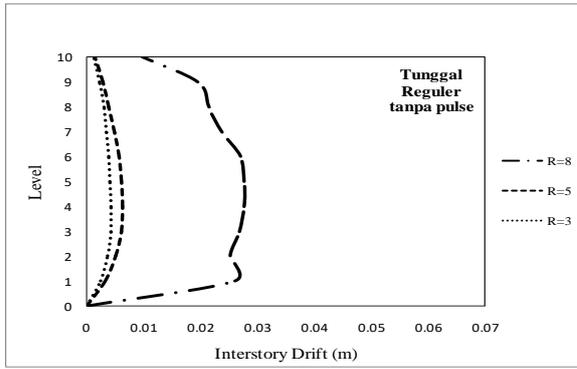


c)

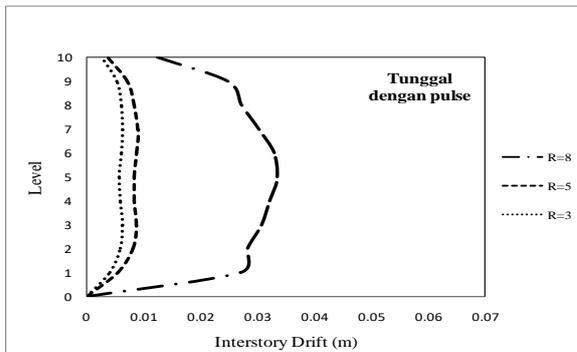


d)

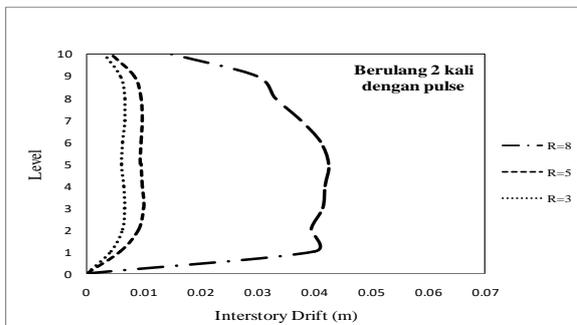
Gambar 5: Nilai rata-rata *Interstory Drift* (*ID*) untuk struktur beton SRPM 5 lantai dengan R=8, R=5, dan R=3: a) *ID* akibat gempa tanpa *pulse* tunggal, b) *ID* akibat gempa *pulse* tunggal, c) *ID* akibat gempa *Pulse* berulang 2 kali, d) *ID* akibat gempa *pulse* berulang 3 kali.



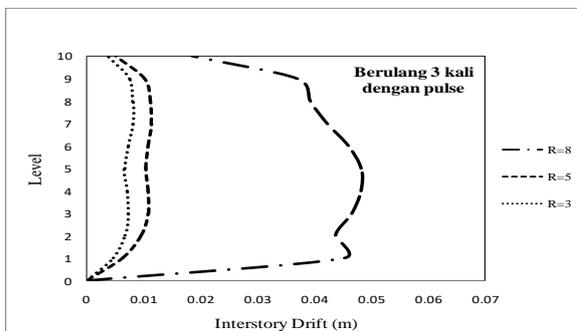
a)



b)

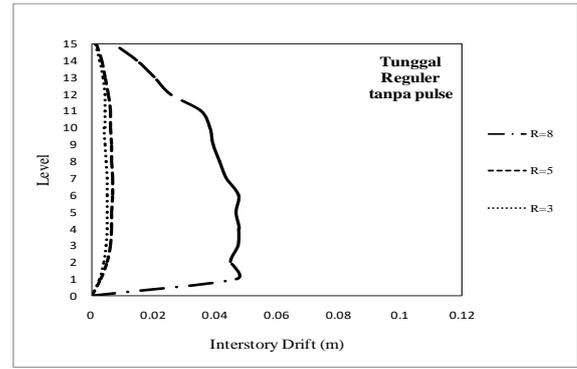


c)

