

Analisis Riwayat Waktu Nonlinier Struktur *Flat Slab* dengan OpenSees Navigator

*Samsul A Rahman Sidik Hasibuan, Yoyong Arfiadi, Junaedi Utomo
Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Yogyakarta
) samsulhasibuan@gmail.com

Received: 1 Mei 2021 Revised: 8 Juli 2022 Accepted: 15 Juli 2022

Abstract

Structural systems that do not use a beam as the main component were first developed by Turner in 1906. This structural system is better known as a flat slab. The flat slab structure is supported by column heads and drop panels, or without drop panels, or without column heads. Several building codes such as IS 456:2000, ACI 318-08, ACI 318-19, EC 2:2004, and NZS 3101 (Part 1):2006 provide guidance for designing flat slab systems under gravity loads only. However, many flat slab buildings are also built in areas with high earthquakes which can cause the collapse of buildings due to earthquake loads. In this paper the 10-level flat slab building structure design results are analyzed using nonlinear time history response analysis with the help of OpenSees Navigator software using several earthquake records, namely Kobe (Japan, 1995), Imperial Valley (California, 1979) and Tabas (Iran, 1978) which has been adjusted to the design spectra of the city of Yogyakarta. From the results of the analysis using OpenSees Navigator, it was found that the story drift that occurred was still within the limits required in the regulations, so that the building being reviewed was still within the limits of life safety design.

Keywords: *Flat slab, nonlinear analysis, opensees navigator, PEER*

Abstrak

Pengembangan sistem struktur yang tidak menggunakan balok sebagai komponen utama pertama kali diajukan oleh Turner pada tahun 1906. Sistem struktur ini lebih dikenal dengan flat slab. Struktur flat slab didukung oleh kepala kolom dan drop panel, atau tanpa drop panel, atau tanpa kepala kolom. Beberapa peraturan bangunan seperti IS 456:2000, ACI 318-19, EC 2:2004, dan NZS 3101 (Part 1):2006 hanya memberikan pedoman untuk merancang sistem flat slab di bawah beban gravitasi saja. Namun demikian, bangunan flat slab juga banyak dibangun di daerah dengan gempa tinggi yang dapat menyebabkan runtuhnya bangunan akibat beban gempa. Dalam tulisan ini struktur gedung flat slab 10 tingkat hasil rancangan dianalisis menggunakan analisis riwayat waktu respons nonlinier dengan bantuan software OpenSees Navigator menggunakan beberapa rekaman gempa yaitu Kobe (Jepang, 1995), Imperial Valley (California, 1979) dan Tabas (Iran, 1978) yang telah disesuaikan dengan spektra desain kota Yogyakarta. Dari hasil analisis menggunakan OpenSees Navigator diperoleh bahwa story drift yang terjadi masih dalam batas-batas yang disyaratkan dalam peraturan, sehingga gedung yang ditinjau masih dalam batas perencanaan life safety.

Kata kunci: *Analisis nonlinier, flat slab, opensees navigator, PEER*

Pendahuluan

Umumnya pelat diklasifikasikan dalam pelat satu arah dan pelat dua arah. Pelat yang berdefleksi secara dominan dalam satu arah disebut pelat satu arah. Pelat yang dipikul oleh kolom yang disusun berbaris sehingga pelat dapat berdefleksi dalam dua arah disebut pelat dua arah. Pada struktur

bangunan terdapat beberapa komponen utama yang sangat penting yaitu pelat, balok, kolom, *sloof* dan fondasi. Komponen utama tersebut sebagian besar menggunakan bahan beton sehingga perencanaan konstruksi yang menggunakan beton mulai mengalami peningkatan (McCormac & Nelson, 2006). Tahun 1906 seorang ahli dari luar negeri yang bernama C.A.P Turner

untuk pertama kalinya mengembangkan suatu tipe konstruksi yang tidak menggunakan salah satu komponen utama yaitu balok (Gasparini, 2002).

Tipe konstruksi tanpa menggunakan balok lebih dikenal dengan *flat slab*. Struktur *flat slab* didukung oleh kepala kolom dan *drop panel*, atau tanpa *drop panel*, atau tanpa kepala kolom (Mariyam & Jamle, 2019). *Flat slab* termasuk pelat dua arah non prategang, *flat slab* adalah pelat beton bertulang yang mentransfer beban langsung ke kolom tanpa adanya balok sepanjang garis kolom dalam, namun balok tepi luar boleh jadi ada atau tidak disesuaikan dengan kebutuhan. *Flat slab* mempunyai kekuatan geser yang cukup, karena terdapat *drop panel* yang merupakan penebalan pelat di kepala kolom. *Flat slab* sangat cocok untuk beban berat dan bentang panjang.

