

Perilaku Struktur Bangunan dengan Ketidakberaturan Vertikal Tingkat Lunak Berlebihan dan Massa Terhadap Beban Gempa

Bambang Budiono

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, E-mail: b.budiono@lapi.itb.ac.id

Eko Budi Wicaksono

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, E-mail: ekobudiwicaksono@gmail.com

Abstrak

Variasi geometri struktur bangunan dapat menghasilkan sistem ketidakberaturan struktur. Dua macam ketidakberaturan yang sering dijumpai adalah ketidakberaturan lateral tingkat lunak berlebihan dan ketidakberaturan massa. Penelitian ini akan dipaparkan respon struktur non-linier akibat ketidakberaturan kekakuan lateral tingkat lunak dan massa berlebihan pada struktur bangunan beton bertulang dengan ketinggian 20 lantai dibandingkan dengan struktur bangunan reguler dengan gempa kuat. Struktur beton bertulang sistem ganda didesain berdasarkan persyaratan struktur tahan gempa dengan SNI-1726-2012 dan SNI-2847-2002. Beban gempa kuat yang ditinjau adalah El-Centro N-S 1940 yang diskalakan terhadap beban gempa nominal lokasi Jakarta dengan kelas situs SE. Ketidakberaturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan didesain dengan variabel satu lantai memiliki kekakuan lantai kurang dari 60% kekakuan lantai di atasnya, sedangkan ketidakberaturan massa direncanakan dengan variabel satu lantai memiliki massa 150% lebih besar dibanding massa di lantai yang lain. Respon struktur non-linier dianalisis berdasarkan evaluasi kinerja struktur dengan menggunakan analisis riwayat waktu non-linier dan analisis statik push-over, dengan bantuan piranti lunak Perform 3D. Hasil analisis menunjukkan bahwa struktur bangunan dengan ketidakberaturan vertikal kombinasi antara kekakuan tingkat lunak

Kata-kata Kunci: Ketidakberaturan kekakuan lateral tingkat lunak, ketidakberaturan massa, Desain berbasis kinerja, Analisis riwayat waktu non-linier, Analisis statik push-over.

Abstract

Configuration Variation of building structures may result in systems irregularities of the structures. Two types irregularities which are often encountered are the excessive lateral soft stories and masses. Structural responses due to the excessive lateral soft storey and mass irregularities of 20-storey reinforced concrete structures are compared with the response of the similar building but structurally regular subjected to large earthquake motion. The dual systems of RC structures are designed comply with The Indonesian Standard SNI-1726-2012 and SNI-2847-2002 for earthquake resistant design. The major earthquake considered is the El-Centro 1940 N-S which is scaled match the design earthquake of Jakarta site class E. The excessive soft storey lateral irregularity is designed using variable of one story having 60% less stiffness compared with the above stories while the variable of mass irregularity is assigned to one particular floor having 150% larger mass compared to any other stories. The structural responses are analyzed using Performance Based Design under Non-Linear Analysis with Perform3D software. It was found that the building with the vertical soft stories combined with mass irregularities located in the first story showed the poorest performance.

Keywords: Irregularity of soft story lateral stiffness, Irregularity of mass, Performance Based Design, Non-Linear Time History Analysis, Push-over Analysis.

1. Pendahuluan

Variasi bentuk geometri struktur bangunan gedung dapat menghasilkan suatu ketidakberaturan baik ketidakberaturan lateral tingkat lunak berlebihan maupun ketidakberaturan massa. Pada penelitian ini akan dipaparkan pengaruh ketidakberaturan lateral tingkat lunak berlebihan dan massa pada struktur bangunan beton bertulang dengan ketinggian 20 lantai dengan model struktur bangunan reguler dengan jumlah

lantai sama. Struktur bangunan gedung bertulang didesain dengan beban gempa El-Centro 1940 N-S yang di skala dengan *Maximum Considered Earthquake Risk Category (MCER)* SNI 1726-2012 dan desain penulangan sesuai dengan SNI 2847-2002. Struktur Bangunan Gedung pada studi ini adalah struktur bangunan perkantoran beton bertulang sistem ganda dengan Kategori Resiko II sesuai dengan ketentuan SNI 1726-2012. Studi yang dilakukan adalah sebagai berikut: (i) satu struktur bangunan reguler yang

menjadi acuan analisis (A0), kemudian tiga struktur bangunan studi memiliki ketidakberaturan tingkat lunak berlebihan pada (ii) lantai satu (B1), (iii) lantai sepuluh (B2), dan (iv) tujuh belas (B3). Untuk struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa, studi dilakukan dengan 3 jenis struktur bangunan gedung yaitu ketidak-beraturan massa (v) lantai satu (C1), (vi) lantai sepuluh (C2), dan (vii) lantai tujuh belas (C3). Di samping itu, penelitian juga dilakukan untuk 3 struktur bangunan dengan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak berlebihan dan massa. Kombinasi ketidak-beraturan tingkat lunak dan massa terdapat pada (viii) lantai satu (D1), (ix) lantai sepuluh (D2), dan (x) lantai tujuh belas (D3).

Pada karya tulis ini dipaparkan perencanaan struktur tersebut dengan menggunakan prosedur desain *response spectrum analysis* (RSA), yang kemudian dieksitasi dengan menggunakan beban gempa kuat dengan menggunakan metoda *Non-Linear Time History Analysis* lokasi Jakarta dengan kelas situs SE pada SNI 1726-2012, dan *Static push-over Analysis*. Respon nonlinear struktur akan dijadikan acuan untuk analisis perilaku ke empat tipe struktur bangunan tersebut sesuai dengan prinsip-prinsip *performance based design*. Hasil evaluasi struktur tersebut akan dijadikan acuan untuk menentukan tipe bangunan yang memiliki perilaku paling berbahaya dan masukan untuk perancangan struktur bangunan dikemudian hari.

2. Dasar Teori

2.1 Ketidakberaturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan

Berdasarkan SNI-03-1726-2012, suatu struktur bangunan dapat dikatakan memiliki ketidakberaturan kekakuan lateral tingkat lunak berlebihan jika salah satu lantai memiliki kekakuan kurang dari 60% kekakuan lantai di atasnya atau 70% kekakuan rata-rata tiga lantai di atasnya. Persyaratan ketidak-beraturan kekakuan lateral tingkat lunak tidak berlaku bila deformasi antar lantai atau *drift ratio* kurang dari 1,3 kali *drift ratio* lantai di atasnya.

Perilaku struktur bangunan dengan tinggi tingkat antar lantai yang berlebihan dapat menyebabkan kekakuan tingkat lunak atau kolom fleksibel. Fenomena ini dapat dideteksi dengan terjadinya deformasi yang berlebihan pada lantai tersebut. Kombinasi antara beban lateral dan beban gravitasi dengan kekakuan lateral yang kecil dapat menghasilkan efek pembesaran deformasi P- Δ . Bila kekakuan lateral tidak memenuhi syarat maka efek P- Δ dapat menimbulkan momen sekunder yang signifikan sehingga menurunkan kinerja struktur yang disebut *soft story effect*.

Akibat beban gempa, keberadaan kolom tinggi antar lantai dapat juga menyebabkan kolom tersebut menjadi kolom lemah (*weak story*). Dengan demikian maka kolom fleksibel sangat potensial mempunyai sifat kombinasi mekanisme *soft story* dan *weak story*. Bila deformasi antar lantai akibat *soft story* masih memenuhi syarat maka untuk mencegah terjadinya mekanisme *weak story*, SNI 1726-2012 mensyaratkan penambahan kekuatan bila terjadi perlemahan kolom. Penambahan kekuatan ini dilakukan dengan menambahkan faktor kuat lebih Ω_0 sebesar 2,5 untuk menunda pembentukan sendi plastis yang *premature* di kolom tersebut.

2.2 Ketidakberaturan massa

Berdasarkan SNI-03-1726-2012, suatu struktur dapat dikatakan memiliki ketidak-beraturan kekakuan lateral tingkat lunak massa jika ada salah satu lantai yang memiliki berat sebesar minimum 150% dari berat lantai di atasnya. Persyaratan ketidakberaturan massa tidak berlaku bila deformasi antar lantai atau *drift ratio* kurang dari 1,3 kali *drift ratio* lantai di atasnya. Sama halnya dengan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak, ketidakberaturan massa akan memberikan efek pembesaran deformasi P- Δ sehingga perlu diwaspadai dalam tahap desain struktur bangunan tersebut.

2.3 Desain struktur berbasis kinerja (*performance based design*)

Desain struktur berbasis Kinerja (*Performance based Design*) merupakan salah satu konsep perencanaan desain struktur terhadap beban lateral (beban gempa). Berdasarkan ATC-40 dan FEMA 273, *Performance Based Design* merupakan suatu konsep desain yang dapat merepresentasikan batas-batas kinerja dari tingkat kerusakan pada struktur bangunan yang diakibatkan oleh beban gempa MCER. Batasan ini diwujudkan dalam bentuk kriteria kinerja (*performance*) yang dikenal dengan tingkat kinerja (*performance level*) struktur. *Performance level* disini adalah tingkat atau derajat kerusakan yang ditentukan oleh kerusakan fisik struktur dan elemen struktur sehingga tidak membahayakan keselamatan pengguna struktur bangunan.

