

# ANALISA TIDAK LINEAR STRUKTUR BETON: DARI SEISMOLOGI SAMPAI PEMODELAN STRUKTUR

Ade Faisal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Dosen Program Studi Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Jl. Mukhtar, Basri No.3 Medan 20238, Telp 061-66245674, email: adefaisal@yahoo.com

## ABSTRAK

Penggunaan analisa tidak linear semakin sering dilakukan di dunia khususnya dalam hal evaluasi struktur bangunan lama. Untuk itu memahami cara untuk melakukan analisa tidak linear secara baik adalah sangat perlu. Apalagi peta zona gempa terbaru di Indonesia telah diberlakukan. Hal ini memaksa kita untuk kembali memastikan apakah gedung yang kita tempati masih aman dari bahaya gempa melalui analisa tidak linear. Tulisan ini mengulas secara ringkas perkembangan dalam analisa tidak linear untuk struktur beton yang dimulai dari getaran akibat gempa dari perspektif seismologi sampai dengan pemodelan struktur secara tidak linear tidak elastis.

**Kata kunci:** analisa tidak linear, struktur beton, rekayasa kegempaan

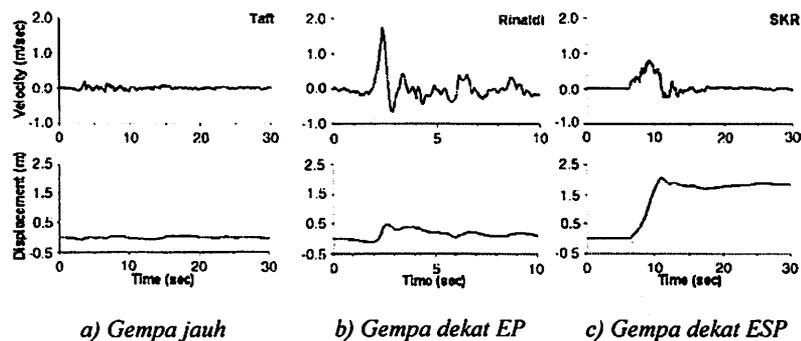
## 1. PENDAHULUAN

Memahami perilaku getaran gedung akibat gempa adalah sangat penting dalam proses perencanaan dan evaluasi kegempaan bangunan gedung. Hal ini dikarenakan respon bangunan gedung yang mengalami getaran gempa tidak akan pernah, walaupun bangunan tersebut memiliki geometri, kekakuan dan kekuatan yang sama. Perkembangan teknologi yang cukup pesat saat ini, khususnya di bidang komputer, membuat kompleksitas masalah di atas dapat dikurangi. Walaupun tidak sempurna dan menyeluruh, getaran dan respon bangunan gedung sudah dapat dimodelkan dengan lebih baik, baik secara linear elastis maupun tidak linear tidak elastis. Oleh karena itu tulisan ini secara ringkas dibuat untuk mengulas perkembangan di bidang rekayasa kegempaan khususnya tentang pemodelan tidak linear tidak elastis struktur rangka gedung beton bertulang. Banyak dokumen yang menjadi rujukan terpaksa tidak disebutkan dalam makalah ini. Beberapa dokumen juga hanya disebutkan nama panggilannya saja, yang dengannya para pembaca akan dengan mudah mendapatkannya di internet. Hal ini terpaksa dilakukan karena keterbatasan ruang penulisan.

## 2. REKAMAN GETARAN GEMPA

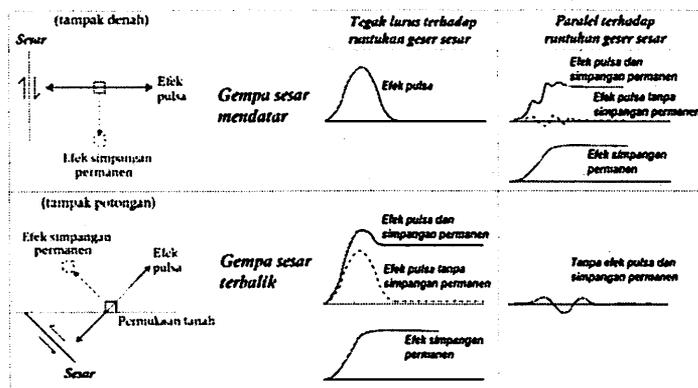
Getaran tanah akibat gempa bermula dari runtuhnya bagian antar muka pada sesar aktif, baik itu pada sesar mendatar (*strike-slip fault*), sesar normal (*normal fault*) maupun sesar terbalik (*reverse fault*). Luas dan volume bagian yang runtuh tersebut akan mempengaruhi besarnya energi yang dilepaskan ke segala arah dari dalam kerak bumi sampai ke permukaan bumi dalam bentuk gelombang getaran. Getaran gempa yang terekam oleh alat pencatat di stasiun gempa dipengaruhi oleh banyak faktor seperti jenis sesar, magnitude, jarak sumber gempa ke lokasi yang ditinjau (jarak gempa) dan jenis lapisan tanah di lapangan. Sebagai ilustrasi dapat dilihat melalui rekaman gempa Kern 1952 (stasiun Taft), gempa Northridge 1994 (stasiun Rinaldi) dan

