

EVALUASI STRUKTUR GEDUNG BERTINGKAT RENDAH UNTUK ANTISIPASI GEMPA SKALA *MEGATHRUST* I (KONSEP)

Abdul Harris*

Prodi Teknik Sipil, UMKT, Samarinda, Kalimantan Timur

*Email: ah610@umkt.ac.id

Abstrak

BMKG telah mengeluarkan peringatan resmi terkait potensi gempa dengan skala *megathrust*. Sementara di sisi lain, kontur gempa yang tersedia masih merujuk pada rekaman gempa yang belum memasukkan potensi *megathrust*. Karena potensi kerusakan besar maka sejumlah industri perlu menyikapinya dengan melakukan evaluasi ulang terhadap aset berupa struktur-struktur *existing*. Evaluasi direncanakan dengan mengembangkan model struktur lakukan dengan kontribusi dinding pada model analisis inelastik.

Kata kunci: evaluasi, *megathrust*, model inelastik, struktur bertingkat rendah

1. PENDAHULUAN

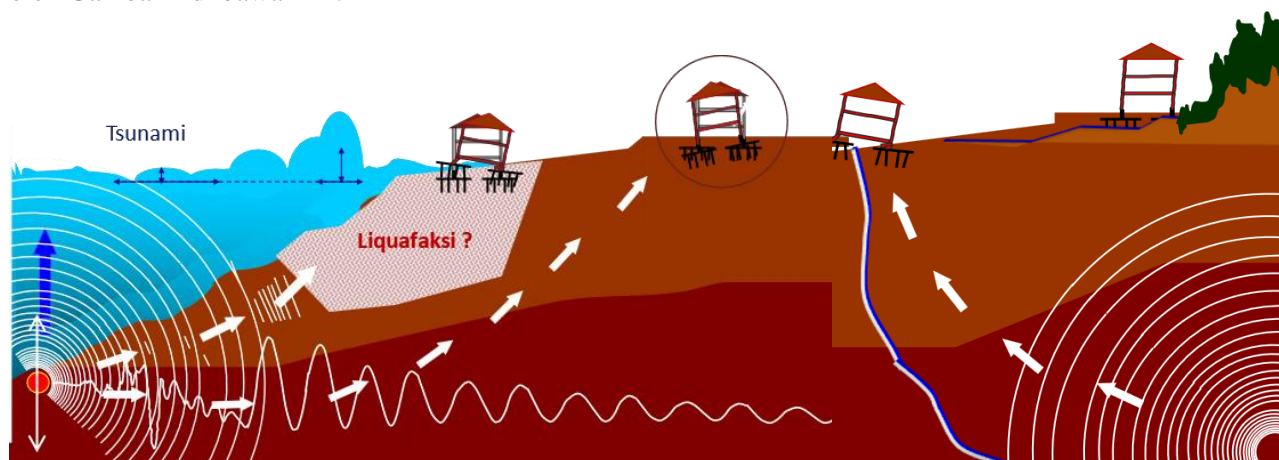
1.1. Naskah

Kepala Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) telah memberikan pernyataan resmi terkait potensi *Megathrust* (24-08-2024) sedemikian membuat beberapa industri berat di Jakarta sampai dengan Karawang merasa perlu untuk menyikapinya dengan melakukan evaluasi seberapa jauh aset mereka seperti bangunan gedung dan pabrik dapat mengantisipasi gempa dengan skala *megathrust*.

Pada dasarnya gempa bumi adalah fenomena alam biasa seperti halnya air yang mengalir dari atas ke bawah, pohon-pohon atau tanah yang menyerap air, pergantian cuaca dan lain-lain. Guncangan gempa dapat dianggap sebagai fenomena alam rutin dalam rangka mempertahankan keseimbangan dinamisnya. Gempa bumi potensial menjadi bencana dominan justru karena persinggungannya dengan kemajuan peradaban manusia. Kota-kota kosmopolitan, bahkan yang megapolitan dengan segala kehidupan modernnya justru meningkatkan efek bencana jika berada di daerah rawan gempa.

Jika fenomena perkembangan peradaban dengan segala efek positif dan negativenya pada kemanusiaan sudah menjadi realita maka fenomena gempa menjadi ancaman bencana bagi daerah terdampak terutama saat fenomena rutin pelepasan energi mempunyai magnitudo tertentu yang bersifat akumulatif. Potensi bencana menjadi semakin besar jika daerah terdampak merupakan kawasan perkotaan megapolitan sampai dengan kawasan industri seperti Jakarta, Bekasi sampai dengan Karawang.

Secara umum dampak gempa kuat dan sangat kuat yang bersumber dari sesar di dasar laut kadang disertai oleh fenomena-fenomena turutan seperti tsunami, likuifaksi selain keruntuhan bangunan dan infrastruktur serta longsornya tebing-tebing. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar ilustrasi yang ditunjukkan oleh Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Ilustrasi gempa bumi sesar di dasar laut dan daratan.

Salah satu definisi Gempa *Megathrust* adalah jenis gempa bumi dengan magnitudo bervariasi antara 7.5 sampai dengan 9.6 yang kemungkinan besar terjadi di wilayah yang terletak di sepanjang sesar serta area di

mana lempeng-lempeng tektonik bertemu satu sama lain (Schäfer & Wenzel, 2019). Indonesia memiliki lima zona lempeng aktif, yaitu *Sumatran Megathrust*, *Java Megathrust*, *Banda Megathrust*, *Northern Sulawesi Thrust*, dan *Philippine Thrust*. Di dalam kelima zona tersebut, terdapat 16 segmen aktif yang berpotensi memicu gempa besar dan menyebabkan tsunami (Tim Pusat Studi Gempa Nasional, 2017).

Walaupun demikian, lebih tepat jika *Megathrust* tidak hanya bertumpu kepada besaran magnitudo sesar-sesar di dasar laut tetapi juga gempa bumi yang bersumber dari sesar-sesar darat, terlebih jika gempa yang terjadi bersifat repetitif pada selang waktu yang singkat. Gempa repetitif di Turki misalnya mengakibatkan dampak yang parah karena bersumber dari daratan sekaligus repetitif. Jadi terminologi *Megathrust* terkait dengan struktur antisipasi gempa lebih tepat diukur dengan skala MMI. Iran, Turki sampai dengan Italy dilewati jalur sesar benua (darat) sedemikian gempa dengan megnitudo di bawah 8 dapat memporak-porandakan kota-kota di sepanjang jalur sesar. Juga jalur yang melewati kota Tangshan di RRC dan yang terakhir gempa yang bersumber dari patahan darat di Myanmar (2025).

Daerah DKI Jakarta dan Jawa Barat juga dilewati jalur-jalur sesar darat yang cukup aktif walaupun dalam satu abad terakhir belum terakumulasi jadi gerakan sesar yang mengakibatkan gempa kuat. Sesar Baribis dan Sesar Lembang potensial akan mengakibatkan gempa kuat yang berdampak dahsyat. Sesar Baribis merupakan sesar mayor yang membentang di bagian barat Pulau Jawa, yang sudah aktif selama 10000 tahun (Sonny 2024) dan mengakibatkan gempa-gempa di Pulau Jawa. Tercatat beberapa bagian Istana Bogor runtuh saat gempa dengan magnitudo 7.0 M_w berpusat sekitar 15 km dari Kota Bogor, kehancuran meluas terjadi. Gempa Cirebon tahun 1847 dengan magnitudo 7.0 M_w berpusat di Kabupaten Cirebon. Gempa bumi Karawang 1862 dengan Magnitudo perkiraan 5.8–6.5 M_w berpusat sekitar perbatasan antara Kabupaten Karawang dan Purwakarta. Data kerusakan tidak tercatat.



Gambar 2. Peta prediksi jalur sesar darat Baribis dan Lembang. (sumber: KOMPAS.com)

Selain Baribis juga terbentang sesar Lembang merupakan sesar aktif yang dapat terdeteksi dan wujudnya terlihat jelas oleh para ahli, yang dikhawatirkan jika terjadi pergerakan, mampu menyebabkan gempa bumi dengan kekuatan yang dahsyat. Yang berpotensi jadi sumber gempa. yang cukup besar di Provinsi Jawa Barat dan juga DKI Jakarta.



Gambar 3. Dampak gempa Cianjur (sumber: Merdeka.com)

Pergerakan Sesar Cianjur yang mulanya tidak tampak di permukaan, namun menjadi sesar aktif dan kemudian menimbulkan gempa baru-baru ini hingga banyak korban berjatuhan. Gempa Cianjur ditandai oleh retaknya tanah hebat di beberapa lokasi yang menunjukkan efek sangat kuat gempa yang diduga bersumber dari patahan darat lainnya di Jawa Barat, yaitu patahan Cimandiri. Gempa bumi Cianjur 21 November 2022 pukul 13.21 WIB mempunyai magnitudo masuk kategori menengah, berkekuatan 5.6 M_w dengan kedalaman yang cukup dangkal, 10 km tetapi menghasilkan kerusakan berat terjadi dengan intensitas Modifikasi Mercalli maksimum mencapai IX (*kerusakan hebat*). Gempa bumi Cianjur 21 November 2022 pukul 13.21 WIB mempunyai magnitudo masuk kategori menengah, berkekuatan 5.6 M_w dengan kedalaman yang cukup dangkal, 10 km tetapi menghasilkan kerusakan berat terjadi dengan intensitas Modifikasi Mercalli maksimum mencapai IX (*kerusakan hebat*).

Dampak gempa pada bangunan tidak serta merta berhubungan langsung dengan skala Richter atau Magnitudo Gempa tetapi juga faktor-faktor lain seperti episentrum gempa jenis tanah dan faktor-faktor minor lainnya. Skala MMI mempunyai parameter yang lebih kompatibel untuk menilai dampak pada suatu daerah terdampak gempa.

Referensi terbaru dari gempa yang bersumber dari sesar darat dan dangkal adalah Gempa Myanmar. Sumber gempa adalah Sesar Sagaing, 16 km barat Kota Mandalay yang merupakan kota terbesar kedua di Myanmar. Sesar Sagaing yang merupakan pertemuan dari Lempeng India dan Lempeng Eurasia dengan kedalaman sekitar 10000 m. Gempa dengan magnitudo 7.7 M_w merupakan gempa *strike slip* dengan efek sekitar X skala MMI yang bahkan dapat meruntuhkan *high rise* di Kota Bangkok yang berjarak 1000 km. Gempa dengan magnitudo 7.7 M_w merupakan gempa *strike slip* dengan efek kerusakan masif ng bahkan dapat meruntuhkan *high rise* di Kota Bangkok yang berjarak 1000 km.

2. PENGEMBANGAN KONSEP DAN METODOLOGI

Untuk mensimulasikan kemungkinan *Megathrust* yang bersumber dari patahan di dasar laut maupun daratan langkah awal adalah dengan mensimulasikan secara sederhana *megathrust* dengan mengaplikasikan tingkat desain penuh *base shear* dimana gaya geser dasar desain (*base shear*) tidak dikalikan 2/3 untuk analisis pendahuluan menggunakan metode statik ekuivalen. Ketentuan di atas dibunyikan oleh ASCE 7 -16 yang dijadikan rujukan utama SNI-1726-2019 : 11.4.7 *Risk -Targeted Maximum Considered Earthquake (MCER) Response Spectrum. Where an MCER response spectrum is required, it shall be determined by multiplying the design response spectrum by 1.5.*

Pendekatan statik ekuivalen atau respons spektrum pada saat gedung dibangun memang bertumpu pada praktek desain tahan gempa yang oleh FEMA 451 disarikan sebagai berikut:

- Persyaratan seismik menyediakan standar minimum untuk digunakan pada desain struktur gedung dalam rangka menjaga keselamatan publik pada saat gempa ekstrem terjadi.
- Persyaratan seismik ditujukan untuk melindungi struktur dari keruntuhan fatalistik dan korban jiwa manusia yang tidak memperhitungkan kondisi struktur pasca gempa terkait pembatasan kerusakan, memelihara fungsi serta kebutuha perbaikan yang relatif mudah pada struktur gedung.
- Gaya-gaya desain berdasarkan asumsi bahwa sejumlah besar perilaku inelastik asignifikan akan terjadi setelah gempa kuat.

Praktik di atas berorientasi kepada *high rise* dengan asumsi-asumsi dari trilogi desain nonlinier statik yaitu dari faktor modifikasi (R), perbesaran defleksi (Cd) dan nilai kuat lebih Ω yang diaplikasikan seragam pada suatu sistem struktur tertentu. Variasi hanya pada tipe gedung berdasarkan perilaku dinamikanya. Pada gedung-gedung *high rise*, perilaku daktail justru dapat dikenali dan diusahakan dengan lebih mudah dibandingkan struktur *low and mid rise*. Jika keberaturan struktur dari *high rise* dapat dijaga, maka hirarki keruntuhan pada *high rise structure* umumnya bersesuaian dengan asumsi-asumsi dari trilogi diasin nonlinier statik.

Konsep yang bersifat implisit di atas terus dikembangkan karena struktur-struktur yang pada perkembangannya dikategorikan sebagai gedung dan non gedung sangat bervariasi perilaku dinamikanya saat memasuki rentang nonlinier. Untuk bangunan tingkat rendah atau menengah (*low-mid rise*) asumsi-asumsi trilogi metode statik nonlinier menjadi kurang kompatibel terlebih jika pada struktur gedung bertingkat rendah diinstalasikan pasangan dinding yang masif dan relatif beraturan secara dinamik.

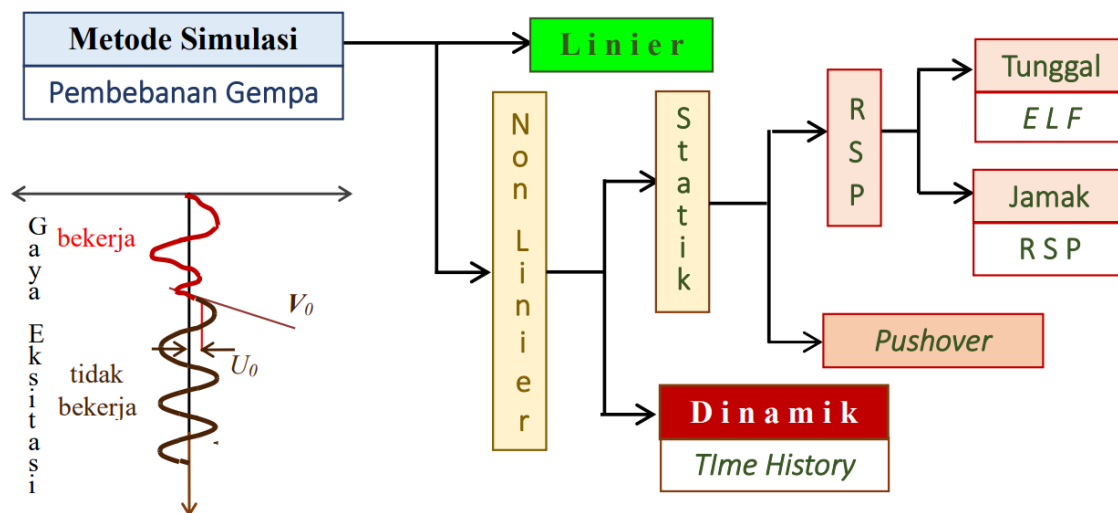
2.1. Metode Desain

Pilihan metode desain struktur berkembang sejalan dengan perkembangan teknologi komputasi dalam bidang analisis struktur. Penggunaan komputer yang berkembang pesat sejak era 1950-an membuat formulasi-formulasi yang stagnan karena keterbatasan alat bantu hitung numerik dapat diatasi sedemikian metode elemen hingga dapat dikembangkan dengan pesat sejak era tahun 1950-an. Model-model struktur yang kompleks dan gigantik dapat dimodelkan dengan relatif mudah, bahkan sampai dengan pemodelan elemen 3 dimensi (3D).

Walaupun demikian penggunaan elemen-elemen 1 Dimensi (1D) untuk pemodelan struktur yang digunakan oleh metode-metode klasik tetap menjadi pilihan pertama. dan kemudian penggunaan elemen-elemen 2 dimensi (2D). Penggunaan elemen-elemen 3D hari-hari ini saat teknologi komputasi sudah berkembang pesat terbatas hanya untuk kepentingan riset dan desain-desain khusus, bukan untuk yang praktis.

Untuk kebutuhan desain praktis, selain penggunaan elemen-elemen 1D atau 2D disederhanakan juga sedemikian rupa sehingga pendekatan dinamik inelastis menjadi pendekatan nonlinier statik dimana proses inelastik diwakili oleh trilogi desain nonlinier statik yang terdiri dari faktor modifikasi (R), perbesaran defleksi (C_d) dan nilai kuat lebih (Ω). Proses penyederhanaan pendekatan dinamis menjadi statis diilustrasikan pada bagan pilihan-pilihan metode simulasi pembebanan gempa lateral yang dapat dicermati pada Gambar 4.

Metode-metode simulasi merupakan hasil penyederhanaan yang lumayan signifikan dari kejadian gempa nyata di lapangan. Bahkan metode respons spektrum, baik yang tunggal maupun jamak justru tidak memasukkan rekaman-rekaman percepatan eksitasi gempa melainkan dengan meninjau perilaku dinamik struktur sesaat setelah eksitasi gempa berhenti bekerja. Terminologi respons spektrum muncul dari penyederhanaan ini. Respons spektrum dari perilaku dinamik model-model struktur saat gaya eksitasi berhenti bekerja. Metode statik ekuivalen pada dasarnya masuk dalam rumpun metode respon spektrum yang paling sederhana yang berbasis hanya pada mode -mode fundamental dari spektrum perilaku dinamik dari suatu model struktur.



Gambar 4. Metode-metode simulasi pembebanan gempa.

Sejalan dengan perkembangan teknologi komputasi maka proses penyederhanaan di atas justru membuka peluang untuk melakukan evaluasi suatu struktur existing yang lebih rasional dengan menelusuri metode-metode terdahulu dan melengkapinya dengan pendekatan-pendekatan terkini. Terdapat *margin-margin* yang masih ada dari hasil penyederhanaan. Walaupun demikian terdapat juga hal-hal yang justru berpotensi fatal akibat dari penyederhanaan jika asumsi-asumsi yang digunakan *misleading*.

Metode simulasi yang paling mendekati adalah metode riwayat waktu (*Time History*) yang umumnya membutuhkan biaya komputasi yang besar. Enam rekaman gempa disimulasikan kepada model analisis dinamik. Untuk mendapatkan metode yang lebih sederhana maka dilakukan pendekatan statik inkremental yang tidak menggunakan rekaman gempa secara langsung. Model dilengkapi dengan model elemen-elemen plastis sehingga proses plastifikasi setiap elemen dapat dijejaki.

Metode berikutnya yang paling sederhana yaitu metode respon spektrum yang juga merupakan pendekatan statik nonlinier. Proses plastifikasi tidak dijejaki langkah demi langkah melainkan disederhanakan dengan memodifikasi simulasi gaya berikut deformasinya dengan membandingkan gaya pada kondisi elastis dengan gaya pada saat model plastisnya mengalami leleh struktur global yang pertama. Simulasi gempa

diperoleh dari persamaan tanpa gaya eksitasi yang menghasilkan nilai-nilai eigen yaitu eigen value dan eigen vektor. Periode *angular*, periode struktur adalah *eigen value* dan *mode-mode shape* adalah eigen vektor. Simulasi gaya yang masuk dan distribusinya merupakan hasil normalisasi *mode-mode shape* dan periode struktur yang besarnya diperoleh dari mencermati nilai maksimum dari rekaman-rekaman gempa pada suatu kontur gaya gempa dasar wilayah. Dengan nilai maksimum ini hal yang dinamik dapat disederhanakan menjadi statik.

Jika yang digunakan adalah *mode-mode shape* yang pertama dan dominan partisipasi modalnya sebagai konsekuensi dari struktur yang beraturan dari segi dinamikanya maka metode respon spektrum dapat disederhanakan dan dimodifikasi menjadi metode statik ekuivalen yang menjadi jauh lebih sederhana. Sebelum melakukan evaluasi dapat dicermati proses penyederhanaan dari Ilustrasi yang ditunjukkan oleh Gambar 4.

2.2. Metode Evaluasi Awal dengan *Pushover*

Pushover adalah metode yang menjadi *bench mark* dari metode-metode nonlinier statik. Kurva-kurva hasil *pushover* juga digunakan sebagai ilustrasi dari suatu kinerja struktur implisit pada saat gempa kuat terjadi. Sebagai contoh, kurva kinerja implisit dari suatu sistem struktur penahan momen, pertama kali diisi dengan kurva hubungan gaya geser lateral dasar maksimum (statik) versus deformasi lateral dari suatu dari suatu model struktur yang didesain elastik semua elemen-elemennya, sebagai desain referensi. Selanjutnya, model struktur dipaksa untuk masuk pada rezim plastis dengan memodifikasi dimensi penampangnya sedemikian sehingga salah satu atau beberapa penampangnya akan mengalami degradasi kapasitas momen penampangnya tetapi tetap bertahan kapasitas geser dan normalnya sedemikian rupa sehingga gaya-gaya dalam masih dapat ditransfer ke bagian penampang lainnya.

Segmen-segmen penampang dari elemen-elemen yang mengalami plastifikasi ini disebut sebagai sendi plastis. Selama gaya inkremen satu arah (bertambah langkah demi langkah) struktur global akan mengalami pelelehan bagian fuse dari elemen-elemennya (sendi-sendi plastis) -pelelehan. pertama kalinya. Simulasi gaya yang membuat struktur mengalami leleh pertama inilah yang disebut sebagai gaya desain pada metode respons spektrum atau statik ekuivalen.

Pada analisis *pushover* nilai R bervariasi, berbeda antara satu model struktur dengan model struktur lainnya. Banyak faktor yang membuat perbedaan menjadi signifikan antara lain adalah ketidakberaturan struktur, daktilitas aktual segmen-segmen yang diharapkan sebagai sendi plastis, hirarki keruntuhan, perilaku pondasi aktual.

Besaran gaya geser yang diinduksikan tidak merujuk pada besaran tertentu melainkan diinkremen langkah demi langkah sampai suatu formasi rangkaian dari sendi-sendi plastis dapat dianggap telah menyebabkan struktur *collapse*. *Pushover* juga dapat diatur dilakukan sampai pada target batas inkremen gaya tertentu atau deformasi tertentu.

Pushover akan memberikan informasi seberapa jauh daktilitas aktual suatu struktur dengan catatan informasi tentang daktilitas *fuse* yang bertindak sebagai sekering cukup akurat bukan sebatas asumsi-asumsi saja. Idealnya perilaku *fuse* dapat dibuktikan oleh sejumlah pengujian model di laboratorium atau dari hasil laporan pengujian-pengujian material dengan geometri yang relatif sama dari elemen-elemen *fuse*. Judul



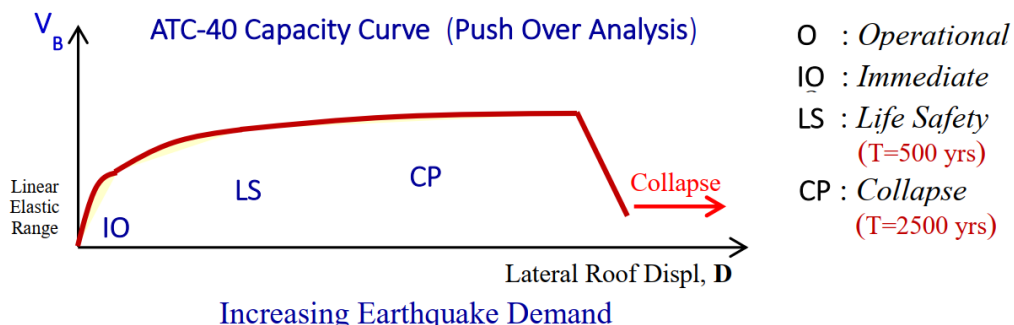
Gambar 5. Contoh struktur dengan nilai R aktual yang rendah.
 (sumber: AFP Photo/BNPB, Tribunnews, Itoldya)

Struktur *low-mid rise* pada umumnya rentan terhadap hirarki keruntuhan yang mengakibatkan perilaku struktur global menjadi kurang daktil sedemikian nilai R dan C_d yang diasumsikan tidak terpenuhi. Ekspresi-ekspresi arsitektur yang tidak dicermati dapat menyumbangkan perilaku global struktur yang getas walaupun sudah di ikhtiarkan daerah sendi-sendi plastis yang daktil.

Dari paparan diatas, daktilitas segmen dalam elemen-elemen utama struktur atau *fuse* menjadi salah satu faktor penting dari suatu simulasi pembebanan gaya ekstrim seperti gempa sedemikian validitasnya perlu dicermati. Info tentang validitas dari daktilitas elemen menjadi persyaratan penting pada saat evaluasi bangunan existing. Dalam hal ini tidak cukup hanya dari info komersial produk melainkan harus diperoleh dari info-info yang jelas validitasnya. Hirarki keruntuhan, daktilitas sambungan dan redudansi struktur adalah faktor-faktor penting lainnya untuk memenuhi asumsi-asumsi daktilitas struktur pada pendekatan statik nonlinier yang paling sederhana yang digunakan oleh standar.

2.3. Kinerja Struktur Eksplisit

Kurva kinerja implisit dari suatu pendekatan nonlinier statik diperoleh dari suatu analisis *pushover*, ditunjukkan Gambar 6 yaitu kurva tipikal dari ATC 40. Kapasitas struktur yang elemen-elemen *fuse*-nya masuk pada kondisi nonlinier direpresentasikan oleh kurva ini. Deformasi global pada *roof top* struktur menjadi indikator dari kinerja.



Gambar 6. Ilustrasi kinerja struktur pasca gempa kuat.

Kinerja implisit hanya direpresentasikan oleh kurva kapasitas tanpa secara eksplisit menggambarkan *demand* respons spektrumnya. Perkembangan 2 dekade terakhir mulai memperkenalkan kurva kapasitas yang disandingkan dengan kurva respon spektrum sedemikian kinerja eksplisit bisa diketahui. Pendekatan ini dikenal sebagai pendekatan berbasis kinerja (ATC, 1996). Dari hasil kinerja eksplisit ini dapat digunakan untuk menggunakan prediksi kinerja untuk mengambil keputusan mengenai keselamatan dan risiko. Metode ini

mengkarakterisasi kinerja terutama dalam hal kerusakan yang diharapkan pada komponen struktural dan nonstruktural. Karena kerusakan struktural menyiratkan perilaku inelastis, prosedur desain dan analisis tradisional yang menggunakan teknik elastis linier hanya dapat memprediksi kinerja secara implisit. Sebaliknya, tujuan dari prosedur analisis seismik inelastis adalah untuk memperkirakan secara langsung besarnya deformasi dan distorsi inelastis.

Sebagai contoh digunakan bangunan gedung dari suatu kompleks pabrik di Jakarta dimana struktur-struktur perkantoran ditemukan relatif beraturan, dengan dinding-dinding dengan bukaan-bukaan yang relatif teratur. Analisis menggunakan bantuan *software* SAP 2000 dan pemrograman Octave. Bangunan gedung objek observasi adalah gedung beton bertulang 3 lantai dengan ketinggian seragam (3.75 m) dengan panjang 7x7.20 m dan lebar (2x7.2+6) m. Pasangan dinding cukup masif dipasang di perimeter gedung dengan bukaan-bukaan jendela dan pintu-pintu masuk.

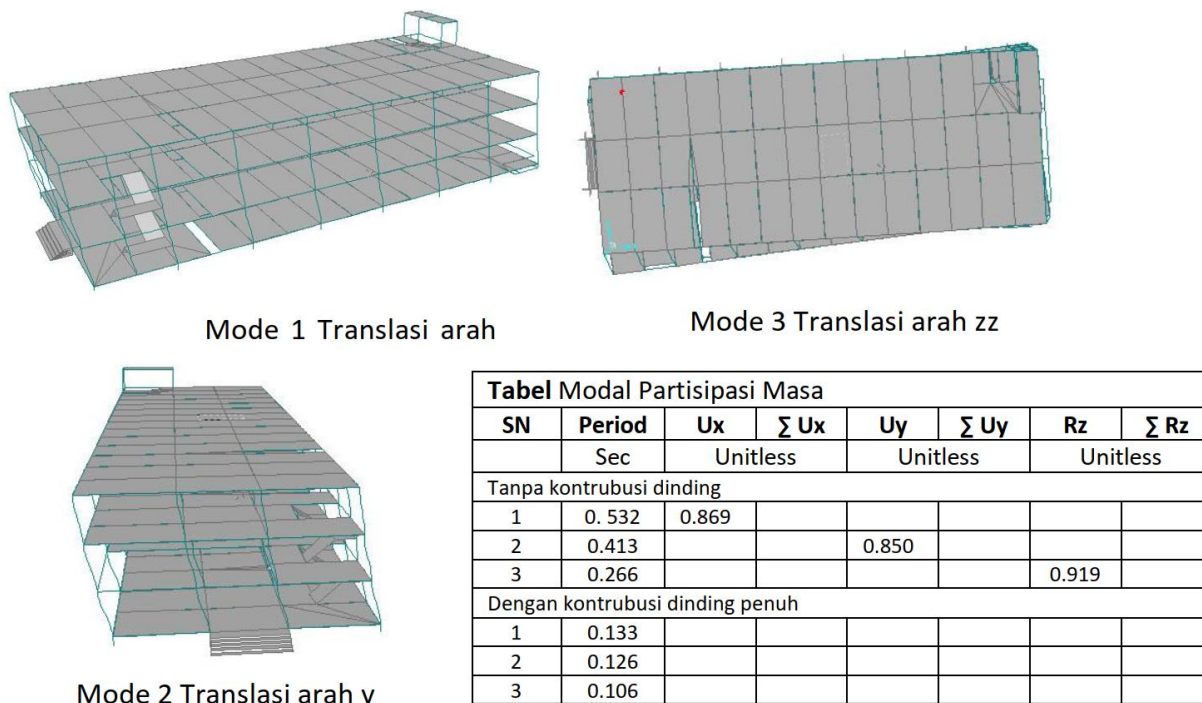
3. HASIL DAN PEMBAHASAN STUDI PENDAHULUAN

Struktur bertingkat rendah yang sedang ditinjau mempunyai perilaku dinamik yang khas saat diguncang gempa kuat. Asumsi-asumsi sistem rangka pemikul momen murni tidak mungkin tercapai karena kontribusi dinding-dinding yang relatif beratutan.

Tanggap inelastik struktur saat gempa kuat mengguncang akan merubah periode struktur secara bertahap dimulai dari kondisi elemen rangka dan juga pasangan dinding yang berperilaku elastik penuh untuk kemudian secara gradual akan berubah sejalan dengan terjadinya retak pada pasangan dinding dan juga terbentuknya sendi-sendi plastis pada elemen balok atau kolom.

3.1. Perilaku Dinamik Hasil Komputasi

Mode shape dan periode getar struktur ditinjau dengan DOFs arah UX, UY dan RZ (Chopra, 1995). *Mode shape* ditinjau untuk mencermati indikasi-indikasi ketidakberaturan struktur pada tahap awal. Begitu juga dengan periode getar struktur yang bertujuan untuk memberikan gambaran awal. Perilaku dinamik gedung pada dua kutub ekstrim yaitu kutub kondisi elastis dan asumsi kutub inelastis utopis dimana pasangan dinding kehilangan seluruh kontribusi kekuannya sehingga struktur menjadi rangka pemikul momen murni. Analisis periode berikut *mode shape* dari 2 kutub ekstrem ditunjukkan oleh Gambar 7.



Gambar 7. Perilaku dinamik tanpa dan dengan kontribusi kekakuan dinding.

Walaupun tidak digunakan dalam desain, perilaku dinamik model elastis dengan kontribusi dinding yang bersesuaian dengan model ekstrim tanpa kontribusi dinding diasumsikan dapat menyederhanakan analisis *pushover* dengan mode tunggal pada setiap arah ortogonal. Hasil analisis juga dapat diinterpretasikan secara sederhana bahwa fenomena ketidakberaturan signifikan tidak terdeteksi dari dua model ekstremnya. Gambar

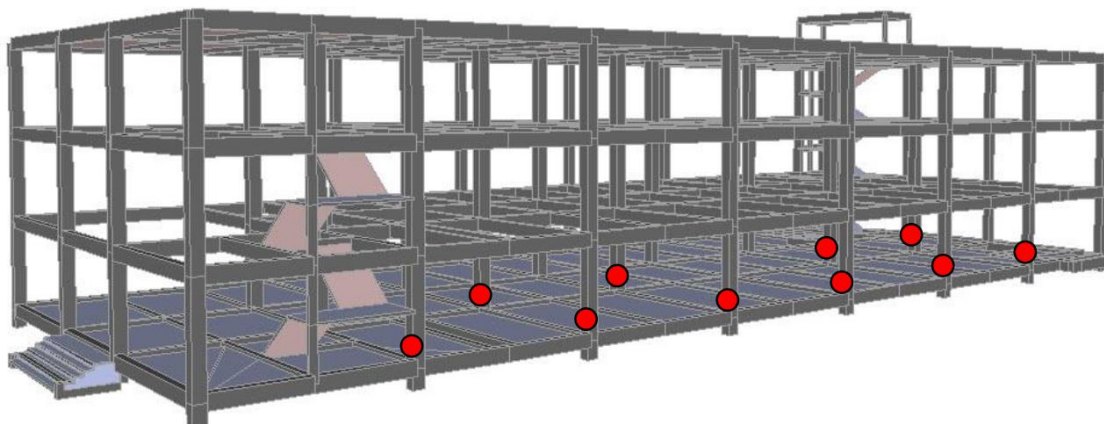
7 di atas juga menunjukkan bahwa periode-periode komputasi dua kutub ekstrim maupun periode pendekatan relatif berada di rentang percepatan konstan sedemikian gaya geser dasar tidak berubah.

3.2. Hasil Studi Awal dengan *Pushover*

Sebagai studi awal, dilakukan analisis ulang berdasarkan metode yang digunakan pada saat gedung didesain dan tanpa kontribusi kekakuan dari pasangan dinding. Hasil analisis mengkonfirmasi bahwa elemen-elemen non *fuse* selama struktur global masuk rezim inelastik tetap elastis sesuai asumsi desain kapasitas. Bahkan elemen non *fuse* terkonfirmasi tetap elastis setelah koefisien S_{DS} dan S_{D1} sama dengan koefisien S_{DS} dan S_{D1} (tidak dikalikan angka $2/3$) untuk mensimulasikan gaya geser dasar pada skema gempa kuat dengan skala *megathrust*.

Hasil analisis statik ekuivalen atau respon spektrum di atas kemudian diuji dengan *pushover* untuk mencermati asumsi-asumsi yang telah diambil dari metode-metode tersebut di atas. Analisis dengan *pushover* dapat menjejaki mekanisme keruntuhan. Hasil analisis menunjukkan sendi-sendi plastis justru terbentuk diawali di kaki-kaki kolom seperti ditunjukkan Gambar 8. Hasil ini jelas tidak kompatibel dengan asumsi dari metode desain dimana tanggap elastik hanya direpresentasikan oleh trilogi desain nonlinier statik. Hasil evaluasi ini tentu saja akan menghasilkan rekomendasi untuk meningkatkan kapasitas kolom sedemikian mekanisme keruntuhan memenuhi asumsi dari metode implisit. Rekomendasi tersebut dapat berlebihan jika kontribusi dinding dalam rentang inelastik dari struktur global dapat dimodelkan dengan baik.

Analisis pendahuluan menggunakan asumsi-asumsi terkait material pada bagian *fuse* dari elemen balok dan kaki kolom. Untuk analisis lanjutan perlu dicermati data tulangan terpasang untuk kemudian dikonfirmasi dengan pengujian sampel tulangan terpasang berikut kapasitas beton terpasang di titik-titik tertentu pada balok dan kaki-kaki kolom.



Gambar 8. Sendi plastis termobilisasi terlebih dahulu di kaki-kaki kolom

Penelitian lanjutan adalah dengan membuat model analisis *pushover* dengan memasukkan kontribusi dinding yang disederhanakan sebagai elemen 1D berupa *strut* monotonik yang memperhitungkan bukaan-bukaan pada pasangan dinding.

4. KESIMPULAN

Hasil analisis model tanpa kontribusi dinding ini tidak menggambarkan kondisi aktualnya sedemikian perlu dimodelkan struktur dengan kontribusi dinding. Berbeda dengan bangunan gedung *high rise* dimana kekakuan dinding pengisi tidak signifikan dibanding elemen-elemen vertikal kolom yang menahan gaya lateral, pada bangunan *low-mid rise* kontribusi pasangan dinding berkontribusi signifikan walaupun pada saat intensitas gempa meningkat pasangan dinding akan masuk pada rezim non linier karena lemah pada tarik dan juga geser. Dalam keadaan non linier dinding diharapkan dapat bertindak sebagai *strut* saat mengalami aksi tekan pada suatu beban siklik.

Jika intensitas gempa meningkat bahkan ekstrim (*megathrust*) di masa yang akan datang maka kontribusi dinding yang sudah terdegradasi ini dapat menyumbangkan kontribusi pada skema terburuk 500 sd 2500 tahunan dengan target kinerja *collapse prevention* atau minimal *life safety*. Walaupun demikian kondisi tersebut di atas hanya dapat dicapai jika struktur relatif beraturan secara dinamik.

Penelitian lanjutan membutuhkan model struktur dengan kontribusi dinding yang dimodelkan sebagai *strut-strut* dengan memperhitungkan bukaan pada dinding-dinding. Untuk melengkapi data-data dengan lebih cermat, kalau diperlukan disertai oleh pengujian non destruktif, *pushover* yang lebih mendekati dapat dilakukan ulang terlebih dari beberapa hasil riset *strut* beton sumbangkan kekakuan yang berlipat dibanding jika halnya memperhitungkan kekakuan lateral kekakuan kolom. Untuk analisis lanjutan perlu dicermati data tulangan terpasang untuk kemudian diklarifikasi oleh pengujian sampel di ujung-ujung balok dan juga kaki-kaki kolom di beberapa titik-titik tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Virginia: American Society of Civil Engineers ASCE
- ATC. 1996. ATC-40: Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Building. California: Applied Technology Council.
- Chiora, A. K. 1995. DYNAMICS OF STRUCTURES. Prentice-Hall, London.
- FEMA. 2005. FEMA 440 : Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedure, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- FEMA. 2006. FEMA 451 NEHRP Recommended Provisions : Design Examples, Washington, DC: Federal Emergency Management Agency.
- Hamzah, A., Sadisun, I.A., Meilano, I., Brahmantyo, B., & Supartoyo. 2013. Analisis Geomorfologi Tektonik Sistem Sesar Baribis di Daerah Majalengka dan Sekitarnya. Jurnal Gunungapi dan Mitigasi Bencana Geologi.
- Schafer, A. M. , M, Wenzel. 2019,.Global Megathrust Earthquake Hazard—Maximum Magnitude Assessment Using Multi-Variate Machine Learning. *Geohazards and Georisks Vol 7 - 2019*
- Tempo. (2019, 24 September). Potensi Gempa Sesar Lembang Peneliti BRIN Sebut Tingkat Ancaman Besar Karena Dangkal, diakses pada 28 September 2019, dari <https://www.tempo.co/lingkungan>