

EVALUASI STRUKTUR BANGUNAN HOTEL AMBARRUKMO PADA KONDISI SEBELUM DAN SETELAH RETROFIT TERHADAP PETA GEMPA 2010

Oleh: Fajar Purwoko

Abstrak: Wilayah Yogyakarta yang termasuk dalam zonasi gempa 3 sesuai dengan SNI 03-1726-2002 dengan percepatan puncak batuan mencapai 0,15g pada kala ulang 500 tahun telah dirubah menjadi 0,3g-0,4g sesuai dengan Peta Zonasi Gempa 2010 untuk probabilitas terlampaui sebesar 10% dalam 50 tahun (kala ulang 475 tahun), sehingga kerentanan atau resiko terhadap kerusakan bangunan akibat gempa menjadi lebih besar. Evaluasi dilakukan dengan 2 tahap yaitu linier dan non linier analysis dalam 3 kondisi (normal, retak, dan retrofit) dengan kala ulang gempa 72, 475, dan 2475 tahun, dari analisis linear didapatkan kapasitas balok-kolom dan drift ratio bangunan, sedangkan analisis non linear menghasilkan kinerja bangunan tersebut. Hasil analisis linear memberikan kesimpulan bahwa kapasitas frame dan drift ratio masih memenuhi syarat untuk semua kondisi, sedangkan pada analisis non-linear yang dilakukan dengan 2 metode (ATC-40 & FEMA-356) memberikan hasil yang berbeda pada metode FEMA 356 pada gempa 2475 tahun dengan kondisi beberapa bagian bangunan mengalami retak kinerja bangunan yaitu D (>Collapse) sedangkan setelah di retrofit kinerja bangunan dapat mencapai Life Safety, hal ini menunjukkan retrofit berupa CFRP akan memberikan kinerja yang lebih baik, namun pemasangannya harus dilaksanakan dengan benar

Kata Kunci: Peta Gempa 2010, non-linier analysis, retrofit.

1. PENDAHULUAN

1.1. Umum

Yogyakarta yang termasuk dalam zonasi gempa 3 sesuai dengan SNI 02-1726-2002 dengan percepatan puncak batuan 0,15g pada kala ulang 500 tahun telah dirubah menjadi 0,3g-0,4g sesuai dengan Peta Zonasi Gempa 2010 untuk probabilitas terlampaui sebesar 10% dalam 50 tahun (gempa kala ulang 475 tahun), sehingga kerentanan atau resiko terhadap kerusakan bangunan akibat gempa menjadi lebih besar. Pengoperasian kembali Hotel Ambarukmo dengan *retrofitting* pada tahun 2011 untuk sarana umum seharusnya didasarkan pada suatu penelitian mengenai kinerja bangunan. Adapun tujuannya penelitian kinerja bangunan ini adalah untuk mengetahui tingkatan kinerja (*Performance Level*) untuk tingkatan resiko gempa kala ulang 72 tahun, 475 tahun dan 2475 tahun dan untuk mengetahui efektifitas *retrofitting* yang telah dilakukan pada bangunan tersebut.

1.2. Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi oleh hal-hal sebagai berikut,

1. Objek penelitian adalah Hotel Ambarukmo blok bangunan lama,
2. Data yang tersedia berupa laporan struktur dan gambar perencanaan oleh konsultan perencana PT. Gistama,
3. Permodelan struktur gedung menggunakan program SAP2000 V.11.0.0.
4. Permodelan dinding atau *masonry* hanya dilakukan pada permodelan *linier dynamic analysis*.
5. Pembebanan gedung berdasarkan IBC 2006

6. Pembebanan gempa berdasarkan ASCE 7-10, dengan Peta Gempa 2010 untuk kala ulang 72 tahun, 475 tahun dan 2475 tahun
7. Perletakan struktur diasumsikan berupa jepit.
8. Struktur bangunan yang dievaluasi adalah struktur bagaian atas,
9. Kapasitas elemen struktur dihitung dengan berdasarkan SNI 03-2847-2002,
10. Analisis yang digunakan meliputi analisis dinamik linier dan analisis statik nonlinier
11. Kapasitas dan hinge properties balok kolom diasumsikan dikarenakan data penulangan eksisting tidak tersedia,
12. Level kinerja struktur ditentukan berdasarkan Metode Spektrum Kapasitas (ATC-40, 1996) dan Metode Kofisien Perpindahan (FEMA 356)

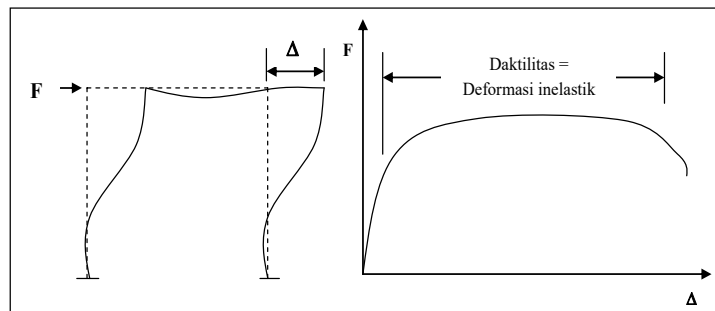
2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Umum

Perencanaan bangunan tahan gempa pada umumnya didasarkan pada building codes yang berlaku, namun menurut pernyataan yang dikemukakan oleh Dewobroto, W. (2006), hal tersebut tidak dapat secara langsung menunjukkan kinerja bangunan terhadap suatu gempa yang sebenarnya, terlebih lagi jika bangunan tersebut merupakan bangunan yang didirikan dan direncanakan sebelum adanya building codes yang berlaku di negara tersebut. Sehingga analisis berbasis kinerja tentu merupakan prosedur efektif untuk mengetahui kinerja bangunan eksisting yang terkait dengan resiko yang dihadapi pemilik bangunan dan investasi yang telah dikeluarkan.

