

Evaluasi Kinerja Struktur pada Gedung Eksisting Tujuh Lantai dengan FEMA 310

Nur Khotimah Handayani

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Surakarta

e-mail: nur.k.handayani@ums.ac.id

Abstract

FEMA 310 guides in evaluating the performance of existing building structures where the Indonesian code has not provided standard rules for it. FEMA 310 is used to evaluate an existing seven-story building in Berek, Yogyakarta which has limited ductility. FEMA 310 consists of 3 stages, namely Tier 1, Tier 2, and Tier 3. This study is devoted to comparing the evaluation of Tier 2 results (linear static procedures) with Tier 3 results (nonlinear static procedures). The results have shown that the Tier 2 evaluation is well correlated with Tier 3 for the case of a seven-story building with limited ductility. This confirms that Tier 2 evaluations are capable to provide performance evaluations for low-rise to medium-rise buildings with limited ductility capacity.

Keywords—*Seismic Evaluation, Performance Evaluation, Existing Building, Limited Ductility, FEMA 310*

1. PENDAHULUAN

Rehabilitasi seismik bangunan adalah langkah mitigasi resiko paling efektif dalam mencegah keruntuhan bangunan sebelum gempa bumi terjadi [1]. Mitigasi ini diterapkan untuk rehabilitasi bangunan eksisting, terutama bangunan yang dalam perancangannya menggunakan peraturan lama dan harus dievaluasi kembali dengan peraturan baru. Evaluasi seismik bangunan bertujuan untuk mengetahui pendekatan perilaku bangunan saat menerima beban rencana (beban gravitasi dan gempa) sehingga dapat dilakukan perkuatan jika diperlukan.

The American Society of Civil Engineers (ASCE) bersama dengan *Federasi Emergency Management Agency (FEMA)* menerbitkan FEMA 310 sebagai panduan evaluasi seismik pada bangunan eksisting yang memiliki level kinerja IO (*Immediate Occupancy*/kerusakan ringan) atau LS (*Life Safety*/kerusakan sedang). Buku panduan ini berisi tahapan mengevaluasi kinerja bangunan dalam mengatasi bahaya kekuatan gempa, namun tidak membahas desain untuk tindakan mitigasi [2].

Evaluasi seismik bangunan eksisting sesuai FEMA 310 diterapkan untuk mengevaluasi gedung beton bertulang biasa tujuh lantai dengan sistem portal berdinding geser di Berek, Sleman, Yogyakarta saat gedung belum selesai dibangun (Gambar 1). Gedung eksisting ini dibangun pada tahun 2010, namun sempat berhenti antara tahun 2011 sampai 2018 dan dilanjutkan kembali pada pertengahan tahun 2018.

1.1 Kondisi Gedung Eksisting

Gedung ini belum selesai dibangun (saat penelitian berlangsung) sehingga masih berupa struktur (atas dan bawah) saja tanpa komponen arsitektural, mekanikal dan elektrikal. Struktur gedung tujuh lantai ini berupa sistem portal daktilitas terbatas dengan dinding geser beton bertulang biasa dan dirancang dengan SNI 03-1726-2002 (SNI gempa 2002). Penggunaan gedung ini untuk asrama dan kegiatan pendidikan yang dibangun di atas tanah sedang (kelas

situs D) dengan tinggi total gedung 30 m dan pondasi gedung berupa pondasi telapak gabungan. Gedung terdiri dari tiga gedung dipisahkan oleh dilatasi yaitu gedung timur, tengah, dan barat [3]. Evaluasi seismik pada penelitian ini hanya akan dilakukan pada gedung timur saja.

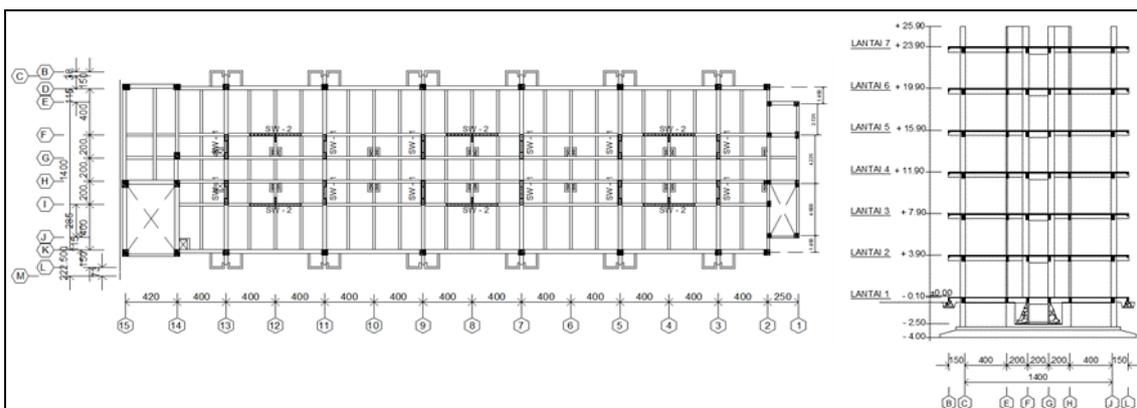
Beton pada struktur juga diketahui memiliki kualitas beton rata-rata yang cukup rendah sebesar 17,85 MPa dari kuat beton rencana 25 MPa. Nilai ini didapatkan dari data penyelidikan kualitas bangunan dengan pengambilan *coredrill* oleh Saputra A. dkk. [4].



Gambar 1. Struktur gedung tujuh lantai di Barek, Sleman, Yogyakarta saat belum selesai dibangun [4]

1.2 Analisis Struktur Sebelumnya dengan SNI 1726:2012

Evaluasi seismik bangunan gedung ini telah dilakukan oleh Saputra [5] dengan menganalisis pemodelan secara linier berdasarkan peraturan SNI 1726:2012 (SNI gempa 2012). Hasil analisis menyimpulkan bahwa struktur gedung memerlukan pengaku (*bracing*) karena ketidakberaturan torsi. Kegagalan struktur juga ditemukan pada beberapa balok dan kolom sehingga memerlukan perkuatan dengan metode *jacketting*. Evaluasi seismik akan dilakukan kembali pada gedung ini dengan panduan FEMA 310.



