

EVALUASI KINERJA STRUKTUR GEDUNG 2 TINGKAT BETON BERTULANG DENGAN ATAP BAJA RINGAN MENGGUNAKAN ANALISIS STATIK PUSHOVER

Putu Agus Nusada Putra¹, I Ketut Sudarsana², dan Ida Ayu Made Budiwati²

¹Alumni Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Denpasar

Email : ksudarsana@unud.ac.id

Abstrak: Evaluasi kinerja struktur terhadap beban gempa terutamanya pada struktur gedung sekolah yang telah berdiri dan menggunakan rangka atap baja ringan dianggap perlu dilakukan, karena dalam perencanaannya gedung sekolah termasuk dalam kategori risiko gempa IV (risiko gempa tinggi). Terlebih setelah diterbitkannya peraturan perencanaan bangunan tahan gempa (SNI 03-1726-2012, di mana dalam analisis perilaku dinamis struktur akibat pengaruh beban gempa akan lebih relevan jika dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh interaksi tanah dengan struktur. Analisis dan evaluasi kinerja dapat dilakukan dengan analisa pushover yang *built-in* pada program SAP2000. Analisis pushover dilakukan untuk menentukan level kinerja struktur yang akan dievaluasi terhadap batasan pada ATC-40 dengan parameter berupa gaya geser dasar, simpangan antar lantai, nilai faktor daktilitas aktual, nilai faktor reduksi gempa aktual dan mekanisme keruntuhan yang terjadi pada struktur. Hasil analisis menunjukkan disain eksisting gedung sekolah tidak memenuhi persyaratan perencanaan struktur beton bertulang pada wilayah gempa kuat sesuai pasal 23 SNI 03-2847-2002 sehingga perlu dilakukan disain ulang terhadap struktur tersebut. Struktur dengan disain ulang memberikan kinerja yang diharapkan terlihat dari struktur tersebut memiliki kecukupan kapasitas saat terjadinya gempa rencana dan kinerja struktur yang berada pada level *Immediate Occupancy* (IO).

Kata kunci : Kinerja struktur, interaksi tanah dengan struktur, analisis pushover, RSNI 03-1726-201x, *Immediate Occupancy* (IO).

PERFORMANCE EVALUATION OF 2 STOREYS REINFORCED CONCRETE BUILDING WITH LIGHTWEIGHT STEEL ROOF TRUSS USING STATIC PUSHOVER ANALYSIS

Abstract : *Performance evaluation of the structure against earthquake for existing school building with lightweight steel roof truss was a requirement. It is included in the seismic risk category IV (high seismic risk), mostly after the publication of seismic resistance building regulations (RSNI-201x 03-1726). The analysis of dynamic behavior of structure against earthquake would be more relevant if the interaction effects of soil and the structure itself is also considered. The performance analysis and evaluation can be done by pushover analysis using SAP2000. The analysis was conducted to determine the performance level of the structure to be evaluated according to limits on ATC-40 for parameter such as base shear force, floor drift, the value of the actual ductility factor (μ), actual reduction factor (R) and the failure mechanisms of the structure. The results of the analysis show that the design of the existing school building doesn't meet the requirements of the reinforced concrete structure in the high seismic risk according to article 23 of SNI 03-2847-2002 so the redesign was needed. The structure with redesign gave more acceptable performance which has sufficient capacity dan the performance point of structure was at the level of *Immediate Occupancy* (IO).*

Keywords: *Performance point, soil structure interaction, pushover analysis, SNI 03-1726-2012, Immediate Occupancy (IO).*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Perencanaan struktur bangunan gedung tahan gempa sangat penting di Indonesia, mengingat sebagian besar wilayahnya terletak dalam wilayah gempa dengan intensitas moderat tinggi. Bangunan pada daerah rawan gempa harus direncanakan mampu bertahan terhadap gempa. Saat ini dalam perencanaannya di Indonesia masih menggunakan konsep disain kapasitas menurut SNI 03-1726-2002 yang hanya menjamin kinerja struktur pada dua level kinerja saja yaitu kinerja batas layan dan kinerja batas ultimit.

Trend perencanaan yang terkini yaitu *performance based seismic design*, yang memanfaatkan teknik analisis non-linier berbasis komputer untuk menganalisis perilaku inelastis struktur dari berbagai macam intensitas gerakan tanah (gempa), sehingga dapat diketahui kinerjanya pada kondisi kritis. Dalam analisis ini perilaku seismik struktur dievaluasi dengan menggunakan analisis statik pushover.