Berdasarkan ATC-40 *Performance level* struktur bangunan dibagi menjadi beberapa tingkat kerusakan utama dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Evaluasi kinerja yang dibahas adalah perilaku respon in-elastik struktur. Di samping itu, evaluasi respon struktur *non-linear* digunakan untuk memverifikasi desain struktur apakah sesuai dengan asumsi dan ekspektasi perilaku struktur pada saat tahap desain apakah sudah sesuai dengan fungsi serta faktor kepentingan bangunan tersebut. Kuantifikasi level kinerja struktur berdasarkan kriteria global diajukan pada dokumen ATC-40, di mana parameter yang

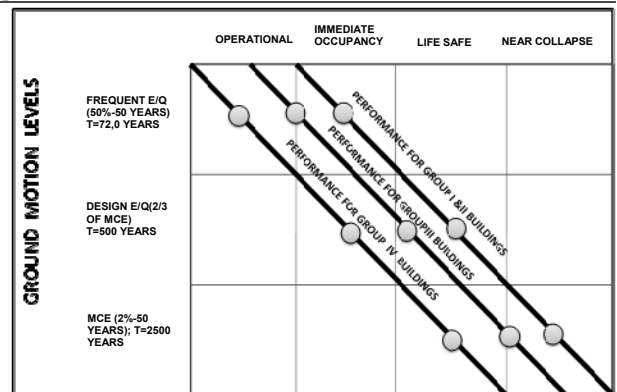
Tabel 1. Tingkat kerusakan berdasarkan ATC-40

Performance level	Keterangan
<i>Operational</i>	Pada batasan ini tidak terjadi kerusakan struktural dan non-struktural sehingga struktur bangunan tetap dapat menjalankan fungsinya seperti sediakala
<i>Immediate Occupancy</i>	Pada batasan ini tidak terdapat kerusakan struktural tetapi terdapat sedikit kerusakan non-struktural. Perbaikan kerusakan ini dapat dilakukan tanpa mengganggu fungsi dari struktur bangunan tersebut
<i>Life Safety</i>	Pada batasan ini terjadi kerusakan pada elemen struktur tetapi tidak terjadi keadaan <i>collapse</i> dan masih dapat diperbaiki pada struktur bangunan sehingga masih dapat memberikan kesempatan manusia untuk keluar struktur bangunan
<i>Structural Stability</i>	Pada batasan ini terjadi kerusakan pada elemen struktur dan bangunan hampir runtuh, elemen penahan gaya lateral sudah <i>collapse</i> , hanya struktur penahan gravitasi saja yang masih utuh. Struktur bangunan sudah tidak dapat diperbaiki lagi. Kemungkinan melukai manusia yang ada didalamnya sangat tinggi jika mencapai batasan ini.

digunakan berupa simpangan lantai struktur atau *drift* dari fasa elastik sampai fasa inelastik bila dibebani oleh gempa MCER. Sedangkan parameter kuantifikasi dengan kriteria lokal diajukan pada FEMA 356, dimana parameter yang digunakan berupa deformasi pada elemen struktur yang direpresentasikan dalam bentuk hubungan momen-rotasi. Dokumen FEMA 303 dan NEHRP 1997 merekomendasikan suatu bentuk matrik terkait ekspektasi kinerja struktur terhadap resiko gempa dan faktor kepentingan bangunan, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 1**.

Ada beberapa metoda yang digunakan untuk mengetahui nilai kinerja dari suatu struktur bangunan. Pada penulisan karya ilmiah ini digunakan metoda *static push-over analysis* (*Capacity Spectrum Analysis-CSA*) dan *non-linear time history analysis* (*NL-THA*). Metoda *NL-THA* pada saat ini diterima sebagai metoda yang lebih akurat sedangkan CSA adalah metoda yang lebih sederhana dan konservatif.

Apabila ragam getar lateral mendominasi respon struktur maka metoda *static push-over analysis* akan memberikan hasil yang dapat diterima. Metoda *static push-over analysis* merupakan suatu metoda dengan memberikan beban horizontal yang memiliki pola se suai dengan bentuk ragam/mode deformasi lateral dominan. Besar beban lateral dorong (*push-over*) dinaikkan secara bertahap sampai deformasi struktur tersebut mencapai batas kapasitasnya (*capacity*). Selama terjadinya kenaikan beban lateral pada struktur, ketahanan struktur bangunan juga diperbarui kondisinya untuk mengetahui tingkat kerusakan (sendi plastis) yang sudah terjadi (Elnashai, 2001). Pada metode ini kurva yang menunjukkan kapasitas dari struktur bangunan yaitu kapasitas gaya dan maksimum deformasi in-elastik dikenal dengan kurva kapasitas. Seiring dengan meningkatnya tingkat kerusakan struktur inelastis tanpa keruntuhan struktur yang bersangkutan maka semakin besar pula redaman histerestiknya (Chopra, 2002). Dengan meningkatnya redaman struktur maka beban gaya gempa (response spectra) akan menurun sehingga response spektra rencana pun akan selalu diperbarui disesuaikan dengan peningkatan redaman, hal ini dikenal dengan nama *demand response spektra*. Perpotongan antara kurva



Gambar 1. Building Performance level berdasarkan FEMA 303/NEHRP 1997 (Sumber : FEMA 303)

kapasitas dengan *demand response spektra* pada tingkat redaman yang konvergen dinamakan *performance point* yang digunakan untuk menentukan level kinerja struktur. Metode ini dapat digunakan dengan syarat bentuk ragam/ mode pertama lateral dalam kedua arah orthogonal sangat dominan dibandingkan bentuk ragam yang lain (di atas 75%).

Metode *assessment* kinerja struktur dapat juga dengan cara dinamik *NL-THA* (*non-linear time history analysis*) yang perhitungannya lebih akurat karena menggunakan beban percepatan gempa fungsi waktu (*acceleration time history*) dari gempa MCER. Seperti pada *push-over analysis*, metoda dinamis juga menjadikan deformasi in-elastik sebagai parameter untuk menentukan level kinerja struktur bangunan. Analisis dinamik mengisyaratkan memperhitungkan massa inersia pada analisisnya, massa inersia diperhitungkan untuk mengantisipasi gaya dan deformasi struktur akibat beban gravitasi dan juga adanya efek P- Δ . Jadi didalam analisis dinamik terdapat dua langkah utama yaitu beban gravitasi diaplikasikan terlebih dahulu, setelah beban gravitasi konstan kemudian diaplikasikan beban gempa yang berasal dari *ground motion*. Struktur bangunan yang mengalami kerusakan (sendi plastis) akibat gempa akan meningkatkan pula redaman struktur bangunan tersebut secara bertahap sebanding dengan pembentukan sendi plastisnya. Untuk memodelkan redaman yang terjadi pada struktur bangunan digunakan formulasi redaman Rayleigh (Chopra, 2002). Redaman ini memformulasikan

besarnya nilai damping (C) sebanding dengan massa (M) dan Kekakuan struktur (K) dapat di ekspresikan dengan bentuk berikut $[C] = \alpha_m [M] + \alpha_k [K]$, yang diperhitungkan dari 2 periode struktur bangunan paling awal pada arah yang ditinjau. Pada dasarnya redaman Rayleigh dibangun dari konteks linier elastik dinamik yang memiliki kekakuan konstan dan mode getar yang dapat diperhitungkan. Tetapi untuk analisis non-linier yang kekakuannya berubah dan mode getar tidak dapat diketahui secara pasti, dapat digunakan penyelarasan antara distribusi linier dari kekakuan dan massa (Hall, 2006).

3. Metodologi Penelitian

Pada **Gambar 2** akan dijelaskan alur dari penelitian dikembangkan berdasarkan teori yang sudah dipaparkan sebelumnya. Berdasarkan kerangka konseptual, akan dirancang 4 jenis struktur bangunan yaitu struktur bangunan dasar (beraturan), struktur bangunan dengan ketidak-beraturan lateral tingkat lunak berlebihan, struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa, dan kombinasi antara tingkat lunak berlebihan dan massa, untuk masing-masing ketidak-beraturan akan dirancang 3 tipe. Kemudian struktur bangunan didesain dengan menggunakan metode kombinasi ragam respons spektra untuk mendapatkan gaya dalam yang digunakan untuk penulangan beton. Setelah fasa desain selesai, struktur bangunan diuji kinerja dengan 2 metode yaitu metode *push-over* dan *NL-THA* untuk mengetahui performa struktur

bangunan tersebut. Dari sini dibandingkan hasil antara metode *push-over* dan *NL-THA* serta kelayakan struktur bangunan ketidak-beraturan terhadap struktur bangunan dasar (beraturan) dan juga perilaku dari masing-masing struktur bangunan

