

Evaluasi Kinerja Seismik Struktur Gedung Asimetris dengan Dinding Geser Nonparalel Sebagai Sistem Pengekangan Torsi

Bambang Budiono

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

Ricky Parulian Malau

Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesa 10, Bandung 40132, Indonesia
E-mail: ricky.pmalau@yahoo.com

Abstrak

Pertimbangan estetika dan arsitektural dalam perencanaan gedung seringkali mengarah pada dihasilkannya bentuk-bentuk ireguler yang kemudian menimbulkan permasalahan ketidakberaturan kinerja seismik bangunan. Oleh karenanya, diperlukan metode yang tepat, agar diperoleh desain yang memenuhi kriteria estetika dan kinerja seismik. Paper ini menganalisis gedung beton bertulang 10 lantai dengan denah monosimetris yang memiliki sisi-sisi perimeter nonparalel, dan memiliki ketidakberaturan torsi berlebihan sebagai dampak dari eksentrisitas struktur. Sebagai upaya menghasilkan ketahanan gempa, akan diajukan metode yang menerapkan konsep-konsep pengekangan torsi, yang mana kekakuan dan kapasitas elemen-elemen struktur yang berada pada perimeter bangunan ditingkatkan hingga rasio $T_{1\theta}/T_{1x} < 60\%$. Pada implementasinya, akan digunakan dinding geser pada tiap-tiap perimeternya, termasuk pada sisi perimeter nonparalelnya, meskipun keberadaan dinding geser nonparalel juga dikategorikan sebagai ketidakberaturan. Namun pada paper ini, efektivitas metode yang diajukan tersebut akan diuji melalui evaluasi kinerja yang menggunakan analisis riwayat waktu nonlinier. Selain itu pada paper ini akan direkomendasikan prosedur desain yang paling efektif dan efisien untuk diterapkan. Hasil analisis membuktikan bahwa upaya torsional restraint yang diajukan mampu menghasilkan struktur yang memenuhi kriteria kinerja seismik yang dipersyaratkan. Selain itu paper ini merekomendasikan analisis kombinasi ragam sebagai prosedur desain alternatif bagi struktur tipe torsionally-restrained, yang lebih praktis dari prosedur numerik analisis riwayat waktu.

Kata-kata Kunci: Ketidakberaturan, Perilaku torsi berlebihan, Eksentrisitas struktur, Pengekangan torsi, Dinding geser nonparalel, Evaluasi kinerja seismik.

Abstract

Aesthetic and architerctural considerations in building design are often result in irregular-shaped buildings which lead to some seismic performance irregularity problems. Hence, there must be proper methods in order to producing the designs which will meet both aesthetic and seismic performance criterias. This paper analyze 10-storey RC buildings with monosymmetric plan and nonparallel perimeter, which have excessive torsional irregularity as the result of the structural eccentricities. As the effort to produce seismic-resistant structures, this paper proposes some methods which apply torsional restraint concepts, which the stiffness and capacity of perimeter elements are increased as its $T_{1\theta} / T_{1x} < 60\%$. As the implementation, shearwalls will be applied at each perimeter, including its nonparallel perimeter sides, although the existance of nonparallel shearwalls is also categorized as a structural irregularity. Whereas in this paper, the effectiveness of proposed methods, will be tested through seismic performance evaluation using nonlinear time history analysis. In addition, this paper will recommend the most effective and efficient design analysis procedure to be implemented. As the result, the proposed torsional restraint methods are able to produce the kind of structures which met any provised seismic-perfomance criterias. Moreover, this paper recommended the modal combination analysis, as alternative design procedure of torsionally-restrained structures, which is more practical than numerical procedure of linear time history analysis.

Keywords: Irregularity, Excessive torsional behaviour, Structural eccentricity, Torsional restraint, Nonparallel shearwall, Seismic performance evaluation. Struktur Departemen Teknik Sipil - ITB

1. Pendahuluan

Pertimbangan estetika dan arsitektural dalam perencanaan gedung seringkali mengarah pada dihasilkannya bentuk-bentuk ireguler yang kemudian menimbulkan permasalahan ketidakberaturan kinerja seismik bangunan. Dalam memenuhi sasaran dan kriteria estetika dan kinerja seismik tersebut, diperlukan metode yang tepat untuk menghasilkan desain yang efektif dan efisien. Pada paper ini, dianalisis model gedung beton bertulang 10 lantai dengan denah monosimetris (hanya memiliki satu sumbu simetris) yang memiliki sisi-sisi perimeter nonparalel dan memiliki ketidakberaturan torsi berlebihan sebagai dampak dari eksentrisitas struktur. Model gedung tersebut akan didesain dengan tiga karakteristik sistem pengekangan torsi yang berbeda, yakni: (1) *torsionally restrained* / TR; (2) *semi-torsionally restrained* / Semi-TR; dan (3) *torsionally unrestrained* / TU.

Secara spesifik, paper ini mensimulasikan perencanaan ketiga sistem struktur tersebut, masing-masing dengan prosedur desain *response spectrum analysis* (RSA) dan *linear time history analysis* (LTHA), yang kemudian dieksitasi beban gempa kuat dengan menggunakan metode *nonlinear time history analysis* (NLTHA). Respon nonlinier struktur hasil analisis tersebut kemudian dievaluasi menggunakan prinsip-prinsip evaluasi berbasis kinerja (*performance-based evaluation*). Hasil evaluasi tersebut digunakan untuk menentukan tipe struktur beserta prosedur desain yang paling efektif dan efisien untuk diaplikasikan pada struktur dengan ketidakberaturan yang bersangkutan.

2. Dasar Teoretis

2.1 Perilaku seismik struktur dengan ketidakberaturan torsi

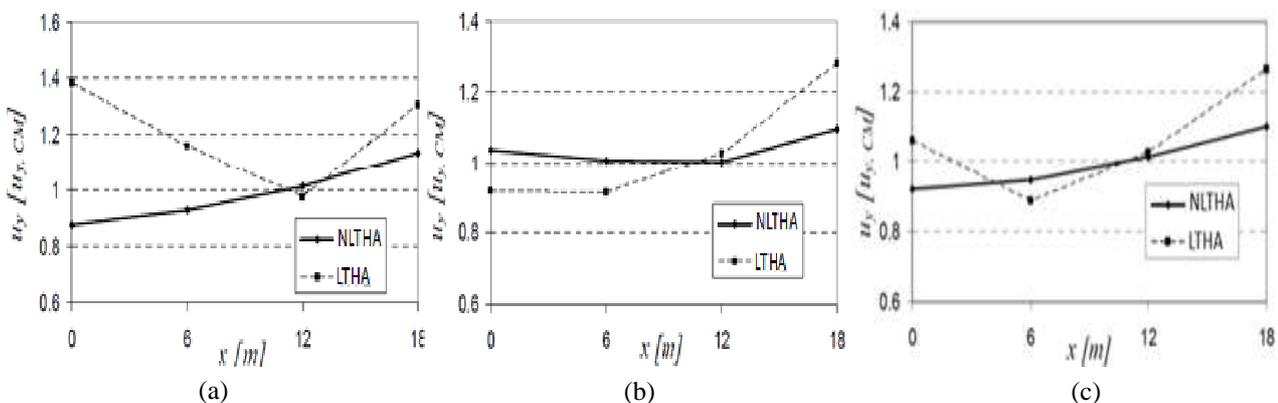
Fokus permasalahan struktur yang dikaji pada paper ini adalah ketidakberaturan torsi yang juga disertai adanya

sistem nonparalel (ASCE, 2010; BSN, 2012). Adapun ketidakberaturan torsi tersebut timbul akibat adanya eksentrisitas pusat kekakuan (*center of stiffness* / CM) terhadap pusat massa (*center of mass* / CM). Adanya perilaku tidak beraturan pada struktur tipe ini ditandai dengan tidak akuratnya prediksi respon torsional inelastik struktur, yang dilakukan pada domain analisis elastik, terhadap respon inelastik aktualnya. Hal tersebut dibuktikan pada penelitian yang dilakukan oleh Lucchini, et.al (2009), yang menganalisis struktur *open frame* asimetris. Komparasi respon prediktif dan aktual struktur dilakukan dengan meninjau perpindahan tiap-tiap *frame*-nya, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 1**.