Gambar 2. Denah tipikal lantai 2-7 (kiri) dan potongan melintang struktur (kanan) gedung tujuh lantai bagian timur[3]

1.3 Pengujian Lapangan pada Gedung Eksisting Tujuh Lantai

Afriandini [6] telah melakukan pengujian lapangan getaran mikro gedung menggunakan alat sensor GeoSIG dan menghasilkan perioda getar alami struktur gedung di lapangan sebesar 0,6387 detik dan 0,6812 detik masing-masing untuk arah X(B-T) dan Y(U-S). Nilai perioda getar alami struktur gedung tersebut menjadi acuan dalam penelitian ini agar pemodelan memiliki parameter struktur yang mendekati kondisi sebenarnya di lapangan, baik dari segi dimensi, mutu bahan, kekakuan, dan lain-lain. Perioda getar alami ini sangat penting untuk diketahui guna menghindari terjadinya peristiwa resonansi dari beban luar yang bekerja akibat gempa [7].

2. METODE PENELITIAN

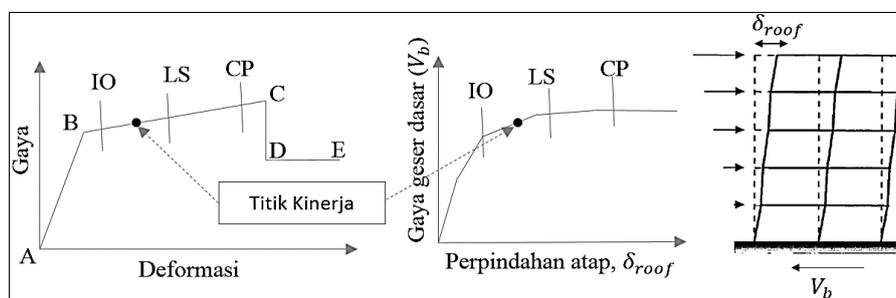
2.1 Metode Analisis

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja struktur gedung eksisting tujuh lantai dengan metode analisis numerik melalui pemodelan struktur dengan program SAP2000. Evaluasi kinerja struktur gedung ini dilakukan dengan FEMA 310 yang mengevaluasi dalam 3 tahap, yaitu *Tier 1 (screening)*, *Tier 2 (tahap evaluasi)* dan *Tier 3 (tahap evaluasi terperinci)*. Kondisi gedung pada penelitian ini belum selesai dibangun yaitu masih berupa struktur (atas dan bawah) saja tanpa komponen arsitektural, mekanikal dan elektrik serta beban layan belum bekerja, sehingga *Tier 1* tidak dapat dilakukan. Oleh sebab itu, penelitian hanya dilakukan analisis sesuai *Tier 2 (evaluasi menggunakan analisis statik linier)* dan *Tier 3 (evaluasi terperinci menggunakan analisis pushover)*. Evaluasi *Tier 3* menggunakan analisis *pushover* metode spektrum kapasitas sesuai ATC-40 [8].

Pemodelan dilakukan sesuai dengan gambar *as-built* gedung, mutu beton rata-rata sesuai hasil pengujian *coredrill* Saputra dkk.[4] sebesar 17,85 MPa dan spektra desain gempa sesuai dengan data di situs gedung berdiri. Pemodelan struktur memiliki acuan nilai perioda getar alami struktur gedung yang telah diteliti sebelumnya di lapangan oleh Afriandini [6].

2.2 Level Kinerja Struktur

FEMA 356 mengelompokkan level kinerja menjadi: O (*Operational*/kerusakan sangat ringan), IO (*Immediate Occupancy*/kerusakan ringan), LS (*Life Safety*/kerusakan sedang), dan CP (*Collapse Prevention*/kerusakan berat) [9]. Kriteria penerimaan level kinerja dibagi menjadi dua, yaitu berdasarkan pada kurva gaya-deformasi (rotasi/kurvatur) untuk mengevaluasi elemen struktur dan berdasarkan grafik gaya geser-perpindahan atap untuk mengevaluasi struktur gedung secara keseluruhan (Gambar 3).



Gambar 2. Kriteria penerimaan level kinerja elemen struktur (kiri) dan struktur secara keseluruhan (tengah) pada bangunan yang menerima beban gempa (kanan)

Kriteria penerimaan level kinerja elemen struktur pada Gambar 3 diidentifikasi dalam 8 kriteria sendi plastis yaitu: A (titik awal), B (batas linier), IO (level kinerja *Immediate Occupancy*), LS (level kinerja *Life Safety*), CP (level kinerja *Collapse Prevention*), C (kapasitas tertinggi), D (kekuatan sisa) dan E (gagal total). Seluruh elemen struktur harus dievaluasi berdasarkan kapasitas struktur elemen itu sendiri, sehingga tiap elemen memiliki kriteria penerimaan masing-masing berdasarkan grafik kapasitas gaya-deformasi. Perhitungan kapasitas elemen struktur beton bertulang pada penelitian ini menggunakan aplikasi Response-2000.

2.3 Evaluasi Seismik Bangunan dengan FEMA 310

Tahapan evaluasi dalam FEMA 310 terdiri dari *Tier 1* (pengamatan eksisting), *Tier 2* (prosedur linier) dan *Tier 3* (prosedur lanjutan/nonlinier).