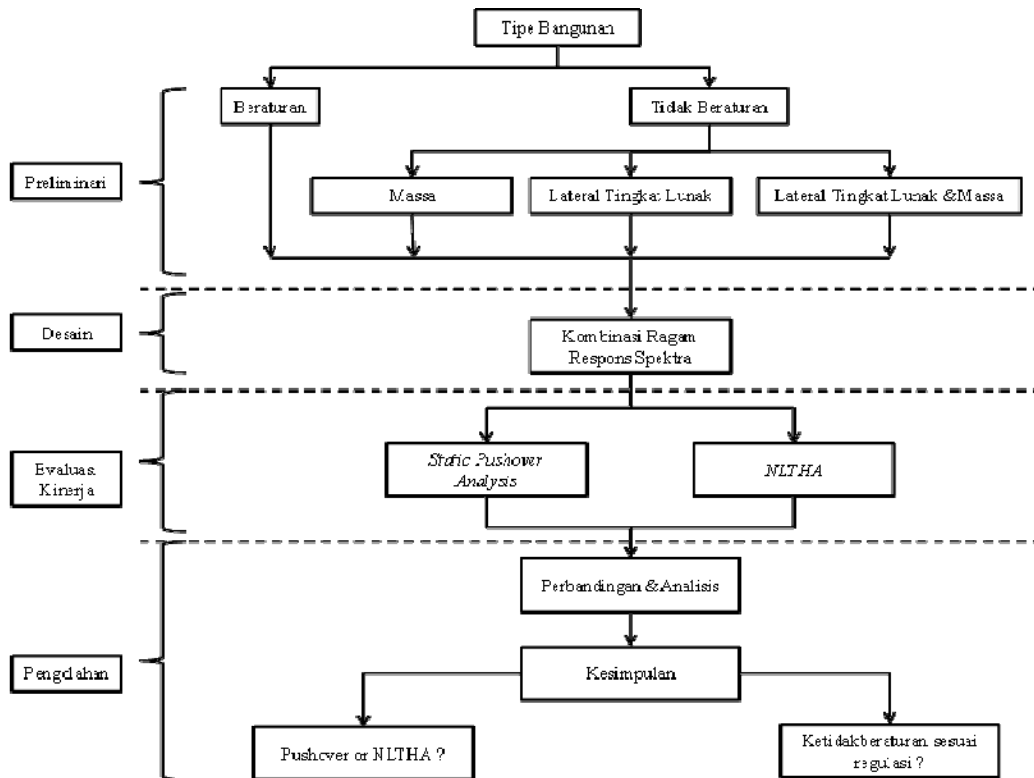
4. Hipotesis

Berdasarkan dasar teori yang telah dipaparkan sebelumnya, didapatkan rumusan hipotesis sebagai berikut:

“Ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak menyumbangkan hasil performa struktur bangunan yang paling berbahaya jika dibandingkan dengan ketidakberaturan massa, kerusakan terbesar diperkirakan akan terjadi disekitar lantai tingkat dimana terdapat ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak tersebut. Pengaruh ketidak-beraturan massa terhadap perilaku bangunan tidak signifikan sehingga pengaruh penyimpangan perilaku terhadap struktur bangunan dasar (beraturan) tidak banyak berbeda”.

5. Konfigurasi Perencanaan Struktur

Konfigurasi perencanaan struktur yang dijadikan model studi yang terdiri dari ketidak-beraturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan, ketidak-beraturan massa dan kombinasi ketidak-beraturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan serta ketidak-beraturan massa, sebagai berikut:



Gambar 2. Kerangka konseptual penelitian

a. Struktur bangunan dasar

Struktur bangunan dengan ketinggian 20 lantai dengan perilaku yang sesuai dengan pasal-pasal pada SNI 03-1726-2012 dan dijadikan acuan untuk perbandingan perilaku struktur bangunan terhadap struktur bangunan dengan ketidak-beraturan yang dibahas pada karya tulis ini. (Tipe A0)

b. Struktur bangunan gedung dengan ketidak-beraturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan

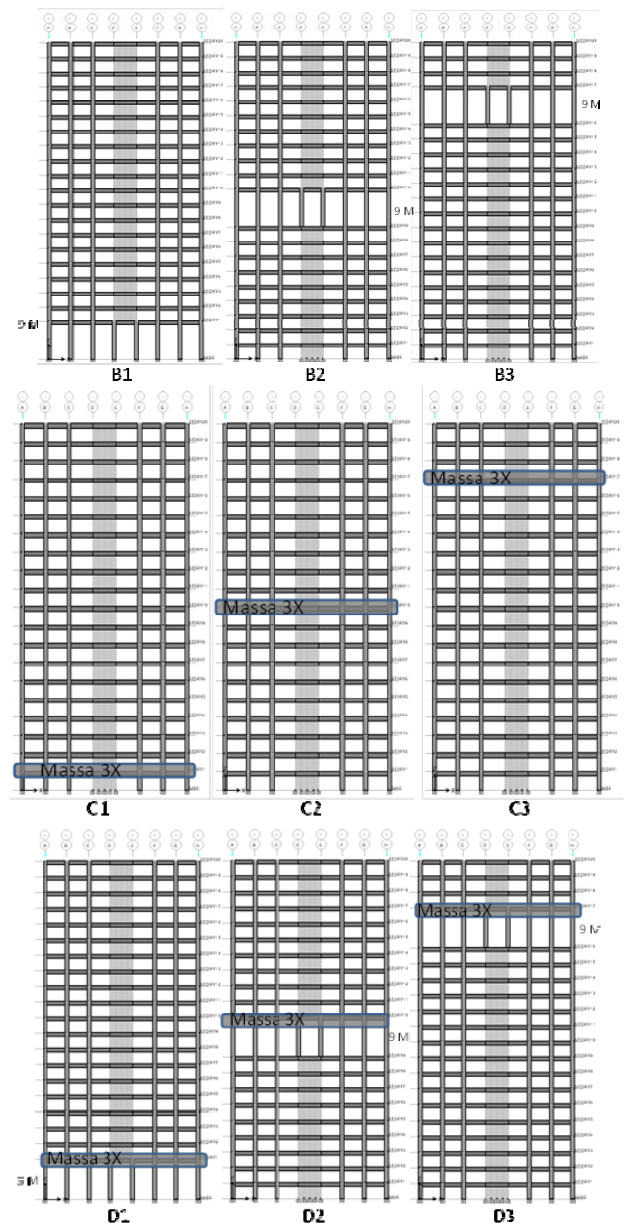
Suatu struktur bangunan gedung dikatakan memiliki ketidak-beraturan kekakuan lateral tingkat lunak berlebihan jika salah satu lantai memiliki kekakuan kurang dari 60% kekakuan lantai di atasnya atau 70% kekakuan rata-rata tiga lantai di atasnya. Didalam penelitian kekakuan lateral tingkat lunak berlebihan, lantai di rancang memiliki kekakuan 30% kekakuan lantai di atasnya. (Tipe B1, B2, dan B3)

c. Struktur bangunan gedung dengan ketidak-beraturan Massa

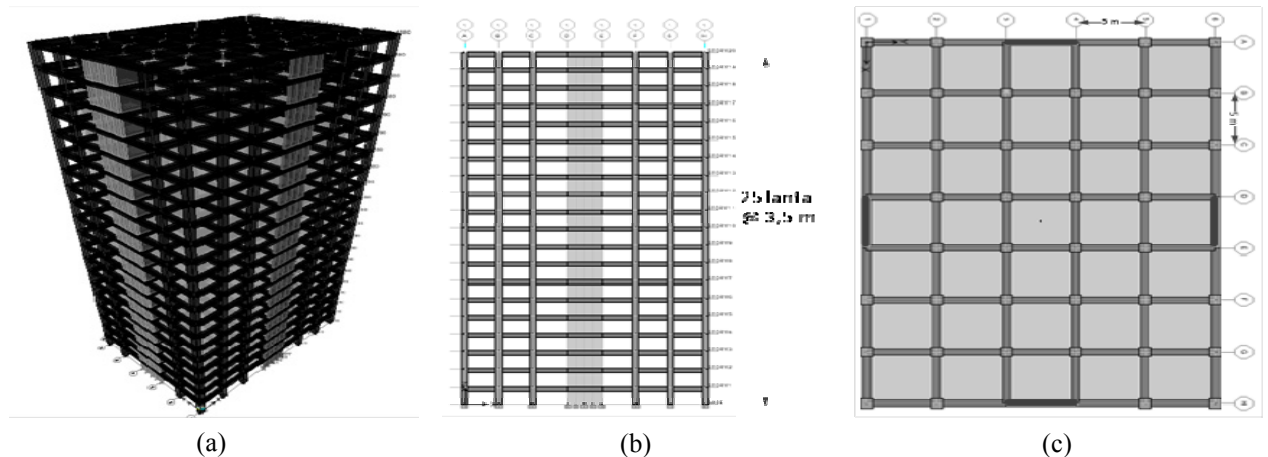
Suatu struktur bangunan gedung dikatakan memiliki ketiakberaturan kekakuan lateral tingkat lunak massa jika ada salah satu lantai yang memiliki berat sebesar 150% lantai di atasnya. Didalam penelitian ini diambil massa lantai sebesar 300% dari massa lantai lain dengan pertimbangan ingin melihat pengaruh ekstrim dari peningkatan massa mencapai 3 kali massa normal. (Tipe C1, C2, dan C3)

d. Struktur bangunan gedung dengan kombinasi ketidak-beraturan vertikal kekakuan tingkat lunak berlebihan dan ketidak-beraturan massa

Didalam penelitian ini, kekakuan lantai objek di rancang memiliki kekakuan 30% kekakuan lantai di atasnya dan dikombinasikan dengan kenaikan massa sebesar 300% pada lantai yang mengalami pengurangan kekakuan tersebut (Tipe D1, D2, dan D3).