Konsep perencanaan *flat slab* dapat dilakukan dengan dua cara yaitu metode perancangan langsung dan metode portal ekuivalen. Sistem pelat diizinkan untuk didesain dengan prosedur yang memenuhi kondisi kesetimbangan dan kompatibilitas geometrik, yang memenuhi kekuatan desain di setiap penampang paling sedikit sama dengan kekuatan perlu, dan semua persyaratan kemampuan layan terpenuhi (SNI 2847, 2019). *Flat slab* memiliki beberapa tipe yang dapat dilihat pada Gambar 1 (Patil & Sigi, 2014; Kandpal, 2015; Grish, 2018; Robertson, 1997). Kelebihan dari struktur *flat slab* yaitu mampu mereduksi tinggi bangunan, menghemat konstruksi material, kemudahan dalam akses dan akomodasi penyaluran mekanikal dan elektrik. Kelemahan struktur *flat slab* adalah kurangnya ketahanan terhadap beban lateral, seperti yang disebabkan oleh angin kencang dan gempa bumi, sehingga dinding geser harus selalu disediakan jika

digunakan dalam konstruksi tingkat tinggi (Vargesh, 2005; Russell, 2018).

Analisis riwayat waktu respons nonlinier dapat digunakan sesuai dengan persyaratan yang ada untuk menunjukkan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas dalam menahan guncangan gempa maksimum (MCER) dengan kinerja yang dapat diterima. Analisis riwayat respons nonlinier harus mencakup efek gerakan horizontal (SNI 1726, 2019). Hasil analisis harus memenuhi kriteria penerimaan yaitu struktur harus dibuktikan untuk memenuhi kriteria penerimaan pada tingkat global maka respons yang tidak dapat diterima adalah (1) Solusi analitis tidak konvergen, (2) prediksi deformasi yang bekerja pada elemen yang dikontrol deformasi (*deformation-controlled*) melebihi rentang pemodelan yang valid, (3) prediksi gaya yang bekerja pada elemen yang dikontrol gaya (*force-controlled*) kritis atau biasa, (4) prediksi kebutuhan deformasi pada elemen yang tidak dimodelkan secara eksplisit melebihi batas deformasi dimana elemen tersebut tidak mampu mendukung beban gravitasi sendiri.

Hasil dari analisis dinamik nonlinier untuk setiap arah pembebanan dibandingkan dalam hal maksimum *drift demands* dan tujuan kinerja dasar untuk hasil (FEMA 356, 2000) dan batas *drift* yang ditampilkan pada Tabel 1. Nilai dalam Tabel 1 menunjukkan nilai *drift* maksimum untuk berbagai tingkat kerusakan yaitu kerusakan ringan, kerusakan sedang, kerusakan parah dan hampir runtuh untuk bangunan *non-engineered* dan *engineered* (Chaulagain *et al.*, 2015; Almeida *et al.*, 2015). Batasan nilai *story drift* desain tidak boleh melebihi *story drift* yang diizinkan oleh peraturan (SNI 1726, 2019). *Story drift* izin yang ditetapkan oleh peraturan ditampilkan pada Tabel 2.



Gambar 1. Tipe flat slab (a) bertumpu langsung pada kolom, (b) dengan kepala kolom, (c) dengan drop panel, (d) dengan drop panel dan kepala kolom.

Tabel 1. Level kinerja and maximum drift limits

Performance Level	FEMA-356	Ghobarah (2004)		Proposed drift limits	
	RC buildings	Non-ductile MRF	Ductile MRF	Non-engineered buildings	Engineered buildings
Slight damage (fully operational)	0.20	0.20	0.40	0.30	0.50
Moderate damage (operational)	0.50	<0.50	<1.0	0.70	1.0
Extensive damage (life safety)	1.50	0.80	1.80	1.50	2.15
Near collapse	2.50	>1.0	>3.0	2.50	3.50

Tabel 2. Story drift izin, Δ_a

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 <i>story drift</i>	$0,025h_{sx}^c$	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$
Struktur dinding geser kantilever batu bata	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$	$0,010h_{sx}$
Struktur dinding geser batu bata lainnya	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$	$0,007h_{sx}$
Semua struktur lainnya	$0,020h_{sx}$	$0,015h_{sx}$	$0,010h_{sx}$

Catatan:
 h_{sx} adalah tinggi tingkat di bawah tingkat- x .
 c tidak boleh ada batasan *story drift* untuk struktur satu tingkat dengan dinding interior, partisi, langit-langit, dan sistem dinding eksterior yang telah didesain untuk mengakomodasi *story drift*.