2.3.1 Tier 1

Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kekurangan melalui *checklist* pada seluruh komponen struktural, nonstruktural dan pondasi. Jika pada *Tier 1* ditemukan defisiensi/kerusakan maka tahapan dilanjutkan ke *Tier 2* dimana analisis secara menyeluruh dilakukan. Gedung tujuh lantai pada penelitian ini dianalisis saat belum selesai dibangun, sehingga *Tier 1* tidak dapat dilakukan.

2.3.2 Tier 2

Evaluasi pada tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi bangunan yang memerlukan perbaikan. Prosedur analisis pada *Tier 2* dapat dilakukan dengan empat cara, yaitu: prosedur statik linier, prosedur dinamik linier, prosedur khusus dan prosedur untuk komponen nonstruktural. Penelitian ini hanya menggunakan prosedur analisis statik linier pada tahapan *Tier 2*, sehingga prosedur analisis lainnya tidak dijelaskan.

a. Prosedur statik linier

Bangunan dimodelkan dengan kekakuan elastis linier dan redaman viskos ekuivalen yang memperkirakan nilai yang diharapkan untuk pembebanan sehingga mendekati titik lelehnya [2]. Gempa desain untuk prosedur statik linier diwakili oleh gaya pseudo lateral (V) dalam persamaan (1) berikut.

$$V = C S_a W \quad (1)$$

dengan C adalah faktor modifikasi, S_a adalah percepatan respons spektrum yang berkesesuaian dengan waktu getar alami efektif pada arah yang ditinjau, dan W adalah berat seismik efektif.

Besarnya gaya *pseudo* lateral pada model elastis linier dipilih dengan maksud agar bangunan menghasilkan amplitudo perpindahan desain yang mendekati perpindahan maksimum yang diharapkan selama gempa desain. Hal tersebut menjadikan simpangan struktur (δ) hasil prosedur analisis statik linier yang menggunakan rumus gaya *pseudo* lateral persamaan (1) dalam FEMA 310 adalah simpangan yang “sesungguhnya” ketika terkena beban gempa rencana. Prosedur statik linier dalam FEMA 310 tidak mempresentasikan gaya lateral sesungguhnya yang harus ditahan bangunan ketika gempa. Hal ini berarti gaya-gaya dalam yang terjadi akibat gaya *pseudo* lateral harus dibagi lagi dengan *m-factors*[2]. Prosedur statik linier dengan gaya *pseudo* lateral dalam FEMA 310 ini berdasarkan perpindahan ekuivalen bukan prosedur gaya geser dasar lateral ekuivalen seperti dalam SNI gempa 2012 [10].

b. Spektra desain

Nilai S_a pada rumus (1) dihitung dari nilai S_{D1}/T dengan S_{D1} merupakan percepatan spektrum respons desain pada periode 1 detik dari peta gempa Maximum Considered

Earthquake (MCE) dan T adalah perioda getar alami gedung. Nilai S_a ini tidak boleh melebihi S_{DS} yaitu percepatan spektrum respons desain pada perioda pendek. Nilai S_{D1} dan S_{DS} diperoleh berdasarkan peta gempa dalam SNI gempa 2012.

c. Evaluasi komponen struktur

FEMA 310 menggunakan nilai *m-factors* untuk mengevaluasi daktilitas komponen struktur berdasarkan level kinerja yang diharapkan. Nilai *m-factors* hanya digunakan pada *Tier* tertentu, yang artinya *m-factors* pada *Tier 2* tidak dapat digunakan pada *Tier 1* dan *Tier 3*.

2.3.3 *Tier 3*

FEMA 310 mengharuskan evaluasi lanjutan *Tier 3* dengan prosedur dinamik linier, prosedur statik nonlinier, atau prosedur dinamik nonlinier jika salah satu syarat di bawah ini terjadi, yaitu:

- Ketinggian gedung lebih dari 100 feet (30,5 m)
- Rasio dimensi horisontal lebih dari 1,4 kalinya dimensi horisontal di lantai yang berdekatan
- Terindikasi memiliki ketidakberaturan torsi horisontal
- Terindikasi memiliki ketidakberaturan vertikal yaitu jika simpangan antar lantainya lebih dari 150% simpangan antar lantai dibawahnya

Struktur gedung tujuh lantai ini merupakan gedung pendidikan (kategori seismik risiko IV menurut SNI) yang diharapkan memiliki level kinerja *Immediate Occupancy*, maka analisis statik nonlinier digunakan pada *Tier 3* ini untuk mengevaluasi struktur secara lebih terperinci. Prosedur nonlinier dapat dilakukan dengan dua cara yaitu prosedur statik nonlinier (atau biasa disebut analisis *pushover*) dan prosedur dinamik nonlinier (atau biasa disebut analisis riwayat waktu nonlinier) [9]. Analisis *pushover* dipilih dalam evaluasi seismik pada gedung tujuh lantai ini karena analisis *pushover* telah mampu memberikan informasi level kinerja gedung dan memperkirakan kerusakan dengan tepat pada gedung eksisting yang rusak akibat gempa [1,11].

a. Prosedur statik nonlinier (analisis *pushover*)

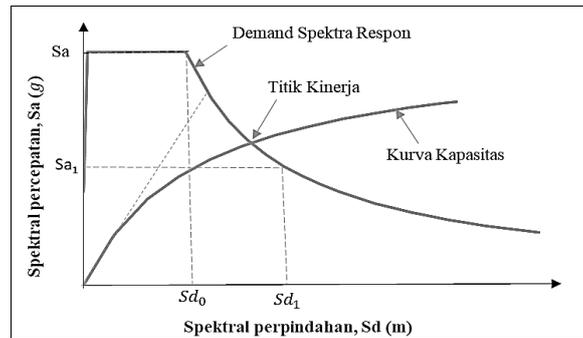
Prosedur statik nonlinier (dikenal pula sebagai analisis *pushover* atau analisis beban dorong statik) merupakan penyederhanaan analisis dinamik suatu struktur yang dilanda gempa dengan menggunakan gaya lateral yang mirip dengan analisis statik linier. Analisis beban dorong gaya lateral yang digunakan dalam analisis dilakukan secara berangsur-angsur meningkat sampai struktur mencapai suatu *displacement* lateral sebesar nilai tertentu [12]. Penelitian pada gedung tujuh lantai ini menggunakan analisis *pushover* dengan metode spektrum kapasitas sesuai ATC 40.