Gambar 4. Gambar Potongan masing-masing model struktur bangunan studi



Gambar 3. (a) Struktur 3 dimensi; (b) tampak; (c) denah struktur bangunan dasar (A0)

6. Studi Kasus

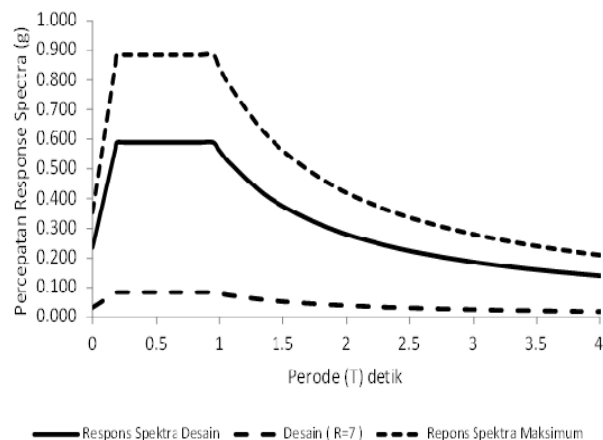
6.1 Deskripsi model

Model studi yang digunakan merupakan struktur bangunan perkantoran tipikal 20 lantai dengan tinggi tipikal 3,5 meter. Struktur bangunan ini dirancang dengan sistem ganda yang merupakan gabungan antara sistem dinding geser dan sistem rangka beton bertulang. Denah struktur bangunan berbentuk persegi panjang yang memiliki bentang antar kolom sebesar 5 m, pada arah memanjang struktur bangunan terdiri dari 7 bentang dan pada arah memendek struktur bangunan terdiri dari 5 bentang. Dinding geser struktur bangunan terletak dikeempat sisi struktur bangunan dibagian tengah bentang. Model studi ini direncanakan terletak di Jakarta dengan kondisi tanah lunak. Denah dan tampak struktur bangunan dasar (A0) dilihat pada **Gambar 3**.

Pada studi ini, struktur bangunan yang digunakan dalam variable pembahasan sebanyak 9 (sembilan) model struktur gedung dengan deskripsi untuk masing-masing model struktur bangunan diberikan pada **Gambar 4**. Pemodelan struktur bangunan dengan ketidak-beraturan memiliki denah yang selalu sama dengan struktur bangunan dasar (A0).

Ukuran balok yang digunakan dalam studi kasus ini adalah seesar 600 mm x 300 mm untuk semua model dan ukuran kolom yang digunakan sebesar 900 mm x 900 mm untuk semua model. Tebal dinding geser yang digunakan sebesar 350 mm.

Standard yang digunakan sebagai acuan desain elemen beton bertulang, penentuan beban gempa dan gravitasi adalah SNI 03-2847 2002, SNI 03- 1726 2012, dan SNI 1727-1989. Material utama struktur bangunan berupa beton bertulang dengan mutu beton $f'_c = 40$ MPa untuk balok, kolom, dan dinding geser. Mutu baja tulangan dengan $f_y = 400$ MPa dan $f_u = 600$ MPa.



Gambar 5. Respons Spektra Jakarta dengan situs tanah lunak pada keadaan maksimum, desain, dan reduksi

6.2 Perencanaan elemen struktur

Didalam perencanaan struktur ini, untuk pembebanan gravitasi digunakan peraturan pembebanan untuk rumah dan gedung SNI 1727-1989, sedangkan untuk pembebanan gempa mengacu pada SNI 03-1726-2012 dan prosedur perancangan struktur bangunan ini didasarkan dari prosedur RSA (*Respons Spektra Analysis*). Pada prosedur ini digunakan respons spektra Jakarta kelas situs SE (**Gambar 5**). Berdasarkan sistem strukturnya, struktur bangunan ini merupakan sistem ganda yang merupakan kombinasi antara dinding geser dan sistem rangka beton bertulang yang dirancang berdasarkan SNI 03-1726-2012 dan SNI 03-2847-2002. Struktur bangunan tersebut dirancang dengan nilai reduksi (R) sebesar 7, nilai perbesaran defleksi (Cd) sebesar 5,5 dan nilai kuat lebih (Ω_0) sebesar 2,5.

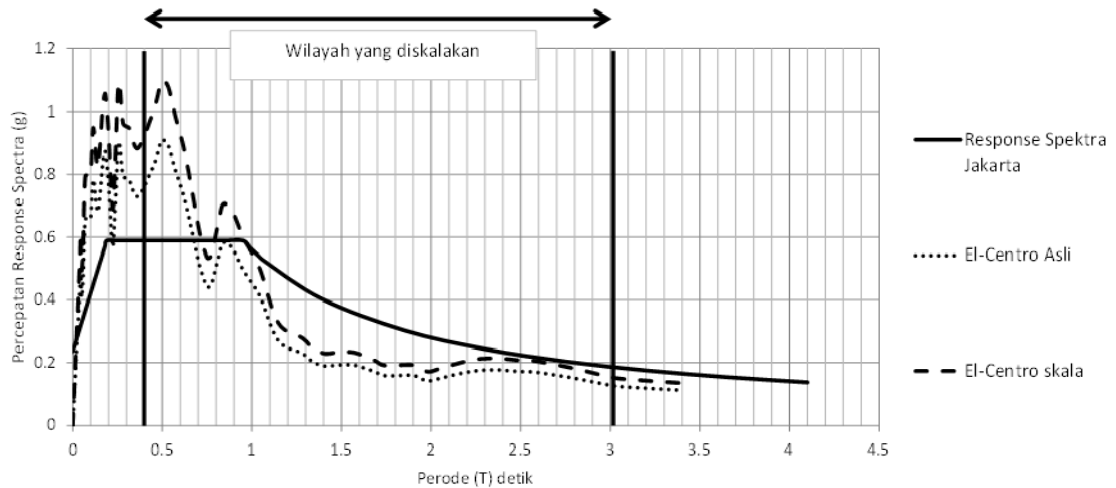
Perencanaan penulangan elemen struktur dan detailing struktur bangunan disesuaikan dengan peraturan di Indonesia yaitu SNI 03-2847-2002 yang diselaraskan dengan SNI 03-1726-2012.

Pada tahap analisis *performance based design* digunakan prosedur *Non-linier time history analysis (NL-THA)* dengan satu riwayat gempa yang memiliki frekuensi domain yang lengkap (*wide domain frequency*) yaitu *El-Centro ground motion* dengan PGA sebesar 0,313 g yang didapatkan dari PEER Berkeley (2000).

Riwayat gempa tersebut diskalakan terlebih dahulu dengan *Respons Spectra* Jakarta (MCER) dengan kondisi tanah lunak untuk merepresentasikan keadaan gempa di wilayah studi. Proses penskalaan dilakukan dengan menggunakan rekomendasi dari SNI 03-1726-2012, interval untuk penskalaan respons spektra diambil mulai dari 0,2T sampai 1,5T, dimana T adalah periode bentuk ragam pertama. Batas atas digunakan koefisien pengali sebesar 1,5 adalah untuk memprediksi penambahan periode natural struktur bangunan saat terjadi plastifikasi, dengan meningkatnya plastifikasi meningkatkan pula redaman histeretik struktur bangunan yang menyebabkan meningkatnya periode struktur bangunan. Sedangkan menggunakan koefisien batas bawah sebesar 0,2 T adalah untuk mengakomodasi perilaku struktur bangunan pada ragam getar tingginya. Periode struktur bangunan desain sebesar **2,1 detik** maka rentang periode natural yang diskalakan pada respons spectra dari 0,4 detik sampai 3 detik. Dari hasil perhitungan didapatkan skala yang digunakan untuk menyamakan besaran ground motion, sebesar 1,1 yang hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 6**.

7. Analisis Nonlinear Struktur

Pemodelan properti nonlinear elemen struktur bangunan dilakukan berdasarkan perencanaan tulangan terpasang



Gambar 6. Penskalaan respons spectra El-Centro terhadap response spectra Jakarta

yang sudah dilakukan pada tahap sebelumnya. Pemodelan ini meliputi: a. Sendi plastis M3 balok, b. Sendi plastis P-M-M Kolom dan c. Pemodelan material pier pada elemen penyusun dinding. Untuk analisis evaluasi kinerja elemen digunakan batasan-batasan tidak melebihi FEMA 356. Properti material nonlinear tersebut dimodelkan dengan menggunakan bantuan piranti lunak CSI Perform 3D, dengan panduan Perform 3D dari Prof. Powell (2012).

Analisis evaluasi kinerja dengan menggunakan CSI Perform 3D (2012) meliputi *assessment* dengan menggunakan metoda *static push-over* dan *NL-THA*. Untuk analisis *NL-THA* menggunakan eksitasi gempa kuat El-Centro 1940 yang diskalakan terhadap respons spektra Jakarta dengan kelas situs tanah lunak (MCER). Parameter yang dibahas pada analisis ini dilihat dari deformasi lateral struktur baik dengan *push-over* maupun *NL-THA*, analisis kurva gaya geser dasar vs deformasi hasil analisis analisis *push-over*, Analisis gaya geser dasar struktur baik dengan *push-over* maupun *NL-THA*, level kinerja plastifikasi struktur baik elemen batang meliputi kolom dan balok serta elemen *fiber* yang merupakan elemen penyusun utama dinding geser.