Tabel 3. Dimensi dan penulangan struktur gedung

Struktur	Tebal (mm)	Dimensi (mm)	Penulangan	
			Tulangan Pokok	Tulangan Sengkang
Kolom 1		800 x 800	16 D 22 mm	P10-150 mm
Kolom 2		400 x 400	6 D 13 mm	P10-150 mm
Pelat	210			
Drop panel	300	2000 x 2000		

Beberapa peraturan seperti IS 456:2000, ACI 318-19, EC 2:2004, dan NZS 3101 (Part 1):2006 hanya memberikan pedoman untuk merancang sistem *flat slab* di bawah beban gravitasi saja (Sen & Singh, 2019). Namun demikian, bangunan *flat slab* juga banyak dibangun di daerah dengan gempa tinggi yang dapat menyebabkan runtuhnya bangunan akibat beban gempa (More & Sawant, 2015; Sanjay *et al*, 2014; Srinivasulu & Kumar, 2015).

Struktur gedung penahan gempa secara umum memakai konsep *force based design*. Konsep dari *force based design* hanya berdasarkan kondisi elastis struktur dan tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya di mana struktur gedung mengalami kondisi inelastis ketika mengalami peristiwa gempa. Sehingga perlu dilakukan analisis kinerja seismik untuk mengetahui kinerja struktur gedung ketika mencapai kondisi inelastis yang merupakan konsep *performance based design* (Indotjoa *et al*, 2018). Saat ini metode yang paling mutakhir untuk melakukan asesmen kerusakan seismik bangunan adalah *performance based design* melalui analisis dinamik nonlinier riwayat waktu (Junaedi *et al*, 2019; Mamun & Saatcioglu, 2017).

Dalam tulisan ini struktur gedung *flat slab* 10 tingkat hasil rancangan (Hasibuan & Kurniati, 2020) akan dianalisis menggunakan analisis nonlinier riwayat waktu dengan bantuan *software* OpenSees Navigator (Akhter & Arfiadi, 2019; Mazzoni *et al*, 2006; Mazzoni, 2008; Mckenna, 2012) menggunakan rekaman gempa PEER yaitu Kobe (Jepang, 1995), Imperial Valley (California,

1979) dan Tabas (Iran, 1978) yang telah disesuaikan dengan spektra desain kota Yogyakarta. Tulisan ini bertujuan untuk mengetahui perilaku dinamik riwayat waktu respons nonlinier berupa *displacement* dan *story drift* pada masing-masing tingkat.

Metode

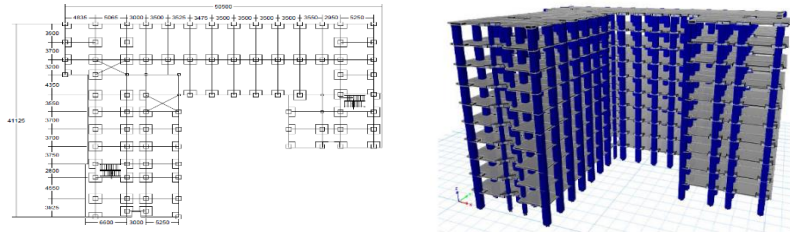
Struktur gedung tipe *flat slab* 10 tingkat hasil perancangan dianalisis dengan metode analisis dinamik riwayat waktu nonlinier dari beberapa rekaman gempa PEER yang dipilih yaitu gempa Kobe (Jepang, 1995), Imperial Valley (California, 1979) dan Tabas (Iran, 1978) dengan bantuan *software* OpenSees Navigator. Denah lantai 1-10 dan bentuk 3D struktur gedung *flat slab* hasil perancangan ditampilkan pada Gambar 2.

Data hasil perancangan struktur meliputi 1) tipe struktur gedung adalah *flat slab*, 2) lokasi di Yogyakarta, 3) jenis tanah adalah sedang, 4) tinggi total struktur gedung adalah 31 meter, 5) tinggi antar lantai adalah 3,1 meter, 6) ukuran gedung 41,125 meter x 50,5 meter, 7) mutu beton 30 Mpa, 8) mutu baja adalah ulir 400 MPa, polos 240 Mpa, 9) periode getar alami struktur (T) 1,04 detik dan 10) dimensi dan penulangan pada struktur gedung diuraikan dalam Tabel 2.

