

Evaluasi Kinerja Seismik Rangka Beton Pemikul Momen Khusus dengan PERFORM-3D

*Junaedi Utomo¹, Januarti Jaya Ekaputri², Antonius³ dan Han Ay Lie⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya, Yogyakarta.

²Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

³Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Sultan Agung, Semarang.

⁴Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Semarang.

^{*)}junaedi.utomo@uajy.ac.id

Received: 26 Juni 2018 Revised: 9 April 2019 Accepted: 12 April 2019

Abstract

Seismic performance of reinforced concrete frame Buildings which have been designed as Special Moment Resisting Frames in accordance to three Indonesian codes (SNI 1727-2013, SNI 1726-2012 and SNI 2847-2013) can be evaluated using nonlinear dynamic analysis. Criteria related to strength such as component plastic rotation capacity, lateral displacement as well as criteria related to damage of elements in the structures were used to evaluate the seismic performance of the buildings. Assessment to the moment and curvature capacities of the cross sections of beams and columns were done using XTRACT. The global seismic performance of the structures depends on the seismic performance of components in the structures. In nonlinear model of the structures, the degrading strength of the components were modeled to take into account the gradual reduction of the contributed components to the resistance of the structures. PERFORM-3D is one of the software that can be used to generate nonlinear model of structures. Seismic performance level of structures can be obtained from the results of the nonlinear dynamic analysis using PERFORM-3D. The Seismic performance level can be utilized for: (1) detecting any weaker part in the structures, and (2) evaluating the improved design of the structures for enhancing the seismic performance of structures.

Keywords: *Nonlinear dynamic analysis, PERFORM-3D, seismic performance of structures, special moment resisting frames, strength degradation*

Abstrak

Dengan analisis dinamik nonlinier kinerja seismik struktur beton bertulang dengan Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus (SRPMK), yang telah dirancang mengikuti ketentuan-ketentuan pada SNI 1727-2013, SNI 1726-2012 dan SNI 2847-2013, dapat dievaluasi. Kriteria yang berhubungan dengan kekuatan seperti kapasitas rotasi plastis komponen, perpindahan lateral serta kriteria kondisi kerusakan komponen struktur dipakai untuk evaluasi kinerja seismik bangunan. Asesmen terhadap kapasitas momen dan kurvatur dari tampang balok dan kolom dilakukan dengan perangkat lunak XTRACT. Kinerja seismik struktur secara global tergantung pada kinerja seismik komponen-komponen di dalam struktur. Dalam model nonlinier struktur, degradasi kekuatan komponen struktur dimodelkan untuk memperhitungkan reduksi gradual dari kontribusi komponen terhadap ketahanan struktur. PERFORM-3D adalah salah satu perangkat lunak yang dapat dipakai untuk membuat model nonlinier struktur. Dari hasil analisis dinamik nonlinier dengan PERFORM-3D akan diperoleh level kinerja seismik struktur yang dapat dipakai untuk: (1) mendeteksi bila ada bagian lemah dari struktur, dan (2) dapat dipakai untuk evaluasi terhadap perbaikan desain struktur sehingga kinerja seismik struktur meningkat.

Kata kunci: *Analisis dinamik nonlinier, degradasi kekuatan, kinerja seismik struktur, PERFORM-3D, SRPMK*

Pendahuluan

Dalam 30 tahun terakhir basis evaluasi kinerja seismik telah bergeser dari kekuatan, perpindahan dan probabilistik (Mamun, 2017 dan Yasamin, 2017). Saat ini metoda yang paling mutakhir untuk melakukan asesmen kerusakan seismik bangunan adalah *performance based design* melalui analisis dinamik nonlinier riwayat waktu (Mamun & Saatcioglu 2017). Dalam makalah ini bangunan enam tingkat dengan sistem rangka beton pemikul momen khusus, untuk perkantoran di Padang, telah dirancang dengan perangkat lunak ETABS (CSI, 2008). Bangunan dirancang mengikuti ketentuan-ketentuan dalam SNI 1727-2013 (BSN, 2013), SNI 1726-2012 (BSN, 2012) dan SNI 2847-2013 (BSN, 2013). Selanjutnya dilakukan analisis dinamik nonlinier dengan PERFORM-3D (CSI, 2011) menggunakan akselerogram gempa Padang 2009 yang telah dibuat *match* dengan spektra desain Padang. Relasi momen-kurvatur tiap komponen dipakai untuk menyatakan perilaku tampang dan sifat nonlinier komponen. Dari hasil analisis terdeteksi bagian lemah ditingkat kedua pada struktur rangka terbuka, yang sebelumnya tidak terdeteksi oleh ETABS. Bagian lemah dihilangkan dengan meningkatkan kinerja seismik bangunan.

Metode

Evaluasi kinerja seismik rangka beton bertulang dilakukan melalui analisis dinamik nonlinier. Informasi yang diperlukan adalah (1) Kriteria desain seismik dari FEMA 273 (FEMA, 1997),

level gempa desain dari FEMA 273 dan *acceptance criteria* dari ASCE/SEI 41-17 (ASCE/SEI, 2017). (2) Dimensi rangka termasuk balok, kolom dan tebal plat, mutu bahan, beban yang bekerja. (3) Sifat nonlinier komponen rangka beton bertulang yang diperoleh dari perilaku tampang masing-masing komponen. (4) Akselerogram gempa Padang 2009 yang telah dibuat *match* dengan spektra desain Padang.

Analisis dinamik nonlinier menggunakan kriteria desain seismik, level gempa desain dan *acceptance criteria* dari butir 1, sifat nonlinier tiap komponen dari butir 3 dan akselerogram gempa Padang 2009 dari butir 4 di atas. Kriteria Desain Seismik ditunjukkan oleh Tabel 1 dipakai untuk mendefinisi level kinerja seismik struktur.

Level Gempa Desain ditunjukkan oleh Tabel 2. Masing masing *seismic hazard* dalam Tabel 2 memberikan beban gempa berbeda serta mempunyai periode ulang gempa dan prakiraan puncak percepatan tanah (PGA) yang berbeda. Masing-masing level beban gempa menyatakan tingkat kerusakan struktur, level 1 adalah *Immediate Occupancy level* (IO), kerusakan terbatas yang terjadi di dalam struktur. Level 2 adalah *Life Safety level* (LS), struktur telah mengalami kerusakan substansial, namun masih tersedia kapasitas deformasi yang cukup besar sebelum keruntuhan terjadi. Level 3 adalah *Collapse Prevention level* (CP), struktur telah mengalami kerusakan sangat besar. Bila terjadi tambahan deformasi lateral struktur menjadi tidak stabil dan mengalami keruntuhan.

