

INOVASI DALAM PERANCANGAN GEDUNG INDONESIA-1 MENGUNAKAN KONSEP PERFORMANCE-BASED

Nick Alexander¹ dan Davy Sukamta²

¹ Partner, Davy Sukamta & Partners

² Principal and Founder, Davy Sukamta & Partners

PENDAHULUAN

Perancangan gedung tinggi di Indonesia dilakukan mengikuti ketentuan SNI 03-1726: 2012, yang merupakan peraturan gempa yang didasarkan pendekatan preskriptif. Pada peraturan tersebut tercantum daftar sistem struktur yang diijinkan berdasarkan ketinggian bangunan dan juga kategori desain seismik. Meski aplikasi daftar sistem struktur tersebut cukup efektif digunakan untuk jenis bangunan yang tergolong tipikal dengan jumlah lantai di bawah sekitar 40 lantai, namun daftar tersebut menjadi tidak efektif atau bahkan tidak relevan digunakan untuk kasus gedung yang sangat tinggi, dimana sistem struktur yang tepat dan efektif digunakan tidak tercakup dalam daftar tersebut (contoh: *coupled wall* dengan *outrigger*). Untuk gedung super-tinggi seperti Indonesia-1, pemilihan sistem penahan lateral tunggal *coupled corewall* dan *outrigger* didasarkan atas kenyataan bahwa sistem ini akan memberikan efisiensi material yang lebih baik dibandingkan dengan sistem ganda *corewall* dan *frame*, selain pengerjaannya juga akan lebih sederhana. Di lain pihak penggunaannya mengharuskan perencana menggunakan pendekatan berbasis kinerja yang memerlukan kajian engineering mendalam.

Ada dua jenis analisis yang saat ini umum digunakan dalam *Performance-Based Seismic Design* (PBSD), yaitu *Nonlinear Response History Analysis* (NLRHA) dan *Nonlinear Static Procedure* (NSP). NLRHA dinilai paling ideal dan akurat untuk analisis *tall building* namun tidak praktis dilakukan karena *running time* yang sangat lama dan kendala pada pemilihan *ground motion input*, khususnya di Indonesia. NSP merupakan jenis analisis nonlinear yang paling praktis dilakukan namun dinilai kurang akurat karena keterbatasannya mencakup pengaruh ragam getar tinggi. Oleh karena itu, dibutuhkan suatu prosedur analisis yang masih praktis dilakukan namun juga dapat memberikan hasil yang relatif cukup akurat. Berdasarkan verifikasi hasil studi dan riset analitis, *Modal Pushover Analysis* (MPA) merupakan prosedur alternatif yang dinilai dapat mengatasi kekurangan maupun kendala prosedur lain (Chopra).

Makalah ini memaparkan aplikasi PBSD pada gedung Indonesia-1 *North Tower* yang memiliki sistem struktur *coupled wall* dengan *outrigger*, menggunakan prosedur MPA. Makalah ini juga akan membahas studi komparatif antara hasil analisis *Response Spectrum Analysis* (RSA) *code*, NSP, dan MPA, dibandingkan terhadap NLRHA.

PROSEDUR ANALISIS NONLINEAR UNTUK PBSD

Beberapa jenis prosedur analisis nonlinear yang lazim dipakai dalam melakukan evaluasi struktur berbasis kinerja dipaparkan secara singkat sebagai berikut:

NONLINEAR RESPONSE HISTORY ANALYSIS (NLRHA)

NLRHA merupakan prosedur analisis nonlinear yang sangat *rigorous*, dinilai paling akurat, dan paling *direct* di antara prosedur-prosedur pendekatan nonlinear lainnya. Dalam prosedur ini,

dibutuhkan paling sedikit 7 pasang input *ground motion* yang dicocokkan dengan target desain spectrum berdasarkan nilai $R=1$ pada level MCE. Jumlah minimum *ground motion* ditentukan untuk memperhitungkan pengaruh *record-to-record variability*. Hasil analisis satu rekaman individu dianggap tidak cukup menangkap pengaruh variabilitas tersebut. *Ground motion* harus diseleksi konsisten dengan sumber gempa yang representatif dan diskala sehingga nilai rata-rata *acceleration response spectrum* pada range periode getar yang relevan sesuai dengan target desain spektrum.

Hingga saat ini, masih ada beberapa hal yang menjadi kendala signifikan dalam menyeleksi dan menskala input *ground motion*. Target desain spectrum yang digunakan dalam perencanaan, merupakan *Uniform Hazard Spectrum* (UHS) yang berasal dari analisis probabilitas gabungan beragam sumber gempa yang memberikan kontribusi terhadap respons *acceleration* pada range periode yang ditinjau. Oleh karena itu, tidak akan ada rekaman gempa aktual yang dapat mewakili desain spectrum gabungan tersebut (UHS) pada keseluruhan range periode struktur. Jenis desain spectrum yang lebih tepat dipakai untuk menyeleksi dan menskala input *ground motion* adalah *Conditional Mean Spectrum* (CMS) (Baker, 2011). CMS merupakan jenis spectrum yang dibuat dengan mentargetkan *acceleration response spectrum* pada satu nilai periode dengan menggunakan persamaan korelasi antar periode, sehingga dapat mempertahankan bentuk spektrum yang realistis khusus untuk gempa yang mengontrol pada nilai periode yang ditinjau. Aplikasi CMS harus dilakukan untuk beberapa nilai periode yang dianggap dominan untuk gedung yang ditinjau. Artinya untuk analisis satu gedung tinggi perlu dibuat lebih dari satu CMS. Selain itu, dengan terbatasnya ketersediaan rekaman gempa kuat di Indonesia, maka proses seleksi dan modifikasi input *ground motion* menjadi semakin sulit dengan ketidakpastian yang tinggi. Dari penjelasan tersebut dapat dibayangkan kendala dan kompleksitas aplikasi NLRHA dari aspek input *ground motion* sedangkan kepastian data tersebut merupakan kunci untuk menjalankan evaluasi *performance-based* NLRHA secara benar.

Analisis satu pasang input *ground motion* untuk model gedung 60-lantai dapat membutuhkan *running time* sekitar 120 jam. Waktu dan tenaga yang dibutuhkan untuk menyelesaikan analisis 7 pasang input *ground motion* menjadi tidak praktis. Seperti proses perancangan pada umumnya, jika hasil evaluasi menunjukkan perlunya revisi geometri maupun kapasitas komponen struktur tertentu akibat kriteria penerimaan yang terlampaui, maka prosedur NLRHA harus diulang secara iteratif sampai seluruh kriteria penerimaan dapat terpenuhi dan menjadi sangat tidak praktis.

NONLINEAR STATIC PROCEDURE (NSP)

Dengan adanya kendala pada NLRHA tersebut, prosedur analisis nonlinear alternatif yang lebih praktis dan lazim menjadi pilihan di Indonesia adalah NSP, atau sering disebut Pushover Analysis. Umumnya NSP dilakukan dengan aplikasi *force increment* secara statik berdasarkan distribusi mode fundamental sampai mencapai suatu titik *performance point* konsisten dengan desain respons spectrum level MCE. NSP menjadi populer digunakan untuk evaluasi *performance-based* karena sangat praktis dilakukan. Waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan analisis *pushover* untuk suatu gedung 60-lantai pada kedua arah hanya sekitar 2 jam. Namun, dari deskripsi prosedur NSP tersebut, dapat dilihat bahwa NSP belum tentu tepat untuk aplikasi pada gedung tinggi karena prosedur tersebut hanya mencakup perilaku struktur untuk mode getar fundamental dan tidak dapat mencakup pengaruh ragam getar tinggi.