Sedangkan pada penelitian yang dilakukan oleh Budiono dan Octaviansyah (2013) telah dikaji beberapa model struktur *open frame* yang diklasifikasikan berdasarkan perilaku torsionalnya, yakni: (1) *symmetric-plan*; (2) *unsymmetric-plan torsion-stiff*; (3) *unsymmetric-plan torsion-flexible*; (4) *unsymmetric-plan similarly-stiff*. Keempat kategori tersebut diklasifikasikan berdasarkan periode ragam torsi struktur-nya. Evaluasi dilakukan dengan metode *modal pushover analysis* (MPA) yang berupa pendekatan analitis, dan dibandingkan dengan metode *nonlinear time history analysis* (NLTHA). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pada struktur *unsymmetric-plan similarly-stiff*, metode MPA menunjukkan ketidakakuratan yang sangat besar dalam konteks perpindahan inelastik struktur, yakni dengan kisaran 40% hingga 50% lebih kecil (*underestimate*) terhadap hasil NLTHA. Fenomena ini diakibatkan dominannya ragam getar torsional struktur, di mana rasio antara periode ragam pertama translasi terhadap torsionalnya cukup besar.

2.2 Mekanisme pengekangan torsi

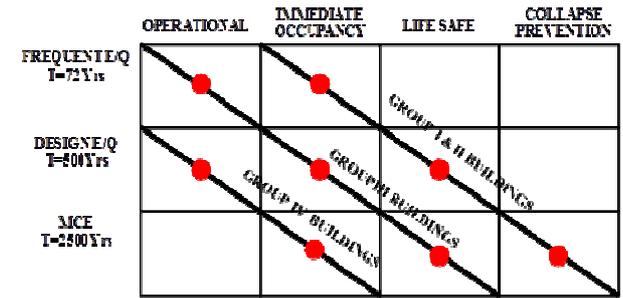
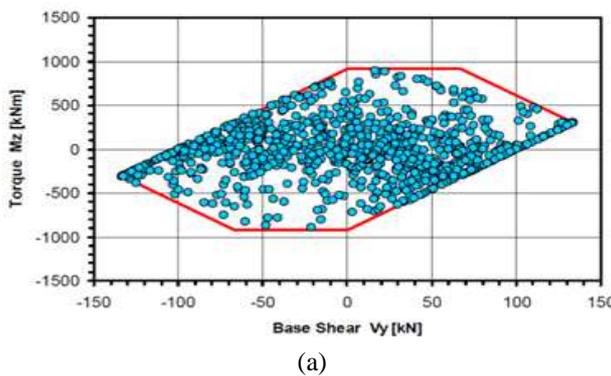
Studi yang dilakukan oleh Paulay (2000) mengenai fenomena torsional pada sistem struktur daktail mengantarkan pengetahuan bahwa respon torsional



Gambar 1. Envelope perpindahan struktur pada level denah relatif terhadap perpindahan pusat massa: a) gempa Campano Luccano (PGA 0.28 g); b) gempa Umbria Marche (PGA 0.51 g); dan c) gempa Montenegro (PGA 0.35 g)

struktur pascaelastik dapat ditangani dengan memahami mekanisme pemikulan torsi pada elemen-elemen strukturnya. Sistem struktur yang efektif dalam memikul torsi bangunan adalah sistem struktur yang berada pada perimeter bangunan. Sistem tersebut memikul torsi dalam bentuk *torsional-induced shear*. Respon torsi bangunan akan cenderung teramplifikasi ketika struktur mengalami plastifikasi. Plastifikasi maksimum akan terjadi pada sistem pemikul torsi yang paralel terhadap gaya geser gempa dominan. Apabila sistem pemikul torsi hanya direncanakan pada salah satu arah gempa rencana saja, maka ketika gempa dominan terjadi pada arah tersebut, maka seluruh sistem pemikul torsi akan mengalami plastifikasi dan struktur kehilangan resistensi torsinya. Sistem tersebut dikategorikan sebagai sistem *torsionally unrestrained* (TU). Sedangkan apabila sistem pemikul torsi didesain pada dua arah ortogonal gempa rencana, maka ketika gempa dominan terjadi pada salah satu arah, maka sistem pemikul torsi pada arah ortogonalnya tidak mengalami plastifikasi maksimum, dan masih mampu mengendalikan pergerakan torsi bangunan. Sistem tersebut dikategorikan sebagai sistem *torsionally-restrained* (TR).

Secara parametrik, kedua sifat pemikulan torsi tersebut memiliki perbedaan perilaku yang cukup signifikan. Paulay (2000) mengajukan suatu bentuk interaksi antara gaya geser dasar (*base shear*) dan gaya torsional dasar (*base torsion*) bangunan, yang disebut dengan terminologi *Base Shear-Torsion* (BST). Pada struktur TR, tipikal BST yang terjadi relatif lebih besar daripada struktur TU, yang tersebut disebabkan struktur TR mampu mengakomodasi pemikulan gaya torsi lebih besar dibandingkan struktur TU. Perbandingan BST struktur TR dan TU tersebut dibuktikan pada penelitian yang dilakukan oleh Ladjinovic dan Folic (2008), seperti yang ditampilkan pada **Gambar 2**.



Gambar 3. Ekspektasi kinerja struktur (FEMA 303/NEHRP 1997)

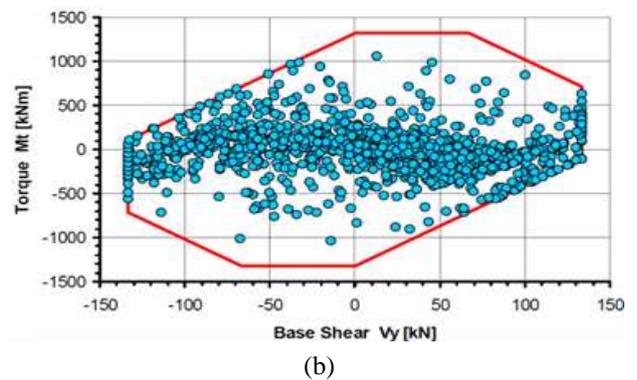
2.3 Evaluasi seismik berbasis kinerja

Evaluasi kinerja seismik dilakukan untuk mengamati respon inelastik struktur, serta menginterpretasikan dan menguji ketesesuaian respon tersebut terhadap ekspektasi perencanaan seismik yang berkaitan dengan fungsi operasional bangunan serta faktor kepentingannya. Kuantifikasi level kinerja struktur berdasarkan kriteria global diajukan pada dokumen ATC-40, dimana parameter yang digunakan berupa drift bangunan dan drift inelastiknya (**Tabel 1**). Sedangkan parameter kuantifikasi dengan kriteria lokal diajukan pada FEMA 356, di mana parameter yang digunakan berupa deformasi pada skala elemen. Dokumen FEMA 303/NEHRP 1997 merekomendasikan suatu bentuk assesment matrix terkait ekspektasi kinerja struktur terhadap resiko gempa dan faktor kepentingan bangunan, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 3**.

3. Metode Penelitian

3.1 Kerangka konseptual penelitian

Dengan mempertimbangkan seluruh dasar teoretis yang telah diuraikan sebelumnya, maka penelitian ini



Gambar 2. Perbandingan *base shear-torsion* (Ladjinovic dan Folic, 2008) a) model TU; dan b) model TR

Tabel 1. Level kinerja bangunan pada kriteria global berdasarkan ATC-40

Limit drift antarlantai	Immediate Occupancy	Damage Control	Life Safety	Structural Stability
Drift total maksimum	0.01	0.01-0.02	0.02	0.33 V_i/P_i
Drift inelastik maksimum	0.005	0.005-0.015	tidak ada batas	tidak ada batas

dieksekusi sesuai dengan kerangka konseptual yang ditampilkan pada Gambar 4. Penelitian ini mengkaji tiga tipe konfigurasi struktur yang representatif terhadap sifat pengekangan torsinya, yakni tipe TR, TU, serta tipe peralihan keduanya (semi-TR). Model struktur Semi-TR tersebut akan mewakili struktur tipe torsionally restrained (Paulay, 2000) dan torsion-lateral similarly stiff (Budiono dan Octaviansyah, 2013). Sedangkan untuk memperoleh kesimpulan terkait prosedur desain, maka untuk tiga tipe pengekangan torsi tersebut, masing-masing akan didesain dengan menggunakan prosedur analisis RSA dan LTHA. Dengan demikian, model yang digunakan berjumlah 6 model bangunan gedung.