Tabel 1. Kriteria desain seismik

Gempa rencana	Level 1 (Gempa moderat)	Level 2 (Gempa sedang)	Level 3 (Gempa kuat)
Level kinerja	Tidak ada/sedikit kerusakan	Ada kerusakan yang dapat diperbaiki	Ada kerusakan tapi tidak roboh
Deformasi kolom (FEMA 273 hal 6-20)	Elastik	Rotasi < 0,01 rad.	Rotasi < 0,02 rad.
Deformasi balok (FEMA 273 hal 6-19)	Elastik	Rotasi < 0,02 rad.	Rotasi < 0,025 rad.
Indek <i>drift</i> yang diijinkan*	0,005	0,01	0,02

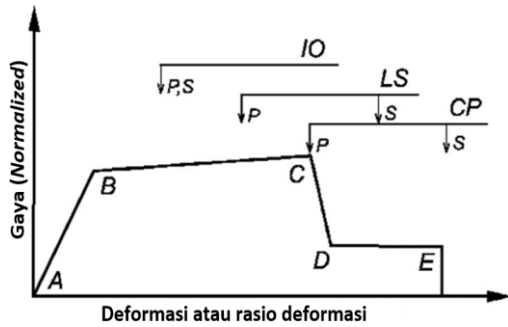
*Indek *drift* adalah rasio perpindahan lateral atap terhadap tinggi bangunan

Tabel 2. Level gempa desain (*seismic hazard*)

Level beban gempa terhadap intensitas MMI*	Deskripsi kualitatif FEMA	Probabilitas kejadian dalam 50 tahun	Periode ulang (tahun)	PGA efektif (g)
Level 1: MMI VII Level Kejadian	Kadang-kadang	50%	72	0,12
Level 2: MMI VIII Level Intensitas desain	Jarang	10%	475	0,25
Level 3: MMI IX Level Keparahan	Sangat jarang	2%	2.475	0,5

*Modified Mercalli Intensity scale

ASCE/SEI 41-17 menyatakan *acceptance criteria* yang digunakan dalam prosedur nonlinier sebagai batas-batas level kinerja seismik (IO, LS dan CP) dalam relasi gaya-deformasi komponen seperti ditunjukkan oleh Gambar 1. Level kinerja seismik (IO, LS dan CP) sesuai uraian pada butir 1, 2 dan 3 di atas. P dan S pada Gambar 1 menyatakan *primary* dan *secondary component* struktur.



Gambar 1. Ilustrasi acceptance criteria (ASCE/SEI 41-17)

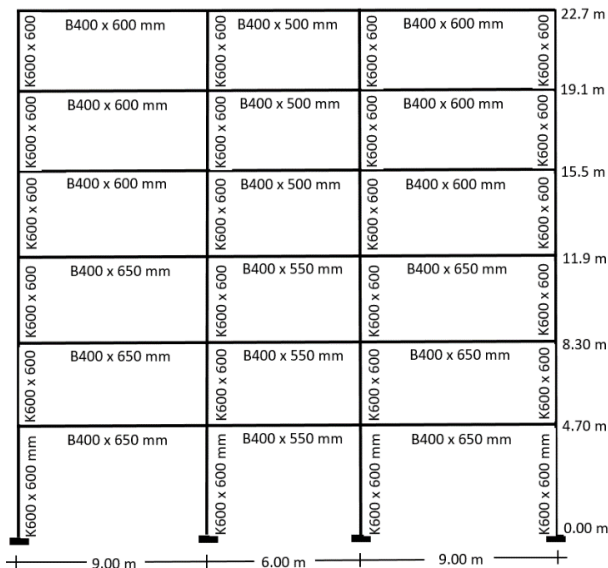
Kinerja seismik rangka beton bertulang daktail enam tingkat, dengan lokasi di Padang, akan dievaluasi. Rangka terdiri dari tiga bentang arah Timur-Barat. Dua bentang dengan panjang masing-masing 9 m dipakai untuk perkantoran dan satu bentang tengah dengan panjang 6 m dipakai sebagai koridor. Arah Utara-Selatan terdiri dari tujuh bentang dengan panjang masing-masing 6 m. Tinggi tingkat tipikal 3,6 m sedang tinggi tingkat pertama 4,7 m. Tampak depan dan dimensi balok dan kolom rangka arah Timur-Barat ditunjukkan dalam Gambar 2.

Dimensi balok tiga lantai pertama untuk rangka arah Utara-Selatan adalah 400x600 mm sedang dimensi balok tiga lantai selanjutnya, termasuk

lantai atap, adalah 400x600 mm. Pelat lantai beton menggunakan pelat satu arah dengan tebal 120 mm arah Timur-Barat, dan didukung oleh dua balok sekunder 300x350mm tiap bentang arah Utara-Selatan. Untuk material beton dipakai beton normal dengan $f'_c = 30$ MPa dan baja tulangan A615-60 dengan $f_y = 413$ MPa. Beban-beban yang bekerja pada rangka beton bertulang adalah: (1). Beban hidup lantai 2,4 kN/m² pada lantai tipikal dan 4.8 kN/m² pada lantai koridor; (2). Beban hidup atap: 1.0 kN/m² pada atap dan 1.6 kN/m² pada 6 m bentang koridor; (3). Beban mati: berat sendiri elemen beton bertulang 23,56 kN/m³, 1,0 kN/m² beban partisi semua lantai, 0,8 kN/m² beban servis mekanikal untuk semua lantai, 0,8 kN/m² material insulasi dan penutup atap dan (4). Beban gempa: ditentukan berdasar $MCE_R(S_S)$ dan $MCE_R(S_I)$ untuk lokasi bangunan di Padang.

Untuk menentukan gaya-gaya dalam, perpindahan lateral, tulangan balok dan tulangan kolom, desain seismik dengan ASCE 7 diaplikasikan pada bangunan menggunakan perangkat lunak ETABS. Retak beton untuk analisis linier elastik diperhitungkan dengan reduksi terhadap kekakuan komponen, yaitu 0,3 EI untuk balok dan 0,7 EI untuk kolom (Tabel 10-5, ASCE/SEI 41-17). Analisis dilakukan dengan prosedur respon spektrum.

Perpindahan maksimum lantai atap arah Y (Utara-Selatan) adalah 56 mm (lebih besar dari $H/500 = 45,5$ mm), dengan $H = 22,7$ m adalah tinggi struktur bangunan (Gambar 2). Dari hasil desain dapat disimpulkan rangka beton bertulang cukup punya kekuatan untuk menahan beban-beban yang bekerja namun rangka beton bertulang ini terlalu fleksibel. Rangka beton bertulang basis ini selanjutnya disebut SRBPMK.