2.2. Konsep Struktur Tahan Gempa

Imran dan Hendrik (2010) menjelaskan bahwa pada prinsipnya SNI 1726-2002 memperbolehkan struktur gedung tahan gempa direncanakan terhadap beban gempa yang direduksi dengan suatu faktor modifikasi (faktor R) yang merupakan representasi tingkat daktilitas yang dimiliki struktur, adapun struktur yang memiliki daktilitas yang baik digambarkan dalam portal dua dimensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 Dengan penerapan konsep ini, maka elemen-elemen struktur tertentu diperbolehkan untuk mengalami plastifikasi pada saat terjadinya gempa kuat. Elemen-elemen yang dipilih mengalami plastifikasi ini adalah elemen yang perilaku plastifikasinya bersifat daktil dan tidak mudah runtuh. Elemen struktur



Gambar 1. Desain Struktur yang Daktil (Imran, 2009)

2.3. Analisis Beban Dorong Statik

Menurut SNI 1726-2002, analisis beban dorong statik (static pushover analysis) merupakan cara analisis statik 2-dimensi atau 3-dimensi linier dan nonlinier, dimana pengaruh gempa rencana dianggap sebagai beban-beban statik yang menangkap pada pusat massa masing-masing lantai, yang nilainya ditingkatkan secara berangsur-angsur sampai melampaui pembebanan yang menyebabkan terjadinya pelelehan pertama (sendi plastis) di dalam struktur gedung, kemudian dengan peningkatan beban lebih lanjut mengalami perubahan bentuk pasca elastik yang besar sampai mencapai kondisi di ambang keruntuhan.

2.4. Pengaruh Penambahan Carbon Fibre Strips pada Balok Beton Bertulang

Arduini, dkk (1997) juga menunjukkan bahwa perbaikan balok lentur dengan Fiber Reinforced Plastic (FRP) menghasilkan suatu perubahan model keruntuhan dan keruntuhan daktail ke getas (brittle). Keruntuhan getas dapat berupa gagal geser pada beton yang secara langsung akan menurunkan kapasitas lentur. Ada empat kemungkinan mekanisme keruntuhan jika suatu balok diperkuat dengan FRP yang ditumpu sederhana dengan pembebanan titik, empat mekanisme kebutuhan tersebut yaitu,

1. Runtuhnya FRP pada bagian tarik (FRP *tensile rupture*) ketika regangan pada FRP berlebih yang terjadi pada zona maksimum
2. Beton pecah (*concrete crushing*) ketika kuat tekan beton berlebih yang terjadi pada zona momen maksimum
3. Debonding antara FRP dan beton akibat keruntuhan pada interface beton adhesive (*debonding at concrete adhesive interface*)
4. Keruntuhan tarik pada ujung pelat FRP (*shear tension failure at plate end*) karena adanya tegangan geser dan tegangan normal didalam beton dan bidang longitudinal baja.

3. LANDASAN TEORI

3.1. Faktor Keutamaan dan Kategori Resiko Bangunan.

Faktor keutamaan gempa pada perhitungan beban gempa merupakan nilai yang berpengaruh pada gaya geser dasar gempa, nilai faktor keutamaan tersebut didapat dari kategori resiko bangunan yang telah ditentukan sesuai pemanfaatan bangunan tersebut.

3.2. Seismic Ground Motion Values

Prosedur dalam menentukan nilai Seismic Ground Motion yang diatur dalam International Building Codes (IBC) 2006 adalah sebagai berikut dengan ilustrasi seperti pada Gambar 2:

1. Mapped Acceleration Parameters

Parameter S_s dan S_1 ditetapkan berdasarkan percepatan 0,2 dan 1,0 detik dari respon percepatan spektra (*spectral response accelerations*) Peta Gempa untuk kala ulang 475 dan 2475 tahun, dan menggunakan parameter pembanding untuk membuat respon spectrum kala ulang 72 tahun menggunakan tabel konversi.

2. Definisi Site Class

Definisi Site Class ditetapkan berdasarkan *soil properties* pada lokasi bangunan. Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 3.C. Klasifikasi Situs

3. Site Coefficients and adjusted maximum considered earthquake spectral response acceleration parameters

Nilai maksimum spektral respon untuk perioda pendek (0,2 detik) dan perioda 1 detik, dengan mempertimbangkan pengaruh *site class* diberikan pada persamaan berikut:

$$S_S = F_a S_s \dots\dots\dots(3.1)$$

$$S_1 = F_v S_1 \dots\dots\dots(3.2)$$

4. Design Spectral Response Acceleration Parameters

Desain percepatan *respon spectra* dengan redaman 5% dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$S_{DS} = \frac{2}{3} S_{MS} \dots\dots\dots(3.3)$$

$$S_{D1} = \frac{2}{3} S_{M1} \dots \dots \dots (3.4)$$

- Menentukan *Seismic Design Category* (SDC)
Seismic Design Category (SDC) ditentukan berdasarkan nilai parameter respons percepatan pada periode pendek dan periode 1 detik S_{DS} dan S_{D1} , serta kategori resiko dari bangunan

3.3. Respon Spektrum

Prosedur penentuan respon spektrum desain yang diatur dalam ASCE 7-10 diuraikan sebagai berikut :