gempa Kocaeli 1999 (stasiun SKR) yang dibuat pada Gambar 1. Getaran gempa dekat (*near-field motion*) jelas sekali mengandung efek pulsa (*pulse effect*) yang cukup besar pada riwayat waktu kecepataannya (Gambar 1b dan 1c), sebuah efek yang tidak dimiliki oleh rekaman gempa jauh (Gambar 1a). Sedangkan dua rekaman gempa dekat dapat memiliki memiliki efek pulsa yang tidak sama (Gambar 1b dan 1c), dimana yang satu (Gambar 1c) mengandung efek simpangan permanen (*fling-step*) sedangkan yang lainnya tidak (Gambar 1b). Ketiga jenis rekaman gempa ini bila dipakai akan memberikan hasil respon bangunan gedung yang sangat berbeda, walaupun rekaman gempa telah diskalakan mengikut spektrum disain yang disyaratkan peraturan.



**Gambar 1:** Perbandingan rekaman gempa jauh dan dekat [1]

Terjadinya masalah di atas erat kaitannya dengan jenis sesar dan jarak gempa. Stewart dkk. [2] menjelaskan bahwa rekaman gempa dekat yang berasal dari sesar terbalik dan sesar mendatar dapat mengandung efek pulsa (EP) atau efek simpangan permanen (ESP) atau bahkan keduanya. Ilustrasi mengenai hal ini dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan sesar normal umumnya tidak mampu memberikan rekaman yang mengandung kedua efek ini.



**Gambar 2:** Ilustrasi EP dan ESP berdasarkan jenis sesar dan arah lokasi bangunan

EP pada rekaman riwayat waktu kecepatan dapat terjadi bila lokasi yang ditinjau terletak dekat dengan runturan sesar, arah runturan geser pada sesar menuju ke lokasi yang ditinjau (*forward directivity*), dan bila arah rayapan getaran ke lokasi yang ditinjau adalah tegak lurus terhadap arah runturan geser sesar. Ini dapat terjadi pada sesar mendatar maupun sesar terbalik. Sedangkan ESP akan terjadi pada rekaman riwayat

waktu simpangan bila lokasi yang ditinjau terletak dekat dengan runtuh geser dan bila arah rayapan getaran ke lokasi yang ditinjau adalah tegak lurus terhadap arah runtuh geser terbalik. ESP juga terjadi bila lokasi yang ditinjau terletak pada arah yang paralel terhadap arah runtuh geser mendatar. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa tidak semua rekaman gempa dekat memiliki EP dan ESP.

Respon struktur terhadap jenis rekaman gempa ini juga akan berbeda secara signifikan. Respon struktur bertingkat banyak akan mengalami deformasi yang lebih besar bila terkena getaran gempa dekat dibanding bila struktur tersebut mengalami getaran gempa jauh. Struktur bertingkat banyak yang terkena getaran gempa dekat EP akan memberikan respon yang cenderung besar pada kondisi ragam getar yang tinggi (*higher mode effect*). Ini berbeda bila struktur tersebut terkena getaran gempa dekat ESP dimana struktur akan cenderung memberikan respon yang besar pada kondisi ragam getar alami [1]. Berdasarkan hal ini maka rekaman gempa harus dipilih secara hati-hati untuk analisa riwayat waktu.

### 2.1. Memilih rekaman gempa untuk analisa riwayat waktu

Ada banyak metode dalam memilih rekaman gempa yang dapat mewakili kondisi kegempaan di lokasi struktur. Katsanos dkk. [3] menjelaskan secara ringkas sejumlah metode yang ada seperti metode berdasarkan parameter magnituda-jarak, parameter magnituda-jarak-profil tanah, parameter magnituda-jarak-durasi (rekaman getaran), parameter magnituda-jarak-kondisi seismologi, dan parameter magnituda-jarak-rasio percepatan kecepatan. Metode lain adalah metode berdasarkan penyesuaian ke spektrum disain (*spectral matching*) dan metode berdasarkan ukuran intensitas getaran (*ground motion intensity measures*). Metode yang paling praktis dan umum dipakai adalah memilih rekaman berdasarkan parameter intensitas gempa (magnituda) dan jarak gempa terdekat. Artinya rekaman dipilih dari data di dalam *online database*, seperti PEER-NGA Database ([http://peer.berkeley.edu/peer\\_ground\\_motion\\_database](http://peer.berkeley.edu/peer_ground_motion_database)), COSMOS Database (<http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx>) atau K-net Database (<http://www.knet.bosai.go.jp>), berdasarkan magnituda gempa maksimum yang pernah atau kemungkinan akan terjadi di wilayah di sekitar lokasi gedung dan jarak gempa terdekat. Metode ini kemudian berkembang pesat dengan penambahan parameter-parameter lain seperti jenis sesar dan kondisi tanah. Metode pemilihan rekaman gempa yang dianut di berbagai peraturan gempa di dunia (ASCE 7-10, Eurocode 8) umumnya berdasarkan parameter magnituda, jarak gempa terdekat, jenis sesar dan kondisi lapisan tanah. Untuk mengadopsi efek gempa dekat ( $\leq 5$  km), ASCE 7-10 mensyaratkan komponen utama horizontal getaran agar dirotasikan ke arah tegak lurus runtuh geser sesar sedangkan komponen ortogonal lainnya ke arah paralel runtuh geser sesar.