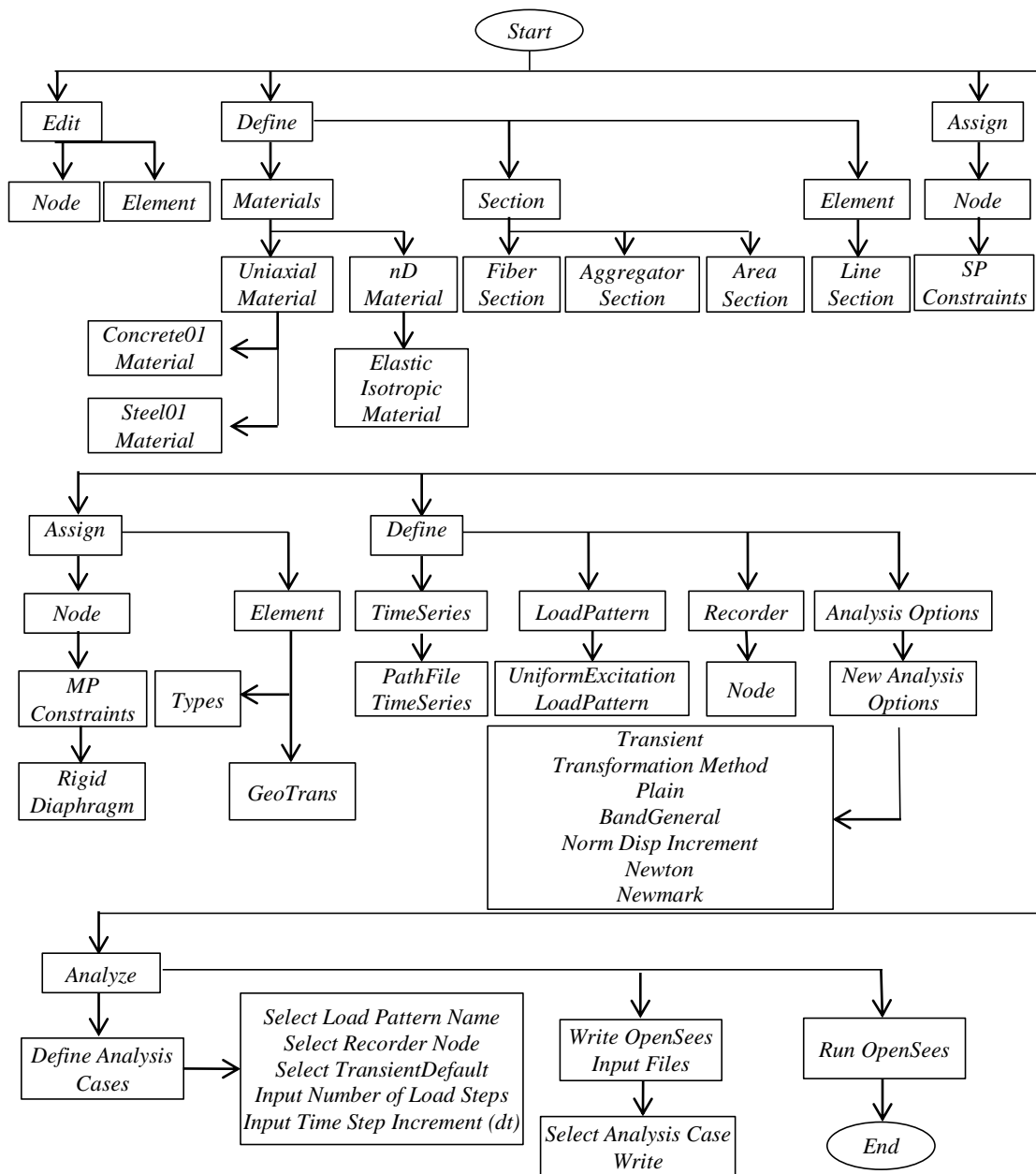
Langkah-langkah analisis riwayat waktu nonlinier dipaparkan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 3. Analisis dinamik nonlinier memerlukan *scaling* terhadap akselerogram gempa agar respons

akselerasi spektrum gempa tersebut *match* dengan target spektra (Danai *et al*, 2015; Nilesh *et al*, 2017). Hasil *matching acceleration* dengan respons spektrum yogyakarta untuk rekaman gempa Tabas 1978, gempa Imperial 1979, dan