- Untuk perioda kurang dari T_0 , maka desain *respon spectra* S_a diformulasikan sebagai berikut

$$S_a = S_{DS} \left(0,4 + 0,6 \frac{T}{T_0} \right) \dots \dots \dots (3.5)$$

- Untuk perioda antara T_0 sampai dengan T_S , maka desain respon spectra S_a diambil sebagai nilai S_{DS} .
- Untuk perioda antara T_S sampai dengan T_L , desain respon spectra S_a diformulasikan sebagai berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1}}{T} \dots \dots \dots (3.6)$$

- Untuk perioda lebih besar dari T_L , desain respon spectra S_a diformulasikan sebagai berikut.

$$S_a = \frac{S_{D1} T_L}{T^2} \dots \dots \dots (3.7)$$

dimana,

S_{DS} = Desain percepatan respon spektra pada T pendek

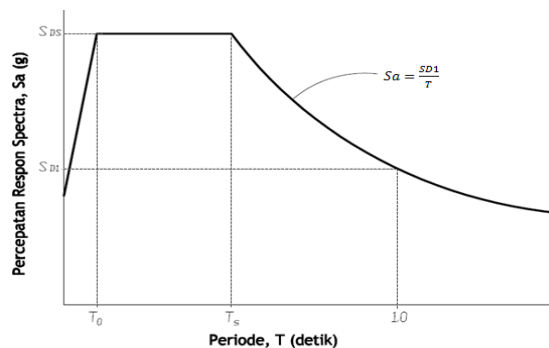
S_{D1} = Desain percepatan respon spektra pada T 1-s

T= Periode alami struktur (detik)

$$T_0 = 0,2 \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots \dots \dots (3.8)$$

$$T_S = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \dots \dots \dots (3.9)$$

T_L = Long period transition (detik)



Gambar 2. Desain Respon Spektrum

3.4. Gaya Lateral Ekuivalen (ASCE 7-10)

Gaya geser dasar sismik (V), ditetapkan dengan persamaan sebagai berikut,

$$V = C_s W \dots\dots\dots(3.10)$$

Dengan,

C_s adalah =koefisien respons seismik yang ditentukan;

W adalah =berat seismik efektif

3.5. Periode Fundamental (ASCE 7-10)

Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan properti struktur dan karakteristik deformasi elemen penahan dalam analisis yang teruji. Periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung (C_u) dan periode fundamental pendekatan, T_a , yang ditentukan dari nilai koefisien C_t dan x serta ketinggian bangunan.

3.6. Target Perpindahan

Ada beberapa cara menentukan target perpindahan, dua yang cukup terkenal yaitu Metoda Koefisien Perpindahan (FEMA 356) dan Metoda Spektrum Kapasitas (ATC 40).

Metode koefisien Perpindahan (FEMA 356)

Merupakan metoda utama yang terdapat dalam FEMA 356 untuk prosedur statik nonlinier. Penyelesaian dilakukan dengan memodifikasi respons elastis linier dari sistem SDOF (Single Degree of Freedom) ekuivalen dengan faktor koefisien C_0 , C_1 , C_2 , dan C_3 sehingga diperoleh perpindahan global maksimum (elastis dan inelastis) yang disebut target perpindahan (δ_T).

3.7. Metode Spektrum Kapasitas (ATC-40)

Merupakan metoda utama dalam ATC 40 (1996) yang dimaksudkan untuk evaluasi konstruksi beton bertulang. Dalam Metoda Spektrum Kapasitas, prosedur dimulai dengan menghasilkan kurva hubungan gaya dan perpindahan yang memperhitungkan kondisi inelastis struktur. Proses tersebut sama dengan Metode Koefisien Perpindahan, kecuali pada hasilnya diplotkan dalam format ADRS (acceleration displacement response spectrum).

3.8. Periode Fundamental (ASCE 7-10)

Periode fundamental struktur, T , dalam arah yang ditinjau harus diperoleh menggunakan properti struktur dan karakteristik deformasi elemen penahan dalam analisis yang teruji. Periode fundamental struktur, T , tidak boleh melebihi hasil koefisien untuk batasan atas pada periode yang dihitung

3.9. Kinerja Batas Ultimit (ASCE 7-10)

Untuk mengakomodasi deformasi inelastis, maka nilai perpindahan dari hasil analisis linier elastis perlu disesuaikan dengan formulasi dari ASCE 7-10 sebagai berikut.

$$\delta_x = \frac{C_d \delta_{xe}}{I} \dots\dots\dots(3.11)$$

3.10. Pembesaran Momen

Gaya aksial terfaktor, P_u , momen terfaktor m_1 dan m_2 pada ujung-ujung kolom dan bilamana diperlukan simpangan relative antar lantai, Δ_0 , harus dihitung dengan analisis elastis orde satu, dimana besaran-besaran penampang ditentukan dengan memperhatikan pengaruh beban aksial, adanya retak sepanjang bentang komponen struktur, dan pengaruh

durasi beban. Sebagai alternatif, nilai besaran pada Tabel 1 untuk komponen struktur bangunan yang akan ditinjau (SNI 03-2847-2002).

Tabel 1. Perbesaran Momen pada Penampang Komponen Struktur

Komponen Struktur	Perbesaran Momen
Balok	0.35I _g
Kolom	0.70I _g
Dinding Retak	0.35I _g
Dinding tidak retak	0.70I _g
Pelat datar dan lantai datar	0.25I _g
Luas	1.0I _g

4. METODOLOGI PENELITIAN

4.1. Metodologi

Analisis dilakukan dengan membuat model dengan program SAP 2000 (Gambar 3) yaitu dengan studi kasus hotel Ambarukmo dengan tiga kondisi yaitu, kondisi normal sebelum terjadi retakan, kondisi mengalami keretakan pada beberapa material, dan kondisi setelah mengalami perbaikan. Masing-masing kondisi tersebut dianalisa linear dynamic (untuk mengetahui nilai simpangan dan nilai beberapa strength capacity of material) dan non linier static (pushover analysis) untuk mengetahui kinerja bangunan tersebut.