Belakangan ini metode pemilihan rekaman gempa berdasarkan konsep probabilitas sudah sering dipakai seperti yang diusulkan oleh Prof. Baker dari Universitas Stanford. Baker memperkenalkan cara memilih sekumpulan rekaman gempa yang dinamakan *conditional mean spectrum (CMS)*. Dalam *CMS*, pertama-tama nilai spektrum percepatan disain pada perioda alami struktur ditentukan. Kemudian rekaman dipilih dari *database* berdasarkan skenario magnituda dan jarak terdekat. Setelah mengubah semua rekaman ke bentuk spektrum respon ( $S_a$ ) dan ke bentuk log  $S_a$ , nilai rata-rata dan standar deviasinya kemudian dihitung. Lalu nilai epsilon (*conditional mean*) ditentukan untuk semua perioda dan dikalikan terhadap koefisien korelasi. Kemudian *CMS* dapat ditentukan dengan menjumlahkan nilai rata-rata log  $S_a$

kepada hasil kali epsilon dengan standar deviasi log  $S_a$ . Semua rujukan yang terkait CMS dapat diunduh gratis di <http://www.stanford.edu/~bakerjw/publications>.

Selain rekaman asli, rekaman getaran gempa sintetis atau hasil simulasi numerik juga dapat dipilih untuk analisa riwayat waktu. Getaran gempa sintetis umumnya merupakan hasil penyesuaian spektra (*spectral matching*) dimana  $S_a$  dari rekaman yang dipilih disesuaikan dengan bentuk spektra disain yang ada di peraturan gempa. Sejumlah metode penyesuaian spektra telah diusulkan termasuk oleh Hancock dkk. [4]. Metode Hancock dkk. ini dipakai sebagai "mesin" pada program *SeismoMatch*.

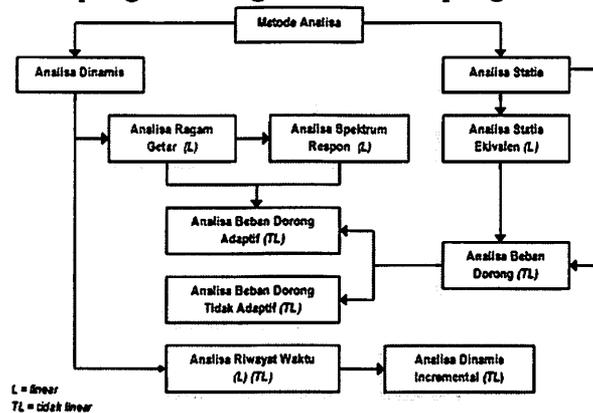
Getaran gempa hasil simulasi numerik dapat juga dipakai, yang umumnya merupakan hasil analisa gelombang gempa berbasis parameter-parameter seismologi seperti kecepatan gelombang geser pada batuan, sifat perlambatan gelombang sebuah material (*anelastic attenuation*), jarak gempa, magnituda momen, luas runtuh pada sesar, tegangan yang dilepas (*stress drop*) dan lain-lain. Metode yang umum dipakai di AS dan Kanada adalah Metode Boore dan Metode Motazedian-Atkinson. Kedua metode ini menggunakan pendekatan simulasi stokastik yaitu getaran diperlakukan sebagai sinyal Gauss acak (*white noise*) mengikuti spektrum sumber gempa model-Brune yang dipengaruhi oleh parameter *stress drop*. Perbedaan antara keduanya terletak pada bagaimana memperlakukan sumber gempa dimana Metode Boore memakai model sumber gempa titik (*point source*) sedangkan Metode Motazedian-Atkinson menggunakan model sumber gempa sesar hingga (*finite fault source*). Metode Boore ada di dalam program gratis SMSIM ([http://www.daveboore.com/software\\_online.html](http://www.daveboore.com/software_online.html)) sedangkan metode Motazedian-Atkinson ada di dalam program gratis EXSIM ([http://http-server.carleton.ca/~dariush/research/EXSIM\\_Beta.zip](http://http-server.carleton.ca/~dariush/research/EXSIM_Beta.zip)). Rujukan yang terkait dengan kedua metode ini dapat diunduh secara gratis di jejaring Dr. David M. Boore ([http://www.daveboore.com/pubs\\_online.php](http://www.daveboore.com/pubs_online.php)).