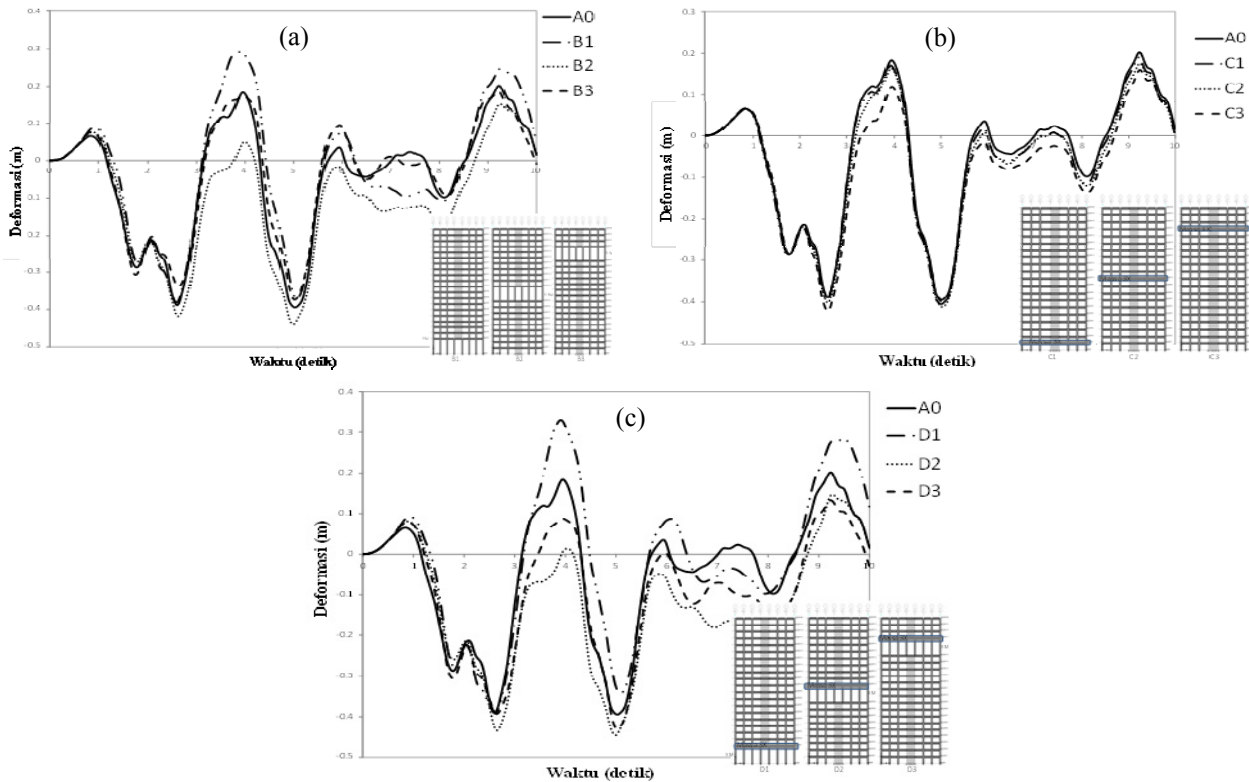
7.1 Deformasi *non-linear time history analysis*

Salah satu hasil dari analisis *NL-THA* adalah deformasi berdasarkan riwayat waktu dari *ground-motion* gempa. Dari hasil defromasi *NL-THA*, Diantara tipe struktur bangunan dengan ketidak-beraturan tingkat lunak (Tipe B) struktur bangunan Tipe B2 memiliki deformasi paling besar dibandingkan yang lain, yaitu sebesar 0,438 m kemudian tipe struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa (tipe C), struktur bangunan tipe C3 memiliki deformasi paling besar dibandingkan yang lain, yaitu sebesar 0,426 m, dan yang terakhir adalah tipe struktur bangunan dengan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa (tipe D), struktur bangunan tipe D2 memiliki deformasi paling besar dibandingkan yang lain, yaitu sebesar

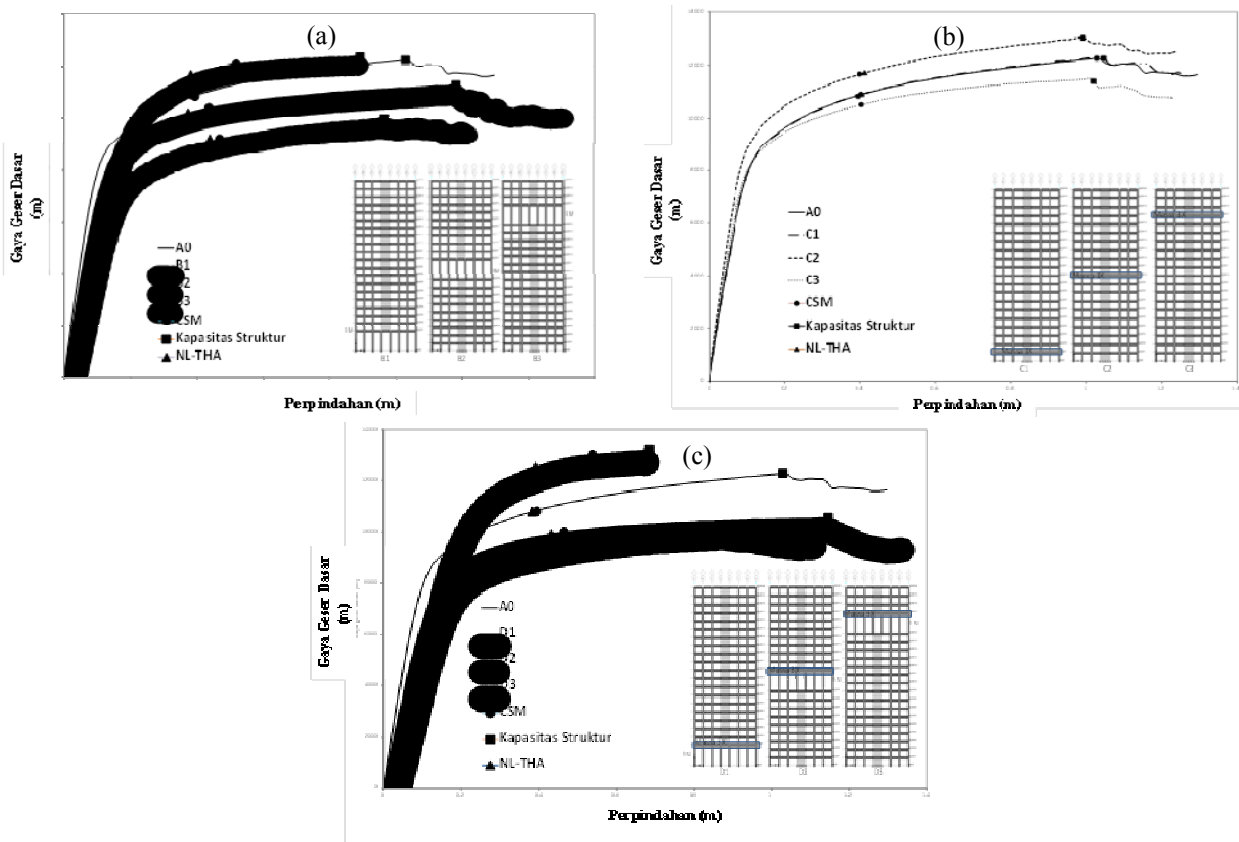
0,440 m. Dari hasil analisis deformasi maksimum *NL-THA*, struktur bangunan yang memiliki ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak akan memberikan hasil performa dari deformasi yang paling besar, Selain itu, bentuk kurva yang sudah tidak berbentuk sinusoidal menunjukkan sudah terjadi kerusakan pada elemen struktur minimal pada level *immediate Occupancy (IO)*, hal ini terjadi akibat adanya penyusunan ulang matrik kekakuan struktur akibat terjadinya sendi plastis. Hasil dari *NL-THA* dapat dilihat pada **Gambar 7**.

7.2 Analisis kurva *push-over*

Dari kurva hasil *Push-over Analysis* yaitu Gaya geser dasar (*base shear*) vs. perpindahan atap, menggambarkan perilaku struktur pada saat elastik dan inelastik, selain itu pada kurva ini pula dapat dilihat dua buah keadaan yaitu *demand* saat struktur bangunan tersebut dikenai beban gempa rencana MCER dan keadaan *capacity*, yaitu kemampuan kekuatan maksimum struktur bangunan dalam menerima beban gempa rencana MCER. Perbandingan antara nilai *capacity* dan *demand* menjadi nilai *safety factor* struktur bangunan tersebut terhadap kemungkinan beban gempa yang lebih besar dibanding gempa rencana MCER. Pada **Gambar 8** dapat dilihat bahwa diantara struktur bangunan dengan ketidak-beraturan vertikal kekakuan tingkat lunak yang memiliki nilai *safety factor* terendah adalah ketidak-beraturan pada lantai 1 (B1) dengan nilai 1,71, pada struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa memiliki nilai *safety factor* yang cenderung sama untuk setiap tipe dengan nilai rata-rata sebesar 2,5, sedangkan pada struktur bangunan dengan ketidak-beraturan kombinasi kekakuan tingkat lunak dan massa yang memiliki *safety factor* paling kecil adalah ketidak-beraturan pada lantai 1 (D1) yaitu sebesar 1,32, sehingga disimpulkan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa pada lantai 1 (D1) adalah kondisi struktur bangunan yang paling berbahaya dengan nilai *safety factor* sebesar 1,32.