3.2 Metode perencanaan konfigurasi struktur

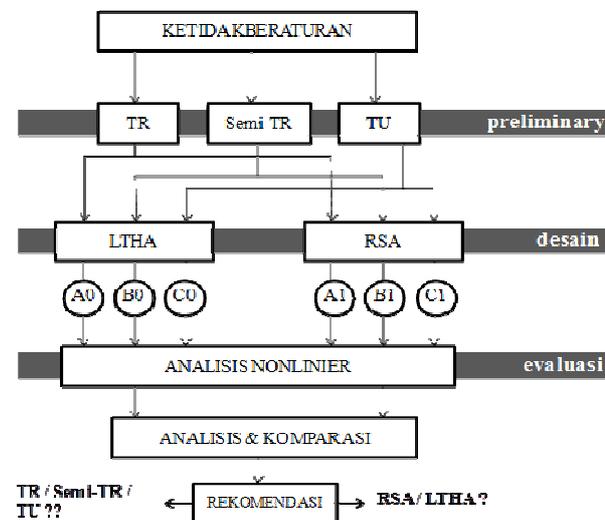
Berikut ini adalah metode-metode yang diajukan untuk merencanakan konfigurasi elemen struktur dalam menghasilkan struktur yang memiliki tipe pengekangan torsi TR, TU, dan Semi-TR:

a. Struktur tipe TR

Sistem yang difungsikan untuk memikul torsi berupa *dual-system* antara SRPMK dan dinding geser yang berada pada seluruh perimeter bangunan. Elemen balok dan kolom pada sistem ini didesain memiliki dimensi yang lebih besar dibanding elemen di interior bangunan, hingga rasio periode $T_{1\theta} / T_{1x}$ bernilai maksimum 60%.

b. Struktur tipe TU

Sistem yang difungsikan untuk memikul torsi berupa *dual-system* antara SRPMK dan dinding geser yang berada pada sisi-sisi perimeter dan interior gedung yang paralel terhadap sumbu gempa rencana. Elemen balok dan kolom pada sistem ini didesain memiliki dimensi yang lebih besar dibanding elemen di interior bangunan, hingga rasio periode $T_{1\theta} / T_{1x}$ bernilai minimum 80%.



Gambar 4. Kerangka konseptual penelitian

c. Struktur tipe Semi-TR

Sistem yang difungsikan untuk memikul torsi berupa *dual-system* antara SRPMK dan dinding geser yang berada pada seluruh perimeter bangunan. Seluruh elemen balok dan kolom pada sistem ini didesain memiliki dimensi yang sama karena difungsikan sama dalam memikul respon torsi dan translasi struktur. Rasio periode $T_{1\theta} / T_{1x}$ bernilai diantara 60% dan 80%.

4. Hipotesis

Mengacu pada dasar teoretis yang dikemukakan sebelumnya, maka dirumuskan hipotesis berikut ini: “Struktur dengan elemen-elemen perimeter yang didesain memiliki dimensi yang relatif besar dan kaku dibanding elemen interior lainnya, yang sedemikian rupa menghasilkan sifat struktur torsionally restrained/TR, mampu mereduksi secara efektif respon torsional inelastik yang terjadi ketika bangunan mengalami beban gempa kuat. Hal tersebut bertujuan untuk meningkatkan kekakuan dan kekuatan torsional struktur, serta melemahkan kekakuan dan kekuatan struktur pada arah translasional”.

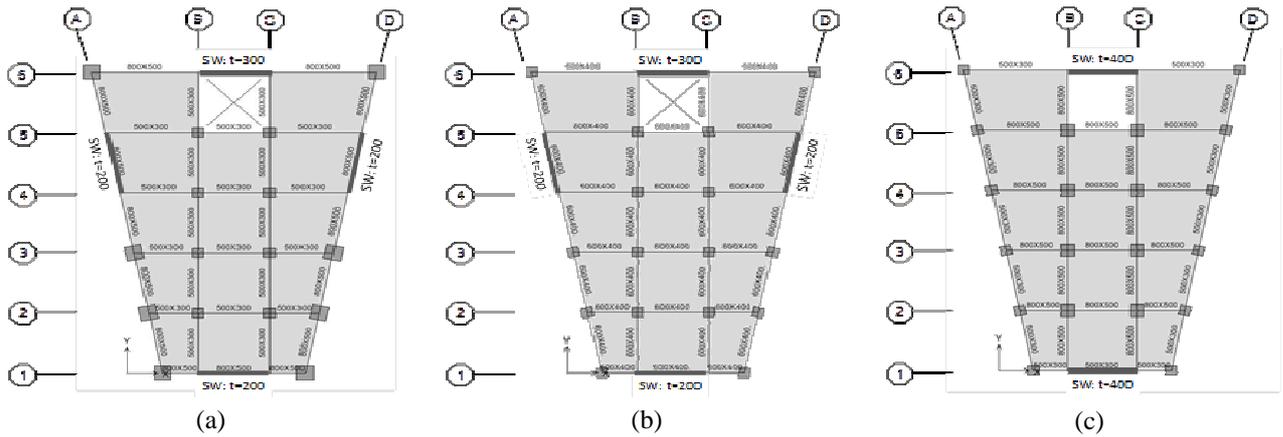
5. Studi Kasus

5.1 Deskripsi model studi

Model studi berupa gedung perkantoran hipotetikal 10 lantai, dengan elevasi lantai pertama 4 m, dan tinggi lantai tipikal berikutnya 3.5 m. Bentuk grid denah arsitektural model studi berbentuk *wedge (wedge-shaped building)*, dengan satu sumbu simetris dan asimetris terhadap sumbu lainnya. Pada arah X bangunan, terdapat 3 bentang yang besarnya bervariasi untuk tiap-tiap gridnya. Sedangkan pada arah Y, terdapat 5 bentang, yang masing-masing memiliki panjang 5 m. Grid A dan D merupakan grid yang nonparalel terhadap kedua sumbu utama gedung. Sedangkan grid-grid lainnya paralel dan saling ortogonal terhadap sumbu utama gedung.

Tabel 2. Dimensi elemen struktur model studi

Elemen Struktur		TR	Semi-TR	TU
Kolom perimeter	H mm	1200	800	800
	B mm	1200	800	800
Kolom interior	H mm	800	800	1000
	B mm	800	800	1000
Balok perimeter	H mm	800	600	500
	B mm	500	400	300
Balok induk	H mm	500	600	800
	B mm	300	400	500
Dinding X (Grid 1)	t mm	200	200	-00
Dinding X (Grid 6)	t mm	300	300	-00
Dinding NP (Grid A)	t mm	200	200	-
Dinding NP (Grid D)	t mm	200	200	-
Pelat	t mm	150	150	150



Gambar 5. Denah tipikal struktural: a) model TR; b) model Semi-TR; dan c) model TU

Adapun material utama bangunan berupa beton bertulang dengan mutu beton $f'c = 30$ MPa, dan mutu baja tulangan $f_y = 400$ MPa. Detail dimensi dan lokasi elemen struktur ditampilkan pada Tabel 2 dan Gambar 5. Struktur TR dan Semi-TR didesain memiliki dinding geser di keempat sisi perimeternya, termasuk pada sisi nonparalel. Sistem dinding geser tersebut merupakan komponen utama pemikul torsi yang sangat kaku. Sedangkan pada struktur TU, dinding geser tidak terdapat pada sisi nonparalelnya, dan hanya didesain pada sisi perimeter yang saling paralel.

5.2 Perencanaan elemen struktur

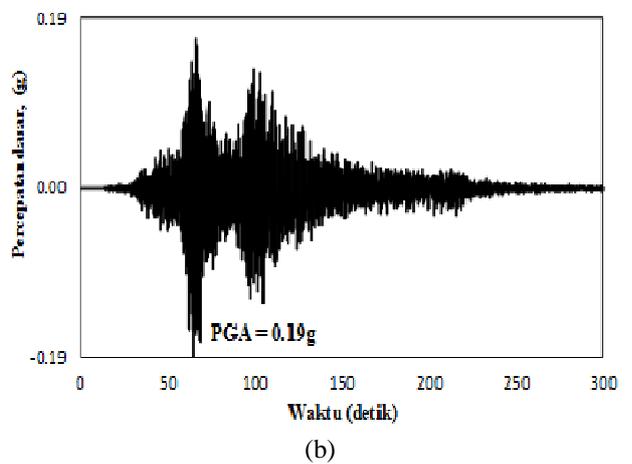
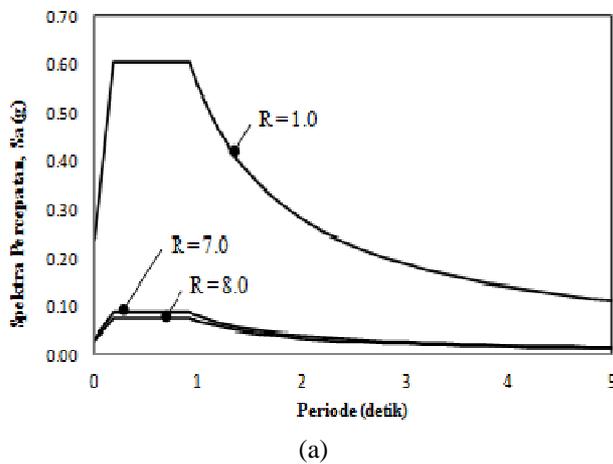
Pembebanan gravitasi pada struktur mengacu pada Pedoman Pembebanan untuk Rumah dan Gedung 1987, Sedangkan pembebanan gempa mengacu pada SNI 03-1726-2012. Adapun prosedur pembebanan gempa yang digunakan dalam perencanaan adalah prosedur RSA dan LTHA. Pada prosedur RSA, beban gempa berupa respon spektra Jakarta kelas situs SE (Gambar 6.a). Sedangkan pada prosedur LTHA, beban gempa berupa akselerasi dasar gempa Tohoku-oki (2011) N-S (Gambar 6.b), yang dimodifikasi / diskalakan terhadap respon spektra prosedur RSA.