Prosedur pemilihan rekaman gempa dan penskalaannya untuk keperluan analisa riwayat waktu untuk berbagai jenis struktur dijelaskan secara terperinci di dalam NIST GCR 11-917-15 yang diterbitkan oleh NEHRP. Dokumen ini merekomendasikan penggunaan spektrum target untuk berbagai jenis parameter respon struktur yang berbeda, pemilihan rekaman dan penskalaan spektrum rekaman asli ke spektrum target. Sebagai contoh bila respon gedung bertingkat rendah/sedang didominasi oleh perioda alami dan respon yang diharapkan adalah simpangan atap maka direkomendasikan untuk memakai CMS. Dokumen ini menjelaskan bahwa tidak ada satu spektrum target pun yang dapat mewakili secara sempurna semua kondisi getaran yang mungkin terjadi.

### 3. ANALISA STRUKTUR

Dalam disain dan evaluasi kegempaan struktur gedung, sejumlah metode analisa struktur dapat digunakan. Analisa riwayat waktu tidak linear tidak elastis adalah yang terbaik untuk dilakukan, baik itu untuk disain maupun untuk evaluasi. Pada Gambar 3 diilustrasikan berbagai jenis metode analisa struktur yang sering dipakai mulai dari analisa statik sampai dengan analisa dinamik. Analisa riwayat waktu tidak linear *incremental dynamic analysis* (IDA) adalah metode yang terbaik untuk memperkirakan respon struktur. Sayangnya metode usulan Vamvatsikos dan Cornel [5] ini memerlukan proses yang berulang-ulang dan waktu analisa yang relatif lama. Metode IDA secara langsung sering dipakai untuk memperkirakan daktilitas dan kuat lebih (*overstrength*) struktur. Sebelum IDA diperkenalkan, daktilitas diperkirakan melalui analisa beban

dorong (*pushover analysis*) dan analisa riwayat waktu tidak linear, yang masing-masing untuk memperkirakan simpangan leleh global dan simpangan maksimum struktur.



Gambar 3: Metode-metode analisa struktur [6]

Analisa beban dorong juga sering digunakan untuk menentukan nilai kuat lebih struktur dan juga faktor reduksi beban, bersama dengan analisa riwayat waktu atau analisa statis ekuvalen. Saat ini ada 2 metode analisa beban dorong yaitu metode adaptif dan metode tidak adaptif. Metode tidak adaptif terdiri dari metode yang mengandung efek ragam getar (*non-adaptif modal pushover analysis*) dan yang mengabaikan efek ragam getar (*non-adaptif non-modal pushover analysis*). Metode standar konvensional, yang banyak dipakai dalam praktek saat ini, adalah murni analisa statik tidak linear dan termasuk ke dalam metode tidak adaptif mengabaikan efek ragam getar. Untuk struktur gedung bertingkat, metode ini sama sekali tidak mampu menghasilkan nilai simpangan antar tingkat mendekati hasil analisa riwayat waktu tidak linear, karena mengabaikan pengaruh ragam getar tinggi.

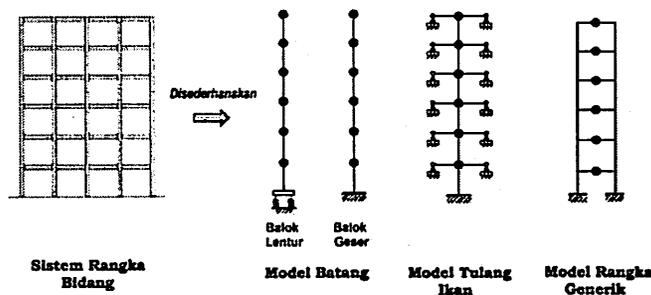
Kemudian metode ini dikembangkan dengan memakai sejumlah pembebanan lateral konstan. Bentuknya mengacu ke bentuk-bentuk ragam getar (umumnya sampai ke ragam getar ke empat). Hasil analisa kemudian dikombinasikan mengikut beberapa aturan main. Metode ini termasuk ke dalam metode tidak adaptif yang mengandung efek ragam getar. Metode ini berkembang lagi dengan memasukkan unsur ragam getar dan massa ragam getar efektif (sampai ragam getar ke tiga) yang kemudian hasil analisisnya dikombinasikan mengikut aturan SRSS. Metode ini dikenal dengan *modal pushover analysis*. Hasil dari metode ini, yang diaplikasikan kepada struktur gedung bertingkat, sangat mendekati hasil analisa riwayat waktu, khususnya pada tingkat bawah struktur, sedangkan pada bagian tingkat atas struktur cenderung kurang mendekati.

Metode analisa beban dorong yang pada prosesnya memuat perubahan-perubahan pembebanan lateral seiring dengan perubahan ragam getar dan faktor partisipasi massa (hasil dari analisa Eigenvalue), yang kemudian hasil akhirnya dikombinasikan memakai aturan SRSS atau CQC, disebut dengan metode adaptif. Metode ini ada 2 macam yaitu metode berbasis gaya dan metode berbasis perpindahan. Metode berbasis gaya memberikan hasil yang kurang lebih sama kualitasnya dengan metode tidak adaptif yang tidak mengandung ragam getar. Hal ini berbeda dengan metode adaptif berbasis perpindahan dimana hasil simpangan antar tingkatnya cenderung mendekati hasil analisa riwayat waktu. Kedua jenis metode adaptif ini ada di dalam program komersial *SeismoStruct* dan program gratis *ZeusNL*.

Bila perbandingan hasil kurva kapasitas dilakukan antara analisa beban dorong adaptif (berbasis perpindahan) dengan IDA maka akan diperoleh perbedaan yang kecil. Artinya analisa beban dorong masih bisa menjadi sebuah alternatif yang bagus dan praktis dalam rangka mengetahui kapasitas struktur. Program gratis lainnya yang mampu melakukan analisa ini adalah *OpenSees*. Walaupun blok-blok data masukan telah disiapkan oleh pengembang program, namun pembuatan data masukannya masih terbilang "kurang bersahabat" karena harus dilakukan dengan memakai bahasa pemrograman Tcl/tk. Program komersil lainnya adalah *Ruaumoko* yang memiliki fitur model histeresis yang sangat bervariasi dan banyak, sehingga dapat dimanfaatkan untuk berbagai jenis material dan juga berbagai kondisi analisa riwayat waktu.

### 3.1. Pemodelan struktur

Pada tulisan ini pemodelan struktur yang dimaksud adalah pemodelan struktur gedung beton bertulang secara makroskopis menggunakan alat bantu program komputer. Umumnya dalam proses perencanaan, analisa struktur tidak perlu berulang-ulang dilakukan sehingga model struktur gedung beton bertulang dapat secara penuh dimodelkan ke dalam bentuk sistem rangka portal atau sistem kombinasi. Namun bila tujuan analisa adalah untuk mengevaluasi respon struktur berdasarkan parameter-parameter disain (daktilitas, faktor reduksi beban), disebut dengan studi parametrik, maka pemodelan secara utuh akan memakan waktu analisa yang lama. Untuk keperluan ini umumnya penyederhanaan model selalu dipakai. Sebagai contoh sistem rangka bidang (2 dimensi) pada Gambar 4 dapat disederhanakan ke bentuk model batang (*stick model*), baik itu model balok lentur ataupun model balok geser. Sistem rangka juga dapat disederhanakan menjadi model tulang ikan (*fish bone model*) yang cukup populer di Jepang. Model lain yang sering dipakai untuk penyederhanaan analisa dalam kajian parametrik adalah model rangka generik (*generic frame*). Semua model ini sangat layak dipakai bila target hasil analisa yang diinginkan adalah simpangan global, simpangan antar tingkat, gaya geser tingkat dan gaya geser dasar.



Gambar 4: Model sistem rangka portal yang disederhanakan

Pemodelan struktur gedung yang memiliki sistem rangka portal dan dinding geser dapat dibuat dengan model rangka dan *bracing*. Untuk kasus struktur gedung yang memiliki sistem rangka portal dan dinding geser, penyederhanaan model dapat dibuat dengan menganggap dinding geser sebagai kombinasi kolom lentur dan balok yang sangat kaku, menggunakan elemen garis pada program komputer. Artinya kolom lentur ini dihubungkan oleh balok-balok yang sangat kaku pada setiap tingkatnya.

Struktur dinding pengisi, yang biasanya diabaikan dalam pemodelan struktur, umumnya dimodelkan sebagai elemen *bracing* aksial. Perlu dicatat disini, kontribusi

dinding pengisi yang terbuat dari dinding bata sangat mempengaruhi kekakuan tingkat. Adanya dinding pengisi yang kaku pada sebuah tingkat, dan pada tingkat lainnya tidak ada, bisa menyebabkan efek tingkat lemah (*soft-story*). Keberadaan dinding pengisi juga sangat mempengaruhi ragam getar alami sehingga nilai faktor gempa yang dipengaruhi oleh perioda alami sudah pasti akan menjadi tidak sama. Dalam analisa tidak linear elemen dinding pengisi ini dimodelkan melalui sebuah elemen garis yang memiliki kekuatan dan simpangan yang getas (*brittle*). Persamaan untuk mendapatkan parameter ini dapat diperoleh di peraturan-peraturan gempa yang ada.

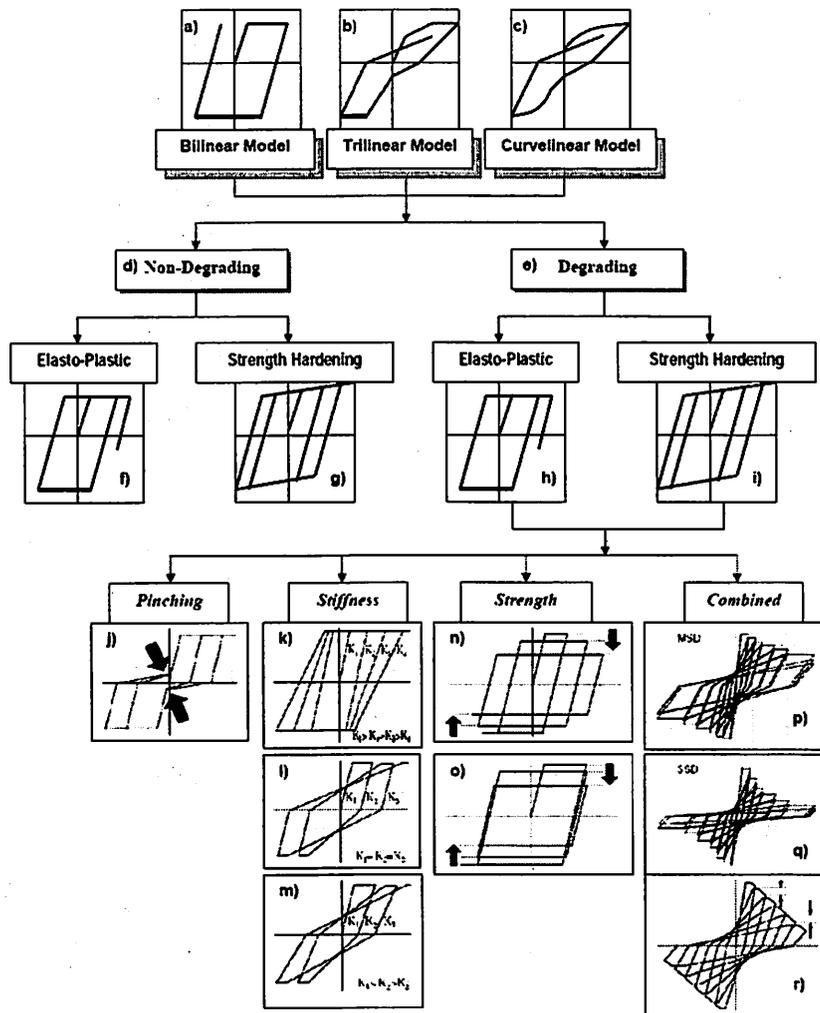
### 3.2. Pemodelan elemen struktur

Hal penting lain yang harus mendapat perhatian dalam analisa tidak linear tidak elastis adalah pemodelan kekakuan dan kekuatan yang melalui fungsi histeresis pada elemen struktur. Ada banyak model yang dapat dipakai untuk keperluan ini, yang pemilihannya tergantung kepada parameter tujuan yang ingin dihasilkan. Gambar 5 menjelaskan klasifikasi dan jenis-jenis model histeresis (termasuk perilaku kekakuan dan kekuatan di dalamnya) yang dipakai dalam analisa tidak linear tidak elastis. Model histeresis ini dapat diklasifikasikan ke dalam 3 bagian yang disebut dengan model bilinear, model trilinear dan model kurva-linear. Kemudian masing-masing bagian ini dapat dibedakan lagi ke dalam kelompok model dengan kekakuan yang dapat berubah (*degrading*) atau model dengan kekakuan yang tidak berubah (*non-degrading*). Umumnya elemen baja dimodelkan dengan histeresis *non-degrading* baik itu model elasto-plastis ataupun model *strength hardening*, sedangkan elemen beton bertulang dimodelkan dengan histeresis *degrading*. Ulasan lebih lengkap tentang kekuatan-kekakuan di dalam histeresis dapat dilihat di dalam FEMA P440A.

Model histeresis elemen yang paling ideal untuk struktur beton bertulang adalah model kurva linear kombinasi (*combined-curvelinear model*) yang mengandung efek gelincir pada rekatan tulangan-beton (*pinching*), efek perubahan kekakuan (*stiffness degradation*) dan efek perubahan kekuatan (*strength degradation*), seperti ditunjukkan pada model p), q) dan r) pada Gambar 5. Namun demikian beberapa literatur terpercaya menyebutkan bahwa model *modified-Takeda*, yang tergolong *bilinear*, *elasto-plastic* dan *stiffness-strength degradations*, sudah sangat memadai untuk model histeresis elemen struktur beton. Untuk model ini direkomendasikan nilai faktor beban dilepas (*unloading parameter*) dan faktor beban diulangi (*re-loading parameter*), yang masing-masing lebih dikenal dengan parameter  $\alpha$  dan  $\beta$ , adalah 0,3 dan 0,6 baik itu untuk elemen balok maupun kolom. Tapi ada juga literatur yang merekomendasikan parameter  $\alpha$  dan  $\beta$  masing-masing 0,3 dan 0,0 untuk elemen kolom.

Dalam kaitan kepada kekakuan elemen, sebaiknya kekakuan efektif balok beton bertulang yang dipakai dalam analisa tidak linear adalah sebesar  $0,3EI_g$  untuk kekakuan lentur dan  $0,4GA_w$  untuk kekakuan geser. Disini  $E$  adalah modulus elastisitas beton,  $I_g$  adalah momen inersia penampang,  $G$  adalah modulus geser dan  $A_w$  luas penampang geser. Untuk kekakuan efektif pada kolom direkomendasikan kekakuan lentur sebesar  $0,7EI_g$  (bila gaya tekan yang bekerja  $\geq 0,5 A_g f'_c$ ) dan  $0,3 EI_g$  (bila gaya tekan yang bekerja  $\leq 0,1 A_g f'_c$  atau dengan gaya aksial tarik) dan  $0,4GA_w$  untuk kekakuan geser.  $A_g$  di sini adalah luas penampang. Untuk dinding geser direkomendasikan nilai kekakuan lentur sebesar  $0,5EI_g - 0,8EI_g$  dan kekakuan geser  $0,4EA_w$ . Sedangkan untuk dinding basement direkomendasikan nilai kekakuan lentur sebesar  $0,8EI_g$  dan kekakuan geser  $0,8GA_w$ .

Untuk mengadopsi perilaku histeresis elemen ini, diperlukan pula model elemen struktur balok dan kolom yang tidak linear tidak elastis. Elemen balok dan kolom yang umum dipakai untuk struktur beton adalah model balok Giberson (*Giberson beam model*) yang dikenal juga dengan sebutan *one-component model* atau *lumped plasticity model*. Model ini mengandung elemen batang linear yang diapit oleh elemen pegas tidak linear tidak elastis pada kedua ujung-ujungnya. Pemakaian elemen pegas di sini adalah untuk mewakili sendi plastis (rusak) pada struktur beton akibat gempa. Elemen pegas ini mengandung parameter-parameter tidak linear tidak elastis dalam bentuk hubungan gaya-deformasi seperti momen-kurvatur atau momen-rotasi, interaksi gaya aksial-momen, gaya geser-simpangan geser dan gaya aksial-simpangan. *Lumped plasticity model* ini ada di semua program komputer tidak linear yang memiliki elemen garis.



Gambar 5: Klasifikasi model histeresis elemen (dimodifikasi dari FEMA P440A)

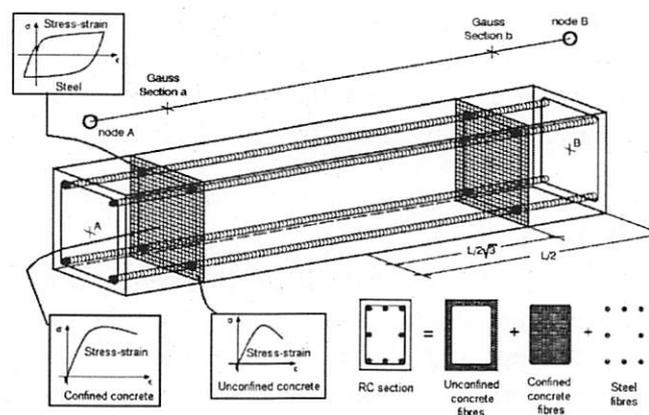
Model ini kemudian berkembang menjadi elemen tidak linear lainnya yang disebut dengan *spread-plasticity model*, sebuah model dengan fleksibilitas elemen linear (diantara dua pegas tidak linear) yang dapat berubah disebabkan oleh efek penyebaran kerusakan di sepanjang lokasi sendi plastis. Kedua model plastis ini sering terkandung di dalam elemen garis (*line element*) di dalam program-program komputer yang ada

seperti *Ruaumoko*, *OpenSees* dan *IDARC2D*.

Umumnya kondisi tidak linear tidak elastis pada sendi plastis di elemen garis cukup diwakili oleh parameter-parameter momen-rotasi (untuk balok) dan interaksi gaya aksial-momen lentur (untuk kolom). Momen leleh dan kurvturnya, beserta interaksinya dengan gaya aksial, dapat diperoleh dengan program analisa tampang. Sedangkan momen maksimum, rotasi leleh dan rotasi batas, untuk membentuk kurva *backbone* histeresis elemen dapat dihitung dengan persamaan-persamaan di dalam Fardis [8]. Pada literatur ini juga akan diperoleh persamaan-persamaan untuk membentuk kurva *backbone* histeresis geser-perpindahan.

Model elemen tidak linear lainnya yang dipakai untuk elemen garis adalah elemen serat (*fiber element*). Model elemen ini juga terdiri dari elemen linear yang diapit oleh elemen tidak linear pada kedua ujung-ujungnya (sendi plastis). Ketidak-linearannya didefinisikan melalui hubungan tegangan-regangan material yang ada di dalam elemen yang dimodelkan. Untuk struktur beton terdiri tegangan-regangan material beton yang tidak diikat (*unconfined*), material beton yang terikat (*confined*) dan material baja tulangan, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6. Model elemen serat ini ada di dalam fitur program tidak linear *SAP2000*, *ETABS*, *SeismoStruct*, *ZeusNL*, *OpenSees*, *STAADPro*, dan lain-lain.