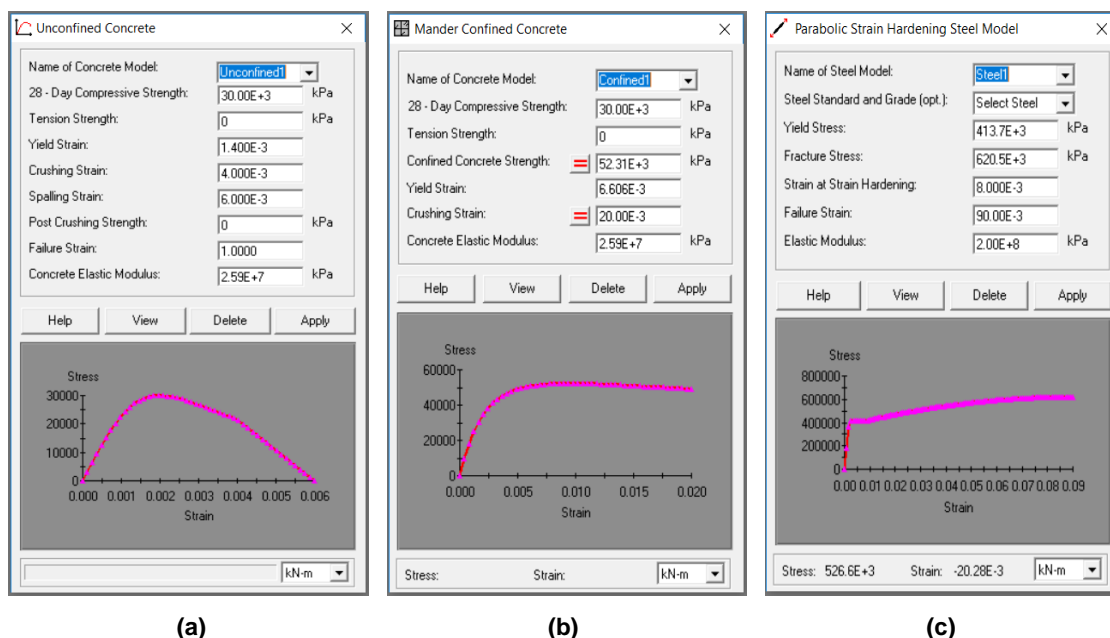


Gambar 2. Tampak depan rangka beton bertulang basis (arah Timur-Barat)

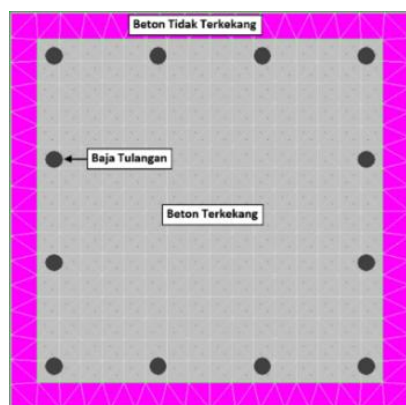
Sifat nonlinier tiap komponen SRBPMK dapat diperoleh melalui perilaku tampang masing-masing komponen. Perilaku tampang elemen dapat diperoleh melalui hubungan momen-kurvatur tampang. Relasi momen-kurvatur adalah cara terbaik untuk menyatakan perilaku tampang dan sifat nonlinier dari komponen-komponen SRBPMK. Relasi momen-kurvatur dapat diperoleh melalui eksperimen atau dengan kajian analitis. Karena perlu waktu dan juga mahal untuk menguji tiap komponen SRBPMK maka metoda analitis yang realitis menjadi opsi menarik (Naci *et al.*, 2015). Asesmen momen dan kapasitas kurvatur tampang dilakukan dengan perangkat lunak XTRACT (IMBSEN, 2006). Ada tiga jenis material pada tampang beton bertulang yaitu: beton tidak terkekang, beton terkekang dan baja

tulangan (Gambar 3). Hasil analisis dengan XTRACT untuk kolom dasar 600x600mm dengan jumlah tulangan 12D25 mm pada bagian eksterior SRBPMK ditunjukkan oleh Gambar 4.

Salah satu hasil analisis XTRACT untuk kolom dasar eksterior 600x600 mm (Gambar 4a) ditunjukkan oleh Gambar 4b. Setelah sifat nonlinier SRBPMK diperoleh dari perilaku tampang masing-masing elemen maka evaluasi kinerja seismik SRBPMK dapat dilakukan dengan PERFORM-3D (Mamun & Saatcioglu, 2017, Rezaei & Massumi, 2014). Spektra desain gempa Padang telah dibentuk mengikuti prosedur dalam SNI 1726-2012. Akselerogram gempa Padang 2009 komponen Utara-Selatan dipakai untuk evaluasi kinerja seismik SRBPMK.



Gambar 3. Material beton bertulang: (a) Beton tidak terkekang; (b) Beton terkekang dan (c) Baja tulangan



Analysis Results:

Max. Compression Load:	15.90E+3 kN
Max. Tension Load:	-2437 kN
Maximum Moment:	1203 kN-m
P at Max. Moment:	4861 kN
Minimum Moment:	-1203 kN-m
P at Min. Moment:	4861 kN
Moment (Max) at P=0:	601.9 kN-m
Plastic Rotation Capacity:	29.07E-3 rad

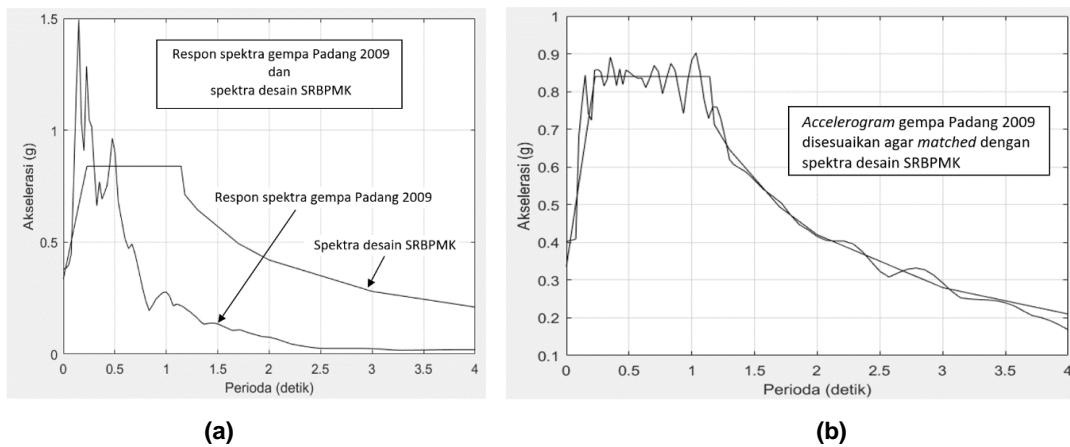
Gambar 4. Tampang kolom dan hasil analisis tampang: (a) Kolom 600x600mm dan (b) Hasil analisis XTRACT