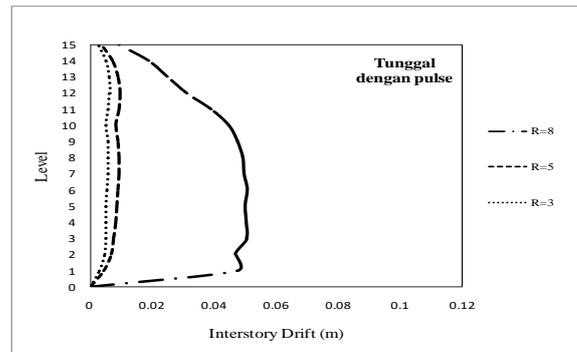


d)

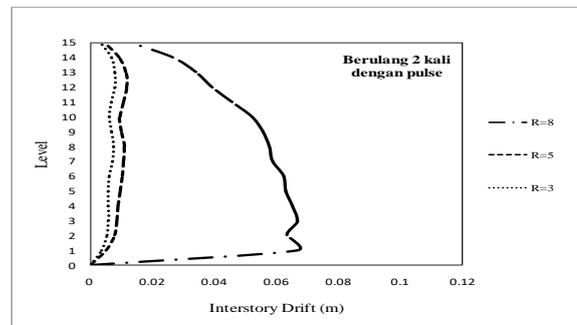
Gambar 6: Nilai rata-rata *Interstory Drift* untuk struktur beton SRPM 10 lantai dengan faktor R=8, R=5, dan R=3: a) *ID* akibat gempa tanpa *pulse* tunggal, b) *ID* akibat gempa *pulse* tunggal, c) *ID* akibat gempa *Pulse* berulang 2 kali, d) *ID* akibat gempa *pulse* berulang 3 kali.



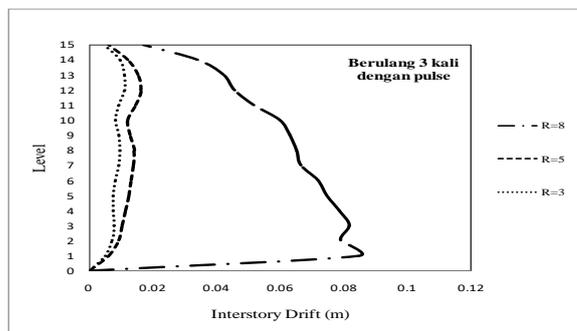
a)



b)

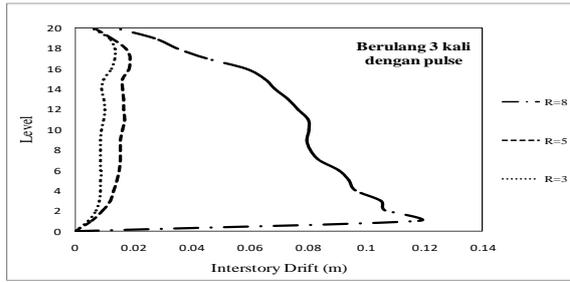


c)

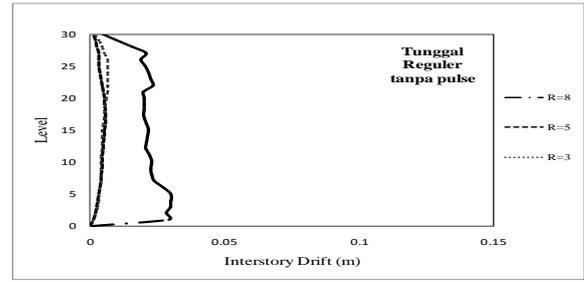


d)

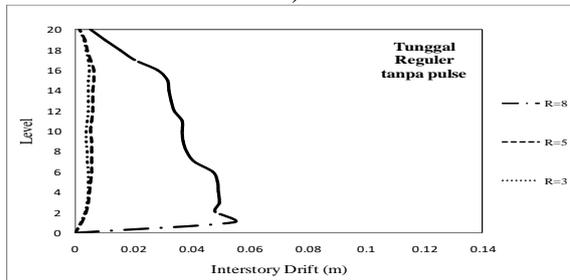
Gambar 7: Nilai rata-rata *Interstory Drift* untuk struktur beton SRPM 15 lantai dengan faktor R=8, R=5, dan R=3: a) *ID* akibat gempa tanpa *pulse* tunggal, b) *ID* akibat gempa *pulse* tunggal, c) *ID* akibat gempa *Pulse* berulang 2 kali, d) *ID* akibat gempa *pulse* berulang 3 kali.