1. Tahap Pengumpulan Data

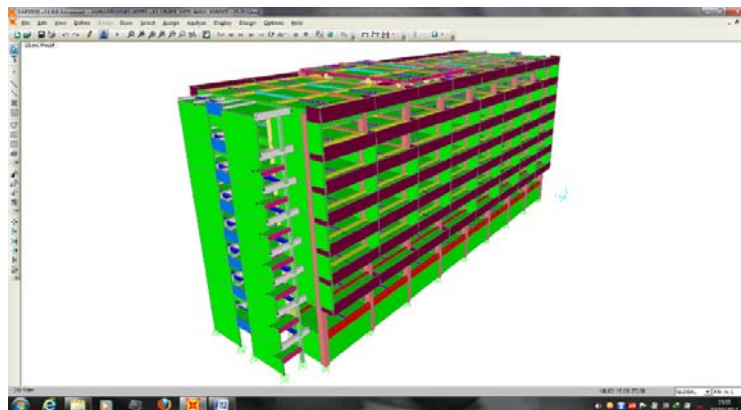
Sebagai data untuk pelaksanaan penelitian, diperlukan dokumen-dokumen hasil rekaman proses konstruksi mulai dari tahap perencanaan sampai dengan tahap pelaksanaan perbaikan Hotel Ambarukmo.

2. Tahapan Analisis

Pemeriksaan kinerja bangunan akan dilakukan untuk tiga kala ulang gempa (72, 475, dan 2475 tahun) dengan menggunakan dua prosedur perhitungan yaitu LDP dan NSP.

a. Linier Dynamic Procedures

Analisis LDP (*Linier Dynamic Procedures*) merupakan metode yang masih berbasis *strength method* (metode kekuatan), dimana analisisnya masih menggunakan sifat-sifat linier. Namun demikian penggunaan metode LDP ini diperlukan untuk melakukan evaluasi kuat tampang elemen dan sebagai pembandingan kesesuaian perilaku kegagalan atau keruntuhan struktur bangunan terhadap hasil dari metode NLP (*Non Linier Static Procedures*).

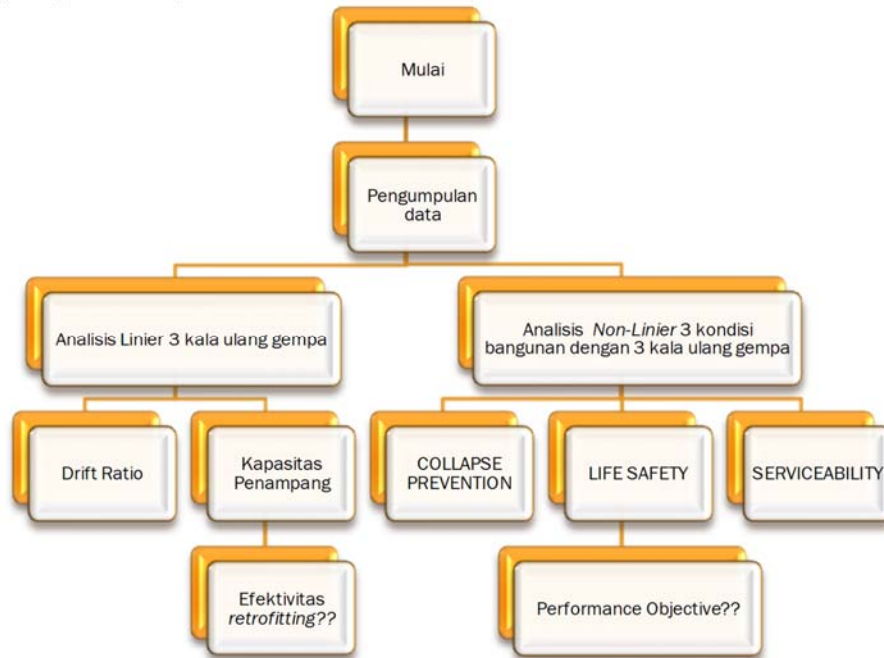


Gambar 3. Model 3D struktur Hotel Ambarukmo

b. *Nonlinier Static Procedures*

Analisis non linier dilakukan dalam beberapa kondisi bangunan, dengan 3 kala ulang gempa masing-masing 72, 475, dan 2475 tahun, berbeda dengan analisis linier, dalam analisis non-linier perencana diharuskan menentukan *hinge properties* balok/kolom utama, dalam penelitian ini *hinge properties* ditentukan dari *auto default hinge properties* dalam program SAP 2000.

Adapun prosedur penelitian diilustrasikan pada Gambar 4.