Gambar 7. (a) Perbandingan deformasi *NL-THA* antar struktur dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak (b) struktur dengan ketidak-beraturan massa (c) kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa



Gambar 8. (a) Perbandingan kurva kapasitas antar struktur bangunan dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak (tipe B); (b) Gedung dengan ketidak-beraturan massa (tipe C); (c) kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa (tipe D)

7.3 Analisis deformasi inelastik model studi struktur bangunan gedung

Berdasarkan **Gambar 9** mengacu pada hasil *push-over* maka dilihat dari sisi deformasi struktur bangunan dengan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak lantai 1 (B1) sebesar 0,522 m dan struktur bangunan dengan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa lantai 1 (D1) sebesar 0,549 m memiliki hasil paling berbahaya karena melebihi batas deformasi izin, yaitu perkalian faktor pembesaran ($C_d = 5,5$) terhadap perpindahan elastiknya, untuk struktur bangunan tipe B1 memiliki batas izin sebesar 0,433 m dan tipe D1 sebesar 0,487 m. Sedangkan jika analisis kinerja struktur bangunan menggunakan *NL-THA*, memberikan nilai deformasi yang hampir sama baik untuk struktur bangunan dasar (A0) maupun struktur bangunan dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak, massa, dan kombinasinya memiliki nilai rata-rata sebesar 0,410 m. Hal ini menunjukkan adanya *over-estimated analysis* pada metoda *push-over* untuk ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak yang terjadi pada lantai satu yang dapat menjadi indikasi ketidak-beraturan tersebut memiliki tingkat resiko yang cukup besar. Hasil *NL-THA* yang merupakan analisis yang lebih akurat perlu dijadikan bahan pertimbangan didalam menentukan akurasi performa struktur bangunan tersebut untuk mendapatkan hasil yang optimum.

Berdasarkan **Gambar 10**, Jika dilihat dari *drift ratio* antar lantai keseluruhan struktur bangunan baik dengan menggunakan metoda *push-over* maupun *NL-THA* kondisi struktur bangunan tersebut masih memenuhi batas maksimum *drift* untuk struktur bangunan perkantoran yaitu sebesar 2%. Selain itu pada struktur bangunan yang mengalami ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak berlebihan terdapat loncatan *inter-story drift* yang besar dengan nilai drift pada struktur tipe B1 sebesar 1,55% dengan metoda *push-over* dan 0,85% dengan *NL-THA*, serta pada struktur tipe D1 sebesar 1,70% dengan metoda *push-over* dan 1,08% dengan *NL-THA*.

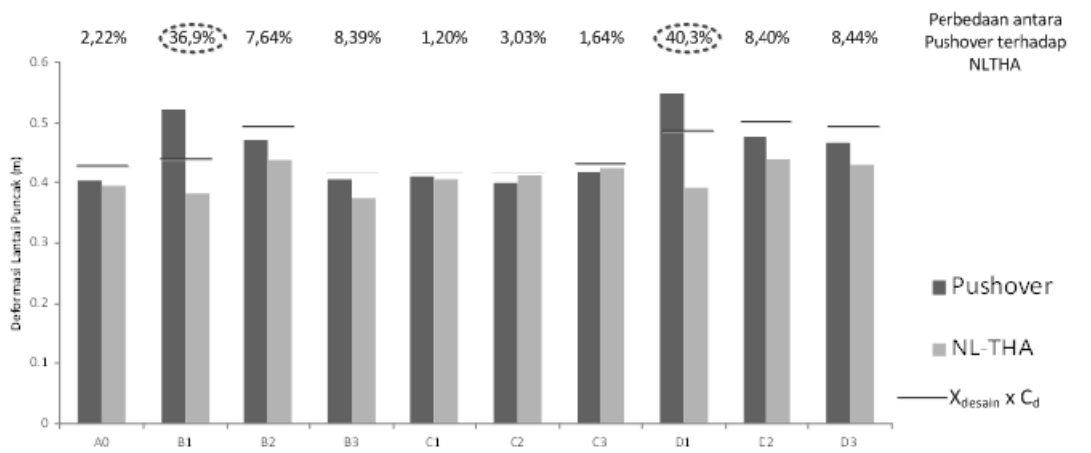
7.4 Analisis gaya geser dasar model studi struktur bangunan gedung

Berdasarkan **Gambar 11**, terlihat struktur bangunan yang mempunyai ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak (Tipe B) akan menghasilkan gaya geser yang menyimpang dari struktur bangunan dasar (A0) baik pada analisis *static push-over* maupun *NL-THA*. Hal ini diakibatkan adanya diskontinu dinding geser pada lantai yang lemah tersebut menyebabkan adanya anomali nilai gaya geser sehingga memberi distraksi terhadap gaya geser lantai lainnya. Untuk struktur bangunan tipe B memiliki rata-rata galat gaya geser dasar terhadap struktur bangunan model reguler sebesar 19,5%.

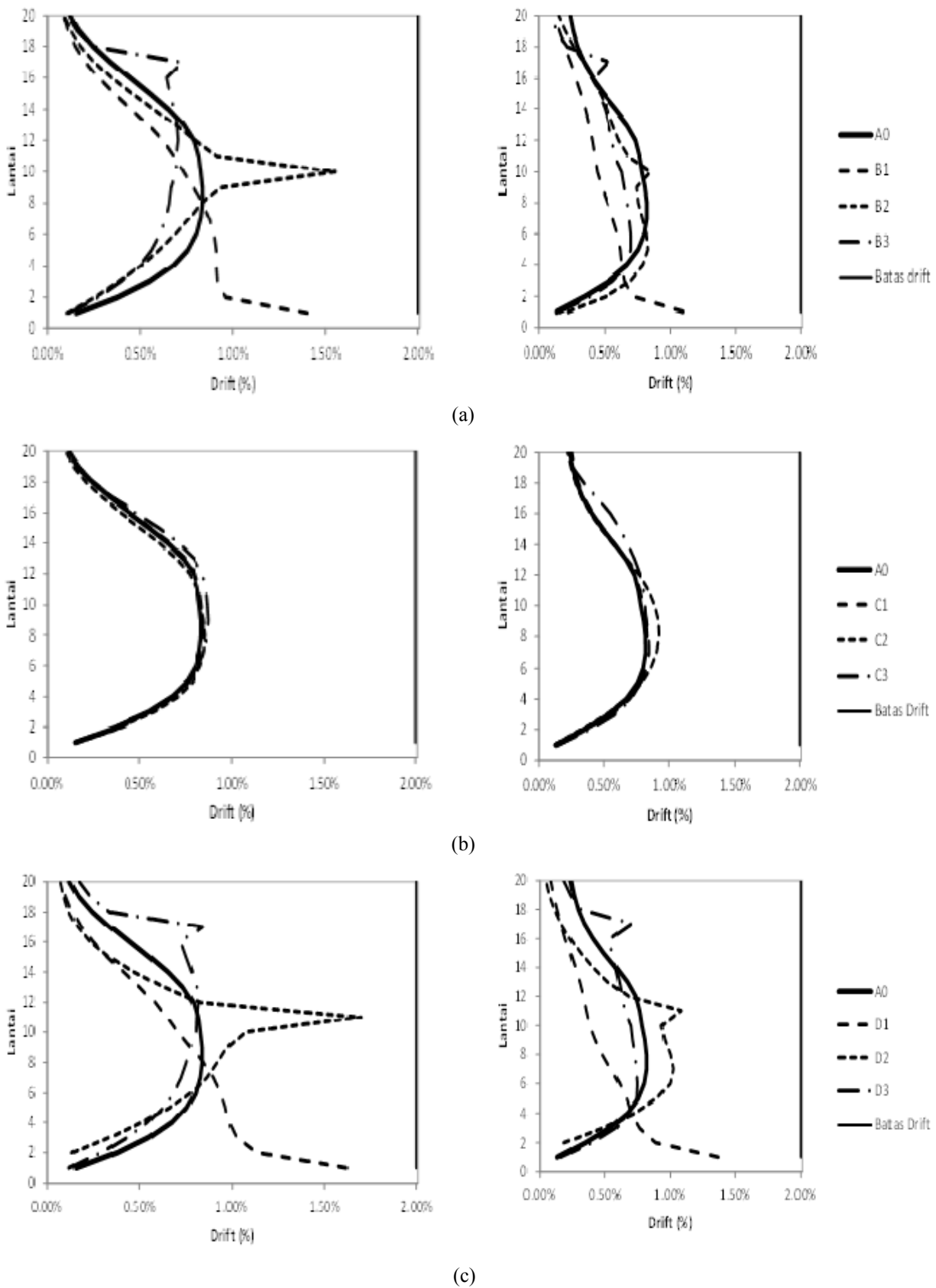
Untuk struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa, terlihat hasil gaya geser lantai struktur bangunan tipe C terhadap struktur bangunan dasar (A0) sangat berimpit, hal ini mengindikasikan bahwa ketidak-beraturan massa dengan penambahan massa sebesar 3 kali dari berat lantai tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap gaya geser struktur bangunan. Untuk struktur bangunan tipe B memiliki rata-rata galat gaya geser dasar terhadap bangunan model awal sebesar 9,43 %.

Untuk struktur bangunan dengan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa memiliki pola yang mirip dengan struktur bangunan tipe B, struktur bangunan tipe D memiliki rata-rata galat gaya geser dasar terhadap struktur bangunan dasar (A0) sebesar 18,5 %, hal ini juga dapat menjadi indikasi bahwa pada struktur bangunan tipe D yang mendominasi perilaku struktur dilihat dari sudut pandang gaya geser adalah jenis struktur bangunan dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak.