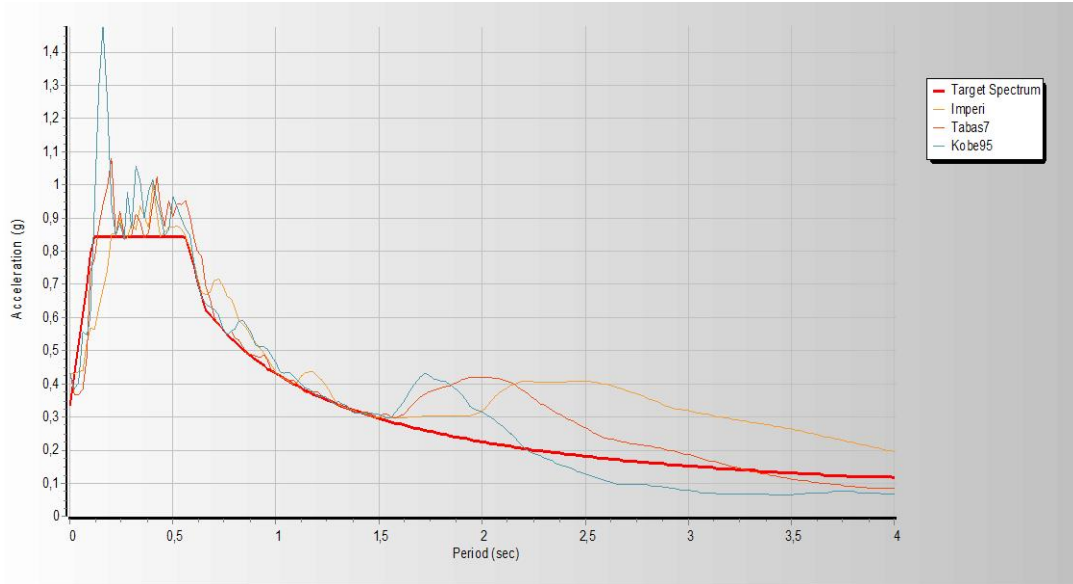
gempa Kobe 1995 dilakukan dengan bantuan *software* seismomatch ditampilkan pada Gambar 4. Hasil *spectra matching* rekaman gempa Tabas 1978, gempa Imperial 1979, dan gempa Kobe 1995 ditampilkan pada Gambar 5.



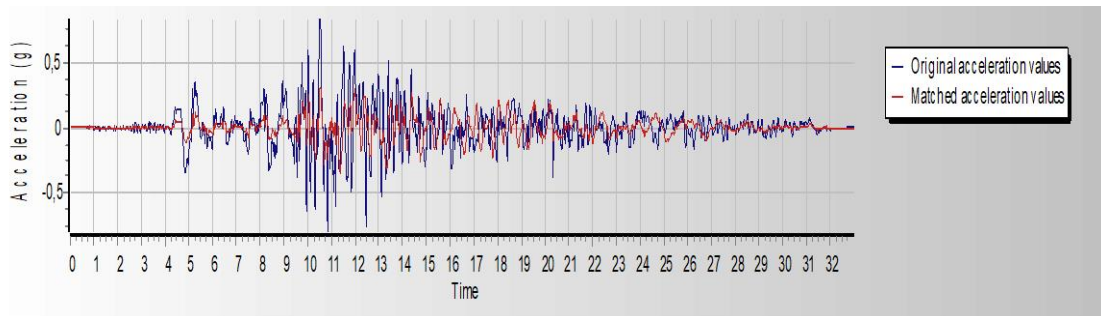
Gambar 2. Denah lantai 1-10 struktur gedung dan model 3D struktur gedung



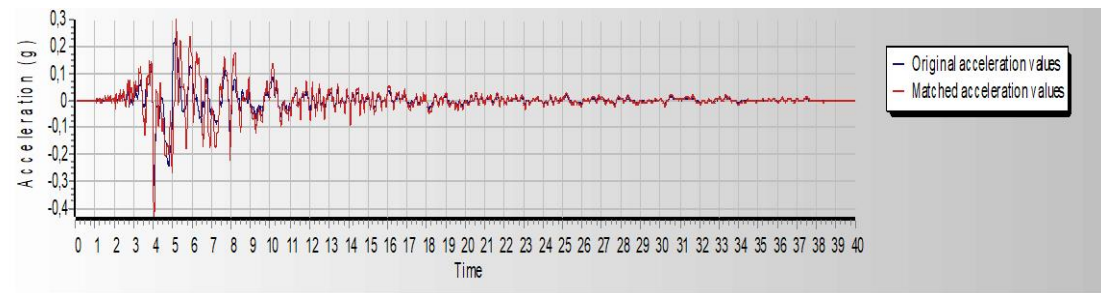
Gambar 3. Langkah-langkah analisis riwayat waktu nonlinier dengan *software* OpenSees Navigator



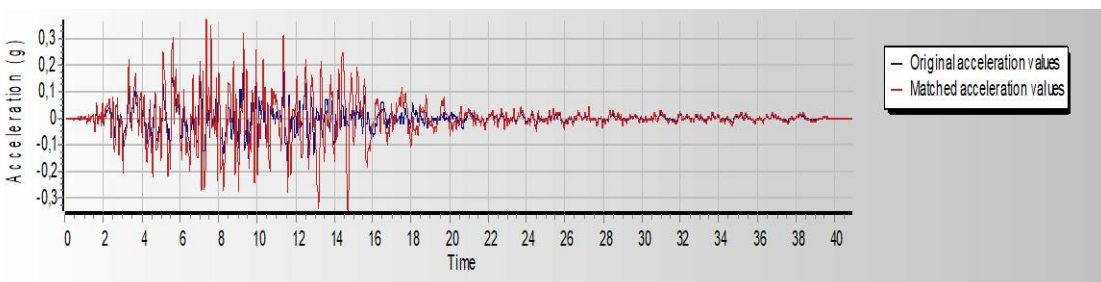
Gambar 4. Matched accelerations respons spectrum