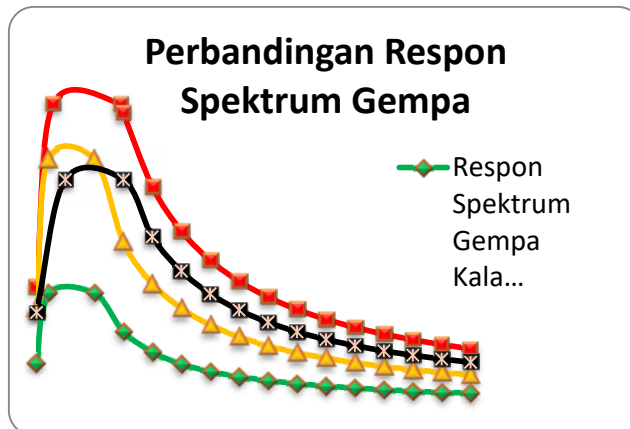


Gambar 4. Bagan Alir Penelitian

5. ANALISA DAN PERHITUNGAN

5.1. Seismic Demands

Prosedur dalam menentukan beban gempa perlu dan kriteria lainnya mengikuti prosedur yang diatur dalam ASCE 7-10, yang dalam penelitian ini akan digunakan gempa perlu pada kala ulang 2475, 475, dan 72 tahun. Dari ketiga respon spectrum berdasarkan gempa kala ulang 2475, 475, dan 72 tahun, didapatkan perbandingan grafis seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan Respon Spektrum Gempa 2475, 475, dan 72 tahun, yang dibandingkan dengan Respon Spektrum SNI 03-1726-2002

5.2. Analisa Modal

Nilai perhitungan waktu getar komputasi struktur dengan penampang utuh (gross) dan penampang retak (cracked) pada ragam dominannya diberikan sebagai berikut:

Tcx-gross = 0,5755 detik

Tcy-gross = 0,519 detik

Tcx-cracked = 0,651 detik

Tcy-cracked = 0,601 detik

5.3. Analisa Ragam Respon Struktur

1. Base Shear

Selain nilai partisipasi massa yang harus 90% untuk memenuhi persyaratan dynamic linier analysis gaya geser dasar minimum dalam ketentuan ASCE 7-10 Pasal 12.9.4.1, bahwa nilai akhir respon dinamik struktur terhadap gempa nominal gempa rencana dalam arah tertentu tidak boleh diambil kurang dari 85% nilai respon ragam pertamanya. Dalam penelitian ini hanya geser dasar gempa arah Y yang disesuaikan karena geser dasar arah X telah memenuhi syarat. Hasil perhitungan sebagai berikut pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan Gaya Geser Dasar dan Faktor Pengali

Parameter	2475	475	72
Berat Bangunan, W (kN)	197752,97	197753	197753
Ie	6,5	6,5	6,5
R	1	1	1
$C_s = \frac{S_{DS}}{\left[\frac{R}{I_e} \right]}$	0,1128154	0,09231	0,043385
T _{use-y}	0,651	0,651	0,651
T _{use-x}	0,651	0,651	0,651
arah Y $C_s = \frac{S_{D1}}{T \left[\frac{R}{I_e} \right]}$	0,0991256	0,05571	0,025536
arah X $C_s = \frac{S_{D1}}{T \left[\frac{R}{I_e} \right]}$	0,0991256	0,05571	0,025536
Syarat, $C_s = 0.044 S_{DS} I_e \geq 0,01$	0,0322652	0,0264	0,012408
C _{s-use-y}	0,0991256	0,05571	0,025536
C _{s-use-x}	0,0991256	0,05571	0,025536
maka, Vy= Cs x W (kN)	19602,387	11017,7	5049,795
maka, Vx= Cs x W (kN)	19602,387	11017,7	5049,795
V (statik)	19602,387	11017,7	5049,795
	19602,387	11017,7	5049,795
0,85 V	16662,029	9365,07	4292,326
Vx base Reaction	17740,488	11800,8	4845,25
Vy base Reaction	16590,064	10333,7	4274,129
FPx	I	I	I
Fpy	1,004338	I	1,004257

5.4. Kapasitas Penampang

Kapasitas penampang pada kondisi normal, retak dan setelah retrofit dibedakan masing-masing dari kapasitas penampang inersia pada balok tersebut, jika normal akan menggunakan 1 I_g, retak G1 (retak hingga kedalaman 10-20cm) dianggap hanya plat yang menopang beban karena kondisi balok sudah tidak mampu menahan kapasitas momen maupun geser, sehingga pada kondisi retak digunakan perbandingan sebagai berikut,

$$I_{g1} = 1/12 \times 0.45 \times 0.95^3 = 0.0321516 \text{ m}^4$$

$$I_{crackG1} = 1/12 \times 0.45 \times 0.12^3 = 0.0000648 \text{ m}^4$$

$$\text{Dibandingkan, } 0.0000648/0.0321516 = 0.002$$

Jadi, digunakan 0.002 I_g yaitu diaplikasikan dari as kolom (ujung balok) sampai dengan sejauh 2h, sedangkan bagian tengah tetap digunakan I_g untuk merepresentasikan balok yang mengalami kerusakan. Dari permodelan di SAP 2000 balok no.143 didapatkan momen dan gaya geser sebagai berikut pada Tabel 3,