Perencanaan penulangan elemen struktur dilakukan dengan bantuan SAP2000 v.15, sesuai standar ACI 318-08. Perencanaan dilakukan sesuai dengan persyaratan SNI 03-1726-2012 dan turut meninjau hierarki *strong column-weak beam* untuk mencegah terjadinya *soft story mechanism* pada saat struktur dieksitasi beban gempa kuat pada analisis nonlinier.

5.3 Analisis nonlinier struktur

Pemodelan properti nonlinieritas elemen struktur dilakukan berdasarkan hasil perencanaan penulangan pada tahapan sebelumnya. Pemodelan ini meliputi pemodelan: (1) sendi plastis mekanisme lentur M3 balok, (2) sendi plastis mekanisme interaksi PMM kolom, dan (3) model konstitutif material pada elemen *fiber* dinding geser. Adapun limit deformasi tiap-tiap model properti nonlinier tersebut bersesuaian dengan rekomendasi pada dokumen FEMA 356. Properti nonlinier tersebut kemudian diaplikasikan pada model struktur untuk analisis nonlinier, dengan menggunakan bantuan program CSI Perform-3D.

Analisis nonlinier pada CSI Perform-3D menggunakan prosedur NLTHA dengan menggunakan 2 data



Gambar 6. a) Respon spektra Jakarta kelas situs SE; b) Akselerasi dasar gempa Tohoku-oki (2011) N-S

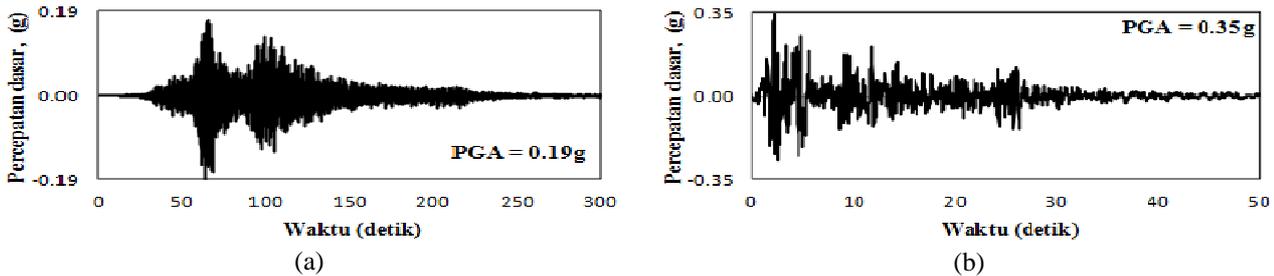
akselerasi dasar, yakni: (1) gempa Tohoku-oki (2011) N-S (**Gambar 7.a**); dan (2) gempa El-Centro (1940) N-S (**Gambar 7.b**); yang masing-masing dimodifikasi/diskalakan terhadap respon spektra Jakarta kelas situs SE (SNI 03-1726-2012). Analisis NLTHA untuk gempa Tokohu-oki dieksekusi selama 150 detik pertama, dan untuk gempa El-Centro dieksekusi selama 10 detik pertama.

5.4 Evaluasi Base Shar Torsion (BST)

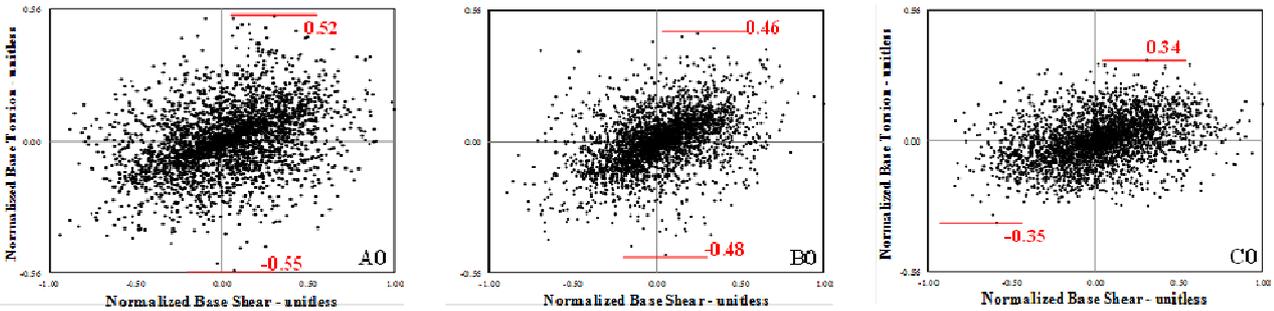
Hubungan gaya geser dan momen torsi dasar riwayat waktu (BST) hasil analisis NLTHA gempa Tohoku-oki terskala dilaporkan pada **Gambar 7** dan **Gambar 8**. Sumbu-x BST tersebut mewakili gaya geser gempa riwayat waktu yang dinormalisasi terhadap nilai gaya geser maksimumnya, sedangkan sumbu-y mewakili momen torsi riwayat waktu yang dinormalisasi terhadap gaya geser maksimum dan panjang bentang bangunan. Grafik BST tersebut menunjukkan bahwa model A0 dan A1 memiliki *normalized base torsion* maksimum sebesar 0.55 dan 0.56. Nilai ini merupakan yang terbesar jika dibandingkan model lainnya, yang mana model B0 dan B1, menghasilkan *normalized base*

torsion maksimum sebesar 0.48 dan 0.43; serta model C0 dan C1, menghasilkan *normalized base torsion* maksimum sebesar 0.35 dan 0.33. Pola serupa juga teramati pada analisis NLTHA yang menggunakan eksitasi gempa El-Centro terskala, yang mana *normalized base torsion* terbesar dimiliki oleh model A0 dan A1 masing-masing keduanya sebesar 0.47. Sedangkan nilai terkecil dimiliki oleh model C1, yakni sebesar 0.31. Dari pola tersebut dapat diamati bahwa hasil desain LTHA dan RSA konsisten menunjukkan tipe TR memiliki resistensi torsi yang paling besar dibandingkan dengan Semi-TR dan TU. Model tipe TR dan Semi-TR menghasilkan tahanan torsi masing-masing 41%- 68% dan 11%-38% lebih besar dari model TU.

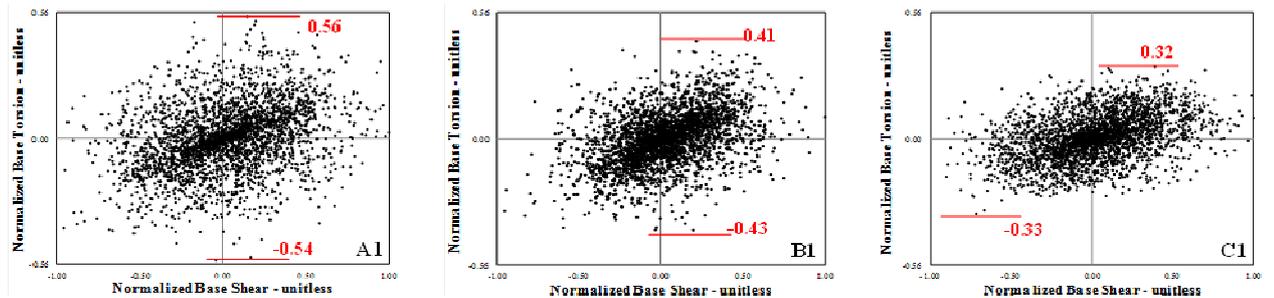
Hal-hal tersebut secara konsisten membuktikan bahwa sistem struktur TR sangat efektif dalam meningkatkan pengekangan torsi. Adanya dinding geser nonparalel pada model tipe TR, yang juga dimiliki oleh Semi-TR, mampu menghasilkan struktur dengan pengekangan torsi yang efektif. Tidak adanya dinding geser nonparalel pada model TU mengakibatkan mekanisme pengekangan torsi tidak terbangun secara efektif.