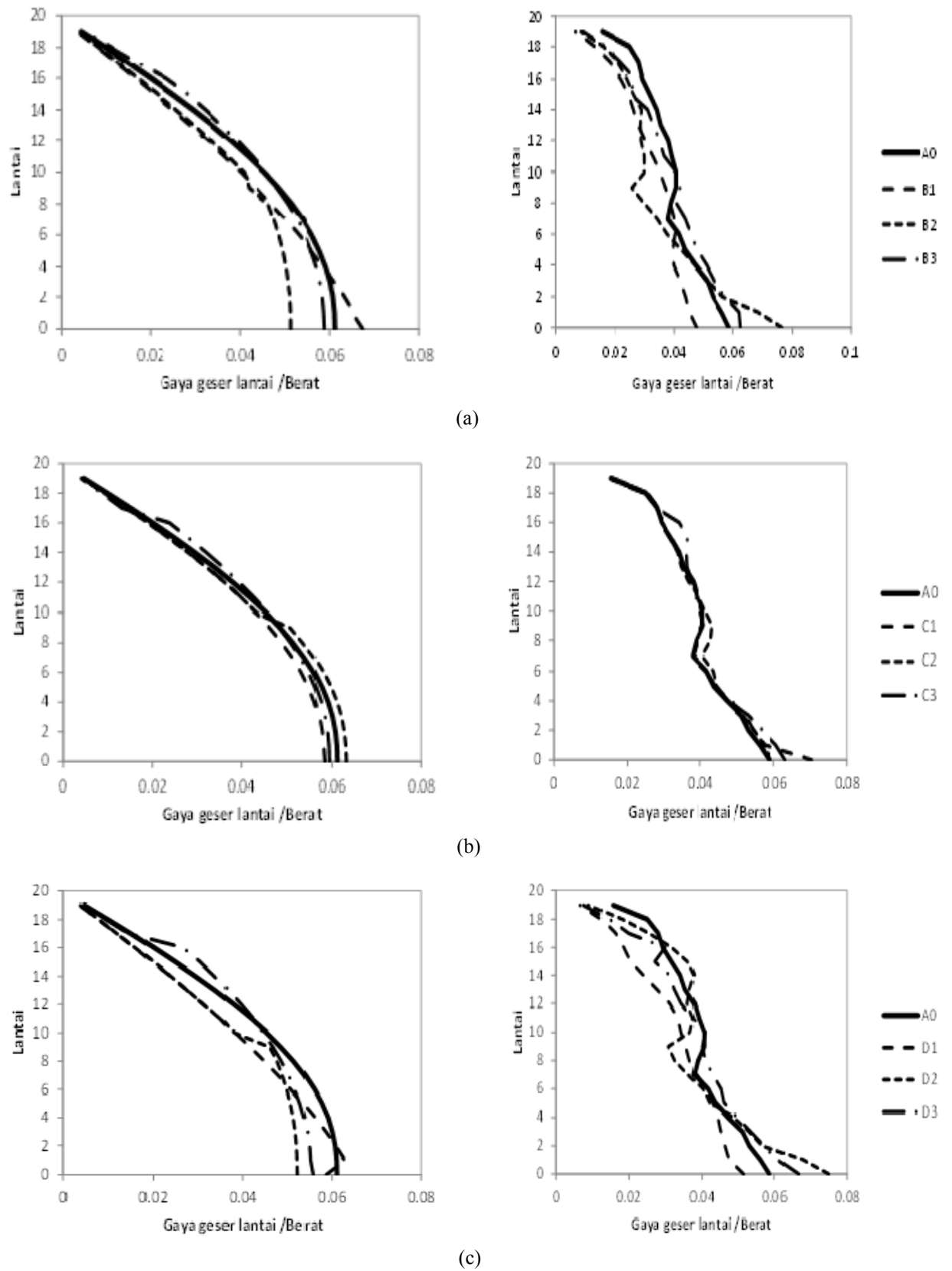
Secara umum anomali gaya geser dasar yang terjadi akibat ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa masih dalam batas yang dapat diterima karena struktur bangunan masih memberikan performa yang sesuai dengan ketentuan dalam SNI 1726-2012.



Gambar 9. Perbandingan deformasi antar struktur bangunan dan antar metoda analisis yang digunakan



Gambar 10. Perbandingan *interstory drift* (a) struktur bangunan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (tipe B) ; (b) Ketidakberaturan massa (tipe C); (c) Kombinasi ketidakberaturan tingkat lunak dan massa (tipe D) terhadap struktur bangunan dasar (A0). (Kiri: *Push-over Analysis* dan Kanan: *NL-THA*)

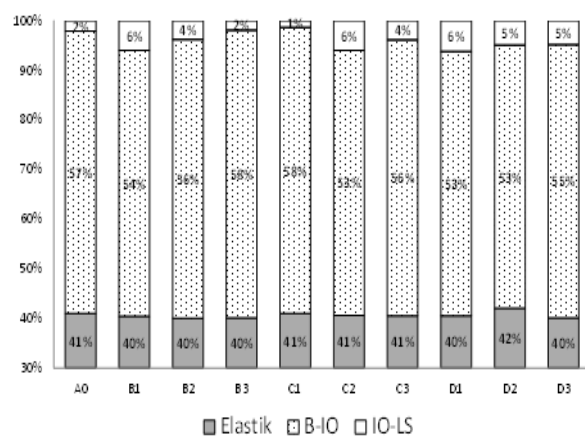


Gambar 11. Perbandingan *base shear* (a) struktur bangunan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (tipe B); (b) Ketidakberaturan massa (tipe C); (c) Kombinasi ketidakberaturan tingkat lunak dan massa (tipe D) terhadap bangunan dasar (A0). (Kiri: *Push-over* dan Kanan: *NL-THA*)

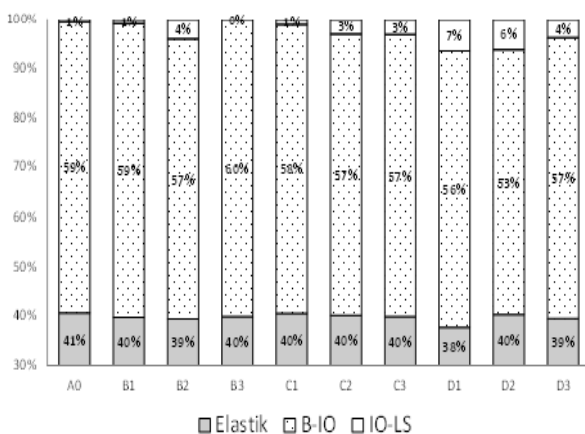
7.5 Level kinerja dan plastifikasi struktur

Analisis level kinerja dan plastifikasi struktur dilakukan pada elemen-elemen struktur utama penyusun bangunan tersebut baik balok, kolom, dan dinding geser. Plastifikasi elemen balok dan kolom bisa dilihat dari level kinerja yang terjadi berdasarkan rotasi sendi plastis. Sedangkan untuk dinding geser menggunakan elemen *fiber*, untuk melihat level kinerjanya bisa dengan menganalisis *strain gage* yang dipasang di elemen *fiber* tersebut.

Berdasarkan kriteria penerimaan elemen pada Gambar 1 didapat level kinerja struktur bangunan perkantoran (kategori resiko II) adalah *Life Safety* (LS) sedangkan ekspektasi maksimum berdasarkan FEMA 303 adalah *Collapse Prevention* (CP) sehingga dapat disimpulkan bahwa model studi sudah memenuhi standar tersebut. Struktur bangunan yang terdapat ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak berlebihan memiliki level kerusakan paling besar yaitu *Life Safety* (LS).



(a)



(b)

Gambar 12. Perbandingan plastifikasi struktur (a) performance point pada static push-over analysis dan (b) deformasi maksimum pada NL-THA

Pada Gambar 12 ditampilkan perbandingan plastifikasi struktur antara *push-over analysis* dan *NL-THA* untuk setiap jenis konfigurasi geometrik antar struktur bangunan. Hasil plastifikasi struktur dengan metode *static push-over analysis* memberikan hasil yang lebih konservatif dibandingkan hasil *NL-THA*. Analisis *push-over* menyebabkan suatu elemen struktur bangunan dibebani gaya lateral *incremental* pada satu arah yang ditinjau, sehingga plastifikasi pada elemen struktur cenderung menjadi lebih besar akibat energi potensial tidak pernah berkurang. Pada analisis dengan metoda *NL-THA* eksitasi *ground-motion* yang bekerja pada struktur merupakan gerakan gempa bolak-balik sehingga gaya yang terjadi pada elemen struktur lebih tersebar dan tidak dipusatkan pada elemen-elemen tertentu akibatnya energi potensial pada struktur menjadi lebih kecil dibandingkan dengan energi potensial pada analisis *push-over*.