Tabel 3. Hasil analisis balok ID 143

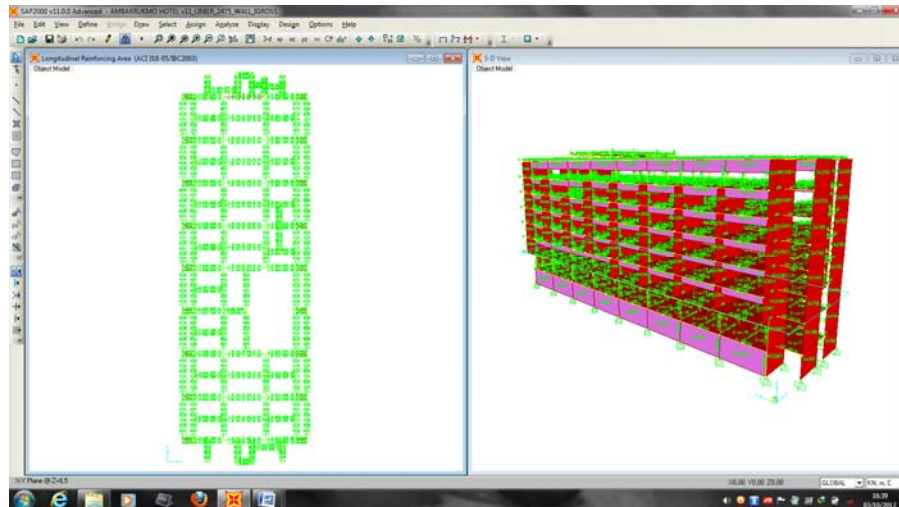
Kala Ulang Gempa	M_u^+	M_u^-	V
2475	488,975	615,01	323,927
475	488,998	563,784	323,927
72	488,998	559,377	323,927

Ukuran balok eksisting B450x950 memiliki nilai Momen Nominal
 $M_n^- = 1244,343 \text{ kNm}$
 $M_n^+ = 644,189 \text{ kNm}$

6. HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1. Output Linier Dynamic Analysis

kapasitas penampang diperlihatkan pada Gambar 6, dalam gambar tersebut terlihat bahwa rasio seluruh penampang balok masih memenuhi syarat (momen, geser, dan torsi), balok yang tidak memenuhi syarat hanya pada balkon kantilever sepanjang 2 meter dan balok penghubung dari dinding geser ke bangunan utama, namun kerusakan tersebut hanya terjadi karena gaya geser.



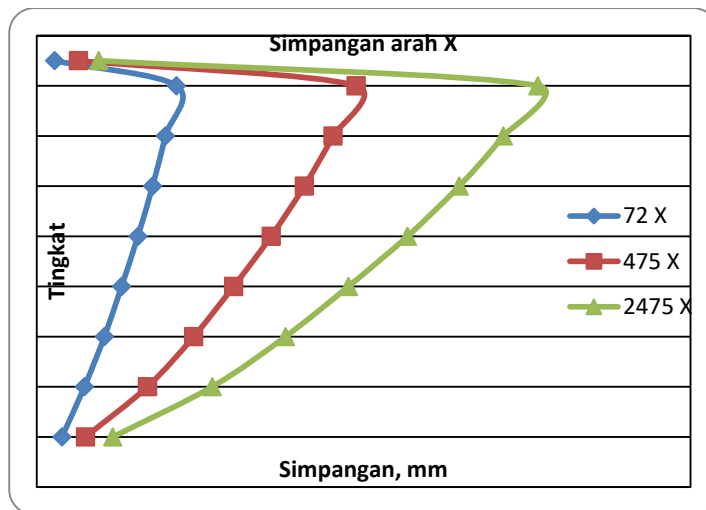
Gambar 6. Output analisis beton pada lantai 2

6.2. Base Shear dan Simpangan Bangunan

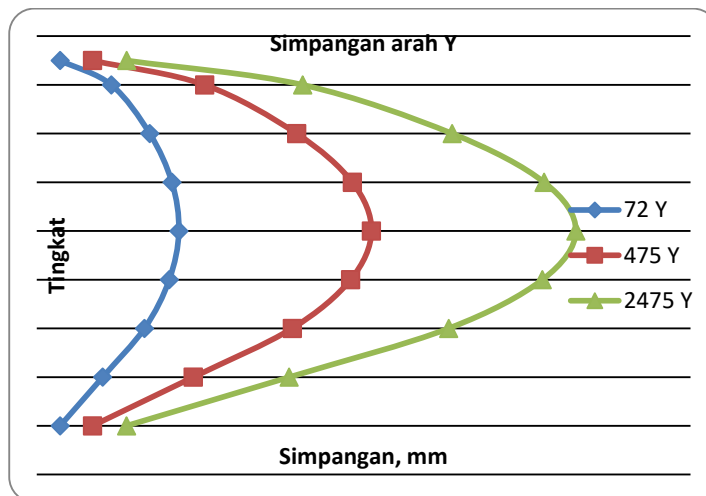
Nilai gaya geser dasar dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu, gaya gempa yang terjadi, massa bangunan, dan tingkat kekakuan bangunan tersebut. Nilai gaya gempa dipengaruhi lagi oleh periode bangunan, faktor reduksi gempa dan yang paling signifikan perbedaannya adalah nilai Spectral Acceleration Parameter. Perbandingan hasil gaya geser dasar dan simpangan bangunan dengan 3 kala ulang berbeda disampaikan pada Tabel 4, Gambar 7, dan Gambar 8.

Tabel 4. Perbandingan nilai gaya geser dasar dan simpangan untuk 3 kala ulang gempa

Tingkat	Gempa 72 Tahun		Gempa 475 Tahun		Gempa 2475 Tahun	
	V_{base-x} (kN)=		V_{base-x} (kN)=		V_{base-x} (kN)=	
	V_{base-y} (kN)=		V_{base-y} (kN)=		V_{base-y} (kN)=	
	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)	x (mm)	y (mm)
8,5	0,676	0,535	1,587	1,278	2,364	2,061
8	5,337	1,71	12,212	3,85	19,159	6,1
7	4,917	2,59	11,325	5,96	17,838	9,53
6	4,426	3,1	10,231	7,24	16,153	11,64
5	3,866	3,26	8,961	7,68	14,175	12,37
4	3,241	3,04	7,524	7,2	11,919	11,6
3	2,5833	2,47	5,998	5,86	9,51	9,45
2	1,82	1,51	4,229	3,59	6,707	5,79
1	0,96	0,535	1,86	1,278	2,902	2,06