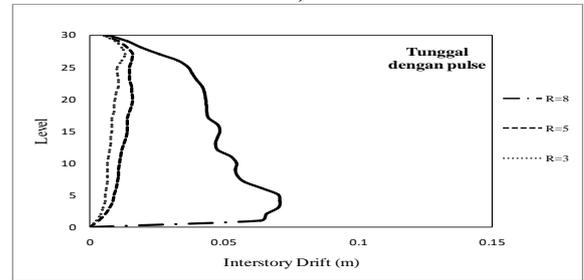
a)



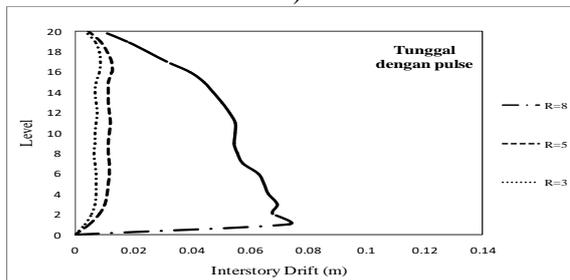
a)



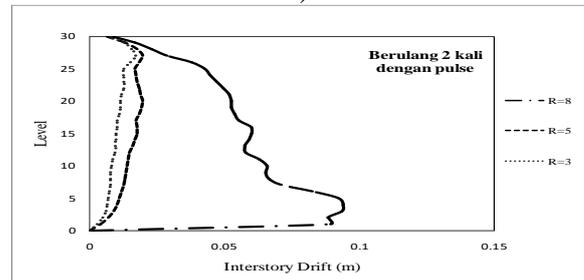
b)



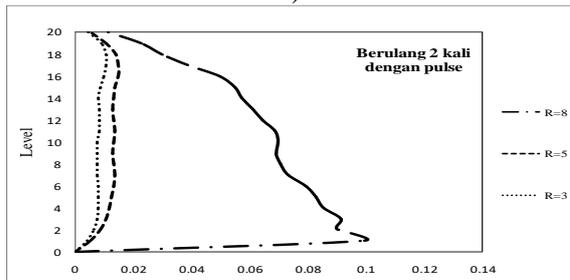
b)



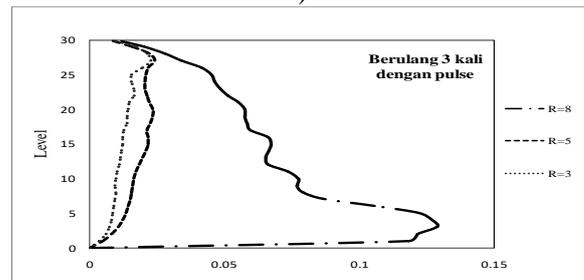
c)



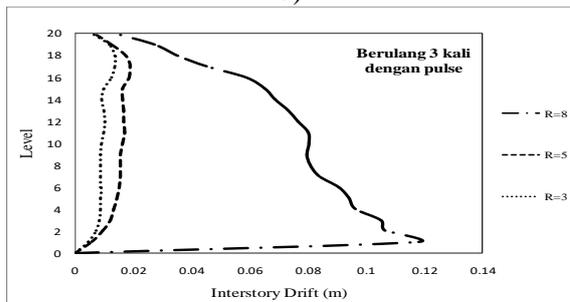
c)



d)



d)



e)

Gambar 8: Nilai rata-rata *Interstory Drift* untuk struktur beton SRPM 20 lantai dengan faktor R=8, R=5, dan R=3: a) ID akibat gempa tanpa *pulse* tunggal, b) ID akibat gempa *pulse* tunggal, c) ID akibat gempa *Pulse* berulang 2 kali, d) ID akibat gempa *pulse* berulang 3 kali, e) Gempa *Pulse* berulang 3 kali.

Gambar 9: Nilai rata-rata *Interstory Drift* untuk struktur beton SRPM 30 lantai dengan faktor R=8, R=5, dan R=3: a) ID akibat gempa tanpa *pulse* tunggal, b) ID akibat gempa *pulse* tunggal, c) ID akibat gempa *Pulse* berulang 2 kali, d) ID akibat gempa *pulse* berulang 3 kali.