Analisis dinamik nonlinier memerlukan *scaling* terhadap akselerogram gempa agar repons akselerasi spektrum gempa tersebut *match* dengan target spektra (Danai *et al.*, 2015 dan Nilesh *et al.*, 2017). Gambar 5 menunjukkan *spectral matching* melalui *scaling* terhadap akselerogram gempa Padang 2009. Plot akselerogram asli dan plot akselerogram asli bersama dengan akselerogram hasil *scaling* ditunjukkan oleh Gambar 6 dan 7.

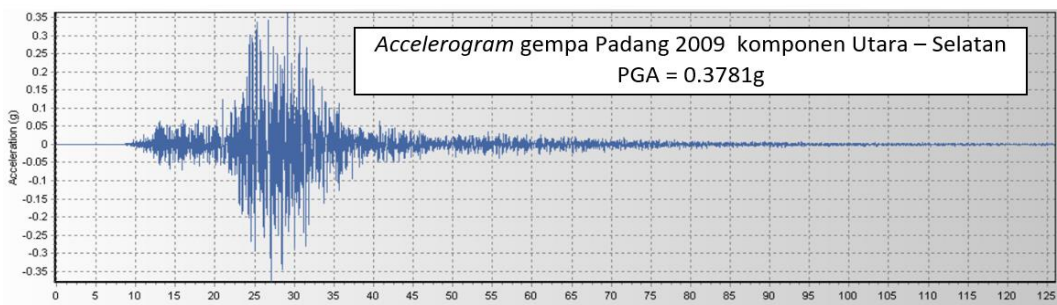
Dari Gambar 7 tampak distorsi pada akselerogram gempa Padang 2009, setelah dilakukan *scaling*, tidak terlalu besar namun jumlah input energi gempa yang diterima oleh SRBPMK, sebelum dan sesudah dilakukan *scaling*, berbeda sangat besar.

Perbedaan ini terjadi karena masing masing titik pada respon spektra Gambar 5 menunjukkan besarnya energi gempa untuk frekuensi getaran tertentu. Dari Gambar 5b tampak bahwa, setelah terjadi *matching*, input energi gempa yang masuk ke SRBPMK jauh lebih besar.

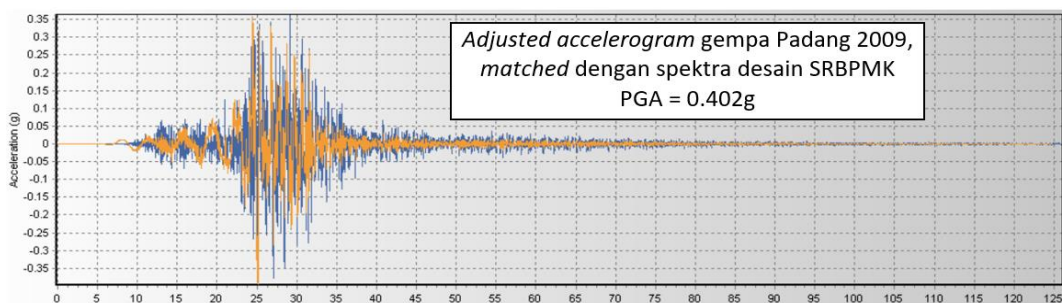
Kriteria kinerja seismik level komponen dimasukkan ke PERFORM-3D bersama hasil analisis tampang hubungan momen-kurvatur dari XTRACT. Keunggulan PERFORM-3D adalah mudah untuk memodelkan perilaku inelastis komponen balok/kolom menggunakan model *FEMA Beam* dan *FEMA Column* yang *built-in* dalam PERFORM-3D.



Gambar 5. *Scaling* akselerogram gempa Padang 2009: (a) Sebelum dilakukan *scaling* dan (b) Setelah dilakukan *scaling* sampai terjadi *matching* dengan spektra desain SRBPMK



Gambar 6. Plot *accelerogram* asli gempa Padang 2009 komponen Utara-Selatan



Gambar 7. Plot *accelerogram*: asli bersama dengan *accelerogram* hasil *scaling* gempa Padang 2009 (kuning)

Inelastic Strength

You can use these strengths for inelastic components such as hinges.

Axial/Bending | Shear | Torsion

Strength at U Point Yes No

Axial Forces

Tension (PT) Moments at Balance Point (MB)

Compression (PC) Axis 2 (1-3 plane) Axis 3 (1-2 plane)

Balance point (PB) At 45 degrees (optional - for checking yield surface)

Moments at P = 0 (optional - for checking yield surface)

Axis 2 (1-3 plane) Axis 3 (1-2 plane)

Shape of P-M2-M3 Yield Surface

P exponent, Alpha, for P-M interaction

PB to PC vs. M2 PB to PC vs. M3

PB to PT vs. M2 PB to PT vs. M3

Min 1.5, Max 3.0, Suggested = 2.0

M exponent, Beta, for P-M interaction

Min 1.1, Max 3.0, Suggested = 1.1

M exponent, Gamma, for M-M interaction

Min 1.1, Max 3.0, Suggested = 1.4

P-M2-M3 M2-M3

Plot: Compression vs. M

Gambar 8. Input kolom beton bertulang 600x600 mm hasil analisis XTRACT ke PERFORM-3D

(a) Basic F-D Relationship

Section and Dimensions | Elastic Stiffness | **Basic F-D Relationship** | Yield Surface

F = P and M. D = plastic axial displ and end rotation. Plotted values = elastic + plastic

Basic Actions and Deformations	Tension	Compression	Axis 2 Bending at Balance Point	Axis 3 Bending at Balance Point
Actions FU	2437	15900	1203	1203
Deformations DU				
Deformations DX	.02907	.02907	.02907	.02907

Deformation values = plastic axial deformations and end rotations.

Tilinear Behavior: FY/FU Unit = m

Approximate Length of Column Element: 4.1 Unit = m

Items in green are obtained from the cross section properties.

(b) Deformation Capacities

Section and Dimensions | Elastic Stiffness | **Deformation Capacities** | Basic F-D Relationship | Yield Surface

Strength Loss | **Deformation Capacities** | Cyclic Degradation | Upper/Lower Bounds

These are bending deformation capacities.