(a)

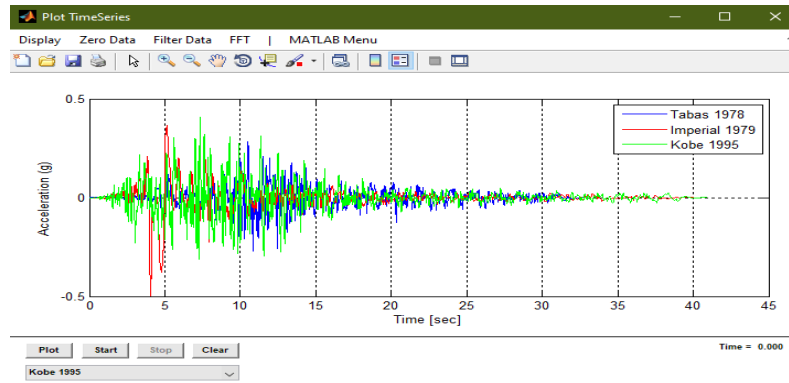


(b)

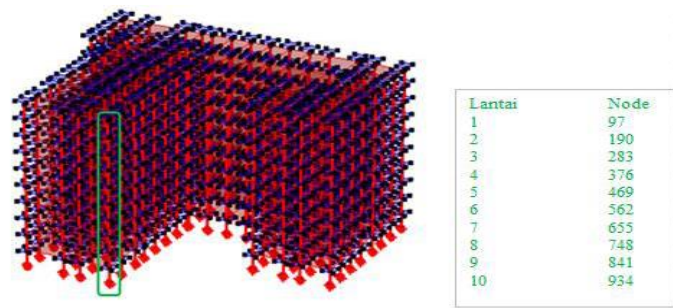


(c)

Gambar 5. Matched acceleration (a) gempa Tabas 1978, (b) gempa Imperial 1979, (c) gempa Kobe 1995



Gambar 6. Plot time series



Gambar 7. Model OpenSees Navigator dan node tinjauan

Hasil dan Pembahasan

Plot time series pada software OpenSees Navigator ditampilkan pada Gambar 6 dan hasil pemodelan struktur gedung flat slab serta node tinjauan pada masing-masing tingkat yang selanjutnya akan digunakan untuk melihat output displacement tiap tingkat ditampilkan pada Gambar 7. Selanjutnya hasil output displacement disajikan dalam Gambar 8 dan 9 untuk kurva nilai maksimum dan minimum displacement pada masing-masing tingkat. Nilai-nilai story drift disajikan pada Gambar 10 untuk nilai maksimum dan minimum.

Slab dan drop panel pada struktur dimodelkan sebagai shell dgn menggunakan nDmaterial elastic isotropic, kemudian untuk diafragma lantai MP constraint ditetapkan sebagai rigid diaphragm (diafragma kaku). Bentuk struktur pada tulisan ini tidak simetris menyebabkan letak titik berat struktur tidak berada di tengah struktur. Hal ini akan menimbulkan efek torsi yang cukup besar jika struktur terkena beban gempa, dampaknya struktur akan mengalami deformasi yang cukup besar.

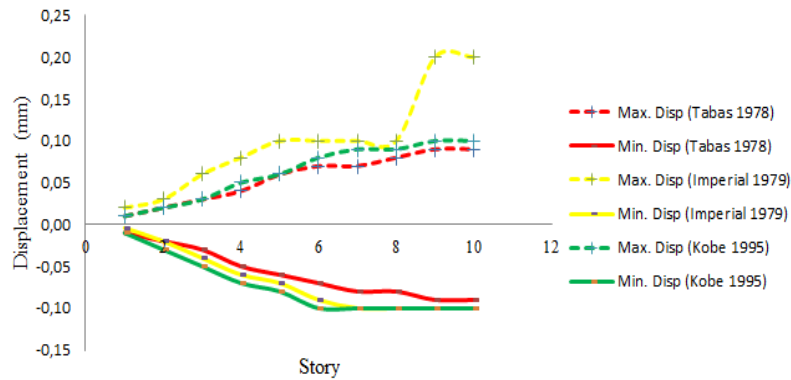
Salah satu cara mengurangi efek torsi selain dengan cara delatasi (pemisahan elemen) yaitu struktur akan membutuhkan dimensi elemen yang relatif besar. Nodal displacement yang terjadi pada setiap lantai menunjukkan hasil yang berbeda-beda untuk masing-masing rekaman gempa.