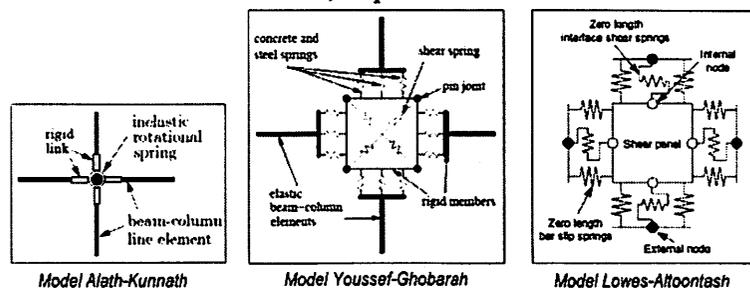
Elemen tidak linear lain adalah elemen pejal (*solid element*) yang umum dipakai dalam analisa mikroskopis menggunakan metode elemen hingga kontinum (*ANSYS*, *ABAQUS*, *SAP2000* dan lain-lain). Analisa seperti ini cocok sekali dipakai untuk melihat sebaran kerusakan yang terjadi di sepanjang elemen struktur beton. Namun ia tidak praktis bila dipakai untuk evaluasi struktur gedung karena memerlukan diskretisasi elemen yang sangat banyak.



**Gambar 6:** Ilustrasi model elemen serat untuk beton bertulang [7]

Bagian penting struktur beton lainnya yang perlu dimodelkan adalah pertemuan balok-kolom, tempat dimana terjadinya kerusakan selain daerah sendi plastis di ujung-ujung elemen balok dan kolom. Untuk bagian ini biasanya model pertemuan sangat kaku (*rigid link*) sudah dianggap cukup memadai (ada di semua program tidak linear) dan lazim dipakai, walaupun sebenarnya ada banyak model pertemuan balok-kolom tidak linear. Beberapa contoh model pertemuan balok-kolom diilustrasikan di Gambar 7. Namun jarang sekali program komputer yang memasukkan fitur model pertemuan balok-kolom ini, kecuali *OpenSees* yang menyediakan model Lowes-Altoontash untuk

memodelkan pertemuan balok-kolom beton bertulang. Bila kita menginginkan model seperti ini dipakai dalam memodelkan struktur gedung dengan program komputer maka kita harus mengembangkannya sendiri menggunakan elemen pegas tidak linear. Pemodelan ini seperti ini tentu tidak praktis karena mempengaruhi kompleksitas dan waktu analisa. Parameter-parameter penting lain untuk pemodelan dan analisa tidak linear, seperti redaman dan efek P-delta, dapat dilihat di dalam PEER/ATC-72-1.



Gambar 7: Ilustrasi model pertemuan balok-kolom

#### 4. KESIMPULAN

Analisa tidak linear sangat diperlukan untuk memperkirakan perilaku struktur gedung berdeformasi akibat getaran gempa secara tepat. Struktur gedung seperti ini akan sangat dipengaruhi oleh getaran gempa, kekuatan struktur, kekakuan global dan kekakuan lokal elemen. Untuk itu diperlukan pemahaman yang baik bagaimana memodelkan struktur gedung dimaksud, khususnya struktur beton, ke dalam program komputer secara tidak linear. Tulisan ini menjelaskan secara ringkas perkembangan analisa tidak linear struktur beton dan hal-hal yang perlu diperhatikan dalam memodelkannya memakai program komputer tidak linear. Termasuk pemilihan rekaman getaran gempa, metode analisa tidak linear, model histeresis elemen atau material, model elemen dan model pertemuan balok-kolom.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Kalkan, E, dan Kunnath, S K (2006) Effects of fling step and forward directivity on seismic response of buildings. *Earthquake Spectra*, **22**, 367-390.
2. Stewart, J P, Chiou, S J, Bray, J D, Graves, R W, Somerville, P G, dan Abrahamson, N A (2002) Ground motion evaluation procedures for performance-based design. *Soil dynamics and earthquake engineering*, **22(9)**, 765-772.
3. Katsanos, E I, Sextos, A G, dan Manolis, G D (2010) Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30(4)**, 157-169.
4. Hancock J J, Watson-Lamprey J, Abrahamson N A, Bommer J J, Markatis A, McCoy E, Mendis R (2006) An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, **10(1)**, 67-89.
5. Vamvatsikos, D dan Cornell, C A (2002) Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **31(3)**, 491-514.
6. Elnashai, A S, dan Di Sarno, L (2008) *Fundamentals of earthquake engineering*.

Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.

7. Pinho, R (2007) Nonlinear dynamic analysis of structures subjected to seismic action. In *Advanced Earthquake Engineering Analysis*, A. Pecker (Editor). New York: Springer.
8. Fardis, M N (2009) Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings. New York: Springer.