Gambar 7. Simpangan bangunan arah X



Gambar 8. Simpangan bangunan arah Y

6.3. Perbandingan Balok Eksisting dengan Demand

Hasil perhitungan untuk kebutuhan tulangan pada beban ultimit disampaikan dalam Tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan Hasil Perhitungan Kebutuhan Tulangan dengan Tulangan terpasang (Eksisting)

Balok	Kebutuhan Tulangan untuk Gempa			Tulangan Eksisting	Kebutuhan CFRP
	Kala Ulang 72 Tahun	Kala Ulang 475 Tahun	Kala Ulang 2475 Tahun		
Tulangan Momen +	4D 25	4D 25	4D 25	5D 25	Tanpa CFRP
Tulangan Momen -	5D 25	5D25	5D 25	10D25	Tanpa CFRP
Tulangan Geser	2P10-160	2P10-160	2P10-160	2P10-150	Tanpa CFRP

Dari Tabel 5 dapat disimpulkan bahwa tulangan momen dan geser untuk seluruh kala ulang gempa masih dalam batas yang aman, sehingga penggunaan CFRP yang telah dilakukan hanya meningkatkan kekakuan balok maupun struktur secara keseluruhan.

6.4. Perbandingan Hasil Pushover Analysis

Pushover analysis dilakukan 9 permodelan dengan kondisi normal, retak pada beberapa balok, setelah retrofit pada beberapa balok, dengan masing-masing 3 kala ulang gempa yang berbeda yang dianalisis menggunakan metode ATC-40 dan FEMA 356 untuk mengetahui kinerja bangunan tersebut. perbedaan tiga model tersebut terletak pada balok yang mengalami rusak dan retrofit, balok rusak dianggap meninggalkan kekakuan berupa plat lantai (embedded beam) yaitu hanya 0,002 I_g, sedangkan untuk kondisi CFRP pada balok yang sebelumnya mengalami kerusakan diasumsikan sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Pangestuti (2006) dalam Pengaruh Penggunaan Carbon Fibre Reinforced Plate Terhadap Perilaku Lentur Struktur Balok Beton Bertulang, dalam penelitian tersebut disampaikan bahwa penambahan pelat CFRP eksternal memberikan kontribusi kekakuan flexural sebesar 49%, sehingga diasumsikan balok rusak diberi penambahan kekakuan hingga 50% (0,5 I_g).

Metode ATC-40 memberikan hasil level kinerja yang lebih baik pada ke 9 model tersebut, seluruh model memiliki kriteria performance immediate occupancy, hal ini tentu saja diatas ekspektasi peraturan ASCE 7-10 (Tabel 6), perbedaan hanya terjadi pada performance point yang dihasilkan seperti pada Tabel 7 dan 8.

Tabel 6. Tingkat Kinerja (ASCE 7-10)

Earthquake Design Level	Earthquake Performance Level			
	Operational	Immediate Occupancy	Life Safety	Collapse Prevention
Frequent (72)	BO	UA	UA	UA
Occasional (225)	EO	BO	UA	UA
Rare (474)	SC	EO	BO	UA
Very rare (2475)	NF	SC	EO	BO

Tabel 7. Parameter Performance Point untuk 3 kondisi bangunan arah X

Kondisi Bangunan	Kala Ulang Gempa	V (kN)	D (m)	S _a	S _d	T _{eff}	B _{eff}
Normal	72 Tahun	2183,636	0,00106	0,015	0,00379	0,927	0,051
	475 Tahun	6015,479	0,002842	0,042	0,009409	0,932	0,054
	2475 Tahun	9215,599	0,004589	0,063	0,015	0,948	0,054
Crack	72 Tahun	2175,696	0,00105	0,015	0,00379	0,927	0,051
	475 Tahun	5903,477	0,002797	0,041	0,00941	0,936	0,055
	2475 Tahun	9385,09	0,004824	0,065	0,016	0,986	0,051
CFRP	72 Tahun	2165,721	0,001185	0,015	0,003795	0,928	0,051
	475 Tahun	6015,479	0,002842	0,042	0,009409	0,932	0,054
	2475 Tahun	9465,055	0,004594	0,065	0,015	0,943	0,054

Tabel 8. Parameter Performance Point untuk 3 kondisi bangunan arah Y

Kondisi Bangunan	Kala Ulang Gempa	V (kN)	D (m)	S _a	S _d	T _{eff}	B _{eff}
Normal	72 Tahun	2316,693	0,001448	0,016	0,004198	1,041	0,05
	475 Tahun	5884,557	0,003681	0,04	0,01	1,04	0,05
	2475 Tahun	9415,295	0,005887	0,063	0,017	1,04	0,05
Crack	72 Tahun	2231,09	0,001401	0,015	0,004317	1,07	0,05
	475 Tahun	5691,803	0,003599	0,039	0,011	1,067	0,05
	2475 Tahun	7987,338	0,005541	0,055	0,018	1,115	0,053
CFRP	72 Tahun	2359,401	0,001473	0,016	0,004144	1,027	0,05
	475 Tahun	5977,674	0,003726	0,04	0,01	1,027	0,05
	2475 Tahun	9564,279	0,005958	0,064	0,017	1,027	0,05

Metode FEMA 356 memberikan hasil yang berbeda pada kinerja bangunan, khususnya pada balok yang mengalami retak. Beberapa nilai gaya geser dasar sudah dalam kondisi pasca-elastis bangunan dikarenakan beberapa nilai gaya geser dasar statiknya lebih kecil dari nilai gaya geser dasar kinerja dengan nilai gaya geser dasar statik untuk ketiga kala ulang gempa 72, 475, dan 2475 tahun masing-masing yaitu, 5049,795 kN, 11017,7 kN, dan 19602,387 kN. Hasil perhitungan level kinerja berdasar FEMA 356 yang disampaikan pada Tabel 9 dan Tabel 10 menunjukkan bahwa penambahan CFRP mengembalikan kondisi bangunan pada initial condition yaitu tanpa kerusakan pada baloknya.