Untuk mendapatkan hasil dinamik yang akurat, maka pemilihan data time history harus sesuai dengan kondisi geologi, seismologi dan target parameter pergerakan batuan dasar (ground motion parameter), seperti percepatan gempa maksimum, kandungan frekuensi dan durasi. Pemakaian data time story dari negara atau lokasi lain belum tentu sesuai diterapkan untuk semua lokasi atau kondisi di Indonesia.

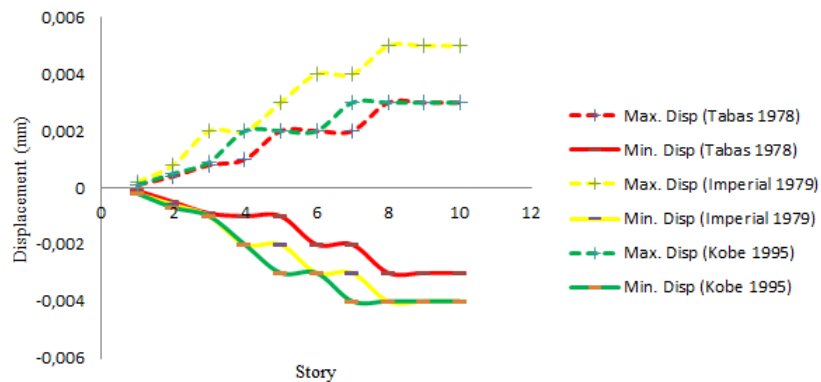
Nilai story drift yang diukur dari dasar lantai di bawahnya memperlihatkan hasil yang rendah. Nilai story drift masih dalam batasan story drift yang diizinkan oleh peraturan. Struktur bangunan yang memiliki kekakuan lateral yang rendah, rentan terhadap terjadinya simpangan (drift) hingga kegagalan struktur.

Kesimpulan

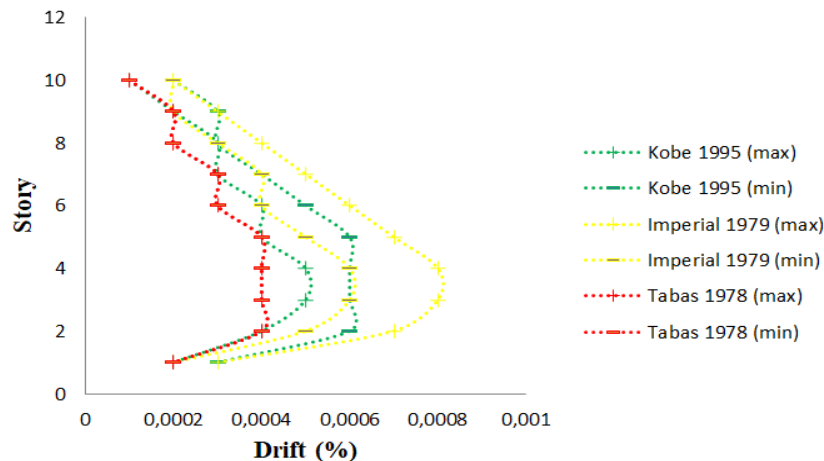
Analisis riwayat waktu nonlinier struktur flat slab 10 tingkat yang dirancang dengan bentuk struktur yang tidak simetris telah dilakukan dengan software OpenSees Navigator. Hasil output analisis riwayat waktu nonlinier berupa node displacement dan story drift pada masing-masing tingkat telah diperoleh. Hasil analisis menggunakan software OpenSees Navigator diperoleh bahwa story drift yang terjadi masih dalam batas-batas yang disyaratkan dalam peraturan, sehingga gedung yang ditinjau masih dalam batas perencanaan life safety.



Gambar 8. Kurva hasil *output displacement* arah X



Gambar 9. Kurva hasil *output displacement* arah Y



Gambar 10. *Maximum dan minimum story drifts*

Daftar Pustaka

Akhter, A.F.M.S & Arfiadi, Y. (2019). Displacement-Based Design Of Reinforced Concrete Special Moment Frame (Rc-Smf) With Vertical Irregularity. *Matec Web Of Conferences* 258, 05014, 1–7.

Almeida, A., Inácio, M., Lúcio, V & Ramos, A. P. (2015). *Flat Slab Punching Behaviour Under Cyclic. May.*

Chaulagain, H., Rodrigues, H., & Spacone, E., & Varum, H. (2015). Seismic Response Of Current Rc Buildings In Kathmandu Valley. *Structural Engineering And Mechanics*, 53(4), 791–818.