Gambar 7. Akselerasi dasar gempa untuk NLTHA: a) Tokohu-oki (2011) N-S; b) El-Centro (1940) N-S



Gambar 8. BST model A0, B0, dan C0 terhadap gempa Tohoku-oki



Gambar 9. BST model A1, B1, dan C1 terhadap gempa Tohoku-oki

5.5 Evaluasi target perpindahan struktur

Perpindahan maksimum / *envelope* aktual struktur pada level denah teratas (lantai 10) hasil NLTHA dilaporkan pada **Gambar 10** dan **Gambar 11**. Besaran perpindahan yang termonitor dinormalisasi terhadap perpindahan pusat massa-nya. Perpindahan aktual tersebut juga dikomparasikan dengan nilai perpindahan prediktif, yang merupakan hasil perkalian faktor pembesaran defleksi (C_d) terhadap perpindahan elastiknya. Dari grafik-grafik tersebut, dapat diamati bahwa struktur tipe TR (A0 dan A1) secara konsisten menunjukkan prediksi respon torsi yang sangat akurat terhadap torsi aktualnya. Kurva perpindahan prediksi sangat akurat mendekati kurva aktualnya. Sedangkan struktur tipe lainnya memiliki *error* yang cukup signifikan. Kurva perpindahan pada model-model tersebut mengalami *spread* yang sangat bervariasi. Adapun keakuratan pada struktur tipe TR tersebut dikarenakan lebih fleksibelnya respon translasional dibandingkan respon torsionalnya yang sangat kaku, atau yang disebut sebagai *torsion-stiff* (Budiono dan Octaviansyah, 2013). Sedangkan pada struktur tipe Semi-TR dan TU, respon torsionalnya cukup dominan.

5.6 Evaluasi level kinerja dan plastifikasi struktur

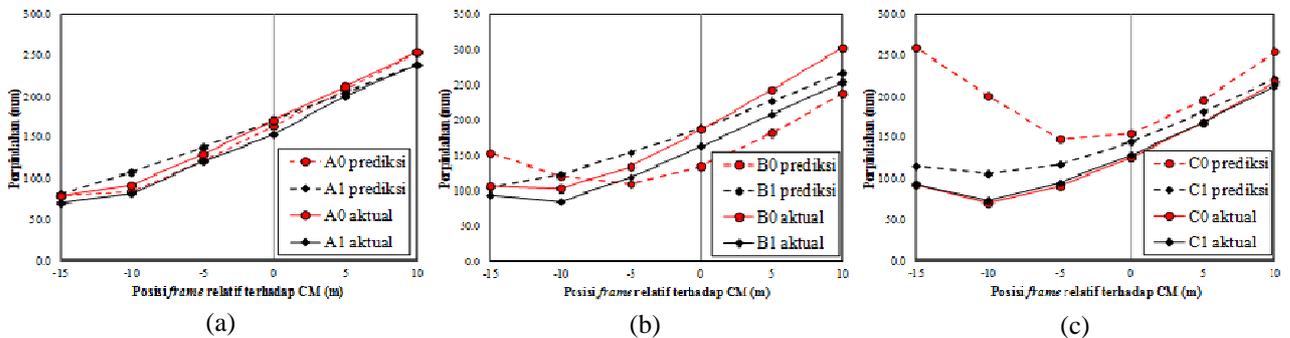
Dengan menggunakan kriteria global ATC-40 (**Tabel 1**), level kinerja keenam model studi hasil NLTHA dilaporkan pada **Tabel 2**. Jika mengacu pada *assessment matrix* FEMA 303/NEHRP 1997 (**Gambar 3**),

maka ekspektasi maksimum kinerja bangunan perkantoran (kategori resiko I) adalah *Collapse Prevention* (CP). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa seluruh model studi memenuhi objektif tersebut. Model studi A0 dan B0 merupakan model yang paling mendekati ekspektasi tersebut, yakni dengan level kinerja *Life Safe* (LS).

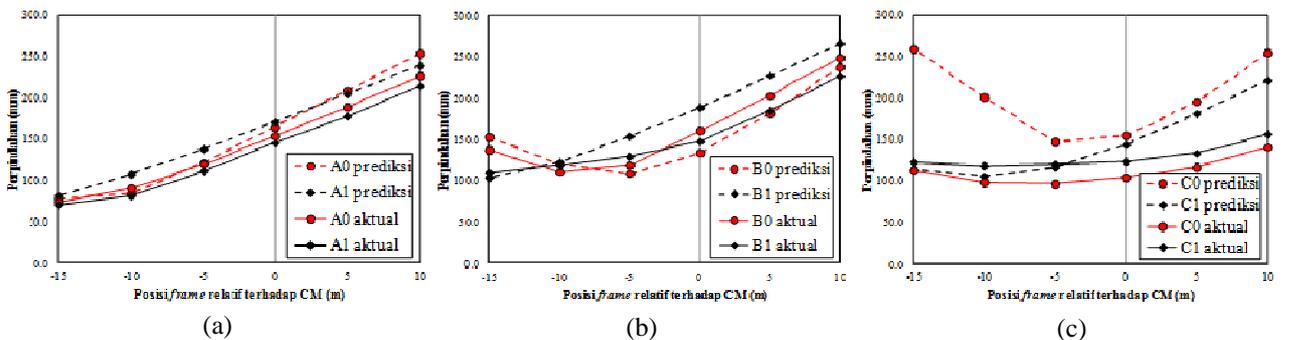
Plastifikasi dan deformasi struktur ketika level kinerja tersebut tercapai ditampilkan pada **Gambar 12**. Kondisi yang ditampilkan pada gambar tersebut merupakan hasil analisis NLTHA dengan eksitasi gempa Tohoku-oki terskala. Jika diamati plastifikasi dari sistem utama pemikul torsi (sebagaimana yang dikemukakan pada bagian 3.2), pada model tipe TR (A0 dan A1), plastifikasi yang mencapai level IO hanya terjadi pada elemen-elemen salah satu sisi perimeternya saja, sedangkan pada 3 sisi perimeter lainnya, termasuk sisi nonparalelnya, masih relatif elastik. Fiber tulangan kedua dinding

Tabel 3. Level kinerja berdasarkan perpindahan maksimum NLTHA

Tipe Pengekangan Torsi	Model	Level Kinerja Maksimum	Lantai Tingkat yang Menentukan
TR	A0	LS	Lt.3-5
	A1	IO	Seluruh lantai
Semi-TR	B0	LS	Lt.4,5, dan 8
	B1	IO	Seluruh lantai
TU	C0	IO	Seluruh lantai
	C1	IO	Seluruh lantai



Gambar 10. Perpindahan maksimum frame untuk gempa Tohoku-oki terskala a) model TR; b) model Semi-TR; dan c) model TU



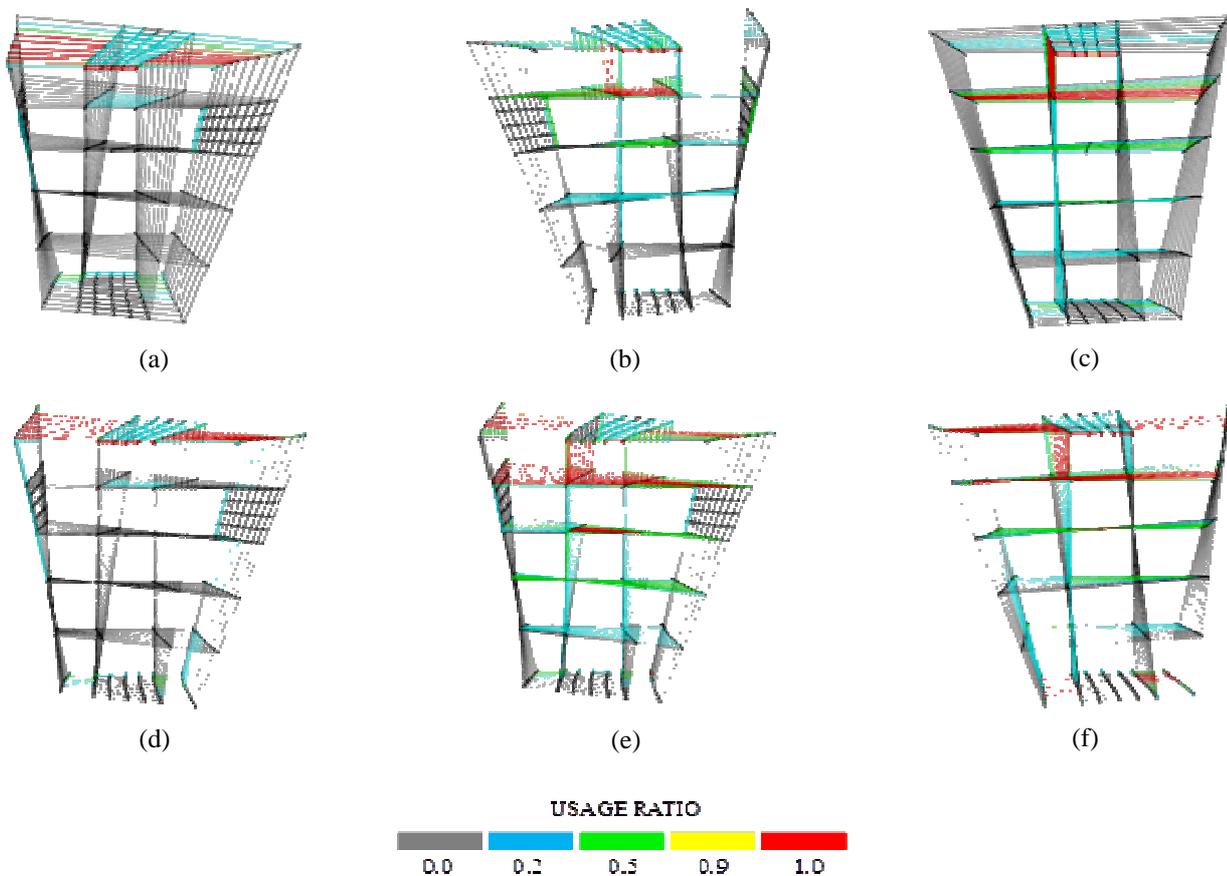
Gambar 11. Perpindahan maksimum frame untuk gempa El-Centro terskala a) model TR; b) model Semi-TR; dan c) model TU