Tabel 9. Kinerja bangunan dan *performance point* dengan metode FEMA 356 pada arah X bangunan

Kondisi Bangunan	Kala Ulang Gempa	V (kN)	D (m)	Kinerja Bangunan
Normal	72 Tahun	6190,101	0,0033	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	12353,418	0,008	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	23337,538	0,014	<i>Life Safety</i>
Crack	72 Tahun	6175,052	0,0033	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	13307,737	0,00862	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	N.A	0,095	<i>D (>Collapse)</i>
CFRP	72 Tahun	5930,233	0,0033	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	13945,608	0,00858	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	22624,96	0,014	<i>Life Safety</i>

Tabel 10. Kinerja bangunan dan *performance point* dengan metode FEMA 356 pada arah X bangunan

Kondisi Bangunan	Kala Ulang Gempa	V (kN)	D (m)	Kinerja Bangunan
Normal	72 Tahun	6095,45	0,0038	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	10875,5	0,00955	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	21257	0,015	<i>Immediate Occupancy</i>
Crack	72 Tahun	6088,2	0,0038	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	12317,9	0,0097	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	18674,7	0,016	<i>Immediate Occupancy</i>
CFRP	72 Tahun	4285,22	0,0037	<i>Immediate Occupancy</i>
	475 Tahun	13447,8	0,00947	<i>Immediate Occupancy</i>
	2475 Tahun	23227,9	0,015	<i>Immediate Occupancy</i>

7. KESIMPULAN DAN SARAN

7.1. Kesimpulan

1. Pada perhitungan analisis dinamik linear hasil drift ratio memenuhi syarat membatasi deformasi pada dinding pengisi non struktural
2. Besaran tulangan pada hasil survey hanya didapatkan dari balok lantai 2 Grid 3/B-K yaitu balok 450x950. Dari perhitungan pada Bab V, balok masih memenuhi kapasitas tampang yang disyaratkan pada kala ulang gempa 2475, 475, dan 72 tahun untuk momen dan gaya geser. Penggunaan CFRP yang telah dilakukan seperti disampaikan oleh Konsultan Perencana PT.Gistama efektif berfungsi untuk membatasi lebar dan penyebaran retak.
3. Perhitungan *pushover analysis* yang dilakukan dengan bantuan program SAP 2000 dengan metode ATC-40 menghasilkan *performance point* yang sangat baik dikarenakan bangunan masih dalam tahap *Immediate Occupancy* (IO), sedangkan perbedaan hanya terjadi pada nilai-nilai *performance point* yang merupakan parameter penentuan kinerja bangunan tersebut.
4. Perhitungan *pushover analysis* yang dilakukan dengan bantuan program SAP 2000 dengan metode FEMA-356 menghasilkan *performance point* yang berbeda dari metode ATC-40. Kinerja bangunan pada saat balok mengalami retak dapat hingga D(>*Collapse*) pada kala ulang gempa 2475 tahun, namun jika balok retak tersebut dalam kondisi normal dan dilapisi dengan CFRP terjadi peningkatan kinerja menjadi *Life Safety*.
5. Metode *pushover analysis* dengan FEMA-356 memberikan ketelitian yang lebih baik mendekati dengan kondisi bangunan yang sebenarnya.

7.2. Saran

1. Perlu adanya dilakukan survey material dan bangunan yang lebih teliti untuk merekam semua kondisi eksisting.
2. Diperlukan data yang lebih lengkap yaitu as-built drawing sebagai data sekunder yang dapat mendukung analisis ulang yang akan dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Arduini, M., dan Nanni A., 1997, *Parametric Study with Externally Bonded FRP Reinforcement*, *ACI Structural Journal*, V.94.
- ASCE 7-10, 2010, *Minimum Design Load for Buildings and Others Structure*, *American Society of Civil Engineers*, Virginia.
- ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings Volume 1*, *Applied Technology Council*, California.

- Dewobroto, W., Evaluasi Kinerja Struktur Baja Tahan Gempa Dengan Analisa *Pushover*, *Civil Engineering National Conference*, Unika Soegijapranata Semarang, 17-18 Juni 2005.
- FEMA 356, 2000, *Prestandard and Comentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*, American Society of Civil Engineers, Washington, D.C.
- IBC 2006, *International Building Code*, International Code Council, Country Club Hills, U.S.A.
- Imran, I., dan Hendrik, F., 2009, Perencanaan Struktur Gedung Beton Bertulang Tahan Gempa berdasarkan SNI 03-2847-2002, Penerbit ITB, Bandung
- Pangestuti, E.,K., (2006), Penggunaan *Carbon Fibre Reinforced Plate* Sebagai Bahan Komposit Eksternal pada Struktur Balok Beton Bertulang, *Jurnal Teknik Sipil*
- SNI 02 – 1726 – 2002, 2002, Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung, Departemen Perumahan dan Prasarana Wilayah, Bandung.
- SNI 03 – 2847 – 2002, 2002, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta