

ANALISIS KERUNTUHAN GEDUNG BERTINGKAT AKIBAT BEBAN GEMPA DAN BEBAN ANGIN DENGAN METODE *PUSHOVER*

Jessen G. Potalangi¹⁾, Hieryco Manalip²⁾, Steenie E. Wallah²⁾

¹⁾ Mahasiswa Prodi Teknik Sipil Pascasarjana Unsrat Manado

²⁾ Staf Pengajar Prodi teknik Sipil Pascasarjana Unsrat Manado

e-mail: jessenpotalangi@yahoo.com

ABSTRAK

Perbedaan perilaku beban gempa dan beban angin merupakan permasalahan yang harus diperhatikan dalam perencanaan gedung bertingkat sehingga analisis dinamis diperlukan dengan mempertimbangkan bentuk dan lokasi struktur. Indikasi keruntuhan elemen dapat terjadi seiring bertambahnya beban lateral. Analisis Pushover merupakan analisis perilaku keruntuhan struktur dimana beban ditingkatkan bertahap sampai melampaui kapasitas maksimum.

Pada penelitian ini dilakukan pemodelan struktur gedung 12 lantai (Gedung Fakultas Hukum Unsrat Manado) dengan berdasarkan gambar dan detail struktur dengan Kategori gedung SRPMK. Analisis didasarkan pada data uji tanah lokasi tinjauan (SPT) mengacu pada SNI 1726:2012 dan peta angin wilayah Indonesia yang mengacu pada HB212-2002 Asian-Pasific Region. Metode pushover dioperasikan lewat software ETABS nonlinear version 9.7.4 yang menganalisis beban struktur akibat gempa, angin maupun kombinasi keduanya.

Hasil penelitian menunjukkan kapasitas, kinerja, dan keefektifan beban lateral struktur gedung bertingkat. Keseluruhan analisis digambarkan dengan mekanisme pushover berupa kemampuan maksimal struktur sampai keruntuhan, sendi plastis kritis, besar displacement-drift dan respon struktur.

Berdasarkan penelitian diperoleh nilai gaya geser dan displacement terbesar yaitu akibat beban gempa (18397,877 KN; 0,584 m), beban angin (2332,929 KN; 0,037 m), dan beban kombinasi gempa-angin (16511,850 KN; 0,587 m). Struktur lebih efektif memikul beban gempa daripada beban kombinasi gempa-angin atau beban angin. Kontribusi Beban angin tidak terlalu signifikan sehingga akibat beban angin termasuk tidak efektif. Secara keseluruhan kinerja struktur pada penelitian ini masih dalam tingkat Immediate occupancy namun baik akibat beban gempa dan kombinasi gempa-angin mempunyai potensi keruntuhan struktur pada lantai 2 dan 3 sementara beban angin tidak.

Kata Kunci: Pushover, Gempa, Angin, Kombinasi, Kapasitas, Keruntuhan, Kinerja

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Pada perencanaan bangunan bertingkat tidak hanya beban gempa saja yang perlu direncanakan sebagai beban lateral tetapi juga beban angin merupakan suatu permasalahan yang perlu diperhatikan sebagai beban lateral. Semakin tinggi struktur gedung maka semakin besar beban angin yang terjadi pada struktur. desain gedung bertingkat baik beban gempa maupun beban angin harus mempertimbangkan tinggi suatu struktur, zona wilayah serta ketidakberaturan vertikal dan horisontal pada struktur hingga memerlukan analisis dinamis yang tepat karena perbedaan beban gempa dan beban angin. Hal tersebut tentunya tidak hanya bertujuan untuk menciptakan struktur bangunan yang lebih kuat, tetapi juga bertujuan untuk

memberikan keamanan dan kenyamanan bagi setiap orang yang ada dan tinggal di dalam bangunan tersebut. Beban dan deformasi harus diperhatikan pada suatu perencanaan struktur bangunan. Respons individu dari setiap komponen dan elemen gedung yang menunjukkan pertambahan beban lateral pada saat gempa atau badai angin harus dihitung. Seiring bertambahnya intensitas beban atau struktur yang terdorong maka sendi plastis akan timbul diberbagai titik lokasi struktur juga indikasi keretakan yang dapat menyebabkan keruntuhan.

Perumusan Masalah

Rumusan Masalah pada penelitian ini:

1. Mekanisme beban dorong dan perilaku struktur sampai pada batas gedung mengalami keruntuhan akibat beban lateral.

2. Kinerja struktur pada berbagai pembebanan lateral.
3. Respon struktur gedung bertingkat yang ditimbulkan oleh beban lateral tersebut.
4. Kondisi akhir struktur sebelum mengalami keruntuhan.

Batasan Masalah

Bangunan yang dimodelkan yaitu gedung 12 lantai (Fakultas Hukum Unsrat daerah Manado, Sulawesi Utara, Indonesia) dikarenakan gedung ini tipikal teratur. Detail struktur mengacu pada gambar yang terlampir dengan model struktur utama yang ditinjau pada penelitian ini adalah struktur beton bertulang sementara model atap (struktur baja) pada penulisan dianggap sebagai pembebanan vertikal. Pada penulisan ini beban lateral berupa adalah beban gempa, beban angin dan beban kombinasi gempa-angin. Beban lateral keseluruhan struktur gedung hanya ditinjau terhadap arah X dan Y.

Tujuan Penelitian

Tujuan pada penelitian ini adalah

1. Memperoleh data hasil kapasitas struktur maksimum hingga kapasitas akhir keruntuhan gedung akibat beban gempa, angin dan kombinasi gempa-angin dengan metode pushover.
2. Mengetahui letak sendi plastis kritis gedung sebelum mengalami keruntuhan.
3. Memperoleh data kinerja akhir gedung.
4. Memperoleh data hasil respon struktur di setiap pembebanan lateral.

Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah

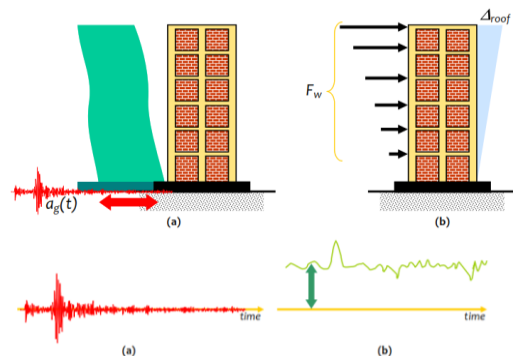
1. Mengetahui kemampuan maksimal struktur gedung bertingkat akibat beban lateral.
2. Mengetahui pengaruh simpangan baik nilai drift atau displacement pada struktur gedung bertingkat terhadap beban lateral
3. Mengetahui perilaku struktur gedung bertingkat ditahap keruntuhan.
4. Mengetahui elemen struktur gedung bertingkat yang rawan runtuh.
5. Mengetahui nilai batas tingkat kerusakan struktur gedung bertingkat dan kontrol keamanan struktur.
6. Mengetahui efektifitas setiap beban lateral yang diterapkan pada struktur gedung bertingkat.

LANDASAN TEORI

Aksi Dinamis Gempa Bumi dan Angin pada Bangunan

Filosofi intuitif desain struktural menggunakan kekuatan sebagai dasar yang konsisten dalam desain angin, dimana bangunan mengalami tekanan pada area permukaan yang terbuka yang disebut pembebanan tipe gaya (*force-type*). Pada desain gempa, bangunan mengalami gerakan acak dari dasar tanah yang menginduksi gaya inersia pada bangunan yang menyebabkan tekanan disebut pembebanan tipe perpindahan (*displacement-type*).

Tekanan angin mempunyai aksi rerata tidak nol (*non-zero mean*) yang diterapkan pada komponen bangunan yang berorientasi kecil, sehingga dibawah tekanan angin ini tegangan yang dihasilkan sekitar bangunan berfluktuasi kecil sementara pada tegangan baliknya hanya terjadi ketika angin tersebut berbalik pada durasi yang panjang. Di sisi lain, gerakan tanah pada saat gempa adalah gerakan siklik (*cyclic*) pada posisi netral struktur sehingga tekanan pada bangunan akibat aksi seismik mengalami banyak pembalikan total dan terjadi dalam durasi pendek. (Murty, Rupen, Vijayanarayan, & Mehta, 2013)



Gambar 1. Perbedaan Efek Desain Bangunan pada Aksi Natural dan Aksi Desain Variasi Alami Sementara

Perencanaan Bangunan Tahan Gempa Berbasis Kinerja

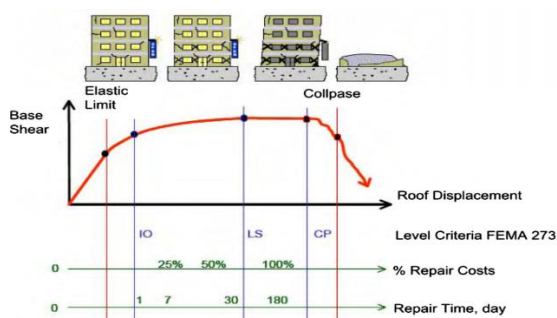
Proses perencanaan tahan gempa berbasis kinerja dimulai dengan membuat model rencana bangunan kemudian melakukan simulasi kinerjanya terhadap berbagai kejadian

gempa. Setiap simulasi memberikan informasi tingkat kerusakan (*level of damage*), ketahanan struktur, sehingga dapat memperkirakan berapa besar keselamatan (*life*), kesiapan pakai (*occupancy*) dan kerugian harta benda (*economic loss*) yang akan terjadi. Sasaran kinerja terdiri dari kejadian gempa rencana yang ditentukan (*earthquake hazard*), dan taraf kerusakan yang diijinkan atau level kinerja (*performance level*) dari bangunan terhadap kejadian gempa tersebut.

Menurut penelitian dari Runtu, dkk (2015), peningkatan kinerja dari suatu bangunan cenderung turut dipengaruhi oleh kelas situs tanah tempat struktur dibangun. Semakin kelas situs tanah mengarah kepada ketidakstabilan maka kinerja struktur cenderung memburuk. Dimana satu fenomena gempa ringan akan semakin meningkat pada jenis tanah yang labil.

Mengacu pada FEMA 273, (1997) yang menjadi acuan klasik bagi perencanaan berbasis kinerja maka kategori level kinerja struktur, adalah:

- a. Segera dapat dipakai (IO = *Immediate Occupancy*)
- b. Keselamatan penghuni terjamin (LS = *Life Safety*)
- c. Terhindar dari keruntuhan total (CP = *Collapse Prevention*)



Gambar 2. Tingkat kinerja struktur terhadap Gempa (FEMA 273/356)

Perencanaan Bangunan Penahan Angin Berbasis Kinerja

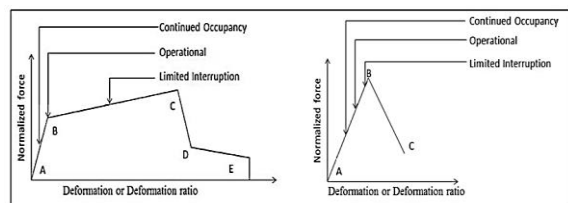
Kerangka kerja ini membutuhkan seperangkat sasaran kinerja yang terkait dengan beberapa tingkat bahaya tersendiri (tergantung pada jenis bangunannya) dimana dengan

memenuhi persyaratan kinerja itu menjanjikan fungsionalitas dan ketahanan bangunan selama peristiwa angin ekstrim. Kinerja spesifik yang ditentukan harus berkorelasi dengan baik dengan output struktural yang dikenal sebagai *Engineering Demand Parameters* (EDP).

Tingkat kinerja dan dukungan terkait kriteria perlu didefinisikan untuk menyajikan status bangunan sehubungan dengan spesifik kinerja dalam hal tingkat kinerja diskrit yang ditetapkan sesuai dengan kerusakan yang terkait dan kerugian biaya retrofit. Dalam praktiknya, dengan melakukan *Incremental Dynamic Analysis* (IDA), data komprehensif yang mewakili respons angin gedung tinggi dapat diperoleh. Menggunakan hasil IDA bersama dengan suatu kerangka kerja, yang menghubungkan parameter rekayasa, indikator kinerja, tingkat kinerja terkait dan kriteria penerimaan akan memberikan penilaian kinerja yang komprehensif dari bangunan tinggi yang mengalami peningkatan akibat beban angin. (Mohammadi, 2016)

Untuk penilaian berbasis kinerja angin, tingkat kinerja komponen ditetapkan untuk mencerminkan perbedaan berbagai tahap kerusakan pada sistem struktural yaitu: tidak ada kerusakan (*no damage*), kerusakan kecil (*minor damage*), kerusakan signifikan (*significant damage*) dan kerusakan besar yang tidak dapat diperbaiki (*unrepairable*).

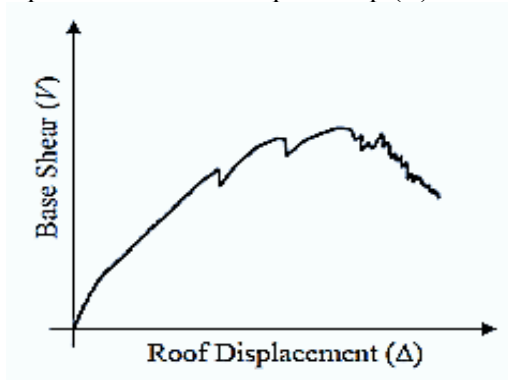
Menurut Griffis et al. (2012) pada kinerja respons komponen, kriteria dukungan diambil dari kerangka desain berbasis kinerja angin yang mempertimbangkan tiga tingkat kinerja respons komponen yaitu: (1) *Continued Occupancy* (CO); (2) *Operational* (Op); dan (3) *Limited Interruption* (LI) sesuai dengan tingkat gaya-deformasi sebagai kontrol deformasi dan kontrol gaya.



Gambar 3. Kriteria Kinerja Komponen terhadap Angin (Griffis, et al., 2012)

Analisis Pushover

Analisis Pushover menghasilkan kurva Pushover, kurva yang menggambarkan hubungan antara gaya geser dasar (V) versus perpindahan titik acuan pada atap (Δ).



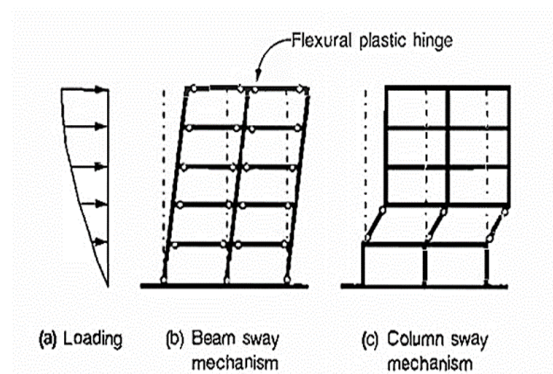
Gambar 4. Kurva Pushover

Kurva Pushover dipengaruhi oleh pola distribusi gaya lateral yang digunakan sebagai beban dorong. Tujuan analisis *pushover* adalah untuk memperkirakan gaya maksimum dan deformasi yang terjadi serta memperoleh informasi bagian mana saja yang kritis. Selanjutnya dapat diidentifikasi bagian-bagian yang memerlukan perhatian khusus untuk pendetilan atau stabilitasnya.

Kurva *pushover* dapat digambarkan secara kualitatif kondisi kerusakan yang terjadi pada level kinerja yang ditetapkan agar awam mempunyai bayangan seberapa besar kerusakan itu terjadi.

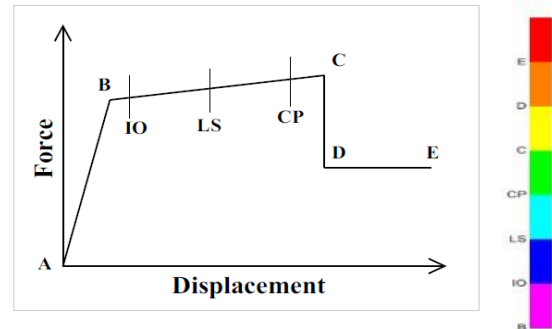
Mekanisme Pushover dan Ciri Sendi Plastis

Sendi plastis merupakan bentuk ketidakmampuan elemen struktur balok dan kolom menahan gaya dalam. Plastisitas dapat dikaitkan dengan perilaku pemindahan gaya aksial, geser, atau momen (tekuk dan torsi).



Gambar 5. Mekanisme sendi plastis pada balok dan kolom gedung bertingkat (ATC-40:1996)

Menurut (CSi, 2017) tingkatan kondisi yang terjadi pada sendi plastis pasca leleh sebagai berikut



Gambar 6. Properti Sendi Plastis (CSi)

Tabel 1. Tingkat Kerusakan Struktur

Keterangan	Simbol	Penjelasan
A	○	Merupakan kondisi dimana belum ada pembebanan sehingga belum terjadi plastifikasi pada sendi plastis
B	●	Merupakan Kondisi dimana elemen mulai mengalami leleh yang pertama kali
IO	●	Merupakan tahapan setelah leleh (plastis) dengan tingkat kinerja pada elemen <i>Immediate Occupancy</i>
LS	●	Elemen pada level kinerja <i>Life Safety</i> (kondisi plastis)
CP	●	Elemen pada level kinerja <i>Collapse Prevention</i> (kondisi hampir runtuh)
C	●	Merupakan kapasitas ultimit dari elemen
D	●	Kekuatan sisa dari elemen
E	●	Merupakan batas dimana elemen sudah mengalami keruntuhan

Analisis Keruntuhan

Struktur gedung saat menerima beban gempa, maka akan memikul gaya geser dasar (*Base shear*). Gaya geser dasar tiap lantai merupakan fungsi dari massa (m) dan kekakuan (k) dari tiap lantai tersebut. Gaya geser dasar mengakibatkan tiap lantai bergeser (*displacement*) dari kedudukan semula. Saat gaya gempa bekerja, maka gedung tersebut memberikan gaya-gaya dalam.

Apabila gaya-gaya dalam tersebut melebihi kemampuan/kapasitas gedung, maka gedung akan berperilaku inelastis jika sifat struktur cukup daktail, tetapi langsung hancur apabila kurang daktail.

Menurut ATC-40:1996 Level kinerja tersebut dapat dideskripsikan lagi atas bagaimana kondisi bangunan pasca gempa dan kategori bangunan yang diizinkan terhadap

level kinerja tertentu ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 2. Kondisi Bangunan Pasca Gempa dan Kategori Bangunan pada tingkat kinerja struktur

Tingkat Kinerja	Kondisi Bangunan Pasca Gempa	Kategori Bangunan
SP-1 <i>Immediate Occupancy</i>	Bangunan aman saat terjadi gempa, resiko korban jiwa dan kegagalan struktur tidak terlalu berarti, gedung tidak mengalami kerusakan berarti, dan dapat segera difungsikan kembali	Struktur bangunan yang mutlak difungsikan sebagai sarana penyelamatan, penyimpanan barang berbahaya, atau struktur bangunan dapat mempengaruhi ekonomi nasional. Contohnya Rumah Sakit, Gudang Bahan bakar, bahan berbahaya dll.
SP-2 <i>Damage Control</i>	Merupakan transisi antara immediate occupancy (IO) SP-1 dan Life safety (LS) SP-3. Bangunan masih mampu menahan gempa yang terjadi, resiko korban jiwa manusia sangat kecil	Struktur untuk bangunan bersejarah, bangunan yang menjadi tempat penyimpanan barang-barang berharga
SP-3 <i>Life Safety (LS)</i>	Bangunan mengalami kerusakan tetapi tidak diperkenankan mengalami keruntuhan yang menyebabkan korban jiwa manusia (resiko korban jiwa sangat rendah). Setelah terjadi gempa maka bangunan dapat berfungsi kembali setelah dilakukan perbaikan komponen struktural maupun non-struktural.	Fasilitas-fasilitas umum, Gedung perkantoran, perumahan, gudang, dll
SP-4 <i>Limited Safety</i>	Merupakan transisi antara SP-3 dan SP-4 dan bukan merupakan tingkatan serta tidak memperhitungkan aspek ekonomis dalam melakukan perbaikan pasca gempa	-
SP-5 <i>Structural Stability</i>	Struktur pasca gempa mengalami kerusakan hingga diambang keruntuhan total maupun parsial. Komponen struktur penahan beban gravitasi masih bekerja meskipun keseluruhan kestabilan sudah diambang keseluruhan	-
SP-6 <i>Not Considered</i>	Bukan merupakan tingkatan kinerja struktur, tetapi hanya untuk melakukan evaluasi seismik non-struktural atau retrofit	-

Sumber: ATC-40:1996

METODOLOGI PENELITIAN

Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini adalah spesifikasi detail struktur sebagai pemodelan analisis dan data uji tanah (Standard Penetration Test) lokasi tinjauan penelitian dalam hal untuk memperoleh hasil klasifikasi situs berdirinya bangunan yang ditinjau. Data yang diperlukan lainnya adalah dan peta gempa 2017 sebagai data kontrol probabilitas percepatan spektrum gempa terbaru yang mengacu pada desain pedoman SNI 1726:2012 serta peta wilayah angin Indonesia yang berdasarkan desain pedoman HB212-2002 Asian-Pacific Region.

Materi penelitian

Materi penelitian yang digunakan adalah detail gambar struktur bangunan untuk dapat menganalisis struktur secara jelas. Analisa dilakukan dengan pengoprasian aplikasi komputer ETABS Non-linear Versi 9.7.4 dan SAP2000 versi 19.2.1 yang merupakan piranti lunak yang digunakan sebagai integrasi sistem dalam memodelkan, menganalisa, mendesain

dan pengoptimasian setiap bagian dari berbagai tipe struktur. Pada penelitian ini SAP2000 v19.2.1 digunakan untuk menghitung beban struktur baja pada bagian atap pemodelan struktur dan ETABS v9.7.4 digunakan untuk analisa struktur gedung bertingkat (beton bertulang) secara keseluruhan. Analisis mengacu pada metode dan acuan sebagai berikut:

1. Pemilihan Metode digunakan adalah menggunakan metode Pushover
2. Acuan yang dipakai antara lain SNI 1726-2012, SNI 1727-2013, SNI 2847-2013, ATC-40 1996, FEMA 356, FEMA 440, ASCE7-10, HB212-2002 dan jurnal penelitian yang berkaitan lainnya.

Rancangan Percobaan

Percobaan sesuai data gambar dan data tabel yang diperoleh dari pengumpulan sumber data.

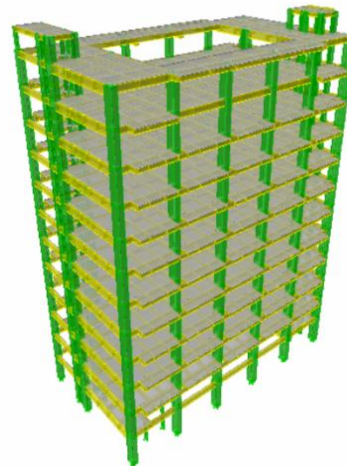
Data Struktur

Material

- 1) Kuat tekan beton (f_c') = 40 MPa
- 2) Tegangan leleh tul. baja f_y = 400 MPa

Elemen struktur

- 1) Jenis struktur : beton bertulang
- 2) Pondasi : terjepit, kaku di tanah



Gambar 7. Pemodelan Geometrik Struktur 3D

HASIL DAN PEMBAHASAN

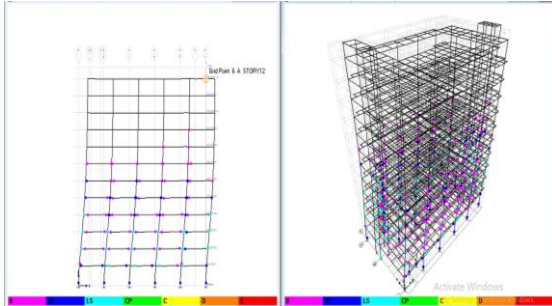
Mekanisme Pushover akibat Gempa

Data mekanisme pushover akibat beban dorong gempa arah X dan arah Y, masing-masing diperlihatkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

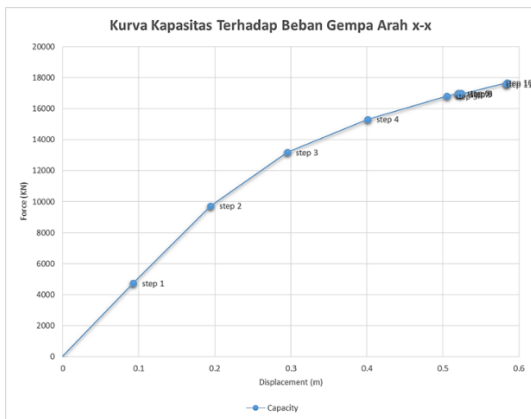
Tabel 3. Beban Dorong Gempa Arah X

Step	Displacement (m)	Base Force (KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
step 0	-9.96E-04	0.000	7903	1	0	0	0	0	0	0	7904
step 1	0.0926	4746.217	7874	30	0	0	0	0	0	0	7904
step 2	0.1945	9730.219	7686	203	15	0	0	0	0	0	7904
step 3	0.2952	13189.203	7549	208	132	15	0	0	0	0	7904
step 4	0.4009	15313.862	7423	250	155	76	0	0	0	0	7904
step 5	0.5047	16806.479	7403	263	153	84	0	1	0	0	7904
step 6	0.5201	17005.522	7403	263	152	85	0	0	1	0	7904
step 7	0.5202	16931.811	7400	265	153	84	0	1	1	0	7904
step 8	0.5239	16986.561	7400	265	150	87	0	0	2	0	7904
step 9	0.5239	16927.115	7350	287	115	149	0	1	2	0	7904
step 10	0.5841	17674.318	7350	287	115	149	0	0	3	0	7904
step 11	0.5828	17577.596	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

unit A - E : Point



Gambar 8. Pushover Gempa X step akhir (Sebelum mengalami keruntuhan)



Gambar 9. Kurva Kapasitas Beban Gempa Arah x-x

Mekanisme pushover akibat gempa arah X diatas menunjukkan bahwa: Kapasitas maksimum terjadi pada step 10 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 17674,318 KN pada simpangan Displacement 0,584 meter. Keruntuhan (collapse) pada step 11 dengan Gaya Geser Dasar sebesar 17577,646 KN pada Simpangan Displacement 0,583 meter.

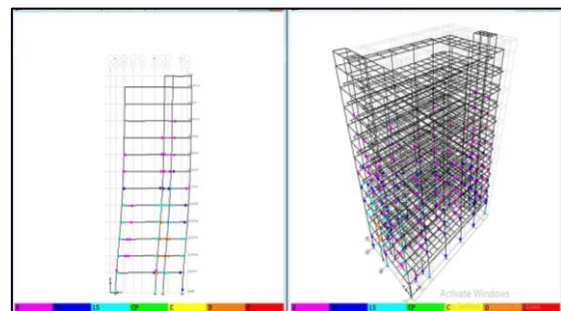
Sebelum mengalami keruntuhan struktur (Gambar 8) ditandai dengan adanya 287 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara leleh pertama sampai tingkatan Immediate Occupancy (B-IO), Terdapat 115 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara Immediate Occupancy sampai tingkatan Life Safety (IO-LS). Terdapat 149 titik sendi plastis tingkatan antara Life Safety sampai tingkatan Collapse

Prevention (LS-CP). Terdapat 3 titik sendi plastis tingkat kekuatan sisa elemen sampai batas elemen harus mengalami keruntuhan (D-E).

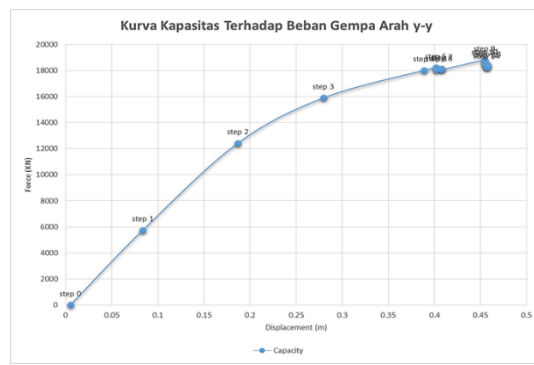
Tabel 3. Beban Dorong Gempa Arah Y

Step	Displacement (m)	Base Force (KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
step 0	0.0052	0	7903	1	0	0	0	0	0	0	7904
step 1	0.0837	5753.2783	7841	62	1	0	0	0	0	0	7904
step 2	0.1867	12430.168	7705	162	34	3	0	0	0	0	7904
step 3	0.2796	15911.6162	7607	192	71	34	0	0	0	0	7904
step 4	0.3886	18031.6172	7598	189	82	34	0	1	0	0	7904
step 5	0.4018	18241.0469	7598	187	84	34	0	0	1	0	7904
step 6	0.4019	18041.0586	7597	185	87	33	0	1	1	0	7904
step 7	0.4079	18156.5879	7597	185	87	33	0	0	2	0	7904
step 8	0.4079	18075.5059	7570	179	105	49	0	1	2	0	7904
step 9	0.4544	18823.7246	7570	177	104	49	0	0	4	0	7904
step 10	0.4544	18542.3594	7570	177	103	49	0	1	4	0	7904
step 11	0.4558	18588.1309	7568	177	102	50	0	0	7	0	7904
step 12	0.4559	18319.3965	7568	177	101	50	0	1	7	0	7904
step 13	0.4583	18397.877	7568	177	101	50	0	0	8	0	7904
step 14	0.4569	18247.709	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

unit A - E : Point



Gambar 10. Pushover Gempa Arah Y step akhir (Sebelum mengalami keruntuhan)



Gambar 11. Kurva Kapasitas Beban Gempa Arah y-y

Mekanisme pushover akibat gempa arah Y diatas menunjukkan bahwa Kapasitas maksimum terjadi pada step 13 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 18397,877 KN pada simpangan Displacement 0,458 meter. Keruntuhan (collapse) pada step 11 dengan Gaya Geser Dasar sebesar 18247,709 KN pada Simpangan Displacement 0,457 meter. Sebelum mengalami keruntuhan struktur (Gambar 10) ditandai dengan adanya 177 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara leleh pertama sampai tingkatan Immediate

Occupancy (B-IO). Terdapat 101 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara Immediate Occupancy sampai tingkatan Life Safety (IO-LS). Terdapat 50 titik sendi plastis tingkatan antara Life Safety sampai tingkatan Collapse Prevention (LS-CP). Terdapat 8 titik sendi plastis tingkat kekuatan sisa elemen sampai batas elemen harus mengalami keruntuhan (D-E).

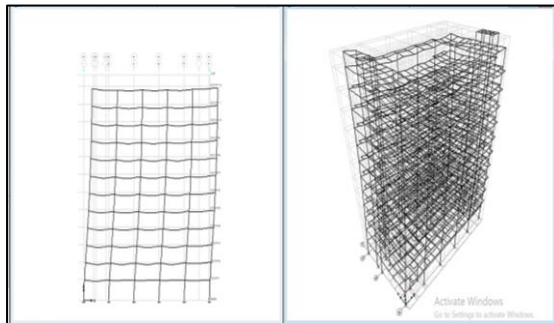
Mekanisme Pushover akibat Beban Angin

Mekanisme pushover akibat beban angin arah dan arah Y, masing-masing diperlihatkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. berikut.

Tabel 4. Beban Dorong Angin Arah X

Step	Displacement (m)	Base Force (KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
step 0	-9,96E-04	0	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 1	0.0018	139.5605	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 2	0.0046	279.1209	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 3	0.0075	418.6814	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 4	0.0103	558.2419	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 5	0.0131	697.8024	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 6	0.0159	837.3628	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 7	0.0187	976.9233	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 8	0.0215	1116.4838	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 9	0.0243	1256.0442	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
step 10	0.0272	1395.6047	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

Unit A-E : Point



Gambar 12. Pushover Angin Arah X Step akhir



Gambar 13. Kurva Kapasitas Beban Angin Arah x-x

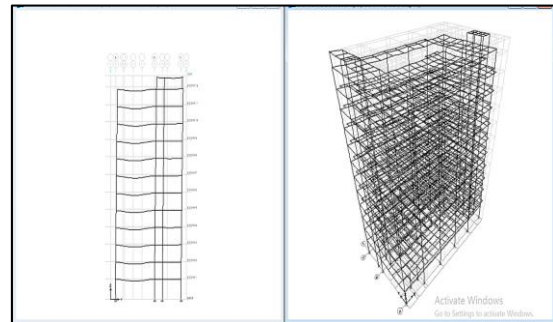
Mekanisme pushover akibat angin arah X diatas menunjukkan bahwa: Kapasitas maksimum terjadi pada step 13 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 1395,604 KN pada simpangan Displacement 0,027 meter.

Pushover angin arah X tidak menunjukkan keruntuhan bahkan pelelehan atau sendi plastis.

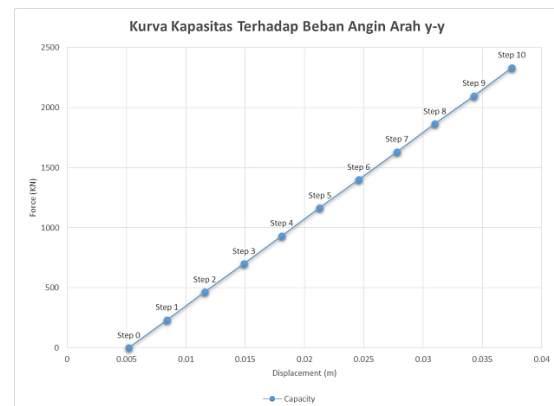
Tabel 5. Beban Dorong Angin Arah Y

Step	Displacement (m)	Base Force (KN)	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
Step 0	0.0052	0	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 1	0.0084	233.2929	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 2	0.0116	466.5859	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 3	0.0149	699.8788	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 4	0.0181	933.1718	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 5	0.0213	1166.4647	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 6	0.0246	1399.7577	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 7	0.0278	1633.0507	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 8	0.031	1866.3435	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 9	0.0343	2099.6365	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904
Step 10	0.0375	2332.9294	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

Unit A-E : Point



Gambar 14. Pushover Angin Arah Y Step terakhir



Gambar 15. Kurva Kapasitas Beban Angin Arah y-y

Mekanisme pushover akibat angin arah Y diatas menunjukkan bahwa : Kapasitas maksimum terjadi pada step 10 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 2332,929 KN pada simpangan Displacement 0,037 meter.

Pushover angin arah Y tidak menunjukkan keruntuhan bahkan pelelehan atau sendi plastis.

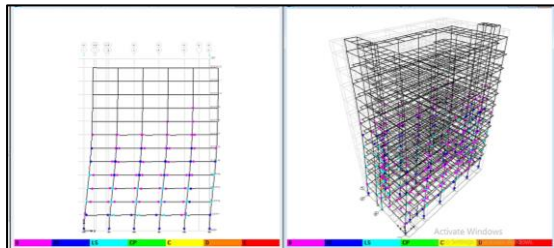
Mekanisme Pushover Kombinasi Gempa dan Beban Angin

Mekanisme pushover akibat kombinasi beban gempa dan angin diperlihatkan pada Tabel 7 dan Tabel 8 sebagai berikut:

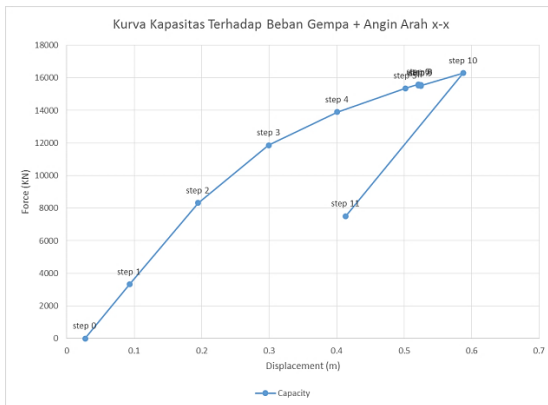
Tabel 6. Beban Dorong Gempa + Angin Arah X.

Step	Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
step 0	0.0272	0	7903	1	0	0	0	0	0	0	7904
step 1	0.0929	3330.6895	7874	30	0	0	0	0	0	0	7904
step 2	0.1947	8313.5527	7680	208	15	1	0	0	0	0	7904
step 3	0.2993	11865.5996	7549	208	132	15	0	0	0	0	7904
step 4	0.4009	13892.8496	7426	250	153	75	0	0	0	0	7904
step 5	0.5022	15352.2539	7403	263	153	84	0	1	0	0	7904
step 6	0.5213	15598.2988	7403	263	152	85	0	0	1	0	7904
step 7	0.5214	15522.1836	7399	266	152	85	0	1	1	0	7904
step 8	0.5246	15570.5371	7399	265	150	88	0	0	2	0	7904
step 9	0.5246	15507.6787	7350	285	115	149	0	3	2	0	7904
step 10	0.5874	16284.0928	7349	286	115	149	0	0	5	0	7904
step 11	0.4135	7515.5366	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

Unit A-E : point



Gambar 16. Pushover Gempa + Angin Arah X akhir (Sebelum mengalami keruntuhan)



Gambar 17. Grafik Kurva Kapasitas Beban Kombinasi Gempa + Angin Arah x-x

Mekanisme pushover akibat kombinasi gempa dan angin arah X diatas menunjukkan bahwa: Kapasitas maksimum terjadi pada step 10 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 16284,093 kN pada simpangan 0,587 meter. Keruntuhan (*collapse*) pada step 11 dengan Gaya Geser Dasar sebesar 7515,637 kN pada Simpangan 0,413 meter.

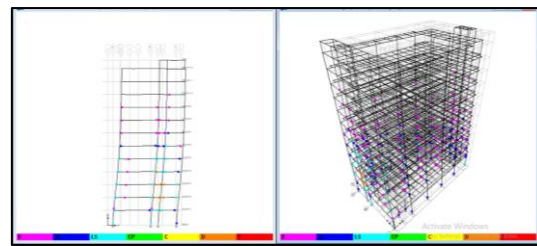
Sebelum mengalami keruntuhan struktur (Gambar 16) ditandai dengan adanya 286 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara leleh pertama sampai tingkatan *Immediate Occupancy* (B-IO), terdapat 115 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara *Immediate Occupancy* sampai tingkatan *Life Safety* (IO-LS). Terdapat 149 titik sendi plastis tingkatan antara *Life Safety* sampai tingkatan *Collapse Prevention* (LS-CP). Terdapat 5 titik sendi plastis tingkat kekuatan sisa elemen sampai

batas elemen harus mengalami keruntuhan (D-E).

Tabel 7. Beban Dorong Gempa + Angin Arah Y.

Step	Displacement	Base Force	A-B	B-IO	IO-LS	LS-CP	CP-C	C-D	D-E	>E	TOTAL
step 0	0.0375	0	7903	1	0	0	0	0	0	0	7904
step 1	0.0839	3398.0466	7837	66	1	0	0	0	0	0	7904
step 2	0.1875	10103.1162	7706	160	35	3	0	0	0	0	7904
step 3	0.2795	13544.2813	7613	194	66	31	0	0	0	0	7904
step 4	0.3808	15542.0215	7601	191	77	34	0	1	0	0	7904
step 5	0.3986	15826.4463	7601	191	77	34	0	0	1	0	7904
step 6	0.3987	15647.1563	7599	182	88	33	0	1	1	0	7904
step 7	0.4073	15807.9707	7599	182	88	33	0	0	2	0	7904
step 8	0.4073	15709.8438	7570	178	101	50	0	3	2	0	7904
step 9	0.4576	16511.8496	7570	178	100	49	0	0	7	0	7904
step 10	0.4529	15860.7861	7904	0	0	0	0	0	0	0	7904

Unit A-E : point



Gambar 18. Pushover Gempa + Angin Arah Y Step akhir (Sebelum mengalami keruntuhan)



Gambar 19. Grafik Kurva Kapasitas Beban Kombinasi Gempa + Angin Arah y-y

Mekanisme *pushover* akibat kombinasi gempa dan angin arah Y diatas menunjukkan bahwa : Kapasitas maksimum terjadi pada step 9 dengan Gaya geser dasar maksimum sebesar 16511,850 kN pada simpangan 0,458 meter. Keruntuhan (*collapse*) pada step 10 dengan Gaya Geser Dasar sebesar 15860 kN pada Simpangan 0,453 meter.

Sebelum mengalami keruntuhan struktur (Gambar 18) ditandai dengan terdapatnya 178 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara leleh pertama sampai tingkatan *Immediate Occupancy* (B-IO), terdapat 100 titik sendi plastis mengalami tingkatan antara *Immediate Occupancy* sampai tingkatan *Life Safety* (IO-LS). Terdapat 49 titik sendi plastis tingkatan antara *Life Safety* sampai tingkatan *Collapse Prevention* (LS-CP) Terdapat 7 titik sendi

plastis tingkat kekuatan sisa elemen sampai batas elemen harus mengalami keruntuhan (D-E).

Evaluasi Kinerja Struktur

Hasil evaluasi kinerja struktur ini didapatkan dari 3 peraturan yang umum digunakan yaitu ATC-40, FEMA 356, dan FEMA 440 dengan tujuan untuk menguji keefektifan kinerja struktur.