MODAL PUSHOVER ANALYSIS (MPA)

Dengan adanya kendala pada NLRHA dan NSP, ada satu metode analisis yang menarik untuk ditinjau karena dikembangkan untuk mengatasi kendala NLRHA dan NSP namun dinilai masih dapat mempertahankan tingkat akurasi yang cukup memadai, yaitu MPA. Secara prinsip, MPA merupakan pengembangan dari NSP yang dikombinasikan dengan RSA, yaitu dengan penambahan pengaruh ragam getar tinggi untuk meningkatkan akurasi hasil analisis. Analisis *pushover* tidak hanya dilakukan untuk mode fundamental, melainkan untuk juga untuk mode-mode yang dianggap memberi kontribusi besar terhadap respons struktur yang ditinjau.

Validasi prosedur MPA dikembangkan dari beberapa asumsi sehubungan pengaruh taraf nonlinearitas gedung terhadap analisis modal. Meskipun analisis modal tidak sepenuhnya berlaku untuk sistem yang mengalami nonlinearitas, namun pembahasan respons dinamik berbasis modal sistem struktur saat kondisi linear masih bisa memberi manfaat. Berdasarkan studi *analytical*, ditunjukkan bahwa meskipun mode getar sudah tidak lagi *uncoupled* satu sama lain, namun taraf *modal coupling* masih terlihat sangat kecil. Oleh karena itu, berdasarkan studi *analytical* tersebut, hasil MPA dibuktikan masih memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, mendekati hasil NLRHA (Chopra). *Running time* untuk analisis MPA, untuk gedung setinggi 60-lantai adalah sekitar 6 jam sehingga relatif praktis dilakukan.

PBSD GEDUNG INDONESIA-1 NORTH TOWER

Prosedur analisis yang digunakan untuk PBSG Gedung Indonesia-1 *North Tower* adalah MPA. Pembahasan berikut memberikan deskripsi konfigurasi & sistem struktur, permodelan, prosedur MPA, dan hasil analisis.

KONFIGURASI DAN SISTEM STRUKTUR

Proyek Indonesia-1 terdiri atas 2 tower, yaitu *North Tower* dengan jumlah lantai 63 dan *South Tower* dengan jumlah lantai 54 yang berada di atas struktur 7-lapis besmen. Sistem struktur penahan gempa untuk masing-masing tower adalah RC *corewall* dengan sistem *outrigger* yang terdiri dari *outrigger* kolom dan *outrigger panel + coupling beam* (Gambar 2). Sistem struktur lantai adalah balok baja komposit dengan *infill* beton di atas metal deck yang ditopang oleh elemen vertikal kolom beton dan *corewall* beton (Gambar 1). Sambungan balok baja ke elemen vertikal adalah jenis sendi secara lentur.

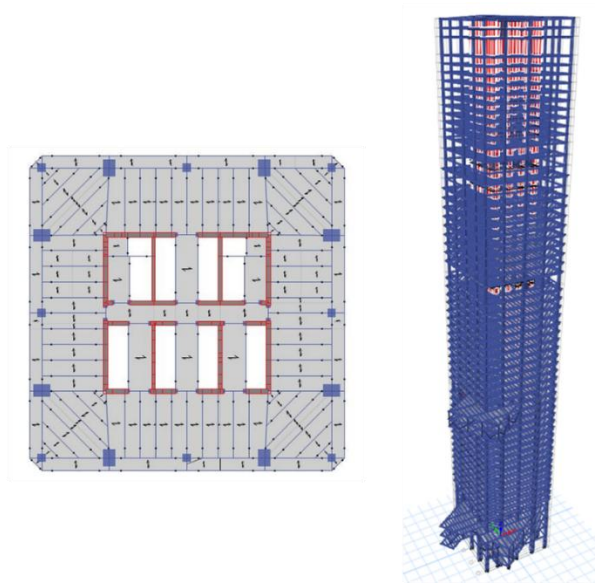
KARAKTERISTIK MODAL

Karakteristik modal gedung Indonesia-1 North Tower dapat dilihat pada gambar 3 dan 4. Gambar 3 menunjukkan deformasi secara denah pada lantai atap untuk berbagai mode gedung untuk tiga triplet mode. Pada triplet pertama, mode 1 dan 2 merupakan mode translasi dan mode 3 merupakan mode torsi. Pada triplet kedua dan ketiga, terlihat adanya coupling antara DOF translasi X dan torsi. Gambar 4 menunjukkan variasi berbagai *mode shape* sepanjang ketinggian gedung.

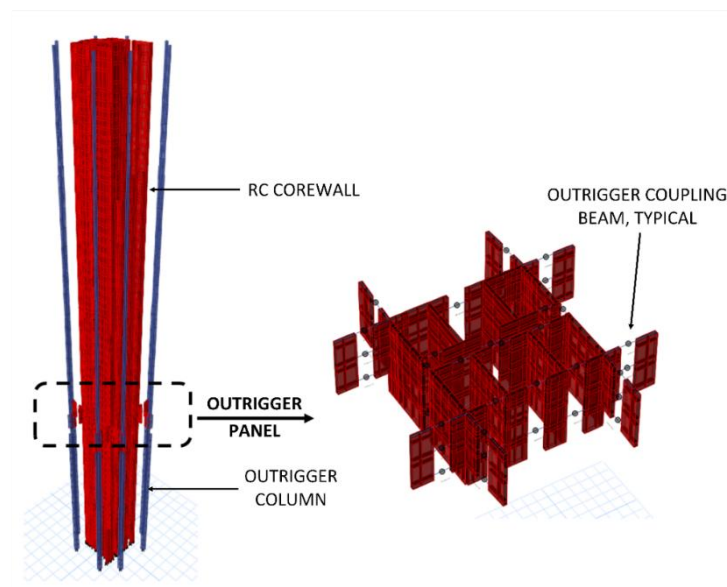
PERFORMANCE OBJECTIVE

Performance objective yang ditargetkan untuk gedung Indonesia-1 *North Tower* disajikan pada tabel 1.

Untuk memenuhi *target performance objective* yang ditentukan, prinsip perancangan tahan gempa secara *displacement-based* diterapkan dengan menentukan komponen-komponen struktur tertentu yang dinilai memiliki perilaku daktail dan dapat mengakomodir deformasi dengan baik. Dengan demikian perilaku komponen struktur gedung dapat diklasifikasikan menjadi jenis *deformation-controlled* dan *force-controlled*.



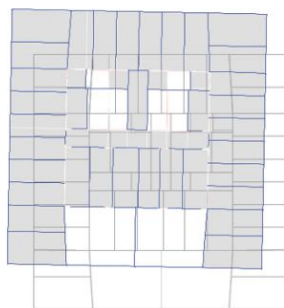
Gambar 1. Konfigurasi struktur gedung Indonesia-1 *North Tower* menggunakan material *mixed concrete-steel*



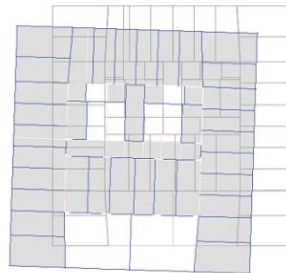
Gambar 2. Sistem struktur penahan gempa: *corewall* beton dengan sistem *outrigger* yang terdiri dari panel *outrigger* dan *coupling beam*

Tabel 1. *Performance Objectives*

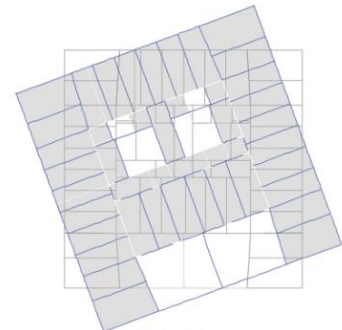
<i>Level of earthquake</i>	<i>Earthquake performance objectives</i>
<i>Design-based earthquake (DBE):</i> perioda ulang 500-tahun dengan 5% damping berdasarkan SNI 03-1726: 2012	Life safety
<i>Maximum considered earthquake (MCE):</i> perioda ulang 2475-tahun dengan 5% damping berdasarkan SNI 03-1726: 2012	Collapse prevention



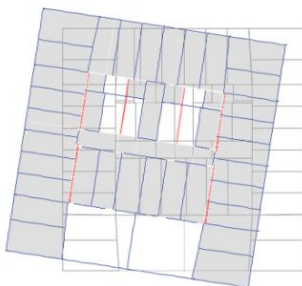
$T_1=7.07$ sec



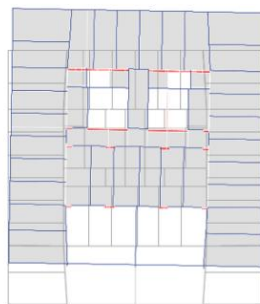
$T_2=6.96$ sec



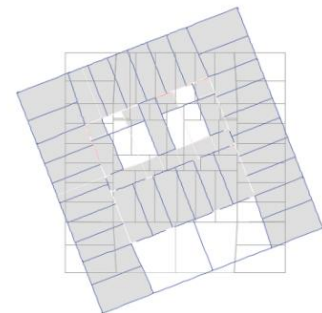
$T_3=3.82$ sec



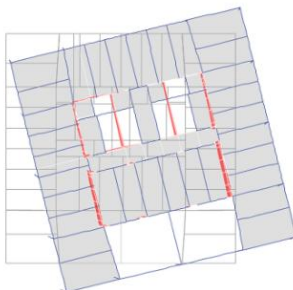
$T_4=2.11$ sec



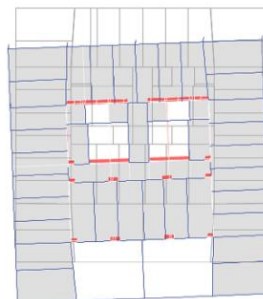
$T_5=1.87$ sec



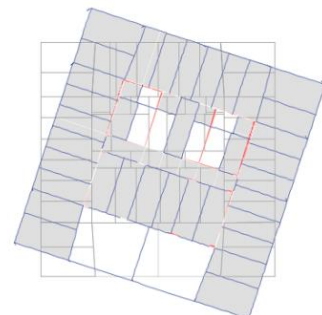
$T_6=1.46$ sec



$T_7=1.07$ sec

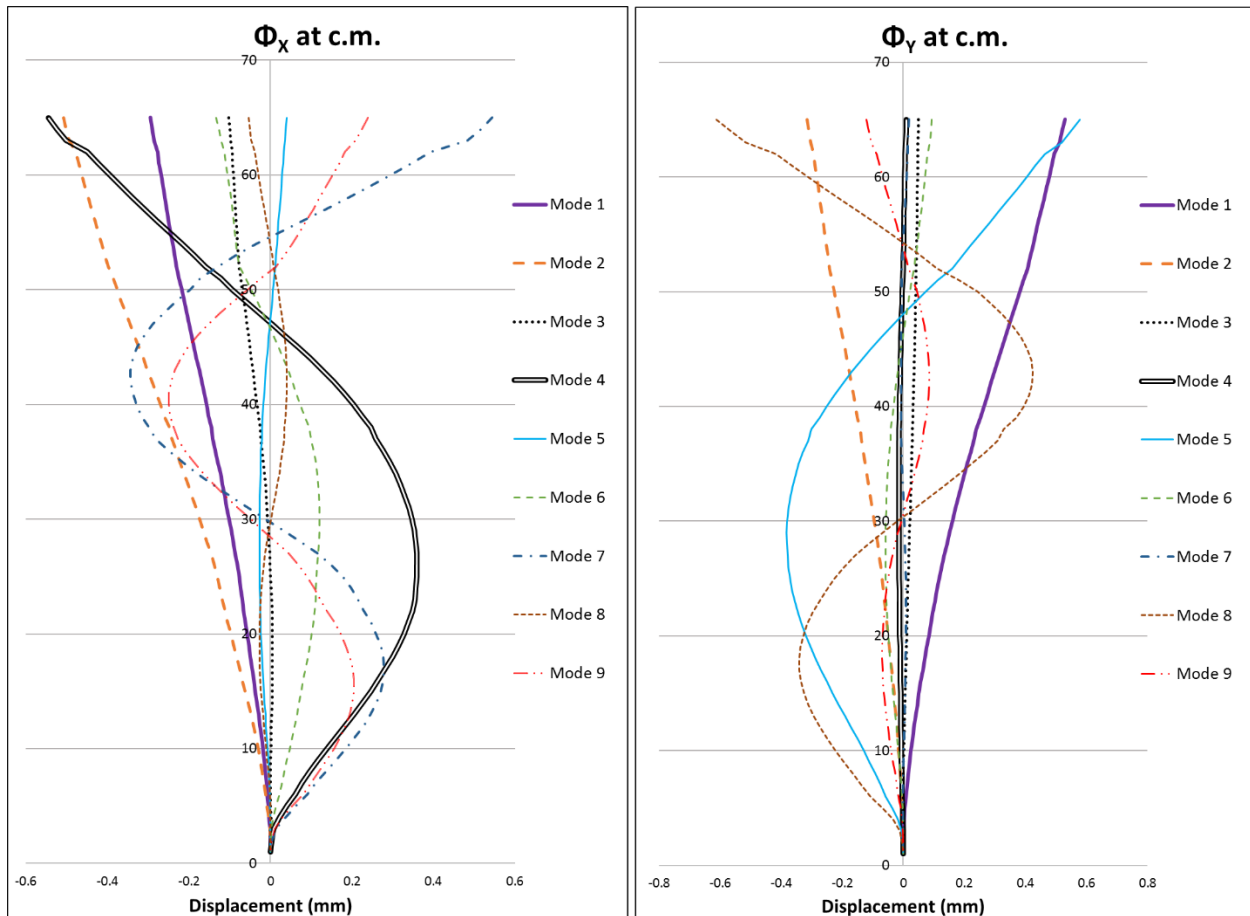


$T_8=0.83$ sec



$T_9=0.79$ sec

Gambar 3. Deformasi lantai atap untuk mode-mode gedung



Gambar 4. Mode shape gedung untuk komponen X (kiri) dan komponen Y (kanan)

Perilaku komponen *deformation-controlled* dirancang untuk mengalami pelelehan secara daktail sehingga dapat mendisipasikan energi secara efektif dan aman. Pada gedung ini, mekanisme pelelehan yang ditargetkan pada sistem struktur gedung adalah pelelehan geser pada balok perangkai dan pelelehan lentur pada dinding geser yang terkonsentrasi pada level penjepitan di atas level *ground* dan di atas level *outrigger* (gambar 5).

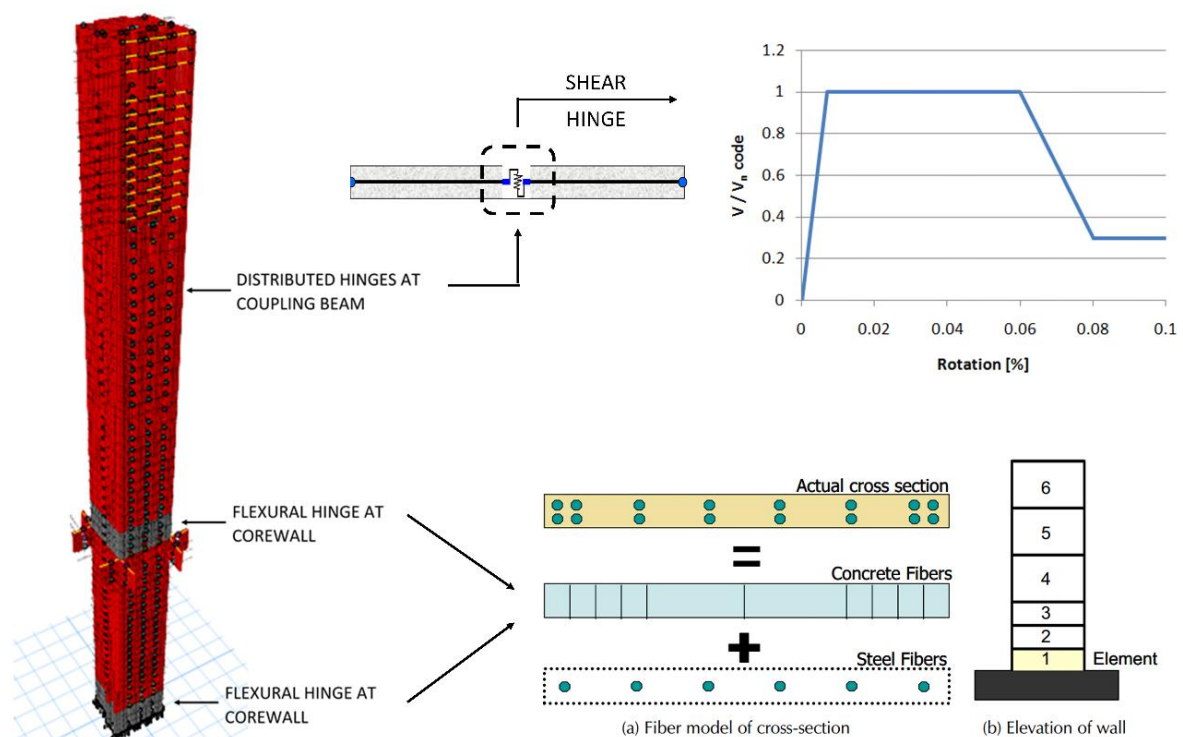
Perilaku komponen *force-controlled* dirancang agar kapasitas nominalnya dapat menahan gaya yang diterima sehingga perilaku komponen secara umum masih bersifat linear elastis. Pada gedung ini, yang termasuk kategori *force-controlled* adalah perilaku geser pada *corewall* dan perilaku geser dan aksial pada kolom *outrigger*.

NONLINEAR MODELLING

Permodelan struktur untuk evaluasi pushover dilakukan menggunakan *software* ETABS 2015, komponen-komponen yang diantisipasi mengalami plastisitas, seperti coupling beam dan dinding geser dalam perilaku lentur, dimodelkan secara nonlinear sesuai dengan dokumen ATC 72-1.

Coupling beam dimodelkan dengan rigid shear link mengikuti referensi ATC 72-1 dengan kurva backbone untuk komponen shear hinge (gambar 5).

Dinding geser dimodelkan sebagai fiber menggunakan komponen *nonlinear layered shell* pada ETABS 2015. Ilustrasi model fiber dapat dilihat pada gambar 5. Kurva *stress-strain* untuk material beton ter-*confine* dimodelkan berdasarkan persamaan Mander. Kurva *stress-strain* untuk baja tulangan dimodelkan mengikuti kurva ASTM A615.



Gambar 5. Target mekanisme pelelehan pada gedung Indonesia-1 North tower, yaitu *flexural hinge* pada *corewall* dan *hinge* pada *coupling beam*. [*hinge modelling source*. ATC-72-1]

ACCEPTANCE CRITERIA

Kriteria penerimaan yang digunakan untuk evaluasi komponen struktur pada titik *performance point* dibedakan sesuai dengan klasifikasi perilaku komponen struktur yang ditinjau, yaitu *deformation-controlled* dan *force-controlled*. Untuk perilaku *deformation-controlled*, kriteria penerimaan berbasis deformasi diambil berdasarkan ATC 72-1. Untuk perilaku *force-controlled*, kriteria penerimaan berbasis gaya dipenuhi dengan memastikan kapasitas komponen untuk perilaku yang ditinjau masih melebihi gaya yang diterima pada titik *performance point*. Tabel di

bawah memberikan rangkuman kriteria penerimaan yang ditentukan untuk *Collapse Prevention* pada MCE-level demand.

Tabel 2. MPA Acceptance Criteria

<i>Item</i>	<i>Value</i>
<i>Story Drift</i>	<i>3% under MCE</i>
<i>Coupling Beam (Frame Type) Rotation</i>	<i>0.04 radian rotation limit</i>
<i>Coupling Beam (Diagonal) Rotation</i>	<i>0.06 radian rotation limit</i>
<i>Core Wall Reinforcement Axial Strain</i>	<i>Rebar tensile strain = 0.05 in tension and 0.02 in compression</i>
<i>Core Wall Concrete Axial Strain</i>	<i>Fully Confined Concrete Compression Strain = 0.015</i>
<i>Core Wall Shear</i>	<i>Verification performed for elastic behavior</i>
<i>Outtrigger Column Axial and Shear</i>	<i>Verification performed for elastic behavior</i>

EARTHQUAKE DEMAND LEVEL & PERFORMANCE POINT UNTUK MPA

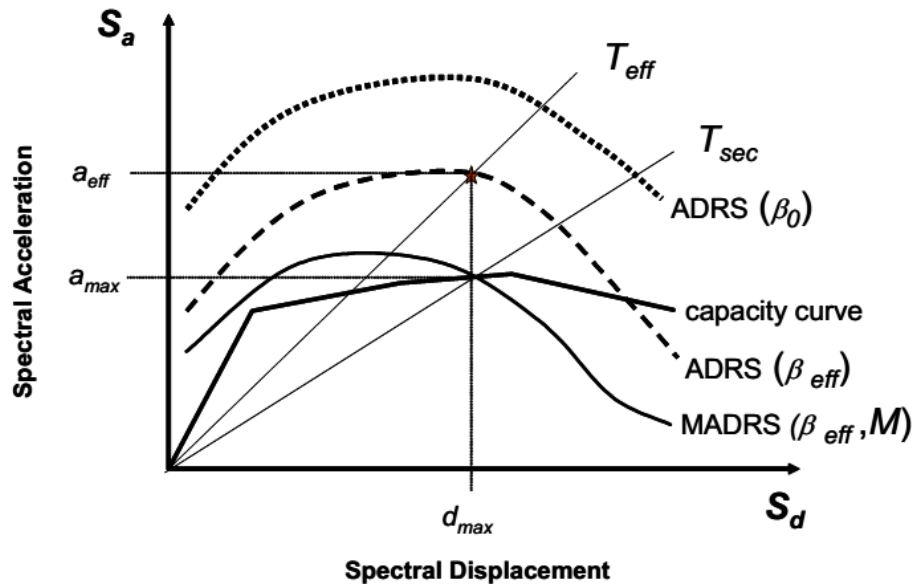
Salah satu hal yang menjadi kunci evaluasi PBSB dengan prosedur statik nonlinear adalah estimasi nilai respons maksimum untuk struktur inelastis yang umumnya direpresentasikan sebagai *peak roof displacement*. Nilai ini sering disebut sebagai *Target displacement* pada metode *displacement modification* atau *Performance Point* pada metode *equivalent linearization* dan harus ditentukan berdasarkan *earthquake demand level* yang tepat. Titik ini yang kemudian dipakai untuk melakukan evaluasi kinerja struktur terhadap kriteria penerimaan yang berlaku. Sesuai dengan ketentuan evaluasi berbasis kinerja (PEER TBI, 2010), penentuan performance point dilakukan pada MCE-level demand.

Untuk gedung Indonesia-1 *North tower*, prosedur yang dipakai untuk menentukan *Performance Point* level MCE adalah FEMA440 Linearization yang dinilai memiliki tingkat akurasi paling baik dibandingkan prosedur alternatif lainnya (Powell, 2006). Secara garis besar, proses linearisasi dilakukan dalam format *Acceleration-Displacement Response Spectrum* (ADRS) untuk mode yang ditinjau dengan menentukan perioda secant, T_{sec} , berdasarkan bentuk kurva kapasitas. Kurva *demand spectrum* yang dimodifikasi/direduksi akibat pengaruh damping efektif diplotkan berpotongan dengan kurva kapasitas, dimana titik perpotongan menghasilkan nilai estimasi respons maksimum atau juga disebut *performance point*. Proses penentuan bersifat iteratif karena perhitungan perioda secant dan damping efektif terkunci pada satu nilai daktilitas (gambar 6).

EVALUASI PBSB MENGGUNAKAN PROSEDUR MPA

Analisis MPA dilakukan menggunakan 20 mode dimana 90% partisipasi massa sudah tercapai berdasarkan analisis modal. Hasil analisis masing-masing mode dikombinasikan menggunakan *Complete Quadratic Combination rule* (CQC) yang dinilai lebih akurat dibandingkan *Square Root Sum Square rule* (SRSS), khususnya untuk struktur yang memiliki perioda saling berdekatan. Koefisien korelasi untuk CQC diambil berdasarkan persamaan Der Kiureghian.

Nilai *performance point* yang ditentukan untuk tiga pasang mode translasi pertama menggunakan prosedur FEMA440 *Linearization* ditunjukkan pada kurva *pushover* dalam format ADRS (gambar 7). Mode 3 dan 6 tidak ditunjukkan karena merupakan mode yang dominan secara torsi sehingga nilai deformasi lateral sangat kecil dan dapat diabaikan.



Gambar 6. Acceleration Displacement Response Spectrum (ADRS) plot berdasarkan prosedur FEMA 440 *Linearization method* [source: FEMA440]

Komponen struktur yang dikategorikan memiliki perilaku *deformation-controlled*, yaitu *shear hinge*/rotasi pada *coupling beam* dan *corewall strain* (tekan pada material beton dan tekan-tarik pada material baja tulangan), dievaluasi masih memenuhi kriteria penerimaan yang berlaku (gambar 8 dan 9).

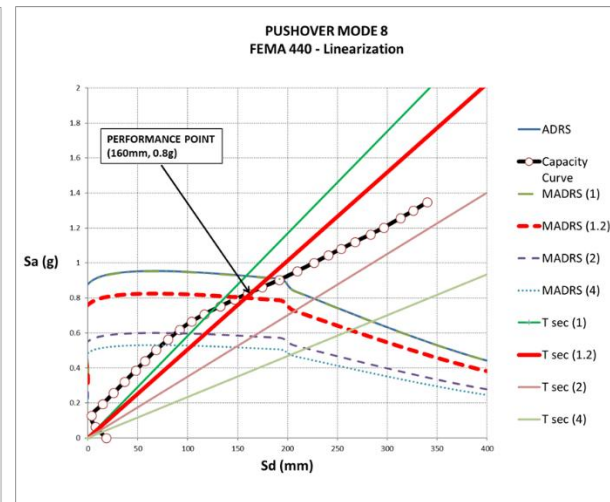
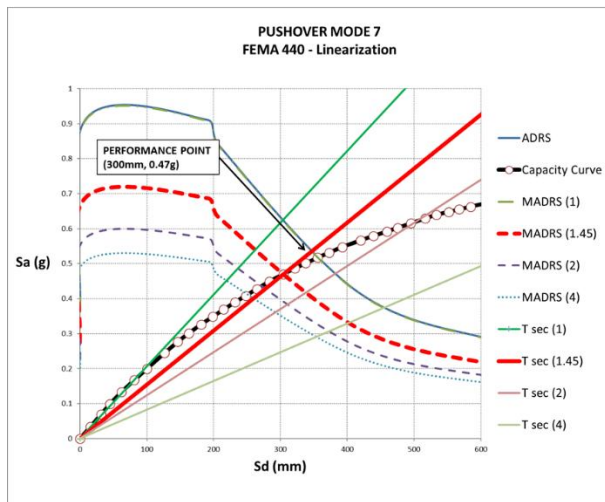
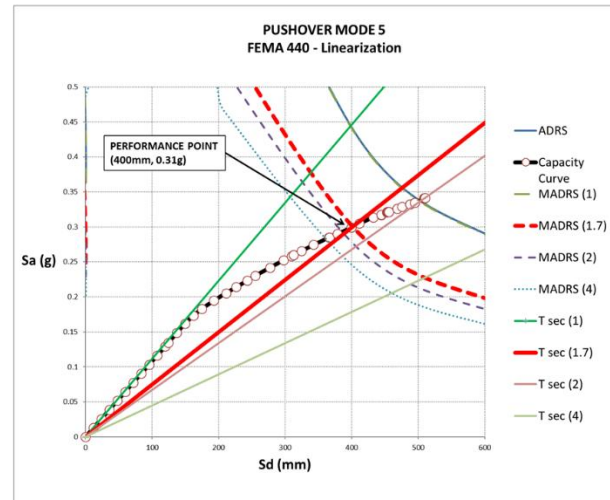
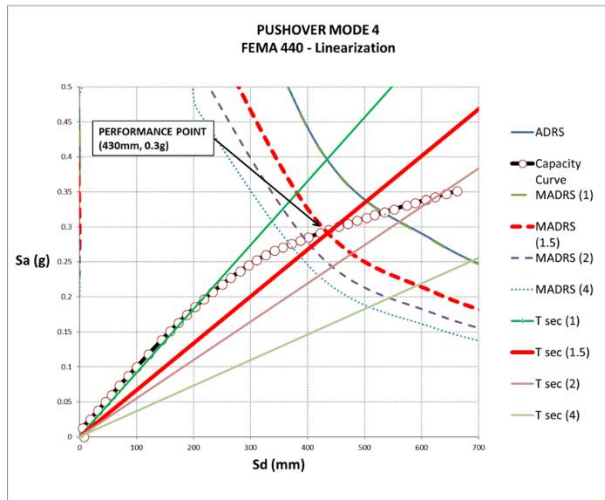
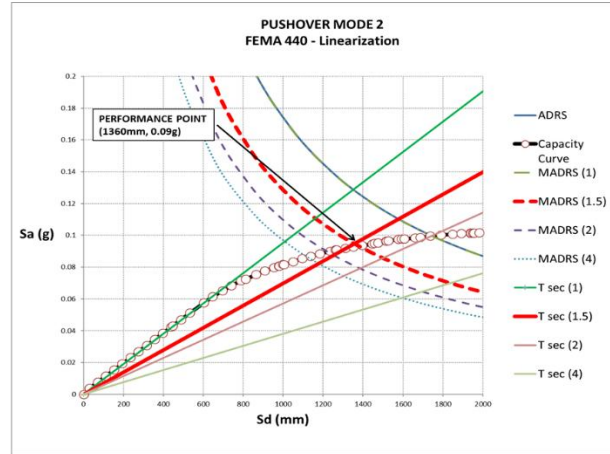
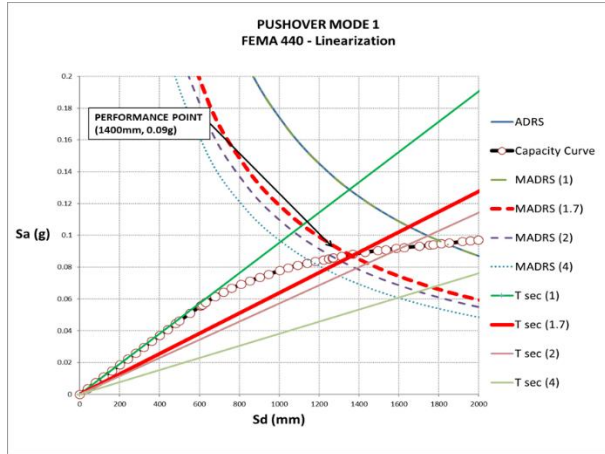
Komponen struktur yang dikategorikan memiliki perilaku *force-controlled*, yaitu *shear* pada *corewall* dan aksial pada kolom, didesain untuk dapat menahan gaya maksimum yang terjadi pada komponen-komponen tersebut.

Berdasarkan evaluasi tersebut, secara garis besar, status kinerja gedung terhadap *demand* gempa level MCE adalah sebagai berikut:

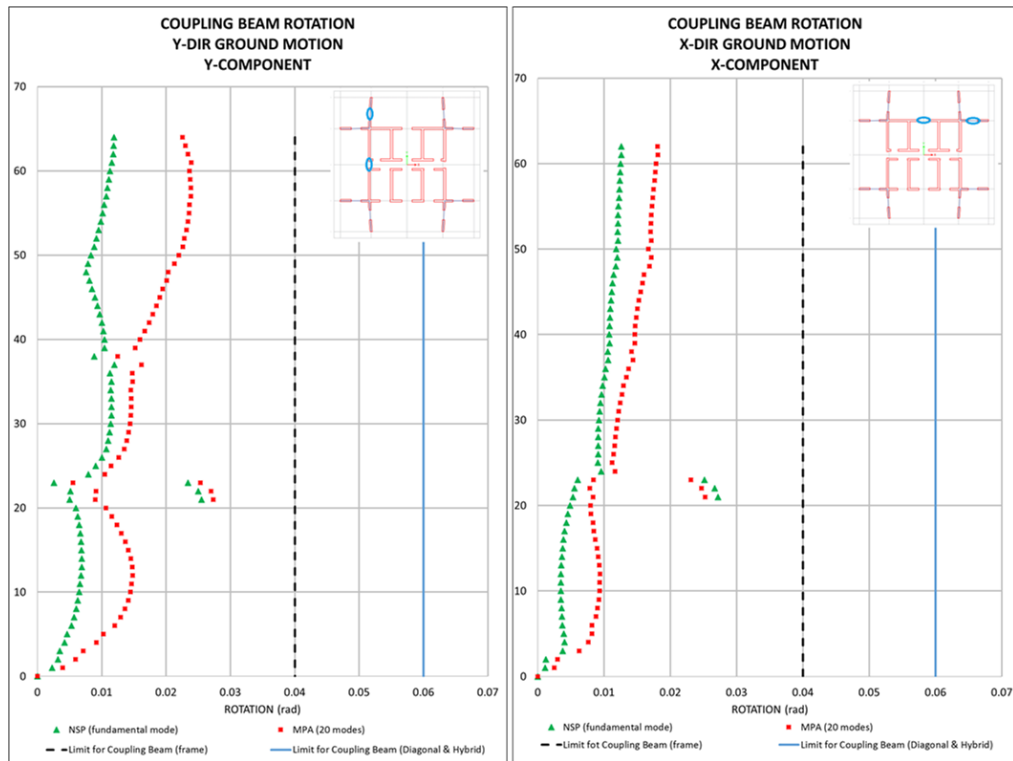
- *Global drift* dan *global interstory drift* masih jauh di bawah batasan kriteria penerimaan, bahkan masih berada di bawah 1% (gambar 11 & 12).
- Pelelehan *coupling beam* sudah terjadi secara cukup merata sepanjang ketinggian bangunan (gambar 8).
- Pelelehan lentur pada dinding geser sudah terjadi pada dasar *corewall* dan level *outrigger* (gambar 9).

PERBANDINGAN HASIL ANALISIS RSA, NSP, MPA, DAN NLRHA

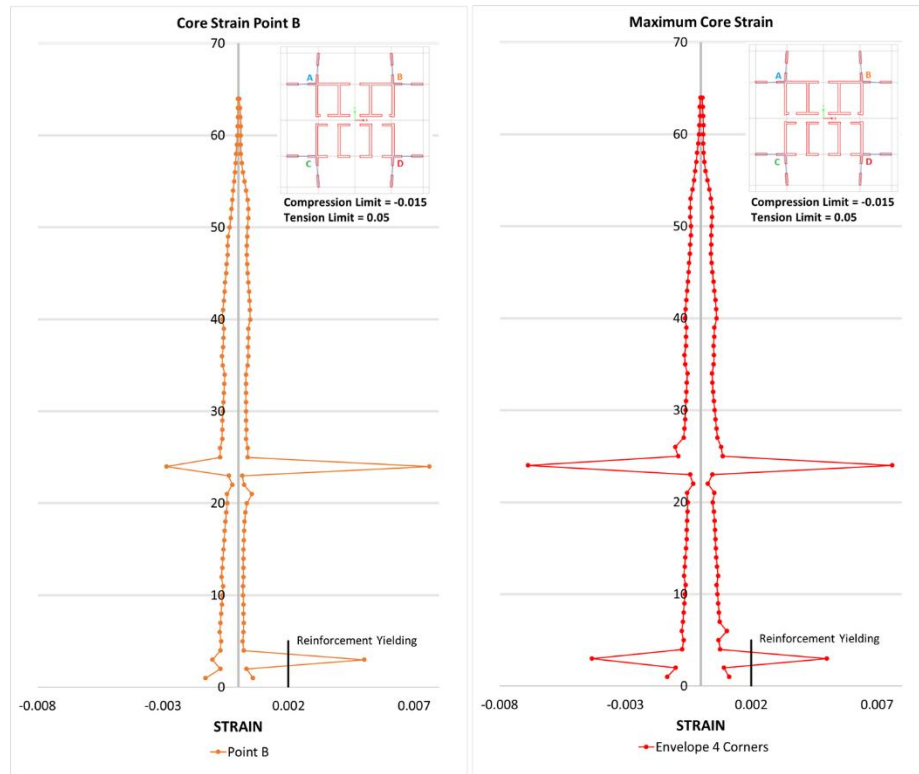
Hasil analisis MPA dibandingkan dengan analisis *RSA code*, *NSP fundamental mode*, dan *NLRHA*. Respons struktur termasuk *story shear*, *displacement*, dan *interstory drift* dibandingkan untuk mengamati tingkat akurasi analisis MPA.



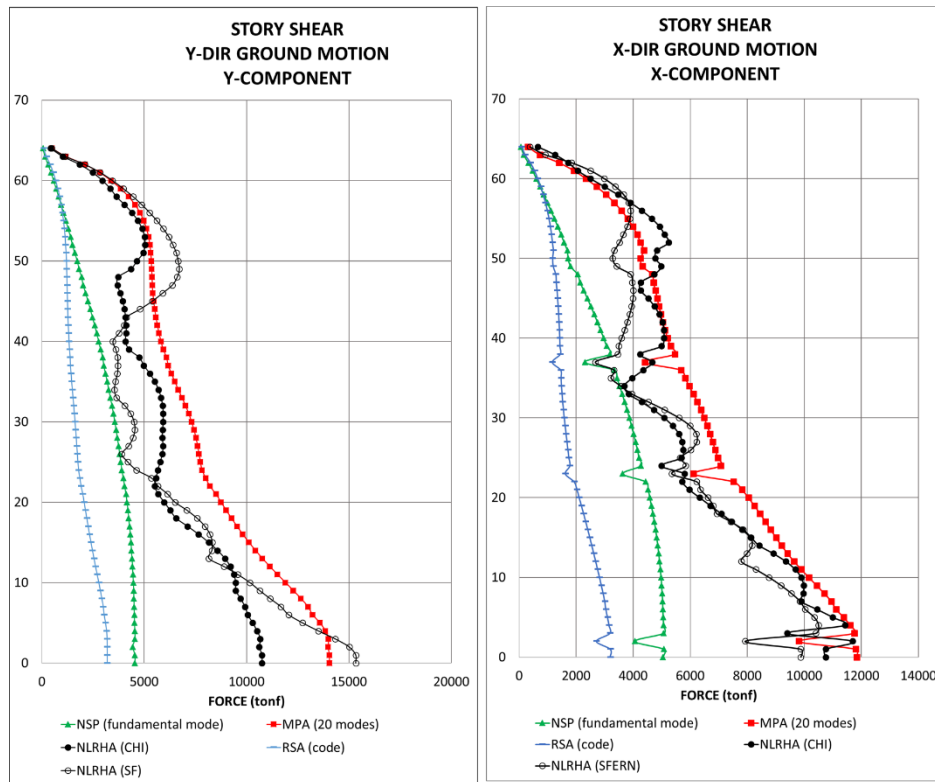
Gambar 7. Kurva pushover dalam format ADRS untuk menentukan *performance point* tiga mode translasi pertama



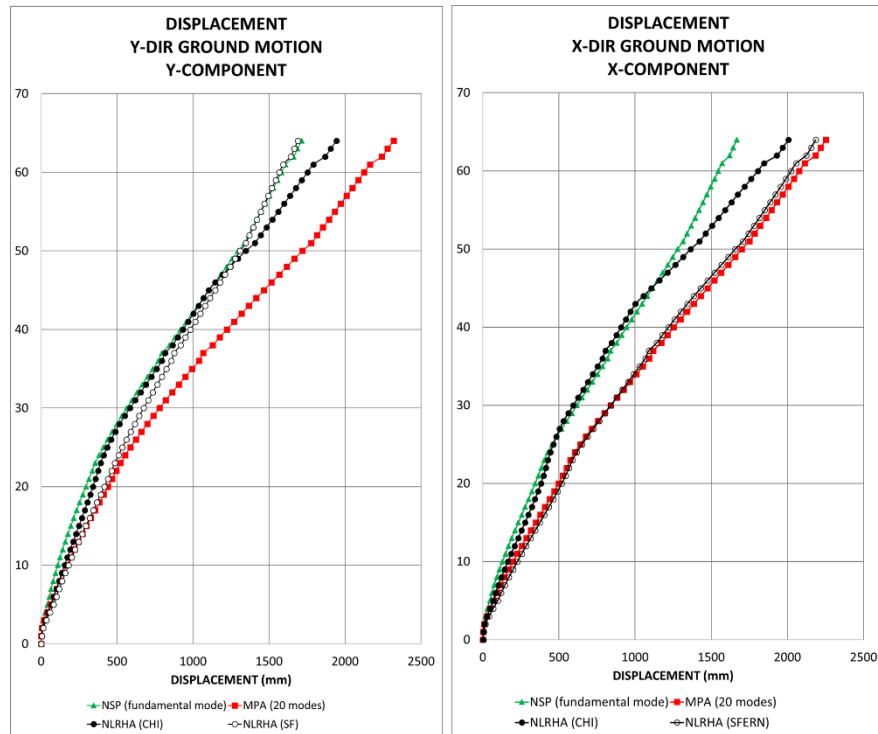
Gambar 8. Plot rotasi maksimum hasil MPA pada *coupling beam* dengan batasan kriteria penerimaan



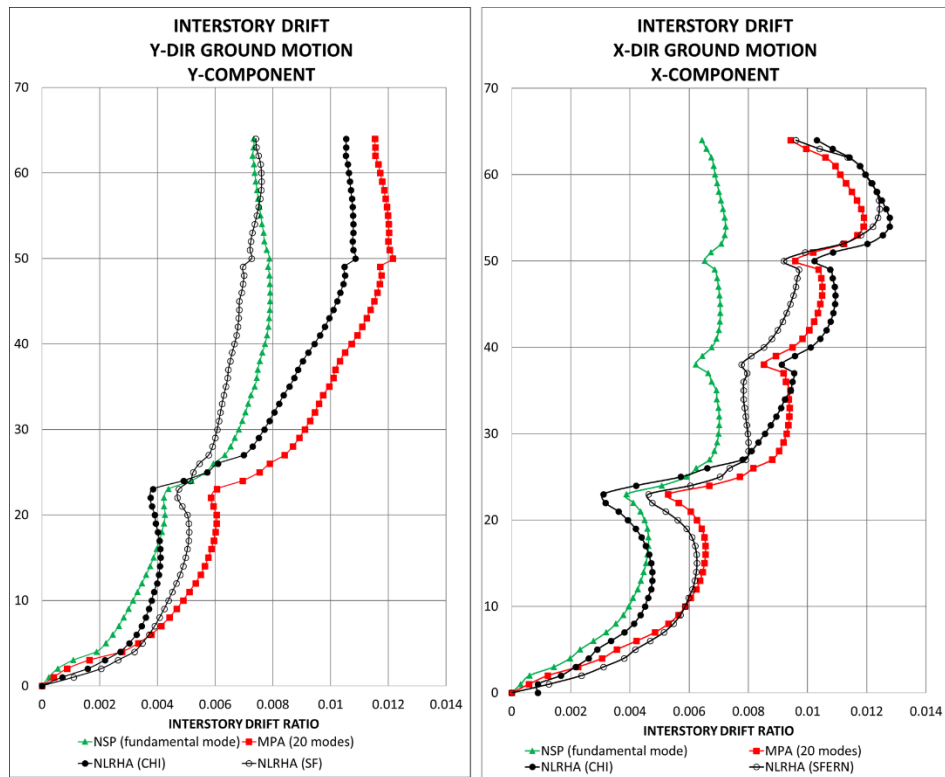
Gambar 9. Plot strain maksimum hasil MPA untuk *corewall* dengan batasan kriteria penerimaan



Gambar 10. Plot story shear untuk ground motion arah Y (kiri) & arah X (kanan)



Gambar 11. *Plot displacement* untuk ground motion arah Y (kiri) & arah X (kanan)

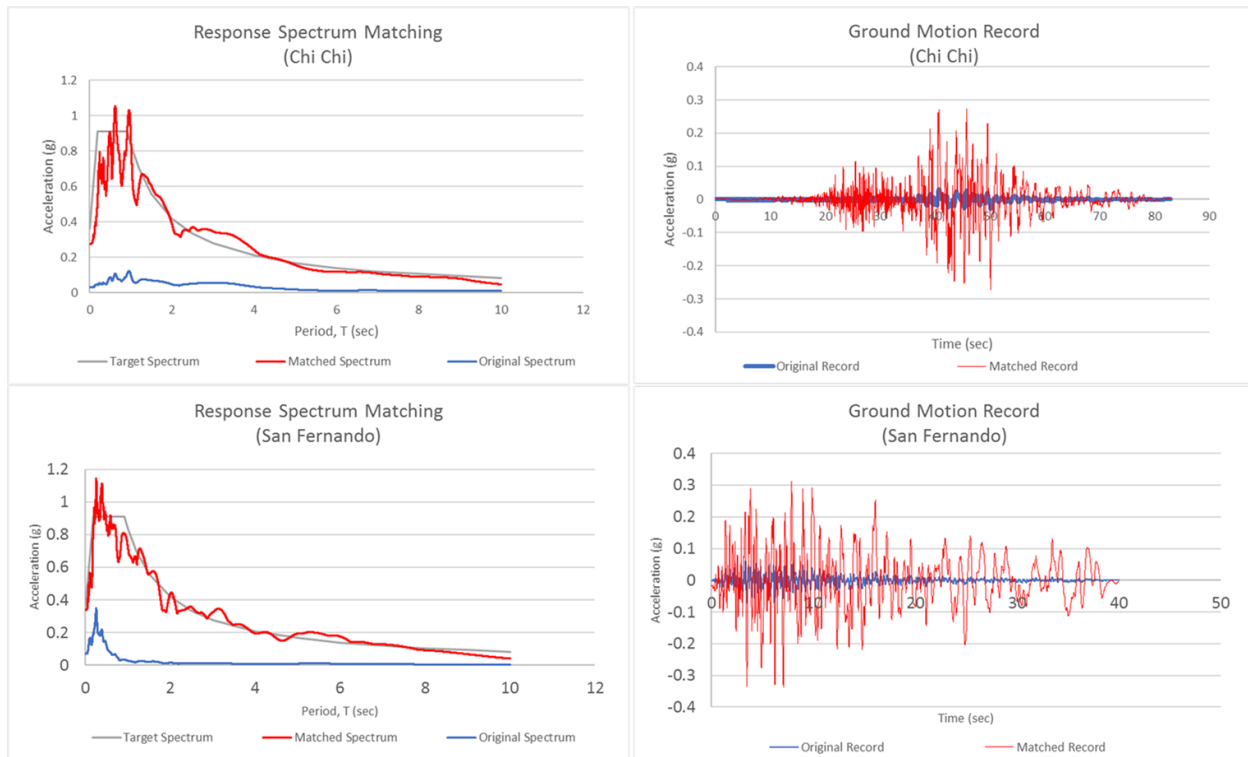


Gambar 12. *Plot interstory drift ratio* untuk ground motion arah Y (kiri) & arah X (kanan)

Seperti yang disampaikan sebelumnya, analisis NLRHA merupakan analisis yang paling akurat dan seharusnya diambil dari nilai rata-rata tujuh rekaman gempa untuk mengatasi *record-to-record variability*. Namun, untuk keperluan studi perbandingan, analisis NLRHA hanya dilakukan menggunakan dua rekaman gempa, yaitu Chi Chi (*subduction*) dan San Fernando (*strike-slip*), yang dimodifikasi dan diskala dalam *frequency domain* untuk dicocokkan dengan *target spectrum* secara individu (gambar 13). Hasil NLRHA tersebut digunakan sebagai *benchmark* untuk mengamati tingkat akurasi prosedur analisis lainnya.

Melalui studi perbandingan hasil respons struktur dari beragam prosedur analisis pendekatan terhadap NLRHA (gambar 10 – 12), khususnya untuk evaluasi komponen *force-controlled* seperti respons geser pada corewall (gambar 10), perlu disoroti beberapa observasi penting sebagai berikut:

- Hasil RSA *code* jauh berada di bawah NLRHA. Hal ini menunjukkan bahwa perancangan berdasarkan analisis RSA *code*, yaitu dengan mereduksi spectrum desain menggunakan faktor modifikasi respons, R, belum tentu menjamin kinerja daktail yang diinginkan pada struktur gedung. Perlu juga dicatat bahwa basis penentuan nilai R yang dicantumkan pada peraturan preskriptif, ditentukan secara acak tanpa basis analitis yang cukup (Klemencic, 2008).
- Hasil NSP masih di bawah NLRHA meskipun sudah memberi hasil yang lebih baik dari RSA *code*. Hal ini menunjukkan NSP masih belum memberikan taraf akurasi yang memadai karena tidak dapat memperhitungkan pengaruh ragam getar tinggi, khususnya untuk aplikasi pada gedung tinggi. ASCE 41 juga membatasi penggunaan NSP, dimana prosedur tersebut hanya diijinkan untuk gedung yang tidak memiliki pengaruh ragam getar tinggi yang signifikan.
- Hasil MPA secara relatif cukup mendekati NLRHA. Hal ini menunjukkan MPA dapat memberikan estimasi hasil respons struktur dengan tingkat akurasi yang memadai.
- Variasi satu rekaman dengan rekaman lain terlihat jelas dan menunjukkan bahwa meskipun eksitasi gempa umumnya merupakan jenis eksitasi *broad-banded*, namun satu rekaman gempa individu tidak akan dapat mengeksitasi seluruh mode pada suatu bangunan. Hal ini menjelaskan alasan aplikasi NLRHA harus dilakukan untuk satu *suite ground motion*, bukan hanya *ground motion* individu untuk mendapatkan hasil analisis yang memadai.



Gambar 13. *Spectrum Matching and Ground Motion Modification* untuk gempa Chi Chi (atas) & San Fernando (bawah)

KESIMPULAN

Makalah ini mengupas aplikasi PBSD pada gedung Indonesia-1 *North tower* yang memiliki sistem struktur *coupled wall* dengan *outrigger*, menggunakan prosedur MPA. Makalah ini juga memaparkan studi komparatif antara hasil analisis *RSA code*, NSP, dan MPA, dibandingkan terhadap NLRHA. Berdasarkan evaluasi PBSD dan pengamatan studi kasus Indonesia-1 *North Tower*, dapat disimpulkan bahwa:

- MPA dan NLRHA merupakan prosedur analisis yang sesuai digunakan untuk gedung tinggi sementara *RSA code* dan NSP masih memiliki keterbatasan dan tidak sesuai digunakan untuk gedung tinggi.
- Analisis *RSA code* berdasarkan peraturan untuk gedung tinggi masih memiliki kekurangan karena asumsi nilai faktor modifikasi respons, R , diambil secara preskriptif tanpa basis analitis yang memadai. Prosedur analisis juga disederhanakan menjadi analisis linear. Penyederhanaan tersebut menyebabkan pengaruh nonlinearitas pada gedung, khususnya untuk ragam getar tinggi tidak ditangkap dengan baik oleh *RSA code*. Oleh karena itu, dalam menggunakan *RSA* berdasarkan peraturan, direkomendasikan menerapkan faktor amplifikasi untuk semua komponen-komponen force-controlled, termasuk gaya geser pada *corewall* (NIST, 2012).
- Evaluasi PBSD menggunakan analisis NSP pada gedung tinggi, masih memiliki kekurangan karena belum dapat mencakup pengaruh ragam getar tinggi.
- Evaluasi PBSD menggunakan analisis MPA pada gedung tinggi, memberikan hasil yang cukup mendekati hasil individu NLRHA, dapat memprediksi taraf pelelehan

- yang direpresentasikan dengan nilai R , secara efektif dan dapat mencakup pengaruh ragam getar tinggi dengan baik.
- Evaluasi PBSB menggunakan analisis MPA dapat memberikan akurasi yang cukup memadai dan masih cukup praktis dilakukan, karena hanya membutuhkan waktu dan tenaga yang jauh lebih sedikit dibandingkan NLRHA dan dapat mengatasi kendala ketidakpastian *ground motion input* pada NLRHA.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE 7. (2010) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* (ASCE/SEI 7-10), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- ASCE 41. (2013) *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings* (ASCE/SEI 31-13), American Society of Civil Engineers, Reston, VA.
- ATC 72. (2010) *Interim Guidelines on Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Buildings* (ATC-72-1), Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Chopra, A. (2007). *"Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering"*, third edition, Prentice Hall
- FEMA 440. (2005) *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures* (FEMA 440), Applied Technology Council, Redwood City, CA.
- Klemencic, R (2008) *"Performance Based Seismic Design – Rising"*, Structure Magazine, Vol. June 2008, 10-13.
- PEER TBI. (2010) *Guidelines for Performance-Based Seismic Design of Tall Buildings* (PEER TBI) Pacific Earthquake Engineering Research Center Tall Building Initiative, Berkeley, CA.
- NIST-NEHRP. (2012) *Seismic Design of Cast-in-Place Concrete Special Structural Walls and Coupling beams* (NIST-NEHRP) National Insititute of Standards and Technology and National Earthquake Hazards Reduction Program, Gaithersburg, MD
- Powell, G. H. (2006), *"Static Pushover Methods – Explanation, Comparison, and Implementation"*, Proc. 8th US National Conference on Earthquake Engineering, San Francisco
- SNI 03-1726. (2012) *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung* (SNI 03-1726:2012), Badan Standarisasi Nasional, Indonesia
- Sukamta, D. (2016), *"Inovasi Dalam Desain Struktur dan Konstruksi Untuk Gedung Super Tinggi"*, Proc. Pameran dan Seminar Himpunan Ahli Konstruksi Indonesia (HAKI), Jakarta, Indonesia