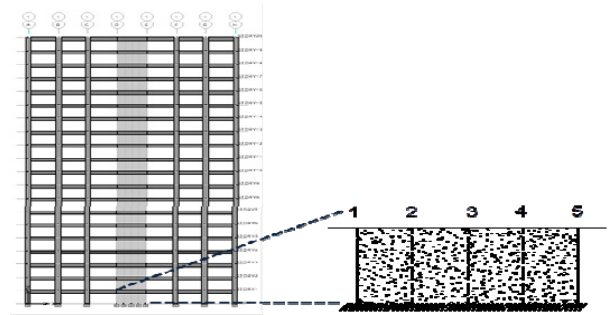
Struktur bangunan dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak (Tipe B) pada lantai bawah (B1) memberikan tingkat plastifikasi yang lebih besar dibandingkan dengan struktur bangunan ketidak-beraturan pada lantai atas (B2 & B3), pada struktur bangunan B1 pembentukan sendi plastis IO sebesar 54% dan LS sebesar 6% sedangkan pada B2 pembentukan sendi plastis IO sebesar 58% dan LS sebesar 4% dan B3 pembentukan sendi plastis IO sebesar 54% dan LS sebesar 2%. Hal ini menunjukkan bahwa ketidak-beraturan pada lantai dasar memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi dibandingkan ketidakberaturan pada lantai-lantai di atasnya. Letak plastifikasi struktur bangunan B1 terpusat pada elemen-elemen disekitar lantai yang mengalami ketidakberaturan, hal ini diakibatkan adanya lantai yang memiliki ketinggian besar mencapai 7 m menyebabkan terjadinya sedikit perputaran elemen pada kolom akan menjadikan perputaran yang besar pada balok, kelelahan balok terbesar terjadi pada lantai satu dibagian balok yang merangkai dinding geser sebesar **0,0028** sudah mencapai *life safety* (LS). Akibat rotasi yang berlebihan maka kelelahan prematur terbentuk pada elemen-elemen balok disekitar lantai tersebut. Hal yang sama terjadi pada struktur bangunan B2, plastifikasi banyak terjadi pada lantai 9-11 atau disekitar lantai dengan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak, akan tetapi berbeda halnya dengan struktur bangunan B3, pola plastifikasi yang terjadi mirip dengan model struktur reguler (A0) disekitar lantai 7 sampai 10.

Struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa pada lantai-lantai atas (C2 & C3) memiliki tingkat plastifikasi yang lebih besar dibandingkan dengan ketidak-beraturan pada lantai bawah (C1). Pada struktur bangunan C1 pembentukan sendi plastis IO sebesar 58% dan LS sebesar 1% sedangkan pada C2 pembentukan sendi plastis IO sebesar 53% dan LS sebesar 6% dan C3 pembentukan sendi plastis IO

sebesar 56% dan LS sebesar 4%. Hal ini menunjukkan tingkat kerentanan struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa dilantai atas lebih tinggi dibandingkan di lantai bawah. Hal ini diakibatkan keberadaan massa yang besar diatas struktur bangunan menyebabkan meningkatnya efek P- Δ , sehingga ada gaya tambahan yang besar bekerja pada struktur bangunan. Letak plastifikasi struktur bangunan tipe C1, C2, dan C3 mirip dengan model struktur reguler pada lantai 7 sampai 10, hal ini menunjukkan ketidak-beraturan massa tidak mengubah perilaku struktur secara signifikan.

Struktur bangunan dengan kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa yang terjadi pada lantai bawah (D1) lebih besar dibandingkan yang terjadi diatas (D2 & D3) Pada struktur bangunan D1 pembentukan sendi plastis IO sebesar 53% dan LS sebesar 6% sedangkan pada D2 pembentukan sendi plastis IO sebesar 53% dan LS sebesar 5% dan D3 pembentukan sendi plastis IO sebesar 53% dan LS sebesar 5%, pola ini menunjukkan bahwa ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak menyumbangkan perilaku yang signifikan dibandingkan ketidak-beraturan massa. Letak plastifikasi tipe struktur bangunan D serupa dengan tipe struktur bangunan B yang memeperkuat analisis bahwa ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak memberikan pengaruh perilaku plastifikasi yang signifikan.

Perilaku plastifikasi pada dinding geser dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan Tabel 2, pada umumnya tulangan yang terdapat pada daerah *boundary element* mengalami kelelahan. Hal ini dapat dilihat pada *strain gage* no 1 dan 5, nilai tegangan yang terjadi sudah melebihi batas lelehnya dan kelelahan tidak terjadi pada starin gage di no 2 dan 4 hal ini mengindikasikan kelelahan hanya terjadi pada daerah *boundary element*. Pada struktur bangunan tipe B1 dan D1 terjadi fraktur pada beton di sisi dinding geser yang mengalami tekan, hal ini terjadi karena adanya diskontinu dinding geser pada lantai 1. Adanya keadaan diskontinu ini menyebabkan rotasi yang besar pada daerah dinding geser lantai 2, sehingga elemen-elemen penyusun dinding geser tersebut mengalami kegagalan pada saat *performance point*. Keberadaan diskontinu dinding geser perlu diberikan perhatian secara khusus terutama dari penulangan didaerah diskontinunya.



Gambar 13. Sketsa potongan dinding geser

8. Kesimpulan

- 1) Ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak yang terjadi pada lantai bawah (B1) memberikan respon yang paling menyimpang jika dibandingkan terhadap struktur bangunan dasar (A0) serta memiliki akurasi yang paling buruk jika dilakukan perbandingan antara metode *push-over* terhadap *NL-THA*, ketidak-beraturan pada lantai bawah (B1) memiliki nilai safety paling rendah jika dibandingkan ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak pada lantai diatas (B2 dan B3)
- 2) Ketidak-beraturan massa pada lantai bawah, lantai tengah maupun lantai atas struktur bangunan gedung tidak memberikan pengaruh signifikan pada respon struktur meskipun massa lantai objektif dinaikan 3 kali.
- 3) Kombinasi ketidak-beraturan kekakuan tingkat lunak dan massa pada lantai satu (D1) memberikan respon yang paling buruk dibandingkan terhadap semua struktur studi kasus. Keadaan ini menyebabkan perlu ada perhatian khusus pada proses desain jika terjadi kedua jenis ketidak-beraturan dalam waktu yang bersamaan.
- 4) Analisis kinerja struktur menggunakan analisis *NL-THA*, memberikan nilai deformasi lateral yang hampir sama baik untuk struktur bangunan irregular maupun struktur bangunan regular (bangunan dasar). Meskipun demikian, perbedaan respon struktur dapat berbeda secara signifikan pada respon elemen strukturnya.

Tabel 2. Nilai regangan dan tegangan elemen *fiber* pada dinding geser

Tipe	Lantai	Regangan Strain Gage					Tegangan Elemen (MPa)				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
A0	1	-0.0014	-0.0004	0.0005	0.0014	0.0024	-36.28	-12.56	100.00	280.00	480.00
B1	2	-0.0042	-0.00278	-0.0007	0.0014	0.0037	-24.71	-36.27	-21.42	280.00	480.00
B2	1	-0.0011	-0.0006	0.0002	0.0008	0.0015	-31.22	-18.57	40.00	160.00	300.00
B3	1	-0.0012	-0.0004	0.0003	0.0011	0.0021	-33.15	-12.56	60.00	220.00	420.00
C1	1	-0.0015	-0.0008	0.0003	0.0014	0.0024	-37.48	-24.14	60.00	280.00	480.00
C2	1	-0.0015	-0.0005	0.0003	0.0016	0.0027	-37.48	-15.60	60.00	320.00	540.00
C3	1	-0.0015	-0.0005	0.0003	0.0014	0.0024	-37.48	-15.60	60.00	280.00	480.00
D1	2	-0.0053	-0.00373	-0.0013	0.0011	0.0037	-18.14	-28.30	-34.84	220.00	480.00
D2	1	-0.0013	-0.0005	0.0003	0.0012	0.0021	-34.84	-15.60	60.00	240.00	420.00
D3	17	0.0022	0.0016	0.0008	-0.0001	0.0013	440.00	320.00	160.00	-3.16	260.00

- 5) Berdasarkan hasil studi, ada beberapa penjelasan pendesainan struktur bangunan studi kasus untuk struktur bangunan dengan ketidakberaturan kekakuan tingkat lunak (tipe B) dan kombinasi kekakuan tingkat lunak dan massa (tipe D) desain SNI 03 1726 2012 dan SNI 03 2847 2002 sudah memenuhi syarat, hanya saja untuk meningkatkan keamanan struktur bangunan khusus pada struktur tipe B1 dan D1, balok merangkai dinding geser pada lantai yang mengalami ketidak-beraturan perlu dikalikan nilai faktor kuat lebih ($\Omega_0=2,5$). Struktur bangunan dengan ketidak-beraturan massa (tipe C) desain desain SNI 03 1726 2012 dan SNI 03 2847 2002 sudah memenuhi syarat.

Daftar Pustaka

- ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Redwood City, California.
- Chopra, A.K, 2002, *Dynamic Structure Theory and Application to Earthquake Engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall
- CSI Perform-3D, 2012, *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures V.5.0.0*. California, USA: Computer and Science, Inc., S/N: C1FBFBY21526JER License owned by Prof. Bambang Budiono of ITB.
- Elnashai. 2001, *Advanced Inelastic Static (Push-Over) Analysis for Earthquake Applications*, Structural Engineering and Mechanics. London, 51-69.
- FEMA 273, 1997, *NEHRP Guidelines for The Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C.
- FEMA 356, 2000, *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C., USA: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA 303, *NEHRP Recommended Provision for Seismic Regulations for New Buildings and Others Structure*. Washington, D.C., USA: Federal Emergency Management Agency.
- Hall, J.F., 2006, *Problems Encountered from The Use (or Misuse) of Rayleigh Damping*, Stanford: John Wiley & Sons, Ltd, 525-545.
- PEER Berkeley, 2000, *Strong Motion Database*. California, USA: University of California.
- Powell, G., 2012, *Performance Based Design Using Nonlinear Analysis*. California, USA: Computer & Structures, Inc. Educational Services
- SNI 1726:2012, 2012, *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 2847:2013, 2002, *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.
- SNI 1727-1989, 1989, *Tata Cara Perencanaan Pembebanan untuk Rumah dan Gedung*. Jakarta, Indonesia: Badan Standardisasi Nasional.