geser paralelnya teridentifikasi telah mengalami pelepasan (lihat Tabel 4). Hal serupa terjadi pada model tipe Semi-TR (B0 dan B1), namun pada model-model tersebut, plastifikasi level IO merambat masuk ke elemen-elemen interior. Kondisi berbeda terjadi pada model tipe TU (C0 dan C1) di mana sebagian besar sistem pemikul torsinya mengalami plastifikasi, yang juga teramati dari terjadinya pelepasan tulangan (lihat Tabel 4). Meskipun elemen-elemen pada perimeter model-model tersebut masih relatif elastik, elemen-elemen tersebut tidak efektif memberikan kontribusi pengekangan torsi karena dimensinya yang relatif lebih kecil dari elemen-elemen interior yang telah mengalami plastifikasi.

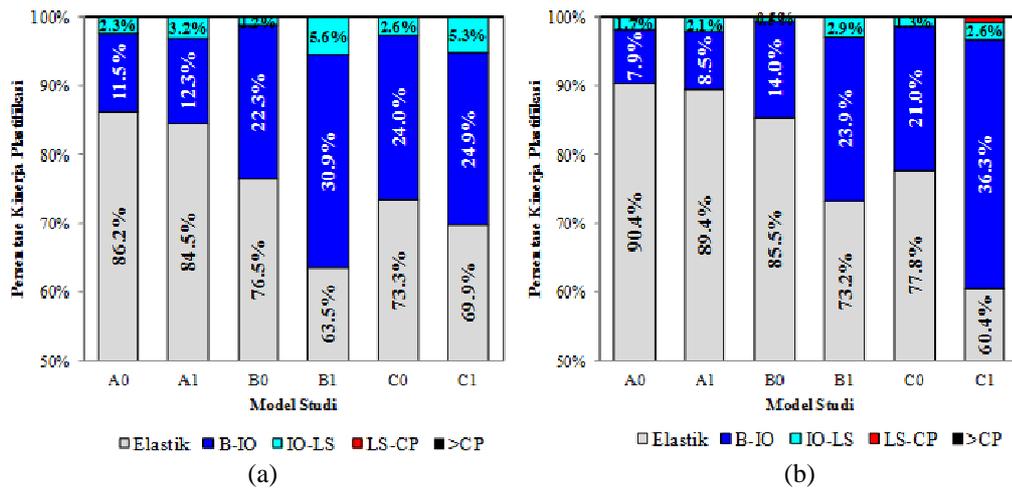
Plastifikasi yang terjadi akibat NLTHA El-Centro terskala juga memiliki pola yang relatif identik dengan hal tersebut. Perbedaan yang terjadi hanya meliputi persentase plastifikasi elemen-elemen strukturnya. Persentase plastifikasi yang terjadi akibat NLTHA kedua eksitasi gempa terskala tersebut dilaporkan pada Gambar 12. Terlihat pada gambar tersebut bahwa persentase plastifikasi model tipe TR (A0 dan A1) cukup konsisten, di mana plastifikasi maksimum terjadi

pada level IO-LS, dan persentase plastifikasi tersebut akibat eksitasi Tohoku-oki 0.6%-1.1% lebih besar dari El-Centro. Di lain pihak, pada model tipe TU (C0 dan C1), perbedaan cukup besar, bahkan terdapat beberapa elemen pada model C1 yang mengalami plastifikasi level LS-CP ketika dieksitasi gempa El-Centro; taraf plastifikasi sebesar itu tidak terjadi ketika model dieksitasi gempa Tohoku-oki.

Dari Gambar 12 juga teramati adanya perbedaan taraf plastifikasi antara model-model yang didesain melalui prosedur LTHA (A0, B0, dan C0) dan RSA (A1, B1, dan C1). Plastifikasi pada model RSA cenderung memiliki taraf kerusakan dan jumlah yang lebih besar. Namun demikian, perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan pada model tipe TR (A0 dan A1). Di lain pihak, pada model tipe Semi-TR (B0 dan B1) dan TU (C0 dan C1), perbedaan tersebut sangat signifikan. Dari aspek ini dapat dinilai bahwa prosedur RSA cukup akurat dan efisien untuk digunakan dalam mendesain struktur dengan tipe TR. Pada struktur tipe lainnya, selisih *underestimate* RSA terhadap LTHA sangat besar, sehingga prosedur RSA tersebut dapat dianggap tidak layak untuk digunakan pada tahapan perencanaan.



Gambar 12. Plastifikasi struktur akibat beban gempa Tohoku-oki terskala untuk kondisi limit *Immediate Occupancy* (IO): a) model A0; b) model B0; c) model C0; d) model A1; e) model B1; dan f) model C1;



Gambar 13. Persentase kinerja plastifikasi elemen struktur a) terhadap gempa Tohoku-oki; dan b) terhadap gempa El-Centro

Tabel 3. Level kinerja berdasarkan perpindahan maksimum NLTHA

Dinding Geser	Fiber beton (<i>compression</i>)		Fiber tulangan (<i>tenston</i>)		
	Regangan	Tegangan	Regangan	Tegangan	
	mm/mm	MPa	mm/mm	MPa	
MODEL TR: A0 DAN A1					
Grid 1	0.00049	13.32	0.0028	400.01	(Y)
Grid 6	0.00095	19.66	0.0061	400.03	(Y)
Grid A (NP)	0.00059	14.73	0.001	200.00	
Grid D (NP)	0.00059	14.73	0.001	200.00	
MODEL SEMI-TR: B0 DAN B1					
Grid 1	0.0021	30.00	0.0011	220.00	(C)
Grid 6	0.0015	27.20	0.0056	400.02	(Y)
Grid A (NP)	0.0011	21.72	0.0019	380.00	
Grid D (NP)	0.0011	21.72	0.0019	380.00	
MODEL TU: C0 DAN C1					
Grid 1	0.0010	20.20	0.0025	400.00	(Y)
Grid 6	0.0008	17.02	0.0035	400.01	(Y)
Grid A (NP)	N/A	N/A	N/A	N/A	
Grid D (NP)	N/A	N/A	N/A	N/A	

Keterangan :
 Y = yielding baja tulangan C = crushing beton

5.7 Komparasi efektivitas pengekanan torsi

Pembahasan evaluasi-evaluasi sebelumnya menunjukkan bahwa struktur tipe TR (A0 dan A1) merupakan tipe struktur yang mampu memberikan resistensi torsi yang sangat maksimal. Selanjutnya, pada bagian ini dikomparasikan efektivitas elemen-elemen perimeter untuk seluruh tipe struktur dalam memikul torsi inelastik struktur. Komparasi dilakukan dengan membandingkan persentase distribusi BST struktur pada elemen-elemen perimeter dan interior, yang sekaligus merepresentasikan kontribusi elemen-elemen tersebut dalam mekanisme pengekanan torsi struktur. Pada Gambar 14 dan Gambar 15 diperbandingkan BST ternormal-

isasi struktur pada elemen perimeter dan interior akibat eksitasi gempa Tohoku-oki terskala. Dari kedua gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada elemen-elemen perimeter, BST yang terjadi menyerupai BST tipikal struktur *torsionally-restrained*, sedangkan pada elemen-elemen interior, BST yang terjadi menyerupai BST tipikal struktur *torsionally-unrestrained*. Dari hasil tersebut, dapat dinilai bahwa elemen-elemen perimeter secara efektif menghasilkan resistensi torsi dibandingkan elemen-elemen interior. Sedangkan pada Tabel 4 dapat dilihat bahwa kontribusi elemen-elemen perimeter tersebut pada model tipe TR dan Semi-TR berkisar pada nilai 96%- 98%, dan pada struktur TU hanya 90% -92%.

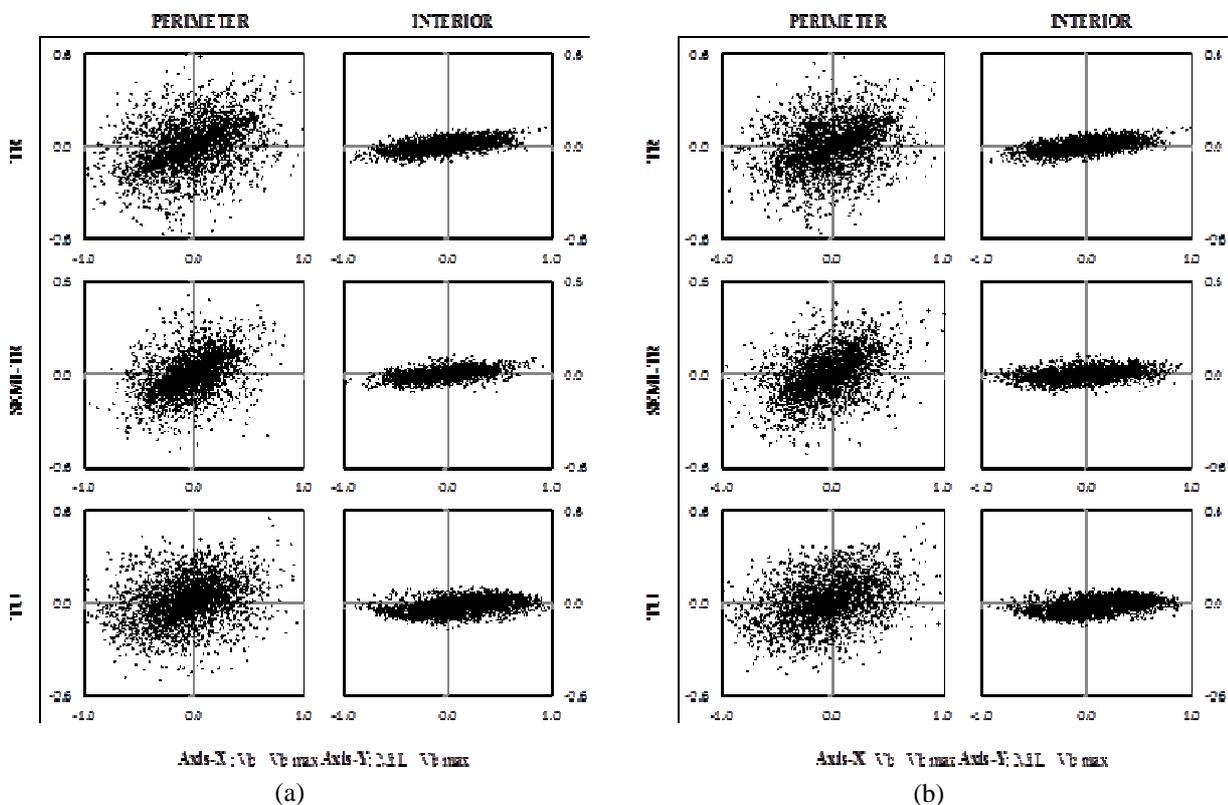
Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode rekayasa yang efektif dalam menghasilkan pengekangan torsi adalah dengan memperkaku dan memperkuat seluruh elemen-elemen perimeter bangunan, sebagaimana yang diajukan pada struktur TR dan Semi-TR, meskipun pada sisi nonparalelnya. Hal tersebut juga didukung bahwa dominannya kontribusi dinding geser pada sistem ganda pemikul torsi (lihat Tabel 4). Selain itu, upaya memperlemah struktur terhadap respon lateral / translasional, sebagaimana yang diajukan pada struktur TR, juga efektif meningkatkan dominasi respon tersebut dibandingkan dengan respon torsionalnya.

Tabel 4. Distribusi resistensi torsi inelastik pada elemen perimeter dan elemen interior

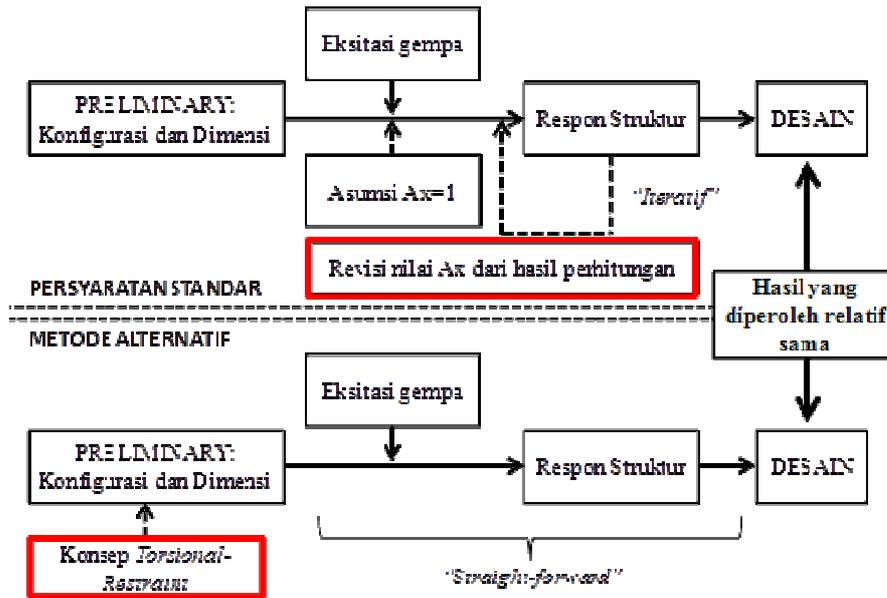
Tipe Pengekangan Torsi	Model	Distribusi resistensi torsi inelastik maksimum pada elemen-elemen struktur		Distribusi resistensi torsi inelastik maksimum pada sistem ganda perimeter	
		Perimeter	Interior	Dinding geser	SRPMK
TR	A0	98%	2%	67%	33%
	A1	98%	2%	68%	32%
Semi-TR	B0	97%	3%	87%	13%
	B1	96%	4%	87%	13%
TU	C0	90%	10%	83%	17%
	C1	92%	8%	84%	16%

6. Verifikasi Persyaratan SNI 03-1726-2012

Pada paper ini telah diajukan metode yang dapat menghasilkan struktur dengan sistem pengekangan torsi yang efektif, yakni dengan menerapkan konsep *torsional-restraint*. Pada dasarnya, SNI 03-1726-2012 telah mengajukan metode yang berkaitan dengan peningkatan resistensi torsi tersebut, yakni dengan mempersyaratkan diperhitungkannya faktor amplifikasi torsi (A_x) pada perhitungan eksentrisitas desain ($e_d = e_o + 5\% A_x$). Namun demikian persyaratan ini bersifat iteratif, di mana nilai A_x tersebut baru diperoleh setelah analisis struktur elastik dilakukan, yang mana pada awal perhitungan, nilai A_x diasumsikan bernilai 1 (Gambar 15), dan kemudian analisis elastik diiterasi dengan nilai A_x yang baru. Sebagai perbandingan, perencanaan model studi yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan nilai $A_x = 0$, dan upaya peningkatan resistensi torsi dilakukan dengan metode-metode yang dikemukakan pada bagian 3.2, dengan parameter rasio T_{10} / T_{1x} sebagai kontrol. Metode yang diajukan pada paper ini lebih bersifat *straight-forward* karena peningkatan resistensi torsi telah diantisipasi pada tahapan *preliminary design* konfigurasi dan dimensi elemen struktur, dan evaluasi kinerja yang telah dibahas sebelumnya menunjukkan bahwa metode ini memberikan hasil yang sesuai dengan ekspektasi.