Hal lain yang perlu diperhatikan dalam analisis perilaku struktur akibat beban gempa adalah adanya interaksi tanah dengan struktur, yang mana secara umum dalam pemodelan pondasi yang merupakan tumpuan dari suatu struktur yang berfungsi meneruskan beban menuju tanah dimodel sebagai tumpuan jepit. Hasil analisis seperti itu umumnya sesuai pada kasus-kasus beban gravitasi yang bersifat statis. Untuk beban yang bersifat dinamis yang diakibatkan oleh getaran tanah dasar seperti gempa, tentunya hasilnya akan berbeda. Terutama respon dinamis struktur akibat jalaran getaran tanah yang dihantarkan oleh pondasi dimana jenis tanah yang berbeda akan memberikan tingkat rambatan gelombang gempa yang berbeda.

Beberapa penelitian telah dilakukan demi mengetahui sampai sejauh mana keandalan dari analisis pushover untuk meramalkan perilaku inelastis dari suatu struktur diantaranya oleh Korkmaz dan Duzgun (2006) serta Lumantarna (2004) yang membandingkan analisis statik pushover dengan analisis nonlinier time history. Dari beberapa penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa analisis pushover dapat memberikan prediksi yang konservatif dan cukup memadai terhadap perilaku inelastis struktur saat menerima beban gempa.

Berdasarkan paparan di atas dan mengingat meningkatnya aktivitas kegempaan di Indonesia serta diterbitkannya peta gempa 2010 yang dibarengi dengan dikeluarkannya rancangan peraturan untuk menghindari kesalahan pengambilan keputusan bangunan tahan gempa (SNI 03-1726-2012) yang menyesuaikan dengan peta gempa tersebut, maka sangat relevan untuk

melakukan evaluasi terhadap kinerja struktur yang telah berfungsi terhadap beban gempa dengan memperhatikan interaksi tanah dengan struktur yang akan dievaluasi kinerjanya menurut ATC-40 (*Applied Technology Council*) dan SNI 03-1726-2012 dengan parameter tinjauan adalah besar gaya geser dasar yang mampu dipikul oleh struktur, simpangan antar lantai yang terjadi, faktor daktilitas dan faktor reduksi gempa aktual serta mekanisme keruntuhan yang terjadi. Gedung yang menarik untuk dievaluasi adalah gedung sekolah terutamanya yang telah berfungsi dan menggunakan rangka atap baja ringan. Gedung sekolah dianggap perlu dievaluasi kinerjanya karena berdasarkan SNI 03-1726-2012 termasuk dalam kategori risiko gempa IV yang berarti gedung sekolah memiliki risiko yang tinggi terhadap jiwa manusia ketika struktur mengalami kegagalan saat terjadinya gempa, disamping itu pula kebanyakan kasus runtuhnya bangunan belakangan ini disebabkan oleh runtuhnya rangka atap baja ringan pada bangunan tersebut.

MATERI DAN METODE

Perencanaan Berbasis Kinerja

Perencanaan tahan gempa berbasis kinerja (*performance-based seismic design*) merupakan proses yang dapat digunakan untuk perencanaan bangunan baru maupun perkuatan (*upgrade*) bangunan yang sudah ada, dengan pemahaman yang realistis terhadap risiko keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang mungkin terjadi akibat gempa yang akan datang.

Hal penting dari perencanaan berbasis kinerja adalah penetapan titik tinjauan yang akan digunakan sebagai indikator dalam meninjau kinerja dari struktur yang bersangkutan saat analisis dilakukan. Disamping itu sasaran kinerja bangunan terhadap gempa juga harus dinyatakan secara jelas, sehingga pemilik, penyewa, asuransi, pemerintahan atau penyandang dana mempunyai kesempatan untuk menetapkan kondisi apa yang dipilih, selanjutnya ketetapan tersebut digunakan insinyur perencana sebagai pedomannya.

Sasaran kinerja terdiri atas kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*) dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut. Mengacu pada ATC 40 yang menjadi acuan klasik bagi perencanaan berbasis kinerja maka kategori level kinerja struktur, adalah segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*), keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life-Safety*), dan terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*).

Hasil analisis pushover salah satunya adalah kurva spektrum kapasitas. Kurva ini menyajikan secara grafis empat jenis kurva yakni kurva spektrum kapasitas yang diwakili garis berwarna ungu, kurva *Family of Demand Spectrum* untuk masing-masing redaman yang diwakili garis-garis berwarna merah, kurva *Single Demand Spectrum* yang diwakili garis berwarna biru, dan kurva periode konstan yang diwakili garis-garis berwarna hijau. *Performance Point* merupakan titik perpotongan antara kurva spektrum kapasitas dengan *demand spectrum*.

Berdasarkan *Performance Point* dapat dihitung nilai *drift* yang digunakan sebagai indikator kinerja struktur. Nilai *drift* merupakan rasio perpindahan atap dengan tinggi struktur. Batasan *drift* sesuai klasifikasi *deformation limit* ATC-40 untuk berbagai macam tingkat kinerja struktur yang ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. *Deformation limit* untuk berbagai macam tingkat kinerja

Interstory Drift Limit	Performance Level			
	Immediate Occupancy	Damage Control	Ljfe Safety	Structural Stability
Maximum total drift	0,01	0,01 - 0,02	0,02	0,33 V/P1

Sumber: ATC 40 (1996)

Tahapan analisis pushover

Persiapan Data

Berikut adalah data material yang digunakan dalam disain eksisting struktur gedung sekolah yang ditinjau.

Mutu beton = K225

Mutu tulangan $D \geq 16 \text{ mm}$ (f_y) = 320 MPa
 $\geq \varnothing 8 \text{ mm}$ (f_y) = 240 MPa

Mutu baja ringan, f_y = 550 MPa

Modulus elastisitas baja ringan = 200.000 MPa

Tinggi lantai 1 = 3,65 m, tinggi lantai 2 = 4,10 m

Nilai N SPT 0 – 3,2 m = 16

Nilai N SPT 3,4 – 5,0 m = 50

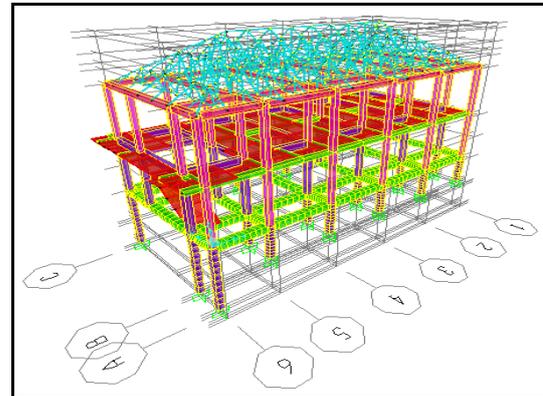
Dimensi komponen struktur gedung sekolah dengan disain eksisting disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Dimensi Komponen Struktur

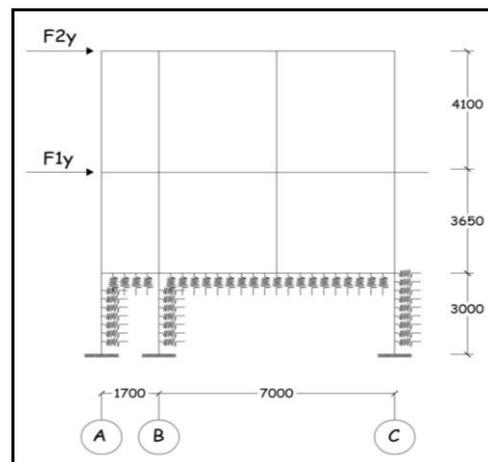
Komponen Struktur	Dimensi Eksisting	
	B	H
	mm	mm
K1	300	400
K2	200	300
K3	200	200
K4	150	300
Ba1-2	200	300
R1-2	200	250
S	200	300
B1-2	300	550
B3-4	250	450
B5-6	200	300
B7-8	200	300

Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur menggunakan program SAP2000 V15, dengan balok, kolom dan rangka baja ringan dimodelkan sebagai frame sedangkan pelat dimodelkan sebagai elemen shell serta interaksi tanah dengan struktur sebagai elemen spring. Berikut adalah ilustrasi pemodelan struktur gedung sekolah dengan disain eksisting menggunakan program SAP2000 V15.



Gambar 1. Ilustrasi model struktur gedung sekolah



Gambar 2. Ilustrasi penempatan spring pada portal 1

Sping ditempatkan pada arah berlawanan dengan arah gaya yang bekerja dengan kondisi hanya dapat menahan gaya tekan saja seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Untuk mendapatkan nilai kekakuan lateral spring dilakukan dengan mengalikan tributari area bidang kontak dengan koefisien reaksi tanah dasar (k_s) yang diperoleh dari persamaan Vesic sebagai berikut :

$$k_s = \frac{E_s}{B(1-\mu^2)} \dots\dots\dots (1)$$

Di mana ,
 k_s = koefisien reaksi tanah dasar (kg/cm^3).
 E_s = modulus elastisitas tanah (kg/cm^2), biasanya

diperkirakan dengan persamaan 28 N dengan nilai N dari hasil pengujian penetrasi standar.
 B = lebar pondasi (cm).
 μ = Poisson's ratio, berdasarkan Tabel 3.

Tabel 3. Nilai poisson's ratio

Jenis Tanah	μ
Lempung berpasir	0.2-0.3

Sumber: Bowles (1992)

Jenis tanah pada lokasi tempat berdirinya gedung sekolah yang ditinjau adalah jenis tanah lempung berpasir dengan nilai poisson's ratio (μ) diambil sebesar 0.3.

Pendefinisian Kasus Beban

Dalam analisis ini beban yang dikerjakan adalah:

- Beban mati yang berasal dari beban berat sendiri struktur dan beban mati tambahan
- Beban hidup yang berasal dari fungsi gedung
- Beban angin yang berasal dari beban angin yang bekerja pada atap dan beban angin yang berasal dari beban angin yang bekerja pada dinding vertikal.
- Beban gempa statik ekuivalen SNI 03-1726-2012.

Kombinasi Beban

Kombinasi yang digunakan dalam analisis ini dibagi menjadi dua kombinasi yaitu kombinasi beban pada rangka beton bertulang dan kombinasi beban pada rangka baja ringan sebagai berikut.

Kombinasi beban pada rangka beton bertulang

Kombinasi 1: 1,4D

Kombinasi 2: 1,2D + 1,6L

Kombinasi 3: $(1,2+0,2S_{DS}) D + 1L + (100\%) \rho Ex + (30\%) \rho Ey$

Kombinasi 4: $(1,2+0,2S_{DS}) D + 1L - (100\%) \rho Ex - (30\%) \rho Ey$

Kombinasi 5: $(1,2+0,2S_{DS}) D + 1L + (30\%) \rho Ex + (100\%) \rho Ey$

Kombinasi 6: $(1,2+0,2S_{DS}) D + 1L - (30\%) \rho Ex - (100\%) \rho Ey$

Kombinasi 7: $(0,9+0,2S_{DS}) D + (100\%) \rho Ex + (30\%) \rho Ey$

Kombinasi 8: $(0,9+0,2S_{DS}) D - (100\%) \rho Ex - (30\%) \rho Ey$

Kombinasi 9: $(0,9+0,2S_{DS}) D + (30\%) \rho Ex + (100\%) \rho Ey$

Kombinasi 10: $(0,9+0,2S_{DS}) D - (30\%) \rho Ex - (100\%) \rho Ey$

Kombinasi beban pada rangka atap baja ringan

Kombinasi 11 : 1,2D + 1L + 1,6W_{tekan}

Kombinasi 12 : 1,2D + 1L - 1,6W_{isap}

Kombinasi 13 : 0,9D + 1,6W_{tekan}

Kombinasi 14 : 0,9D - 1,6W_{isap}

Di mana ρEx dan ρEy merupakan pengaruh gaya seismik horizontal dan 0,2 S_{DS} D merupakan pengaruh gaya seismik vertikal.

Analisis Linier

Analisis linier meliputi analisis beban gravitasi dan beban lateral serta analisis modal untuk mengetahui waktu getar fundamental struktur dan titik tinjauan pada analisis pushover nantinya. Analisis ini juga dilakukan untuk mengecek kecukupan kapasitas penampang dan tulangan komponen struktur dalam menahan beban yang bekerja.

Analisis Nonlinier Pushover

Analisis nonlinier pushover meliputi pendefinisian sendi plastis pada komponen struktur beton bertulang, analisis beban gravitasi yang merupakan awal dari analisis pushover serta analisis pushover itu sendiri.

Pendefinisian sendi plastis mengacu pada FEMA 356 yang mana untuk balok menggunakan sendi plastis tipe M3 dan V2 sedangkan untuk kolom menggunakan PMM dan V2 dengan asumsi balok efektif menerima momen pada arah sumbu 3 dan gaya geser pada arah sumbu 2 serta kolom efektif menahan kombinasi lentur dan aksial.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Linier

Pada analisis linier beban gravitasi dan gempa untuk model gedung sekolah dengan disain eksisting diperoleh bahwa disain awal struktur baja ringan memenuhi persyaratan disain menurut AISI-ASD 1996 berdasarkan nilai Stress Ratio (SR) < 1, sedangkan untuk disain eksisting struktur beton bertulang tidak memenuhi persyaratan disain struktur sesuai dengan SNI 03-2847-2002 pasal 23 mengenai Sistem Struktur Pemikul Momen Khusus untuk bangunan yang berdiri pada wilayah gempa kuat.

Secara garis besar jenis kegagalan yang terjadi pada seluruh komponen struktur adalah karena terlampauinya kapasitas geser dari komponen struktur yang bersangkutan. Sehingga untuk memenuhi persyaratan struktur yang dibangun pada wilayah gempa kuat dengan kategori risiko IV, maka dilakukan disain ulang pada struktur gedung sekolah menggunakan program SAP2000 v15 dengan mengacu pada SNI 03-2847-2002 pasal 23. Hasil disain ulang struktur gedung sekolah ditampilkan pada Tabel 4 sampai Tabel 6.

Secara garis besar seluruh komponen struktur mengalami peningkatan baik dari segi luas penampang maupun luas tulangan lentur dan luas tulangan gesernya.

Tabel 4. Dimensi komponen struktur hasil perencanaan ulang

Komponen Struktur	Dimensi Eksisting		Dimensi Akhir	
	B	H	B	H
	mm	mm	mm	mm
K1	300	400	400	400
K2	200	300	400	400
K3	200	200	375	375
K4	150	300	375	375
Ba1-2	200	300	350	300
R1-2	200	250	300	400
S	200	300	450	500
B1-2	300	550	300	550
B3-4	250	450	375	450
B5-6	200	300	350	400
B7-8	200	300	300	450

Tabel 5. Disain kolom hasil perencanaan ulang

Komponen Struktur	Disain Eksisting		Disain Akhir	
	Tul utama	Hoop	Tul utama	Hoop
	mm ²	mm	mm ²	mm
K1	12 D 16	Ø8-150	16 D 16	Ø8-100
K2	8 D 16	Ø8-150	16 D 16	Ø8-100
K3	8 D 16	Ø8-150	16 D 16	Ø8-100

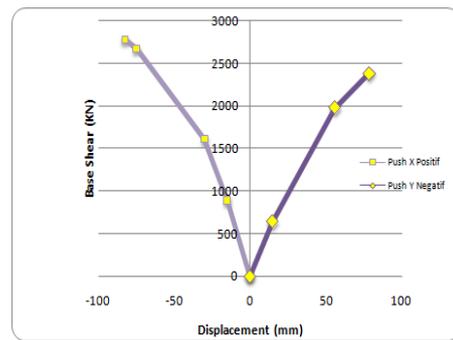
Tabel 6. Disain balok hasil perencanaan ulang

Komponen Struktur	Disain Eksisting			Disain Akhir		
	Bawah	Atas	Hoop	Bawah	Atas	Hoop
	mm ²	mm ²	mm	mm ²	mm ²	mm
B1	6 D 16	4 D 16	Ø8-150	6 D 16	4 D 16	Ø8-120
B2	4 D 16	6 D 16	Ø8-120	4 D 16	6 D 16	Ø8-80
B3	5 D 16	3 D 16	Ø8-150	4 D 16	4 D 16	Ø8-120
B4	3 D 16	5 D 16	Ø8-120	4 D 16	4 D 16	Ø8-80
B5	5 D 16	3 D 16	Ø8-150	4 D 16	4 D 16	Ø8-120
B6	3 D 16	5 D 16	Ø8-120	4 D 16	4 D 16	Ø8-80
B7	5 D 16	3 D 16	Ø8-150	4 D 16	4 D 16	Ø8-120
B8	3 D 16	5 D 16	Ø8-120	4 D 16	4 D 16	Ø8-80
Ba1	5 D 16	3 D 16	Ø8-150	4 D 16	4 D 16	Ø8-120
Ba2	3 D 16	5 D 16	Ø8-120	4 D 16	4 D 16	Ø8-80
R1	3 D 16	2 D 16	Ø8-150	4 D 16	4 D 16	Ø8-120
R2	2 D 16	3 D 16	Ø8-120	4 D 16	4 D 16	Ø8-80
S1	3 D 16	3 D 16	Ø8-150	5 D 16	5 D 16	Ø8-120
S2	3 D 16	3 D 16	Ø8-120	5 D 16	5 D 16	Ø8-80