Depend on Axial Compression (P) and/or Shear (V) Forces? No Yes FU PL VU VL

Capacities for Bending about Axis 3

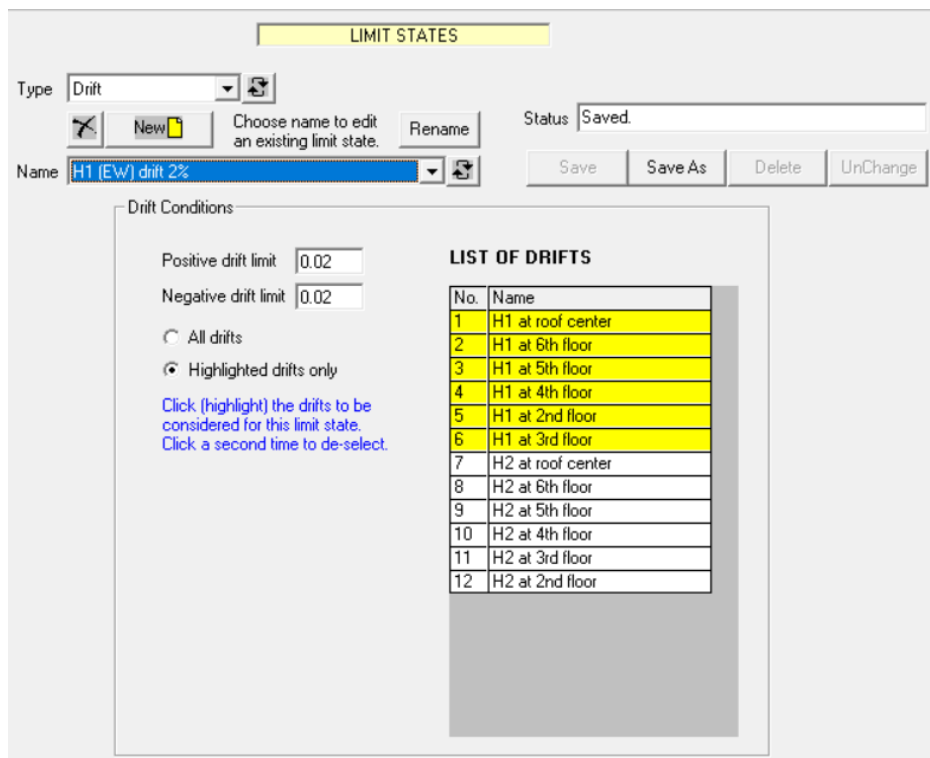
Capacity values = plastic rotations

Level	At PU and VU	At PU and VL	At PL and VU	At PL and VL
1	0.005			
2	0.01			
3	0.02			
4				
5				

Capacities for Bending about Axis 2

Ratio of Axis 2 capacity to Axis 3 capacity (the same for all values)

Gambar 9. Input model FEMA column 600x600 mm: (a) Dari hasil analisis XTRACT ke PERFORM-3D dan (b) Dari kriteria desain seismik



Gambar 10. Batas indeks drift 2% arah H1 (Timur-Barat)

Salah satu perangkat lunak alternatif untuk melakukan analisis dinamik nonlinier adalah SeismoStruct dari SeismoSoft (Mamun, 2017). Meskipun mudah dipakai, perlu waktu lama untuk melakukan seluruh input data ke dalam PERFORM-3D. Gambar 8 dan 9 menunjukkan contoh modeling komponen inelastis dalam PERFORM-3D untuk kolom dasar eksterior 600x600mm, dari kriteria desain seismik (IO, LS dan CP dalam Tabel 1) dan dari hasil analisis XTRACT (Gambar 4b).

Kriteria kinerja global adalah batas indeks drift. Dalam modeling SRBPMK dengan PERFORM-3D, arah H1 adalah arah Timur-Barat dan arah H2 adalah arah Utara-Selatan. Kondisi batas indeks drift adalah 2% untuk Collapse Prevention (level 3 pada Tabel 1) seperti ditunjukkan oleh Gambar 10. Dalam Gambar 10 tampak bahwa drift diperiksa terhadap lantai dasar, mulai dari atap dan lantai-lantai di bawahnya. PERFORM-3D menghitung rasio drift, yaitu nilai drift yang diperoleh dari nilai perpindahan nodal atas dikurangi dengan nilai perpindahan nodal di bawahnya dan dibagi dengan jarak vertikal antara dua nodal. Prosedur yang sama dilakukan untuk menghitung rasio drift arah H2.

Hasil dan Pembahasan

Seismic hazard pada Tabel 2 dan acceptance criteria pada Gambar 1 dipakai untuk evaluasi

kinerja seismik SRBPMK. Dua sasaran Seismic hazard yaitu: Basic Safety Earthquake – 1N (BSE-1N) dan Basic Safety Earthquake – 2N (BSE-2N) dari ASCE/SEI 41-17 adalah (1) Level gempa desain menggunakan gempa dengan perioda ulang 475 tahun dengan 10% probabilitas terlampaui dalam 50 tahun (Section C2.4.1.2 dari ASCE/SEI 41-17) sebagai Design Base Earthquake (DBE) untuk kinerja seismik Life Safety (LS). DBE adalah gempa yang diharapkan terjadi satu kali pada masa layanan struktur. (2) Level gempa desain menggunakan gempa dengan perioda ulang 2.475 tahun dengan 2% probabilitas terlampaui dalam 50 tahun (Section C2.4.1.1 dari ASCE/SEI 41-17) sebagai Maximum Considered Earthquake (MCE) untuk kinerja seismik Collapse Prevention (CP).

DBE koresponding dengan Basic Safety Earthquake - 1N (BSE-1N) hazard dan MCE koresponding dengan Basic Safety Earthquake – 2N (BSE-2N) hazard. Keduanya dipakai untuk evaluasi level kinerja seismik tiap komponen SRBPMK. DBE dipakai untuk memeriksa level kinerja Life Safety pada tiap komponen. Site specific response spectrum diambil 2/3 dari Maximum Considered Earthquake (MCE). MCE dipakai untuk memeriksa level kinerja Collapse Prevention pada tiap komponen. Evaluasi kinerja seismik SRBPMK dilakukan dua kali melalui analisis dinamik nonlinier yaitu: (1) menggunakan akselerogram gempa Padang 2009 yang telah match dengan Spektra Desain SRBPMK untuk

kondisi *DBE*, dan (2) menggunakan akselerogram gempa Padang 2009 yang telah *match* dengan satu setengah kali Spektra Desain SRBPMK untuk *MCE*. Hasil analisis dinamik nonlinier SRBPMK dengan *DBE* ditunjukkan oleh Gambar 11.

Dari hasil analisis dinamik nonlinier pada Gambar 11 tampak ada bagian lemah dari SRBPMK: (1) Dalam kondisi *DBE* diharapkan level *Life Safety* yang tercapai bukan level *Collapse Prevention* namun level *Collapse Prevention* sudah terlewati (dilihat dari *usage ratio graphs* PERFORM-3D), dan (2) Terjadi sendi plastis pada semua kolom lantai pertama dan lantai kedua. Level kinerja seismik LS dan CP berdekatan (Gambar 11), artinya tidak tersedia kapasitas deformasi komponen yang mencukupi dari level LS menuju level CP karena perpindahan lateral terkonsentrasi pada tingkat kedua. Perbaikan desain dilakukan dengan mengganti semua kolom 600x600 mm lantai pertama, lantai kedua dan lantai ketiga dengan kolom 700x700 mm yang lebih kekar. Analisis tampang kolom 700x700 mm dilakukan dengan XTRACT dan hasilnya dimasukkan ke PERFORM-3D. Analisis dinamik nonlinier dengan *DBE* diulang, dan hasilnya ditunjukkan oleh Gambar 12. Dari perbandingan kurva dorong statik Gambar 11a dan Gambar 12a tampak SRBPMK menjadi lebih kaku dan lebih daktail setelah dilakukan perbaikan desain. Sebelum dilakukan perbaikan desain, deformasi lateral dalam SRBPMK terkonsentrasi pada tingkat pertama dan terutama pada tingkat kedua (Gambar 11c), dan deformasi lateral menjadi lebih merata setelah dilakukan perbaikan desain (Gambar 12c).

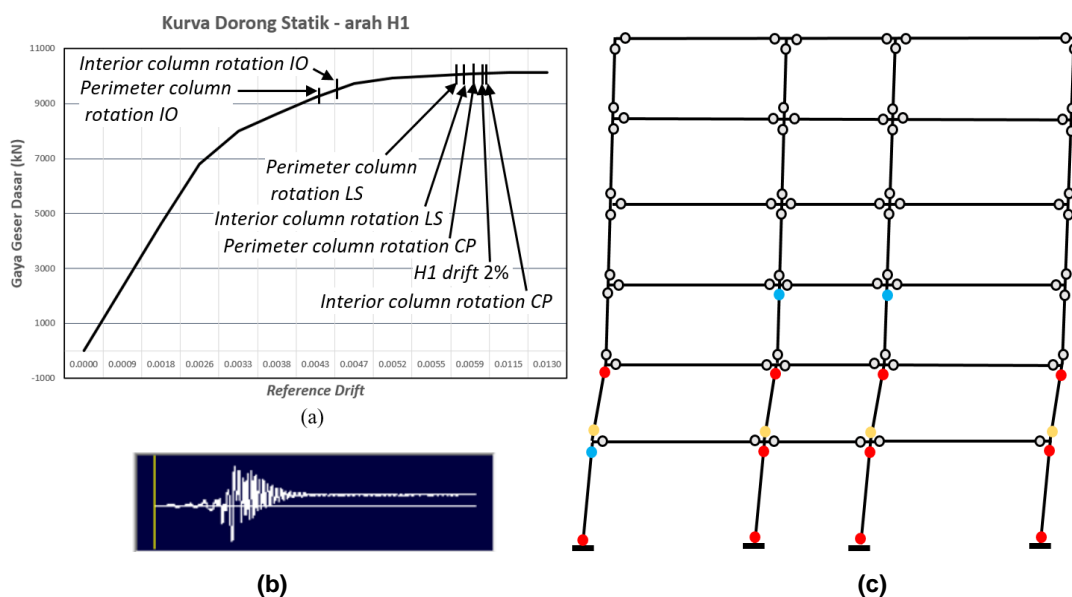
Gambar 12b menunjukkan ada residu deformasi setelah gempa lewat. Gambar 12c menunjukkan kinerja seismik SRBPMK yang telah melampaui level *Life Safety* tanpa mengalami perlemahan tingkat. Terjadinya sendi-sendi plastis pada dasar kolom tidak terhindarkan.

Dari *time history* disipasi input energi gempa dapat diperoleh besar energi yang didisipasi oleh balok dan kolom dalam SRBPMK seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.

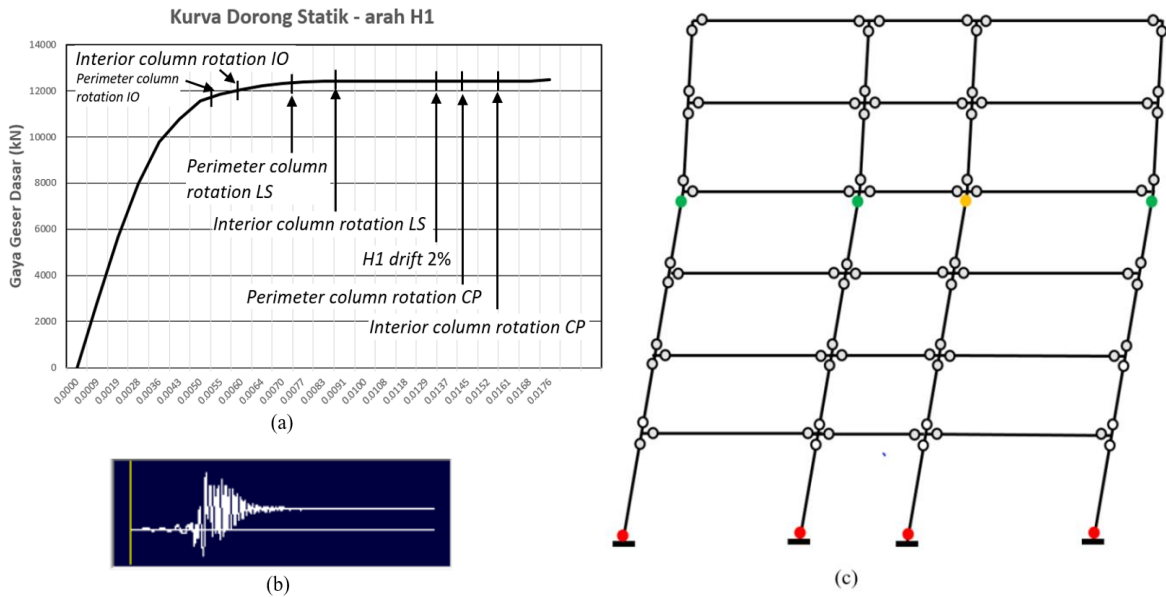
Tabel 3. Disipasi energi elemen SRBPMK

Komponen SRBPMK	Energi terdisipasi (kN.m)
Kolom perimeter	1.575,40
Kolom interior	966,96
Balok perimeter	685,08
Balok interior	2.110,80
Total	5.338,24

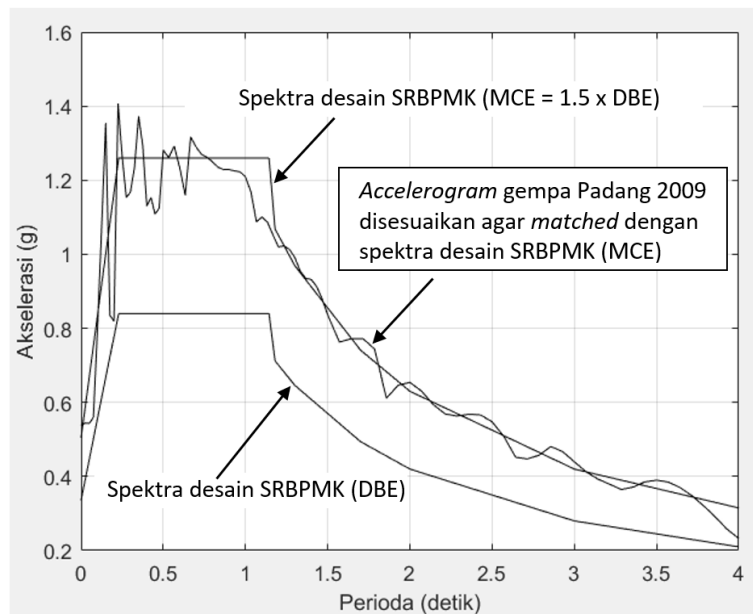
Evaluasi kinerja seismik SRBPMK dilanjutkan dengan memeriksa kinerja tiap komponen pada level *Collapse Prevention* menggunakan akselerogram Gempa Padang 2009 komponen Utara-Selatan yang telah dibuat *match* dengan spektra desain rencana untuk *MCE*. Spektra desain level *MCE* diperoleh dari spektra desain SRBPMK level *DBE* pada Gambar 5 dikali dengan satu setengah. Gambar 13 menunjukkan (1) Spektra desain SRBPMK level *MCE*, dan (2) Respon spektra gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan agar *match* dengan spektra desain SRBPMK level *MCE*.



Gambar 11. Hasil analisis dinamik nonlinier arah H1 terhadap Gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level *DBE*: (a) Kurva dorong statik; (b) Respon inelastis SRBPMK, dan (c) Bentuk struktur terdeformasi akibat gempa Padang 2009 (arah H1)



Gambar 12. Hasil analisis dinamik nonlinier arah H1, terhadap Gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level DBE, setelah dilakukan perbaikan desain: (a) Kurva dorong statik; (b) Respon inelastis SRBPMK; (c) Bentuk struktur terdeformasi akibat gempa Padang 2009 (arah H1)

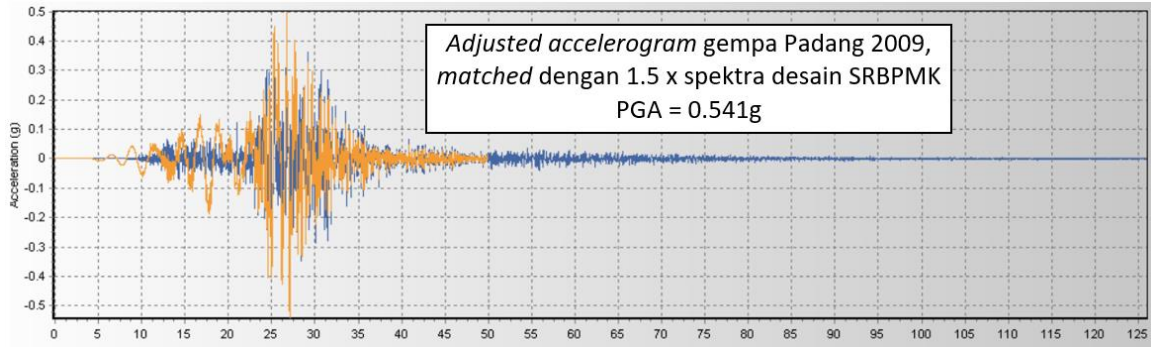


Gambar 13. Spektra desain SRBPMK level gempa DBE dan MCE, dan Respon spektra gempa Padang 2009 yang telah *match* dengan spektra desain SRBPMK level gempa MCE

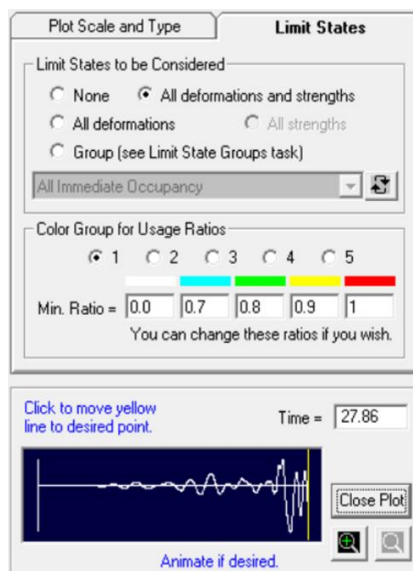
Akselerogram gempa Padang 2009 yang telah *match* dengan spektra desain SRBPMK level *MCE* ditunjukkan oleh Gambar 14. Nilai PGA dari akselerogram pada Gambar 14 adalah 0,541g. Nilai PGA ini mendekati nilai PGA efektif untuk gempa level 3 dalam Tabel 2.

SRBPMK tidak mampu menerima input energi gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level *MCE*. Nilai deformasi maksimum DX pada Gambar 9 terlampaui sehingga PERFORM-3D memutuskan analisis tidak perlu dilanjutkan. Hasil analisis dinamik nonlinier ditunjukkan oleh

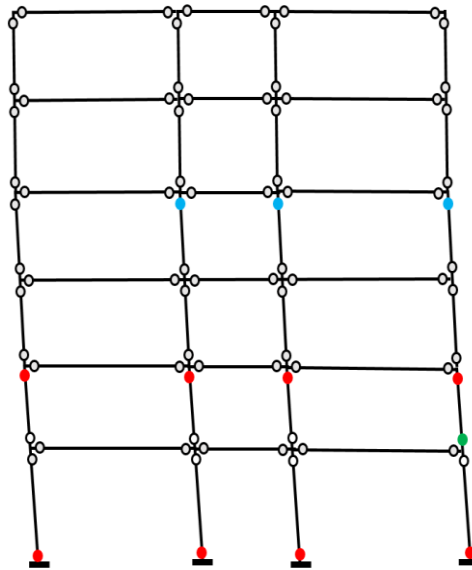
Gambar 15, tampak bahwa sendi plastis terjadi pada kolom atas tingkat kedua sesaat sebelum struktur mencapai $PGA = 0,541g$ (27,86 detik pada Gambar 14 dan Gambar 15a). *Usage ratio graphs* SRBPMK akibat gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level *MCE* ditunjukkan Gambar 16. Saat analisis dihentikan level kinerja *Collapse Prevention* telah terlampaui (Gambar 16). Dari Gambar 16 tampak bahwa level kinerja seismik LS dan CP berjauhan, setelah kinerja LS tercapai masih tersedia kapasitas deformasi lateral cukup besar untuk mencapai kinerja CP, seperti yang disyaratkan oleh ASCE/SEI 41-17.



Gambar 14. Accelerogram gempa Padang 2009, komponen Utara-Selatan yang asli, dan yang telah disesuaikan agar dengan spektra desain SRBPMK pada level gempa MCE

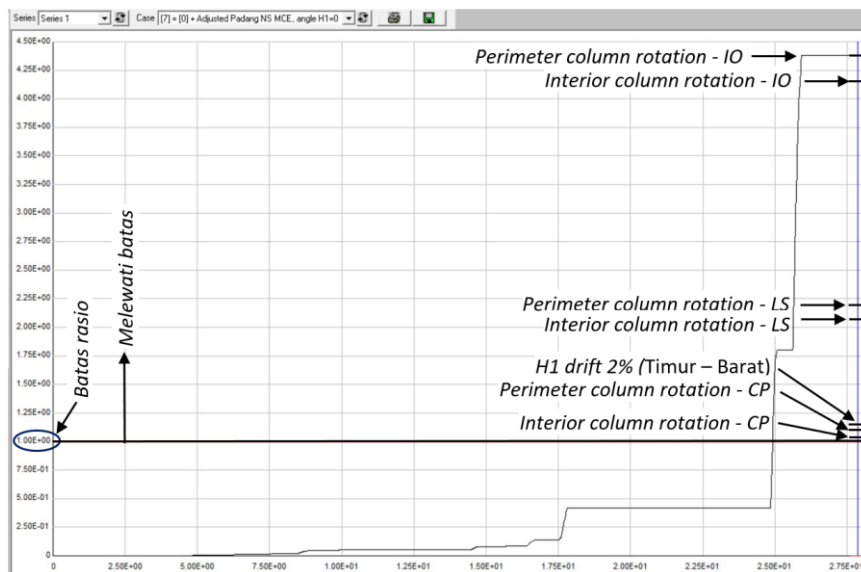


(a)



(b)

Gambar 15. Hasil analisis dinamik nonlinier struktur terhadap gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level gempa MCE: (a) Plot respon SRBPMK; (b) Hasil animasi sesaat sebelum analisis dihentikan (setelah 27,86 detik - arah H1)



Gambar 16. Usage ratio graphs SRBPMK akibat akselerogram gempa Padang 2009 yang telah disesuaikan ke level gempa MCE

Kesimpulan

Dengan PERFORM-3D evaluasi kinerja seismik struktur bangunan menjadi lebih eksplisit. Dari hasil analisis dinamik nonlinier dengan *Design Base Earthquake (DBE)*, terdeteksi bagian lemah dari SRBPMK yaitu terjadi konsentrasi perpindahan pada tingkat kedua. Perbaikan desain dilakukan dan analisis dengan *DBE* diulang. Konsentrasi perpindahan pada tingkat kedua hilang dan level kinerja seismik *Life Safety* tercapai namun belum melewati level *Collapse Prevention*. Hasil analisis dengan *Maximum Considered Earthquake (MCE)* menunjukkan kinerja seismik level *Collapse Prevention* tercapai. Dari kuantifikasi energi yang didisipasi oleh balok dan kolom SRBPMK (Tabel 3) tampak bahwa balok dan kolom cukup imbang dalam mendisipasi input energi gempa Padang 2009. Melalui evaluasi kinerja seismik dengan analisis dinamik nonlinier, desain SRBPMK dengan kinerja seismik yang lebih baik dapat diperoleh.

Ucapan Terima Kasih

Penulis pertama mengucapkan terima kasih kepada Prof. Ir. R. Bambang Boediono, ME., Ph.D. yang telah memberi ijin untuk menggunakan perangkat lunak PERFORM-3D saat menjadi mahasiswa Program Doktor di ITB.

Daftar Pustaka

ASCE/SEI. (2017). Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, *American Society of Civil Engineers – Structural Engineering Institute*, ASCE/SEI 41-17.

BSN. (2012). Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung. *SNI Standar Nasional Indonesia*, SNI 1726.

BSN. (2013). Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain. *SNI Standar Nasional Indonesia*, SNI 1727.

BSN. (2013). Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung. *SNI Standar Nasional Indonesia*, SNI 2847.

CSI. (2011). PERFORM-3D Version 5.0.0. *Computer and Structures, Inc.*, Berkeley, CA.

CSI. (2008). ETABS Nonlinear Version 9.5, *Computer and Structures, Inc.*, Berkeley, CA.

Danai, D., Georgia, D. and Ioannis, V. (2015). Seismic Behaviour of Frames with Innovative Energy Dissipation Systems (FUSEIS1-2). *Journal of Engineering Structures*, Elsevier.

FEMA. (1997). Nehrp Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, *Federal Emergency Management Agency*, FEMA 273.

IMBSEN. (2006). XTRACT Version 3.0.5. *Imbsen Software Systems*, Sacramento, CA.

Mamun, A, Al. (2017). Seismic Damage Assesment of Reinforced Concrete Frame Buildings in Canada, *Ph.D Thesis*, Canada: University of Ottawa.

Mamun, A, Al & 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, Santiago, Chile.

Naci, C., Aydin, D. Hakan, O. & Abdulhalim, A. (2015). A Simple Formulation for Effective Flexural Stiffness of Circular Reinforced Concrete Columns. *Journal of Engineering Application of Artificial Intelligence*, 38, 79-87. Elsevier.

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*, 3(5).

Rezaei, E. & Massumi, A. (2014). Seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Buildings Designed by Iranian Seismic Code. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 16(3).

Yasamin, R. N. (2017). Seismic Fragility Analysis of Reinforced Shear Wall Buildings in Canada, *Ph.D Thesis*, Canada: University of Ottawa.