Tabel 8. Perbandingan Kinerja Gedung Arah X

ARAH	Parameter	Akibat Beban	DBDD	ATC-40	FEMA 356	FEMA 440
X	Target Perpindahan	Gempa	0.571	0.497	0.451	0.451
		Angin	0.571	N/A	0.0272	0.0272
		Kombinasi	0.571	0.529	0.452	0.452
	Drift aktual (Am/Tinggi total)	Gempa	-	0.0096	0.0087	0.0087
		Angin	-	0.000	0.0005	0.0005
		Kombinasi	-	0.010	0.0087	0.0087
	Level Kinerja	Gempa	Life Safety	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy
		Angin	Life Safety	Continued Occupancy	Continued Occupancy	Continued Occupancy
		Kombinasi	Life Safety	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy

Tabel 9. Perbandingan Kinerja Gedung Arah Y

ARAH	Parameter	Akibat Beban	DBDD	ATC-40	FEMA 356	FEMA 440
Y	Target Perpindahan	Gempa	0.571	0.411	0.358	0.358
		Angin	0.571	N/A	0.0375	0.0375
		Kombinasi	0.571	N/A	0.357	0.357
	Drift aktual (Am/Tinggi total)	Gempa	-	0.0079	0.0069	0.0069
		Angin	-	0.000	0.0007	0.0007
		Kombinasi	-	0.0079	0.0069	0.0069
	Level Kinerja	Gempa	Life Safety	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy
		Angin	Life Safety	Continued Occupancy	Continued Occupancy	Continued Occupancy
		Kombinasi	Life Safety	Structural Stability	Immediate Occupancy	Immediate Occupancy

Asesmen

Titik sendi plastis Kritis

1) Gempa

Pada hasil analisa *pushover* gempa arah X sebelum mengalami keruntuhan terdapat 3 sendi plastis tingkat D-E dengan rotasi momen diatas 0,02 (LS) tetapi di antara itu terdapat 2 titik kritis pada balok di lantai 2 dan 3 yang melewati batas rotasi plastis $\theta = 0,025$. Selain balok pada hasil analisa *pushover* akibat gempa arah X menunjukkan 22 titik sendi plastis pada kolom. Sebagian besar hanya pada tingkat kerusakan B-LS atau tidak melewati batas rotasi plastis LS tetapi di antara itu terdapat 4 titik kritis pada kolom lantai 2.

Pada hasil Analisa *pushover* gempa arah Y terdapat 7 sendi plastis kritis tetapi di antaranya terdapat 6 titik kritis pada balok lantai 2 dan 3 yang melampaui batas rotasi plastis maksimum.

Selain balok pada hasil analisa *pushover* akibat gempa arah X menunjukkan 22 titik sendi plastis pada kolom. Sebagian besar hanya pada tingkat kerusakan B-LS atau tidak melewati batas rotasi plastis LS tetapi di antaranya terdapat 4 titik kritis pada kolom lantai 1 dan 2.

2) Kombinasi Gempa dan Angin

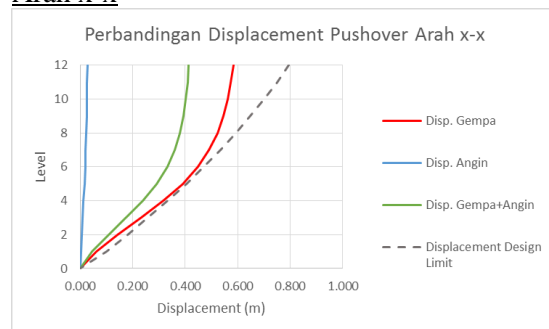
Pada hasil analisa *pushover* kombinasi gempa dan angin sebelum mengalami keruntuhan terdapat 4 sendi plastis tingkat D-E dengan rotasi momen diatas 0,02 (LS) tetapi di antaranya terdapat 2 titik kritis pada balok lantai 2 dan 3 yang melewati batas rotasi plastis $\theta = 0,025$. Selain balok pada hasil analisa *pushover* akibat beban kombinasi (gempa + angin) arah X menunjukkan 22 titik sendi plastis pada kolom. Sebagian besar hanya pada tingkat kerusakan B-LS atau tidak melewati batas rotasi plastis LS tetapi di antara itu terdapat 4 titik sendi plastis pada kolom lantai 2.

Pada hasil analisa *pushover* akibat beban kombinasi arah Y terdapat 7 sendi plastis kritis tetapi di antara itu terdapat 6 titik kritis pada balok lantai 2 dan 3 yang melampaui batas rotasi plastis maksimum. Selain balok pada hasil analisa *pushover* akibat beban kombinasi (gempa+angin) arah Y menunjukkan 22 titik sendi plastis pada kolom. Sebagian besar hanya pada tingkat kerusakan B-LS atau tidak melewati batas rotasi plastis LS tetapi di antara itu terdapat 2 titik kritis pada kolom lantai 1 dan 2.

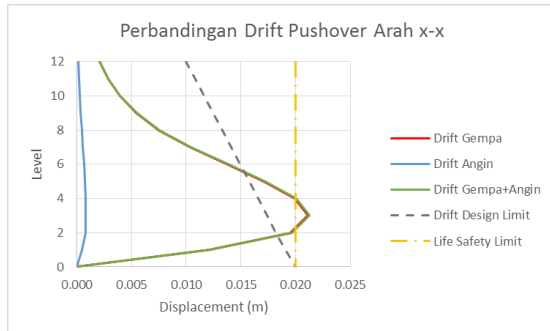
Perbandingan Drift dan Displacement

Resume data perbandingan *displacement* dan *drift* untuk arah X dan Y ditunjukkan dibawah ini

Arah x-x

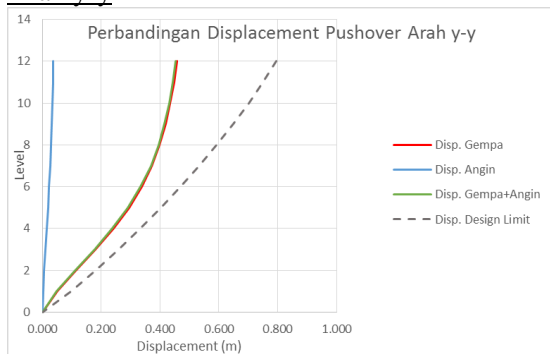


Gambar 20. Kurva perbandingan displacement pushover Arah x-x

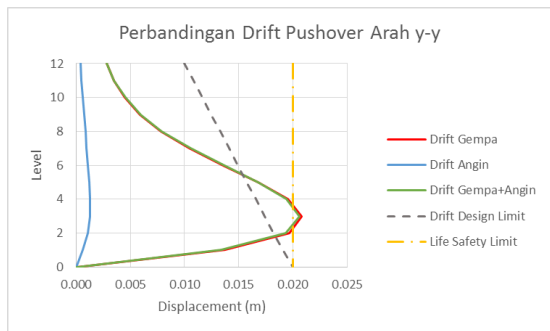


Gambar 21. Kurva Perbandingan Drift Pushover Arah x-x

Arah y-y



Gambar 22. Kurva Perbandingan Displacement Pushover Arah y-y



Gambar 23. Kurva perbandingan Drift pushover Arah y-y

Idealisasi Respon Struktur Hasil Pushover

Idealisasi ini dilakukan dengan pendekatan secara gaya dan displacement sistem struktur untuk memperoleh parameter respon struktur akibat beban gempa dan kombinasi beban gempa dan angin sedangkan respon struktur akibat beban angin tidak dihitung dikarenakan beban angin masih bersifat linier.