Danai, D., Georgia, D. And Ioannis, V. (2015). Seismic Behaviour Of Frames With Innovative Energy Dissipation Systems (Fuseis1-2). *Journal Of Engineering Structures, Elsevier.*

Federal Emergency Management Agency, FEMA-

- 356 (2000) Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings, Washington DC.
- Gasparini, D.A. (2002). Contributions Of C. A. P. Turner To Development Of Reinforced Concrete Flat Slabs 1905–1909. *Journal Of Structural Engineering (Asce)*, 128(10), 1243–1252.
- Hasibuan, S., & Kurniati, D. (2020). Redesain Awana Condotel Menggunakan Metode Flat Slab Berdasarkan Sni 2847:2013. *Teknik*, 41(1), 92–99.
- Indotjoa, D.F., Christianto, D., & Pranata, H. (2018). Evaluasi Kinerja Struktur Gedung Dual System Berbasis Kinerja. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 1(2), 91–100.
- Junaedi, U., Januarti, J.E., Antonius., & Han, A.L. (2019). Evaluasi Kinerja Seismik Rangka Beton Pemikul Momen Khusus Dengan Perform-3d. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(1), 27–37.
- Kandpal, H. (2015). Comparative Seismic Analysis Of Multi Storey Building With Flat Slab And Conventional Grid Slab. *International Journal Of Science And Research (Ijsr)*, 6(5), 2151–2153.
- Mamun, A.A & Saatcioglu, M. (2017). Seismic Performance Evaluation Of Moderately Ductile Rc Frame Structures Using Perform-3d. *Paper Presented At The 16th World Conference On Earthquake Engineering*.
- Mariyam., & Jamle, S. (2019). A Technical Approach To Flat Slab Multistorey Building Under Wind Speed Of A Technical Approach To Flat Slab Multistorey Building Under Wind Speed Of 39 M / S. *International Research Journal Of Engineering And Technology (Ijret)*, 06(05), 7629–7636.
- Mazzoni, S., Mckenna, F., Scott, M.H., & Fenves, G. L. (2006). Open System For Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) - OpenSees Command Language Manual. In *Pacific Earthquake Engineering Research Center*.
- Mazzoni, S. (2008). *OpenSees Model-Building Commands*. University Of California.
- Mccormac, J.C. & Nelson, J. K. (2006). *Design Of Reinforced Concrete* (Sandra Dumas (Ed.); Seventh). Jhon Wiley & Sons, Inc.
- Mckenna, F. (2012). Nonlinear Analysis With Simple Examples. In *Nonlinear Analysis With Simple Examples* (Hal. 1–56).
- More, R. S., & Sawant, V. S. (2015). *Analysis Of Flat Slab*. 4(7), 2013–2016.
- Grish, N., & Lingeswaran, N. (2018). A Comparative Study Of Flat Slabs Using Different Shear Reinforcement Parameters. *International Journal Of Engineering And Technology*, 7(2.20 Special Issue 20), 321–325.
- Nilesh, C.G., Abhijeet, A.G. & Sumant, K. K. (2017). Scaling Of Ground Motions For Performing Incremental Dynamic Analysis Of Rc Framed Structures. *International Journal Of Advance Research, Ideas And Innovations*, 5(3).
- Robertson, I. N. (1997). Analysis Of Flat Slab Structures Subjected To Combined Lateral And Gravity Loads. *Aci Structural Journal*, 94(6), 723–729.
- Russell, J.M., Owen, J.S & Hajirasouliha, I. (2018). Article : Nonlinear Behaviour Of Reinforced Concrete Flat Slabs After A Column Loss Event. *Advances In Structural Engineering*, 2–30. <https://doi.org/10.1177/Tobeassigned>.
- Patil, S. S., & Sigi, R.A. (2014). Flat Slab Construction In India. *International Journal Of Engineering And Innovative Technology (Ijeit)*, 3(10), 138–141.
- Sanjay, P.N., Prabhu, M & Umesh, S.S. (2014). Behaviour of flat slab RCC structure under earthquake loading. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(5), 1386–1395.
- Sen, S & Singh, Y. (2019). *Seismic Performance Of Flat Slab* (Hal. 1–11). Department Of Earthquake Engineering, Iit Roorkee, Roorkee.
- SNI 1726. (2019). *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*. BSN.
- SNI 2847. (2019). *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung Dan Penjelasan*. BSN.
- Srinivasulu, P & Kumar, A.D. (2015). Behaviour Of Rcc Flat Slab Structure Under Earthquake Loading. *Ijsr*, 5(7), 821–829.
- Vargese, P.C. (2005). *Advanced Reinforced Concrete Design* (Second). Prentice-Hall Of India.