b. Spektrum Respon Desain

Spektrum respon merupakan penyederhanaan beban gempa melalui respon linier gedung terhadap gempa. Spektrum respon diperoleh dari data parameter percepatan pada peta gerak tanah seismik berdasarkan kelas situs bangunan berdiri. Prosedur selanjutnya adalah membuat grafik spektrum respon sebagai pendekatan respon gedung terhadap gempa rencana yang dipakai sebagai *demand* spektra respon dalam analisis *pushover*. Spektrum respon desain yang digunakan dalam penelitian ini berdasarkan SNI gempa 2012.

c. Metode Spektrum Kapasitas

Dua elemen penting dalam prosedur nonlinier adalah *demand*/permintaan dan kapasitas. *Demand* menggambarkan permintaan spektrum respon gedung akibat gempa rencana, sedang kapasitas struktur merupakan kurva hubungan gaya geser dasar (V_b) dengan perpindahan titik lantai atap (δ_{roof}) (disebut kurva kapasitas) yang menggambarkan kemampuan struktur terhadap beban gempa. Titik kinerja diperoleh saat kapasitas struktur mampu menangani permintaan spektrum respon desain (lihat Gambar 4).



Gambar 3. Penentuan titik kinerja menurut metode spektrum kapasitas sesuai ATC-40

2.3 Nilai Demand-Capacity Ratio (DCR)

Berbeda dengan pemeriksaan kriteria penerimaan yang bertujuan untuk mengevaluasi level kinerja komponen, pemeriksaan *Demand-Capacity Ratio* (DCR) bertujuan untuk mengetahui besaran dan distribusi *inelastic demand* setiap komponen primer dari sistem pendukung lateral [9]. DCR dihitung berdasarkan gaya *demand* akibat beban rencana (gravitasi dan gempa) (tanpa *m-factors*) dibagi dengan perkiraan kapasitas kekuatan dari komponen sistem pemikul lateral. Nilai DCR hanya digunakan pada prosedur linier dan tidak digunakan pada prosedur lain. DCR dihitung dengan persamaan (2) berikut.

$$DCR = \frac{Q_{UD}}{Q_{CE}} \quad (2)$$

dimana Q_{UD} merupakan gaya-gaya dalam akibat beban gravitasi dan gempa sedang Q_{CE} adalah perkiraan kekuatan dari komponen sistem pemikul lateral.

DCR dihitung untuk setiap aksi (gaya aksial, momen dan geser) dari setiap komponen primer. Penggunaan prosedur linier ditentukan sesuai persyaratan pada FEMA 356, yaitu: 1) Jika DCR semua komponen $\leq 2,0$ maka prosedur linier dapat digunakan, 2) Jika DCR dari satu atau lebih komponen melebihi 2,0 dan tidak terdapat ketidakberaturan struktur gedung, maka prosedur linier dapat digunakan, 3) Jika DCR dari satu atau lebih komponen melebihi 2,0 dan terdapat ketidakberaturan struktur gedung, maka prosedur linier tidak dapat digunakan.

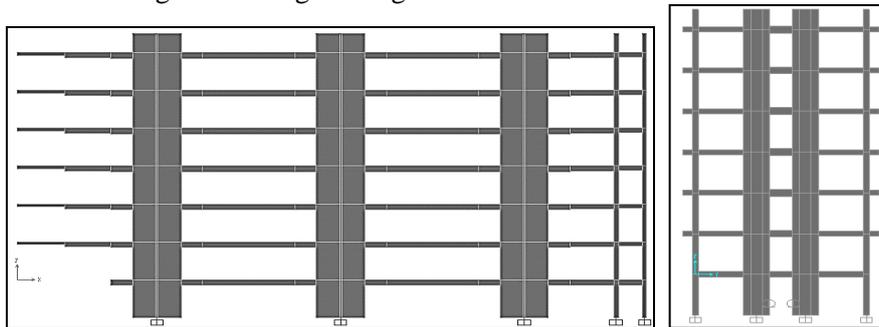
Klasifikasi DCR terhadap kebutuhan daktilitas suatu komponen struktur, dikelompokkan seperti pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Klasifikasi Kebutuhan Daktilitas Komponen [9]

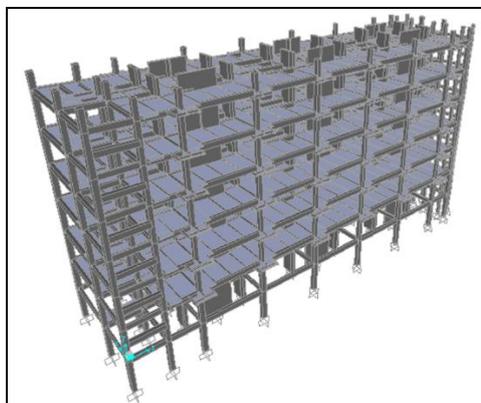
Nilai DCR	Deskripsi
<2	Kebutuhan daktilitas rendah
2 sampai 4	Kebutuhan daktilitas sedang
>4	Kebutuhan daktilitas tinggi

2.4 Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur tiga dimensi dilakukan sesuai gambar *asbuilt* dan kondisi sesungguhnya di lapangan. Balok-kolom dan dinding geser dimodelkan sebagai *frame* dengan balok selebar dinding geser dimodelkan sebagai *rigid body*. Pemodelan dinding geser sebagai *frame* bertujuan agar dinding geser dapat didefinisikan sendi plastisnya dan mendekati perilaku dinding geser di lapangan. Pendefinisian sendi plastis dilakukan pada seluruh *frame* berdasarkan kapasitas desain dan jenis pembebanan yang diterima *frame* tersebut. Elemen balok didefinisikan mengalami sendi plastis akibat gaya lentur arah vertikal (M3), sedang sendi plastis elemen kolom dan dinding geser terjadi akibat kombinasi pembebanan aksial dan lentur dua arah (P-M2-M3). Seluruh elemen struktur juga dilakukan pendefinisian sendi plastis akibat gaya geser berdasarkan kuat geser masing-masing elemen.