Resume perbandingan parameter respon struktur diperlihatkan pada Tabel 11 berikut.

Tabel 11. Resume Perbandingan Parameter Respon Struktur

Parameter	Sistem Rangka (Gempa)		Sistem Rangka (Gempa+Angin)	
	Arah X	Arah Y	Arah X	Arah Y
C_d	2.69	3.14	2.59	2.77
Ω	1.77	1.93	1.65	1.67
R	9.11	9.11	9.11	9.11

PENUTUP

Kesimpulan

Model struktur bangunan 12 lantai (Gedung Fakultas Hukum Unsrat) dengan teritorial Manado, Sulawesi Utara, Indonesia :

1. Analisis pushover akibat gempa pada arah X menunjukkan kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 17674,318 kN pada displacement 0,584 meter dan runtuh pada gaya geser 17577,646 kN pada displacement 0.583 meter. Sebelum mengalami keruntuhan, struktur ditandai dengan sendi plastis kritis balok yang terjadi pada lantai 2 dan 3 masing-masing berjumlah 1 titik serta sendi plastis kritis kolom terjadi pada lantai 2 berjumlah 4 titik. Pada arah Y kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 18397,877 kN pada simpangan 0,458 dan runtuh pada gaya geser dasar 18247,709 kN pada simpangan 0,457 meter. Sebelum mengalami keruntuhan, struktur ditandai dengan sendi plastis kritis balok yang terjadi pada lantai 2 dan 3 masing-masing berjumlah 3 titik serta sendi plastis kritis kolom terjadi pada lantai 2 berjumlah 3 titik dan lantai 1 berjumlah 1 titik. Baik arah X dan Y, perilaku struktur bersifat efektif terhadap pembebanan gempa dan tingkat kinerja struktur akibat gempa berada dalam kategori *Immediate Occupancy* serta respon struktur bersifat sangat duktail, mampu memikul beban dan menunjukkan lendutan struktur yang tergolong aman.
2. Analisis pushover angin pada arah X menunjukkan kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 1395,605 kN pada displacement 0,027 meter. Pada arah Y kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 2332,929 kN pada simpangan 0,0375 meter namun pada kedua arah tidak menunjukkan keruntuhan maupun tanda titik sendi plastis pada struktur. Baik arah X dan Y, perilaku struktur bersifat tidak efektif terhadap pembebanan angin dan tingkat kinerja struktur akibat angin berada dalam

- kategori *Continued Occupancy* serta respon struktur masih bersifat linier atau elastis.
3. Analisis pushover kombinasi beban gempa dan angin pada arah X menunjukkan kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 16284,093 kN pada *displacement* 0,587 meter dan runtuh pada gaya geser dasar 7515,637 kN pada *displacement* 0.413 meter. Sebelum mengalami keruntuhan, struktur ditandai dengan sendi plastis kritis balok yang terjadi pada lantai 2 dan 3 masing-masing berjumlah 1 titik serta sendi plastis kritis kolom terjadi pada lantai 2 berjumlah 4 titik. Pada arah Y kapasitas gaya geser dasar maksimum sebesar 18397,877 kN pada simpangan 0,458 dan runtuh pada gaya geser dasar 15860,786 kN pada simpangan 0,453 meter. Sebelum mengalami keruntuhan, struktur ditandai dengan sendi plastis kritis balok yang terjadi pada lantai 2 dan 3 masing-masing berjumlah 3 titik serta sendi plastis kritis kolom terjadi pada lantai 2 berjumlah 3 titik dan lantai 1 berjumlah 1 titik. Baik arah X dan Y, perilaku struktur bersifat efektif terhadap pembebanan kombinasi gempa-angin dan tingkat kinerja struktur akibat kombinasi gempa-angin berada dalam kategori Immediate Occupancy serta respon struktur bersifat sangat daktail, mampu memikul beban dan menunjukkan lendutan struktur yang tergolong aman.
 4. Secara keseluruhan gedung bertingkat ini menunjukkan bahwa struktur lebih efektif terhadap beban gempa daripada beban kombinasi gempa-angin dan beban angin. Keruntuhan dapat dimulai pada lantai 2 dan 3 pada struktur ini. Struktur ini masuk keruntuhan mekanisme kolom kuat balok lemah.

Saran

1. Diperlukan kajian lanjutan tentang rendahnya kemampuan kombinasi beban gempa-angin dibandingkan dengan beban gempa pada struktur gedung bertingkat serta pengaruh elastoplastis struktur gedung bertingkat oleh increment pembebanan sampai mengalami keruntuhan.
2. Diperlukan kajian lanjutan tentang pengaruh beban angin jika dikombinasikan dengan gempa
3. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan terhadap gedung yang lebih tinggi ataupun gedung asimetris (complex) pada berbagai daerah.
4. Penelitian ini dapat digunakan dalam rangka *retrofitting* gedung atau pencegahan kerusakan serta penambahan lantai.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE 7-10., 2010. *Minimum Design Loads for Structures*, Virginia. Retrieved from www.pubs.asce.org
- ATC-40., 1996. *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Seismic Safety Commission (Vol. 1). California. <https://doi.org/10.1193/1.1586093>
- BSNI., 2012. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. SNI 1726:2012. <https://doi.org/10.1080/0893569032000131613>
- BSNI., 2013. *Beban minimum untuk perancangan bangunan gedung dan struktur lain*. SNI 1727:2013. Retrieved from www.bsn.go.id
- BSNI., 2013. *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. SNI 2847:2013. Jakarta. Retrieved from www.bsn.go.id
- CSI., 2017. *CSI Analysis Reference Manual For SAP2000, ETABS, SAFE and CSiBridge*. CSI Analysis Reference Manual. Retrieved from www.csiamerica.com
- FEMA 356., 2000. *Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Therapiewoche. Washington D.C.

FEMA 440., 2005. *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*.

Griffis, L., Patel, V., Muthukumar, S. & Baldava, S., 2012. *A Framework for performance-based wind engineering.. Advances in Hurricane Engineering*, p. 670.

Holmes, J., & Weller, R., 2016. *Design Wind Speeds for the Asia – Pacific Region*. HB 212-2002.

Mohammadi, A., 2016. Wind Performance Based Design for High-Rise Buildings. <https://doi.org/10.1002/jsfa.8858>

Murty, C. V. R., Rupen, G., Vijayanarayan, A. R., & Mehta, V. V., 2013. *Earthquake Behaviour of Buildings*. (GSDMA, Ed.). Government of Gujarat., Gujarat, India.

Runtu, F. I., Manalip, H., Kumaat, E. J., 2015. Penempatan Dinding Geser pada Bangunan Beton Bertulang dengan Analisa Pushover. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*, 5(1), 283–293, Pascasarjana Universitas Sam Ratulangi, Manado.