## V. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan dapat diambil berdasarkan hasil simulasi terhadap 5 model gedung bertingkat banyak, yaitu 5 lantai sampai dengan 30 lantai, yang memiliki kekuatan (faktor R) yang berbeda yaitu:

1. Perbedaan respon ID maksimum akibat gempa dekat tunggal selalu lebih besar dari

- respon akibat gempa jauh tunggal. Ini berlaku untuk semua model yang ditinjau.
2. Peningkatan respon selalu terjadi pada SRPM yang mengalami gempa berulang.
  3. Semakin tinggi (atau semakin banyak lantai) gedung maka semakin naik respon ID nya, baik itu akibat gempa tunggal maupun akibat gempa berulang
  4. Kenaikan respon ID akibat gempa berulang dapat mencapai 194% bila dibandingkan dengan respon akibat gempa tunggal.
  5. Posisi lantai yang mengalami respon ID maksimum adalah sama baik itu untuk gempa tunggal maupun gempa berulang dan hanya akan berbeda untuk SRPM yang memiliki faktor  $R=8$  pada Model 3, 4 dan 5.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Adiyanto, M.I., Faisal, A., Majid, T.A. (2013) Nonlinear behaviour of reinforced concrete building under repeated earthquake excitation *International Conference on Computer and Software Modeling, IPCSIT*, Malaysia.
- Amadio, C., Fragiaco, M., and Rajgelj, S. (2003). The effects of repeated earthquake ground motions on the non linear response of SDOF systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 32(2), 291-308.
- Badan Standarisasi Nasional (2012) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung SNI 1726:2012*. Jakarta: Departemen Pekerjaan Umum.
- Carr, A. J. (2010) *Ruamoko Manual Volume: 1, Theory and User Guide to Associated Program*. University of Canterbury.
- Dymiotis, C., Kappos, A.J., Chryssanthopoulos, M.K., (1999). Seismic reliability of RC frames with uncertain drift and member capacity. *Journal of Structural Engineering* (ASCE) 125(9).
- Faisal, A., & Halim, G. (2017). Studi parametrik deformasi torsi lantai bangunan asimetris sebidang dipengaruhi oleh gempa pulse dan tanpa pulse. *Portal: Jurnal Teknik Sipil*, 9(2).
- Faisal, A., Majid, T. A., & Hatzigeorgiou, G. D. (2013). Investigation of story ductility demands of inelastic concrete frames subjected to repeated earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 42-53.
- Hatzigeorgiou, G. D., and Liolios, A. A. (2010). Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. *Soil dynamics and earthquake engineering*, 30(10), 1010-1025.
- Hatzivassiliou, M., & Hatzigeorgiou, G. D. (2015). Seismic sequence effects on three-dimensional reinforced concrete buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 77-88.
- Haselton, C. B., Liel, A. B., Deierlein, G. G., Dean, B. S., & Chou, J. H. (2010). Seismic collapse safety of reinforced concrete buildings. I: Assessment of ductile moment frames. *Journal of Structural Engineering*, 137(4), 481-491.
- Hosseinpour, F., & Abdelnaby, A. E. (2017). Fragility curves for RC frames under multiple earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 98, 222-234.
- Jalayer, F., & Ebrahimian, H. (2016). Seismic risk assessment considering cumulative damage due to aftershocks. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Kalkan, E., & Kunnath, S. K. (2006). Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake spectra*, 22(2), 367-390.
- Kappos, A., & Manafpour, A. (2001). Seismic design of R/C buildings with the aid of advanced analytical techniques. *Engineering Structures*. 23, 319-332.
- Majid, T. A., Wan, H. W., Zaini, S. S., Faisal, A., & Wong, Z. M. (2010). The effect of ground motion on non-linear performance of asymmetrical

- reinforced concrete frames. *Disaster Advances*, 3(4), 35-39.
- Negro, P., Pinto, A.V., Verzeletti, G., Magonette, G.E. (1996). PsD test on four-story R/C building designed according to Eurocode. *Journal of Structural Engineering* (ASCE). 122(12).
- Zhai, C. H., Wen, W. P., Li, S., & Xie, L. L. (2015a). The ductility-based strength reduction factor for the mainshock–aftershock sequence-type ground motions. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(10), 2893-2914
- Zhai, C. H., Zheng, Z., Li, S., & Xie, L. L. (2015b). Seismic analyses of a RCC building under mainshock–aftershock seismic sequences. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 74, 46-55.