Gambar 14. Perbandingan BST pada elemen perimeter dan elemen interior: a) model yang didesain dengan LTHA; dan b) model yang didesain dengan RSA



Gambar 15. Perbandingan metode yang dipersyaratkan pada SNI 03-1726-2012 dengan metode yang diajukan terkait peningkatan resistensi torsi bangunan

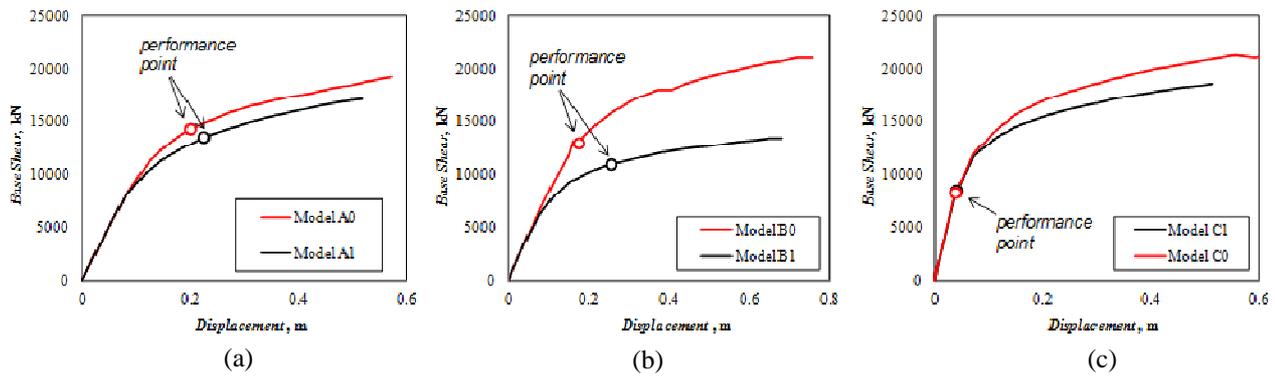
7. Komparasi Prosedur Analisis Nonlinier

Seluruh evaluasi pada bagian-bagian sebelumnya mengacu pada respon inelastik struktur hasil analisis NLTHA, karena hasil tersebut dapat diapresiasi sebagai nilai yang eksak. Namun perlu dipahami bahwa analisis tersebut tidak praktis untuk diterapkan. Metode analisis yang praktis dan umum digunakan adalah metode *pushover* yang menggunakan beban statis yang dibebankan secara inkremental pada struktur sesuai dengan distribusi ragam pertamanya, dan perpindahan struktur yang dimonitor berupa perpindahan titik pusat massa tiap-tiap lantai tingkatnya. Namun demikian, sebagai tambahan, pada penelitian ini diperoleh adanya temuan *misleading* pada metode *pushover*, khususnya pada struktur selain tipe TR. Pada **Tabel 5** dilaporkan selisih perpindahan *pushover* yang ditinjau pada titik kinerja (*performance point*) terhadap perpindahan maksimum NLTHA Tohoku-oki. Pada struktur tipe TR, titik kinerja *pushover* bersifat *overestimate* 18%-42%. Pada dasarnya hasil yang *overestimate* dapat diterima karena keputusan yang akan diambil akan bersifat konservatif. Pada struktur tipe Semi-TR, tidak ada kecenderungan yang pasti antara *overestimate* atau *underestimate*. Sedangkan pada struktur TU, perpindahan antara model C0 dan C1 sangat mendekati satu sama-lain, seakan-akan tidak terdapat perilaku ketidakberaturan pada struktur tersebut (lihat **Gambar 16**). Namun jika dibandingkan dengan NLTHA, hasil tersebut memiliki selisih yang sangat signifikan, yakni sekitar 69%. Hasil yang bersifat *underestimate* tersebut tidak dapat diterima karena akan berdampak pada adanya kesalahan keputusan / *misleading* jika mengacu pada hasil-hasil tersebut tersebut.

Dari komparasi ini dapat disimpulkan bahwa *pushover* pada struktur tipe Semi-TR dan TU memberikan hasil dengan ketidakpastian yang tinggi, bahkan bersifat *underestimate*. Dengan demikian, terhadap struktur tersebut, analisis nonlinier yang boleh digunakan adalah NLTHA. Hal tersebut juga memperkuat kesimpulan bahwa perilaku ketidakberaturan teramati secara jelas pada struktur tipe Semi-TR dan TU.

8. Kesimpulan

1. Model struktur TR yang disimulasikan pada paper ini terbukti menghasilkan mekanisme pengekangan torsi yang sesuai dengan kriteria-kriteria perencanaan berbasis kinerja.
2. Struktur dengan sistem Semi-TR dapat digunakan, karena juga terbukti dapat menghasilkan mekanisme pengekangan torsi, namun dengan memperhatikan ketentuan prosedur analisis desain yang direkomendasikan pada **Tabel 6**.
3. Struktur dengan sistem TU sangat tidak direkomendasikan karena tidak mampu menghasilkan mekanisme pengekangan torsi secara efektif.
4. Prosedur analisis yang direkomendasikan untuk digunakan dalam tahapan perencanaan sistem-sistem struktur tersebut dirangkum pada **Tabel 6**.
5. Analisis nonlinier dengan metode *pushover* tidak dapat digunakan terhadap struktur tipe Semi-TR dan TU.



Gambar 16. Kurva *pushover* dan titik kinerja bangunan
a) model A0 dan A1; b) model B0 dan B1; dan c) model B0 dan B1

Tabel 5. Selisih perpindahan *pushover* terhadap NLTHA Tohoku-oki terskala

Tipe Pengekangan Torsi	Model	Selisih Perpindahan <i>Pushover</i> terhadap NLTHA*
TR	A0	118.2%
	A1	141.3%
Semi-TR	B0	93.9%
	B1	155.9%
TU	C0	30.9%
	C1	31.0%

*) Perpindahan *pushover* ditinjau pada posisi *performance point*; *displacement* NLTHA ditinjau pada kondisi perpindahan maksimum

Tabel 6. Rekomendasi prosedur analisis desain

Tipe Pengekangan Torsi	Prosedur Analisis Desain	
	Analisis kombinasi ragam (RSA)	Analisis riwayat waktu linier (LTHA)
TR	I*	I
Semi-TR	TI	I
TU	TI	I**

Keterangan: I = diijinkan ; TI = tidak diijinkan

*) prosedur yang paling direkomendasikan

) prosedur yang direkomendasikan, namun tipe struktur **sangat tidak direkomendasikan

Singkatan		Lambang	
BST	<i>base shear-torsion</i>	A_x	faktor amplifikasi torsi
LTHA	<i>linear time history analysis</i>	e, e_o, e_d	eksentrisitas tak terduga, bawaan, desain
NLTHA	<i>nonlinear time history analysis</i>	M_t	momen torsi seismik dasar
PGA	<i>peak ground acceleration</i>	PMM	interaksi aksial, momen sumbu 2, dan sumbu 3
RSA	<i>response spectrum analysis</i>	R	koefisien modifikasi respon
SRPMK	<i>sistem rangka pemikul momen khusus</i>	T_{1x}	periode ragam translasi x pertama struktur
TR	<i>torsionally restrained</i>	$T_{1\theta}$	periode ragam torsi pertama struktur
TU	<i>torsionally unrestrained</i>	V_b	gaya seismik dasar

Daftar Pustaka

- ACI 318-08 (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Michigan, USA: ACI Committee 318 Structural Building Code.
- ASCE 7-10, 2010, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Virginia, USA.: American Society of Civil Engineers.
- ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*. Redwood City, California, USA: Applied Technology Council.
- Badan Standardisasi Nasional, 2012, *SNI 03-1726-2012 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. Bandung, Indonesia.
- Budiono, B., dan Octaviansyah, L.K., 2013, *Development of Modal Pushover Analysis Method of Unsymmetric-Plan of Reinforced Concrete Structures Under Major Earthquake Motion*. Singapore: Research, Development, and Practice in Structural Engineering and Construction, pp.33-38.
- CSI Perform-3D, 2012, *Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures V.5.0.0*. Computer and Science, Inc., S/N: C1FB FBY21526JER License owned by Prof. Bambang Budiono of ITB.
- FEMA 303, 1997, *NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures*. Washington, D.C., USA: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA 356, 2000, *Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*. Washington, D.C, USA: Federal Emergency Management Agency.
- Ladjinovic, D.Z. dan Folic, R.J., 2008, *Seismic Analysis of Assymmetric in Plan Buildings*. Beijing, China: The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17.
- Lucchini, A., Monti, G., dan Spacone, E., 2009, *Asymmetric-Plan Buildings: Irregularity Levels and Nonlinear Seismic Response*. Eurocode 8 Perspective from the Italian Standpoint Workshop p.109-117, Napoli, Italy.
- Paulay, T., 2000, Understanding Torsional Phenomena in Ductile System. *Bulletin of The New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol. 33, No. 4, December 2000.