Gambar 4. Pemodelan Dinding Geser SW-2 Sebagai *Frame* dan Balok Kaku Sepanjang Dinding Geser (Potongan As F) dan Pemodelan Dinding Geser SW-1 Sebagai *Frame* dan Balok Kaku Sepanjang Dinding Geser (Potongan As 13)



Gambar 5. Pemodelan Gedung Tujuh Lantai dengan SAP2000

Mutu material pada pemodelan disesuaikan dengan mutu material hasil penyelidikan lapangan yaitu kuat tekan beton rata-rata (f'_c) sebesar 17,85 MPa; mutu tulangan (f_y) untuk $D > 12$ mm sebesar 390 MPa dan mutu tulangan (f_y) untuk $P < 12$ mm sebesar 240 MPa. Periode getar alami struktur pada pemodelan harus mendekati periode getar alami bangunan hasil pengujian getaran mikro di lapangan oleh Afriandini [6] sebesar 0,6387 detik dan 0,6812 detik masing-masing untuk arah X(B-T) dan Y(U-S). Hal ini bertujuan agar pemodelan yang digunakan dalam analisis mendekati parameter struktur (dimensi, mutu beton dan baja tulangan, kekakuan, dll) yang sebenarnya di lapangan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Analisis

Hasil pemodelan menghasilkan perioda getar alami sebesar 0,6247 detik dan 0,6748 detik untuk arah X(B-T) dan Y(U-S). Nilai ini memiliki selisih 2,18% dan 0,94% terhadap perioda getar alami di lapangan oleh Afriandini [6], sehingga pemodelan dapat digunakan karena mendekati perioda getar alami di lapangan.

3.1.1 Tier 2

Tier 2 (prosedur statik linier) memberikan hasil bahwa struktur gedung ini tidak memiliki ketidakberaturan horisontal dan rasio simpangan antar-lantai sesuai yang diharapkan untuk gedung pendidikan. Berdasarkan pemeriksaan kriteria penerimaan struktur, hampir seluruh balok tidak memenuhi kriteria penerimaan level kinerja IO terutama balok BS2, B2'' dan B6 yang tidak memenuhi kriteria penerimaan level kinerja IO untuk gaya lentur dan geser sekaligus. Balok ini berhubungan langsung dengan dinding geser, sehingga gaya gesernya sangat tinggi. Hanya kolom K2 yang tidak memenuhi kriteria penerimaan level kinerja IO untuk gaya geser, sedangkan dinding geser SW2 tidak memenuhi diagram interaksi aksial-kolom. Kriteria penerimaan pada komponen *deformation-controlled* harus dibagi dengan *m-factors* sesuai Tabel 4-3 sampai Tabel 4-6 pada FEMA 310 [2].

Evaluasi seismik *Tier 2* pada FEMA 310 selanjutnya adalah mencari nilai *Demand-Capacity Ration* (DCR) untuk mengetahui kebutuhan daktilitasnya. Jika $DCR > 2$ dan struktur memiliki ketidakberaturan horizontal maka prosedur linier tidak dapat digunakan. Nilai DCR pada elemen struktur dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Nilai DCR Kolom dan Dinding Geser Berdasarkan *Tier 2*

Ket.	K1	K2	K4	K5	K7	K8	K13	SW1	SW2
Geser	0,43	0,49	0,36	0,37	0,35	0,30	0,37	0,18	0,11
Momen	0,55	0,53	0,49	0,43	0,32	0,40	0,34	0,89	1,37
Aksial	0,35	0,45	0,42	0,16	0,11	0,37	0,12	0,39	0,33

Tabel 3. Nilai DCR Balok berdasarkan *Tier 2*

DCR	BS1	BS2	BS3	B1	B2	B2'	B2''	B3	B4	B5	B6	B7
Geser	3,22	4,89	1,36	0,38	0,50	0,00	3,54	1,59	1,01	0,91	4,73	1,59
Momen	1,14	2,91	1,28	1,14	1,45	0,00	2,85	2,38	1,90	1,79	2,75	2,40
DCR	B10	B11	B13	B14	B16	B17	B19	B20	B21	B26	B27	B28
Geser	2,58	0,58	2,90	0,57	0,76	1,37	1,07	0,17	0,24	0,64	0,67	0,87
Momen	2,12	1,42	2,31	1,30	1,21	1,11	1,73	0,07	0,24	1,85	1,07	1,21

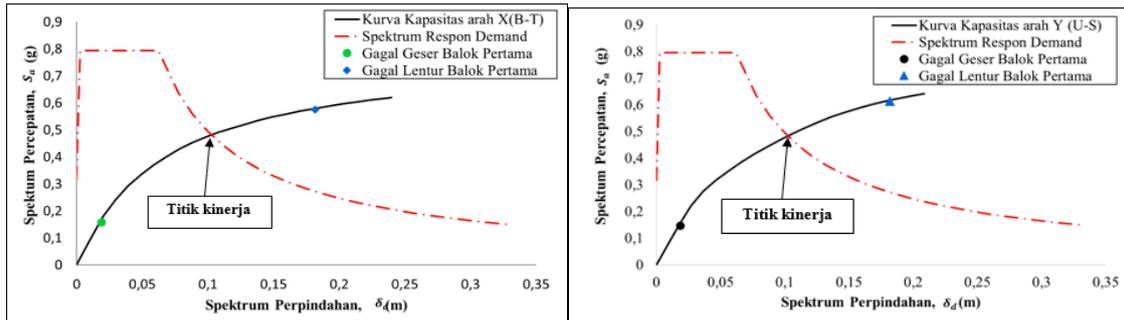
Hasil pemeriksaan *Tier 2* menunjukkan bahwa hampir seluruh balok tidak memenuhi kriteria penerimaan dan beberapa balok memiliki nilai $DCR > 2$ namun struktur tidak memiliki ketidakberaturan struktur, sehingga prosedur linier sebenarnya dapat digunakan. Akan tetapi, fungsi bangunan yang digunakan untuk kegiatan pendidikan (*Immediate Occupancy*) mengharuskan evaluasi struktur secara lebih terperinci dapat dilakukan melalui *Tier 3* (prosedur statik non linier).

3.1.2 Hasil Tier 3

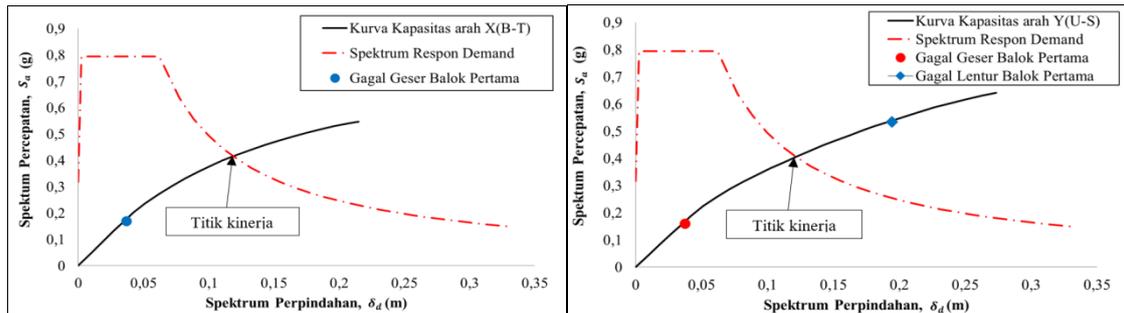
a. Titik Kinerja Struktur

Titik kinerja suatu bangunan struktur didapat dari perpotongan kurva kapasitas struktur dengan kurva spektrum respon *demand*. Penentuan respon desain didasarkan pada nilai S_{Ds} dan

S_{D1} sebesar 0,794 g dan 0,445 g [13] di daerah Berek, Yogyakarta. Titik kinerja dicari berdasarkan dua variasi penampang. Titik kinerja pada penampang utuh digunakan untuk mengevaluasi kriteria penerimaan struktur akibat gaya-gaya dalam yang terjadi, sehingga dapat diketahui elemen mana yang mengalami kerusakan. Titik kinerja pada penampang retak digunakan untuk mengevaluasi simpangan, sehingga dapat diketahui level kinerja struktur secara keseluruhan. Titik kinerja pada penampang utuh ditunjukkan dengan Gambar 7 dan penampang retak dengan Gambar 8.

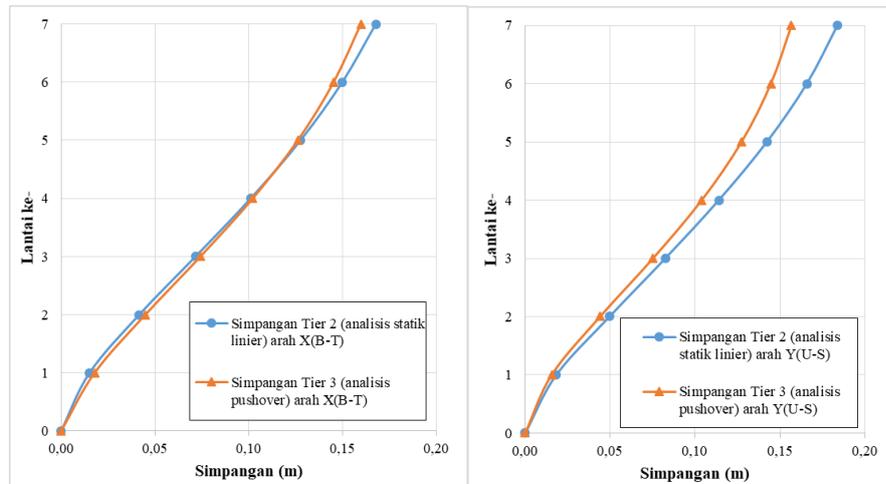


Gambar 7. Titik kinerja berdasarkan metode spektrum kapasitas untuk arah X(B-T) [kiri] dan Y(U-S) [kanan] pada pemodelan dengan penampang utuh



Gambar 8. Titik kinerja berdasarkan metode spektrum kapasitas untuk arah X(B-T) [kiri] dan Y(U-S) [kanan] pada pemodelan dengan penampang retak

Hasil pemeriksaan kriteria penerimaan struktur untuk level kinerja IO dengan Tier 3 menunjukkan kerusakan yang sama dengan Tier 2. Hampir seluruh balok, terutama yang berbatasan langsung dengan dinding geser, mengalami kerusakan dengan ditandai warna merah (E) pada titik *hinge* balok (Gambar 9). Akan tetapi pada Tier 3 ini tidak ditemukan kerusakan pada kolom maupun dinding seser. Terlihat dari Gambar 7 dan Gambar 8 bahwa kerusakan gagal geser balok pertama terjadi sebelum titik kinerja, padahal level kinerja IO mensyaratkan bahwa gedung tidak boleh ada kerusakan struktur ketika titik kinerja terjadi. Hal ini menunjukkan bahwa gedung ini tidak memenuhi level kinerja IO seperti yang disyaratkan untuk gedung pendidikan. Denah kerusakan dapat dilihat pada Gambar 10 di bawah ini.



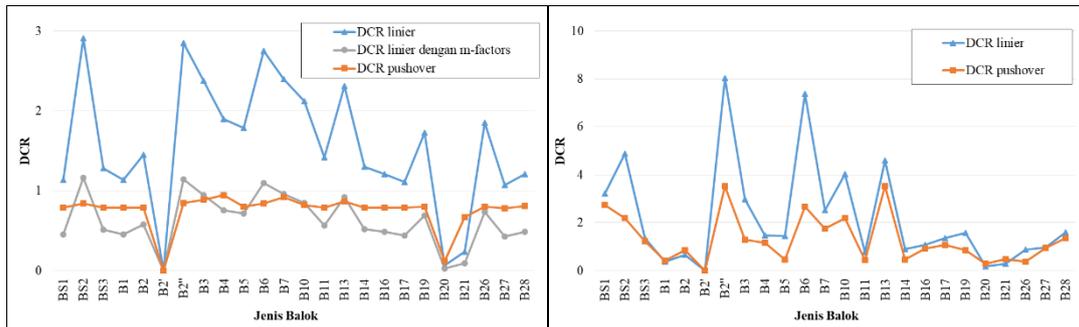
Gambar 11. Perbandingan simpangan lantai arah X(B-T) [kiri] dan Y(U-S) [kanan]

b. Perbandingan *Demand-Capacity Ratio* (DCR)

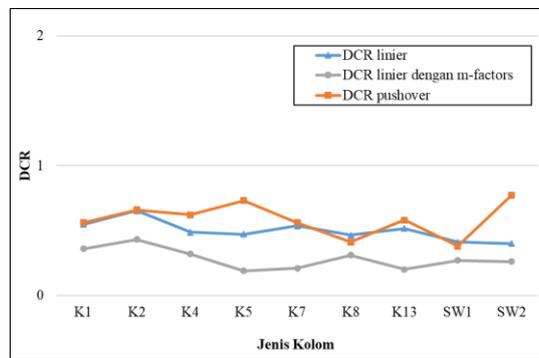
Nilai *Demand-Capacity Ratio* (DCR) hanya digunakan dalam *Tier 2* pada prosedur statik linier atau prosedur dinamik linier. Akan tetapi dalam penelitian ini penulis ingin mengetahui perbandingan nilai DCR hasil *Tier 2* dengan DCR hasil *Tier 3*. Hal ini bertujuan ingin mengetahui keandalan *Tier 2* dalam memprediksi kinerja tiap elemen struktur dibandingkan hasil *Tier 3*.

Kriteria penerimaan untuk mengevaluasi komponen struktur berdasarkan prosedur analisis statik linier di *Tier 2* menggunakan nilai *m-factors* sebagai pembagi nilai gaya aksi *deformation-controlled* (Q_u/m) dan nilai perkiraan kekuatan struktur didapat dari kapasitas struktur nominal dikali faktor pengali (1,25 untuk struktur beton bertulang) ($Q_{nE} = 1,25Q_n$). Komponen struktur dikatakan memenuhi kriteria penerimaan untuk level kinerja tertentu jika $(Q_u/m)/Q_{nE} \leq 1$. Kriteria penerimaan untuk evaluasi komponen struktur berdasarkan prosedur analisis *pushover* di *Tier 3* berdasarkan nilai gaya aksi (tidak menggunakan *m-factors*) dan kapasitas struktur didapat dari tes laboratorium atau perhitungan analitis untuk kapasitas nominal (Q_n). Komponen struktur dikatakan memenuhi kriteria penerimaan untuk level kinerja tertentu jika $Q_u/Q_n \leq 1$. Nilai *Demand-Capacity Ratio* (DCR) hanya digunakan dalam *Tier 2* pada prosedur statik linier atau prosedur dinamik linier. DCR didefinisikan sebagai nilai gaya aksi yang terjadi akibat pembebanan (gempa dan struktur) (Q_u) dibagi perkiraan kapasitas strukturnya (Q_{nE}) atau $DCR = Q_u/Q_{nE}$.

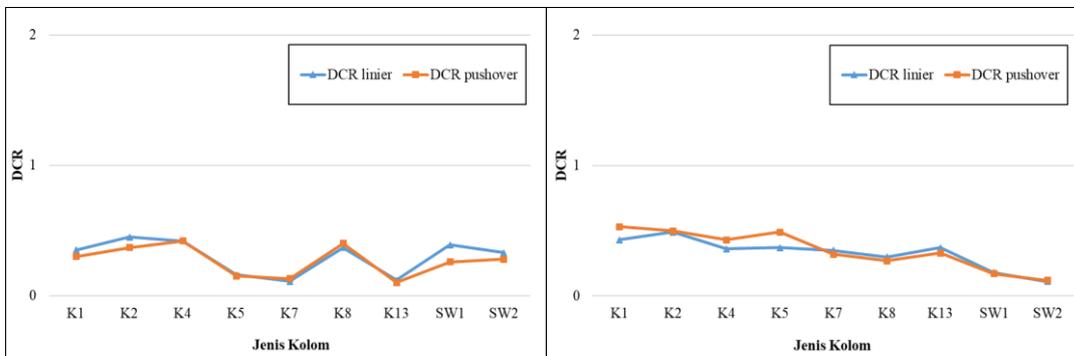
Sebagai penyederhanaan, kriteria penerimaan pada *Tier 2* FEMA 310 dinamakan “DCR linier dengan *m-factors*” dan kriteria penerimaan pada *Tier 3* dinamakan DCR *pushover*. Digunakan pula nilai DCR pada *Tier 2* sebagai pembanding dan dinamakan DCR linier. Perbandingan DCR *Tier 2* dengan *Tier 3* digambarkan di Gambar 12 dan Gambar 13 berikut.



Gambar 12. Perbandingan DCR hasil Tier 2 dan Tier 3 pada balok akibat momen lentur [kiri] dan gaya geser [kanan]



Gambar 13. Perbandingan DCR hasil Tier 2 dan Tier 3 pada kolom akibat momen lentur



Gambar 14. Perbandingan DCR hasil Tier 2 dan Tier 3 aksi gaya *force-controlled* pada kolom dan dinding geser akibat gaya aksial [kiri] dan gaya geser [kanan]

Secara umum nilai DCR linier hasil Tier 2 dengan DCR *pushover* hasil Tier 3 memiliki kedekatan nilai pada aksi gaya *force-controlled* (geser dan aksial) terutama pada elemen kolom dan dinding geser (Gambar 14). Hal ini dikarenakan DCR pada aksi gaya elemen tersebut memiliki kapasitas daktilitas yang terbatas ($DCR < 2$). DCR linier dengan *m-factors* lebih mendekati nilai DCR *pushover* pada aksi gaya *deformation-controlled* (momen lentur) komponen balok (Gambar 12) namun *under-estimate* pada komponen kolom dan dinding geser (Gambar 13). Hal ini menguatkan metode evaluasi Tier 2 dimana gaya-gaya dalam yang terjadi harus dibagi *m-factors* untuk aksi gaya *deformation-controlled* saja.

Hasil perbandingan Tier 2 dengan Tier 3 pada struktur gedung eksisting tujuh lantai ini menunjukkan kemiripan dalam DCR komponen struktur dan simpangan lantai yang terjadi. Sehingga Tier 2 dapat digunakan untuk mengevaluasi dan memperhitungkan kekuatan

(retrofitting) lebih lanjut akibat kegagalan struktur yang teridentifikasi dari pemeriksaan kriteria penerimaan komponen struktur pada gedung ini. Hal ini sejalan dengan penelitian Sucuoğlu dkk [1] yang menyatakan bahwa prosedur evaluasi linier dapat digunakan secara efektif untuk bangunan beton bertulang tingkat rendah dan menengah dengan kapasitas daktilitas yang terbatas seperti pada gedung eksisting tujuh.

4. KESIMPULAN

Evaluasi kinerja struktur gedung eksisting tujuh lantai telah dilakukan dengan FEMA 310, serta hasil evaluasi prosedur linier dengan nonlinier telah diperbandingkan sehingga dapat disimpulkan bahwa:

- a. Gedung tujuh lantai ini didesain menggunakan peta gempa pada SNI 1726-2002 maketika dievaluasi dengan FEMA 310 dengan peta gempa pada SNI 1726:2012 terlihat beberapa balok dan kolom tidak memenuhi kriteria penerimaan level kinerja IO seperti yang disyaratkan untuk gedung fasilitas pendidikan;
- b. Simpangan lantai hasil gaya pseudo lateral pada prosedur statik linier (*Tier 2*) memiliki nilai cukup dekat dengan simpangan lantai hasil titik kinerja prosedur pushover (*Tier 3*). Hal ini menunjukkan bahwa gaya pseudo lateral pada prosedur *Tier 2* memberikan simpangan “sesungguhnya” yang telah mengakomodir kelelahan struktur akibat gempa;
- c. Nilai *Demand-Capacity Ratio* pada prosedur statik linier memiliki keselarasan dengan kinerja elemen struktur pada prosedur pushover, sehingga prosedur *Tier 2* FEMA 310 cukup mampu digunakan dalam mengevaluasi kinerja gedung eksisting untuk gedung tingkat rendah hingga menengah dengan daktilitas terbatas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ucapkan terima kasih kepada Besty Afriandini M.Eng. dan Ashar Saputra, Ph.D. beserta instansi yang telah memberikan data pendukung dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sucuoğlu, H., Gür, T., Günay, M.S., 2004, Performance-based seismic rehabilitation of damaged reinforced concrete buildings. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 130, No. 1, hal 1475-1486.
- [2] FEMA 310, 1998, *Handbook for the Seismic Evaluation of Buildings*, ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [3] Triwiyono, A. dan Santoso, B., 2010, *Laporan Hitungan Struktur Gedung Asrama Mahasiswa MM UGM Barek Yogyakarta*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [4] Saputra, A., dkk., 2016, *Laporan pengujian Hammer Test dan Core drill Gedung Asrama Mahasiswa UGM Kinanti dan Sendowo*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [5] Saputra, A., 2016, *Analisis struktur gedung Asrama Mahasiswa UGM Kinanti dan Sendowo dan Perkuatannya*, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [6] Afriandini, B., 2016, *Analisis respon dinamik getaran mikro gedung Asrama Mahasiswa Kinanti UGM*, Thesis, Program Pascasarjana Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [7] Priyosulistyo, H., 2014, *Analisis Dinamik Struktur*. Diktat Ajar Mata Kuliah Analisis Dinamik Struktur Pascasarjana Jurusan Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

- [8] Applied Technology Council, 1996, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, ATC 40, Vol. 1, Washington, D.C.
- [9] FEMA 356, 2000, *Pre-standard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*, ASCE for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- [10] Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 1726:2012: Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- [11] Çavdar, Ö. dan Bayraktar, A., 2016, Nonlinear Earthquake Performance Evaluation of a Structure Collapsed during the Van, Turkey, Earthquake on October 23, 2011, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol.30, No.4.
- [12] Satyarno, I., 2002, *Analisis Dinamik Struktur dan Teknik Gempa*, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta.
- [13] Pusat Penelitian Mitigasi Bencana Institut Teknologi Bandung (PPMB-ITB) dengan Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman - Kementerian Pekerjaan Umum, 2011, *Desain Spektra Indonesia*, http://puskim.pu.go.id/Aplikasi/desain_spektra_indonesia_2011/, diakses 5 Februari 2018.