Hasil Analisis Pushover

Berdasarkan hasil analisis pushover diketahui arah terlemah untuk masing-masing arah pembebanan pushover adalah arah pushover X positif dan Y negatif, di mana pada arah X positif struktur mengalami kegagalan pada step-4 dengan gaya geser dasar yang bekerja pada saat itu adalah sebesar 2781.235 KN dan pada arah Y negatif struktur mengalami kegagalan pada step-3 dengan gaya geser yang bekerja pada saat itu adalah sebesar 2386.498 KN yang bernilai lebih besar dari nilai gaya geser rencana menurut SNI 03-1726-2012 sebesar 475.705 KN. Berikut adalah kurva

hubungan gaya geser dasar dengan *displacement lateral* yang terjadi.



Gambar 3. Kurva hubungan antara *displacement* dan gaya geser dasar pada arah pembebanan terlemah

Perpindahan/Displacement Lateral

Besar *displacement lateral* struktur pada titik yang ditinjau sebagai hasil dari analisis pushover dapat dilihat pada Tabel 7 dan 8 yang mana nilai simpangan antar lantai (*drift*) tersebut akan dikontrol dengan persyaratan simpangan antar lantai maksimum untuk struktur dengan kategori risiko IV sesuai SNI 03-1726-2012 sebesar 0,01 h_{sx} , dengan nilai $(\Delta y) = 0.01 \times 6150 \text{ mm} = 61.5 \text{ mm}$ untuk arah Y dan untuk arah X $(\Delta x) = 0.01 \times 10250 \text{ mm} = 102.5 \text{ mm}$.

Tabel 7. Nilai simpangan antar tingkat (*drift* (Δ_s)) pada kondisi leleh pertama

Level	Displacement lateral pada kondisi leleh pertama		Drift pada kondisi leleh pertama (Δ_s)	
	arah X positif	arah Y negatif	arah X positif	arah Y negatif
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	0	0	0
1	1.975	1.056	1.975	1.056
2	7.126	9.392	5.151	8.336
atap	15.283	14.65	8.157	5.260

Tabel 8. Nilai simpangan antar tingkat (*drift* (Δ_s)) pada kondisi ultimit

Level	Displacement lateral pada kondisi ultimit		Drift pada kondisi ultimit (Δ_m)	
	arah X positif	arah Y negatif	arah X positif	arah Y positif
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	0	0	0	0
1	4.260	4.880	4.260	4.879
2	34.884	50.260	30.624	45.383
atap	82.783	78.400	47.899	28.140

Berdasarkan Tabel 7 dan 8 diketahui besarnya simpangan antar lantai (*drift*) maksimum pada kondisi leleh pertama adalah berturut-turut 8.157

mm untuk arah X dan 8.336 mm untuk arah Y sedangkan untuk kondisi ultimit adalah berturut-turut 47.899 mm untuk arah X dan 45.383 mm untuk arah Y.

Faktor Daktilitas (μ) dan Faktor Reduksi Gempa Aktual (R)

Faktor daktilitas struktur gedung (μ) adalah rasio antara simpangan maksimum struktur gedung akibat pengaruh gempa rencana pada saat mencapai kondisi diambang keruntuhan /collapse (δ_m) dan simpangan struktur gedung saat terjadi pelelehan pertama (δ_y). Berdasarkan Tabel 7 dan 8 diperoleh besarnya faktor daktilitas aktual struktur gedung sebagai berikut:

$$\mu_x = \frac{82.783}{15.283} = 5.500$$

$$\mu_y = \frac{78.402}{14.053} = 6.000$$

Faktor Reduksi gempa (R) didapat dari hasil kali antara faktor daktilitas dengan nilai faktor kuat lebih sistem ($R = \mu \cdot \Omega_0$), dimana Ω_0 adalah faktor kuat lebih sistem yang dihitung dari beban gempa saat kondisi leleh (V_y) dibagi dengan beban gempa rencana (V_n).

Tabel 9. Nilai kuat lebih sistem (Ω_0)

Kasus Beban Pushover	Kondisi	Gaya Geser Kondisi Leleh Pertama (V_y) KN	Gaya Geser Rencana SNI 03-1726-2012 (V_n) KN	Rasio V_y/V_n Ω_0
Pushover Y Negatif (Step 1)	Leleh	640.000	475.705	1.880
Pushover X Positif (Step 1)	Leleh	893.017	475.705	1.400

Berdasarkan Tabel 9 diperoleh besarnya faktor daktilitas aktual struktur gedung sebagai berikut:

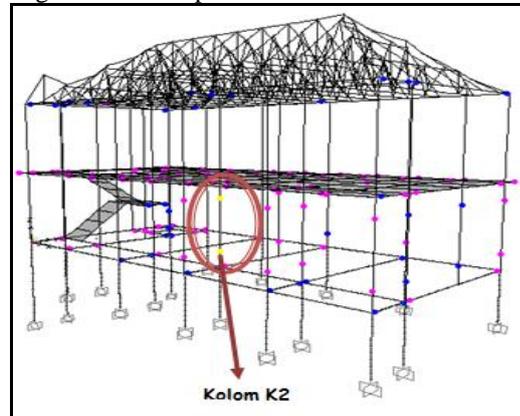
$$R_x = 5.500 * 1.880 = 10.340$$

$$R_y = 6.000 * 1.400 = 8.500$$

Berdasarkan nilai dari faktor daktilitas aktual dan faktor reduksi beban gempa aktual struktur pada kasus pembebanan pushover terlemah adalah saat kasus pembebanan arah X negatif dengan nilai $\mu = 5.5$ $R = 8.5$, sehingga taraf kinerja struktur gedung sekolah cenderung berperilaku daktail penuh.

Mekanisme Keruntuhan Struktur

Mekanisme keruntuhan struktur pada arah terlemah kasus beban pushover yaitu arah Y negatif terjadi pada komponen struktur kolom K2 dengan ilustrasi seperti Gambar 4.



Gambar 4. Posisi kolom K2 yang mengalami kegagalan

Tabel 10. Kondisi keruntuhan pada struktur

Kasus Beban Pushover	Komponen Struktur	Gaya Geser Dasar saat kondisi Ultimit (V_u) KN	Kondisi
Pushover Y Negatif (step-3)	Kolom K2	2386.498	Runtuh
Pushover X Positif (step-4)	Truncated kuda-kuda	2781.235	Belum Runtuh

Berdasarkan Tabel 10 diketahui bahwa struktur baja ringan belum mengalami keruntuhan saat struktur beton bertulang mengalami *collapse*.

Performance Point

Tabel 11. Performance point hasil analisis nonlinier statik puhover

Kasus Beban Pushover	Dt (mm)	H (mm)	Dt/H Maximum total drift	Performance Level
Push X Negatif	21	10250	0.0020	Immediate Occupancy

Berdasarkan hasil analisis nonlinier statik pushover diketahui level kinerja struktur gedung hasil disain akhir berada pada level kinerja *Immediate Occupancy* (IO) berdasarkan batasan $Dt/H < 0,01$ menurut ATC-40.

SIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Secara umum terdapat beberapa hal terkait dengan analisis dan pembahasan sebelumnya:

- Disain eksisting struktur gedung sekolah tidak memenuhi persyaratan disain struktur beton bertulang sesuai dengan SNI 03-2847-2002 pasal 23 mengenai sistem struktur rangka pemikul momen khusus untuk struktur pada wilayah gempa kuat dengan kategori risiko IV.
- Disain akhir struktur gedung sekolah dengan menggunakan program SAP2000 v15 telah memenuhi persyaratan disain sesuai dengan SNI 03-2847-2002 pasal 23 dengan memperbesar dimensi penampang dari komponen struktur dan menambah luas tulangan lentur dan juga geser, yang terlihat dari kecukupan kapasitas yang dimiliki struktur saat terjadinya gempa dengan nilai gaya geser maksimum yang dapat dipikul oleh struktur sebesar 2386,498 kN atau setara dengan 5.017 kali lebih besar dari nilai gempa rencana berdasarkan SNI 03-1726-2012.
- Struktur gedung sekolah dengan disain akhir telah memberikan kinerja yang diharapkan setelah dievaluasi berdasarkan beberapa parameter sebagai berikut :
 - a) Nilai simpangan antar lantai yang terjadi untuk arah pembebanan X dan Y berturut-turut sebesar 47,899 mm dan 45,383 mm lebih kecil dari simpangan antar lantai ijin menurut SNI 03-1726-2012 sebesar $(\Delta y) = 61.5$ mm untuk arah Y dan untuk arah X $(\Delta x) = 102.5$ mm.
 - b) Nilai faktor daktilitas (μ) dan faktor reduksi gempa aktual (R) dari struktur gedung sekolah dengan disain akhir sebesar $\mu = 5.5$ R = 8.5 telah memenuhi persyaratan struktur dengan tingkat daktilitas penuh sesuai SNI 03-1726-2002.
- Struktur rangka baja ringan masih bertahan sampai dengan struktur beton bertulang mengalami kegagalan/*collapse* dengan nilai gaya geser dasar yang bekerja pada saat struktur beton bertulang mengalami *collapse* adalah sebesar 2386,498 KN.
- Berdasarkan nilai *Performance Point* diketahui tingkat kinerja dari struktur dengan disain akhir berada pada kondisi *Immediate Occupancy* (IO) yang artinya tidak terjadi kerusakan yang berarti pada struktur yang mana struktur dapat tetap berfungsi setelah akhir gempa rencana.

Saran

Dari kesimpulan pada penelitian ini hal yang dapat disarankan:

- Setelah mendisain struktur suatu gedung utamanya struktur beton bertulang hendaknya disain tersebut dievaluasi kinerjanya dengan mengacu pada SNI 03-2847-2002 dan SNI 03-1726-2012, karena berdasarkan hasil analisis ada beberapa kondisi yang perlu diperhatikan diantaranya :
 - a) Walaupun struktur tersebut telah didisain berdasarkan disain kapasitas sesuai dengan SNI 03-2847-2002 tetapi pada saat struktur tersebut mengalami kegagalan/ *collapse* (C) ditemukan terjadinya sendi plastis pada ujung atas dan bawah kolom yang dapat mengakibatkan struktur tersebut mengalami keruntuhan seketika.
 - b) Perlu dilakukan pemodelan terhadap keseluruhan komponen struktur untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja struktur tersebut.
 - c) Perlu dilakukan pemodelan terhadap keseluruhan komponen struktur untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja struktur tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur dihadapan Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tulisan ilmiah ini. Terima kasih juga kepada semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dalam menyelesaikan tulisan ilmiah ini.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE. (2000). "FEMA 356 - Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings", *Federal Emergency Management Agency*, Washington, D.C.
- ATC 40. 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit Of Concrete Building Volume 1*. 555 Twin Dolphin Drive, Suite 550 Redwood City, California.
- Badan Standar Nasional. 2002. *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung (SNI 03-1726-2002)*. Jakarta.
- Badan Standar Nasional. 2002. *Tata Cara Perencanaan Struktur Beton Bertulang Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*. Jakarta.
- Badan Standar Nasional. 2010. *Rancangan Standar Perencanaan Ketahanan Gempa*

- Untuk Struktur Bangunan Gedung (RSNI 03-1726-201X)*. Jakarta.
- Bowles, J. E 1992. *Analisa dan Disain Pondasi Jilid 1 Edisi Keempat*, Erlangga, Jakarta.
- Computer and Structures, Inc. 2011. *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE and CSi Bridge*. Berkeley, California, USA.
- Korkmaz, A. and Duzgun, M. 2006. Evaluation of Different Types of Pushover Analyses for R/C Frame Structures. *Proceedings of International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*. June 2006, Montreal, Canada, 2006.
- Lumantarna B. 2002. Keandalan Analisa Pushover untuk Meramal Prilaku Seismik Nonlinier Struktur Portal Terbuka Teratur, *Profesionalisme dalam Dunia Konstruksi Indonesia*, Seminar dan Pameran HAKI 2002, 20-21 Agustus, Jakarta, 2002, pp.01-09.