

# Metropilar

Jurnal Ilmiah Fakultas Teknik Unhalu



VOLUME 10 NO. 4 OKTOBER 2012

- Pola Spasial Ruang Pengrajin Tenun (Pande Tanu) di Permukiman Pesisir Sulaa Kota Baubau**  
Ishak Kadir, Achmad Djunaedi, Sudaryono, Bambang Hari Wibisono .....204 - 209
- Studi Sistem Penerangan Interior Pada Pesawat Terbang N250**  
Mansur .....210- 214
- Alur Kerja di Departemen Publishing PT Tiga Serangkai Pustaka Mandiri Solo Berbasis Group Support System (GSS)**  
Bambang Pramono, Muh Yamin .....215- 229
- Analisis Biaya Operasional Kendaraan Terhadap U-Turn trayek Angkutan Umum 1A dan 1B (Studi Kasus: U-Turn jl. Brigjen Madjid Yunus – Pasar Baru Kota Kendari)**  
Nasrul ..... 230- 236
- Model-Model Dalam Analisis Kolom dan Dinding Geser**  
Abdul Kadir .....237 - 250
- Studi Pemanfaatan Foto Udara Format Kecil Untuk Keperluan Pemetaan Cadangan Karbon Dalam Kawasan Hutan (Studi Kasus: Tanaman Pinus Merkusii)**  
Laode Muh. Golok Jaya .....251 - 258
- Studi Morfologi Kota Kendari Sebagai Penentu Model Inovasi Perancangan Kota Masa Depan Berdasarkan Karakter Struktur Kotanya**  
Irma Nurjannah, Santi .....259 - 270

### Daftar Isi

<b>Pola Spasial Ruang Pengrajin Tenun (<i>Pande Tanu</i>) di Permukiman Pesisir Sulaa Kota Baubau</b>	
Ishak Kadir, Achmad Djunaedi, Sudaryono, Bambang Hari Wibisono .....	204 - 209
<b>Studi Sistem Penerangan Interior Pada Pesawat Terbang N250</b>	
Mansur .....	210 - 214
<b>Alur Kerja di Departemen Publishing PT Tiga Serangkai Pustaka Mandiri Solo Berbasis Group Support System (GSS)</b>	
Bambang Pramono, Muh Yamin .....	215 - 229
<b>Analisis Biaya Operasional Kendaraan Terhadap <i>U-Turn</i> trayek Angkutan Umum 1A dan 1B (Studi Kasus: <i>U-Turn</i> jl. Brigjen Madjid Yunus – Pasar Baru Kota Kendari)</b>	
Nasrul .....	230 - 236
<b>Model-Model Dalam Analisis Kolom dan Dinding Geser</b>	
Abdul Kadir .....	237 - 250
<b>Studi Pemanfaatan Foto Udara Format Kecil Untuk Keperluan Pemetaan Cadangan Karbon Dalam Kawasan Hutan (Studi Kasus: Tanaman Pinus Merkusii)</b>	
Laode Muh. Golok Jaya .....	251 - 258
<b>Studi Morfologi Kota Kendari Sebagai Penentu Model Inovasi Perancangan Kota Masa Depan Berdasarkan Karakter Struktur Kotanya</b>	
Irma Nurjannah, Santi .....	259 - 270

## MODEL-MODEL DALAM ANALISIS KOLOM DAN DINDING GESER

**Abdul Kadir**

Staf Pengajar Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil Universitas Haluoleo

### ABSTRACT

*Columns and shear walls are structural elements that can be used together. The column is generally used as a load-bearing gravity or a combination of gravity and lateral. Considered effective as a shear wall lateral load restraint (earthquake and wind) because it has a great lateral rigidity. In recent years several trials test both static, quasi-static (cyclic) and dynamic and more intense analysis done. The models were developed to simulate and represent the behavior of columns and shear walls behavior of both linear and nonlinear (nonlinear material and geometry) or the behavior of local and global elements, or degrading behavior (stiffness, strength or both) or not.*

*This paper presents the diversity and classification of modeling that has been introduced and developed by many researchers. These models can be classified into micro models (finite element and fiber / fiber) and a macro model includes plastic joint models, model springs (one and more), truss analogy, rational model and combination models. The purpose of this paper is to reveal the state-of-the-art modeling columns and shear walls and the challenge.*

**Keywords:** concrete slabs, columns, shear walls, a model of micro, macro model

### ABSTRAK

Kolom dan dinding geser merupakan elemen struktur yang dapat digunakan secara bersama. Kolom umumnya difungsikan sebagai penahan beban gravitasi atau kombinasi gravitasi dan lateral. Dinding geser dipandang efektif sebagai penahan beban lateral (gempa maupun angin) karena mempunyai kekakuan lateral yang besar. Dalam tahun-tahun terakhir beberapa pengujian baik uji statik, quasi statik (siklik) maupun dinamik dan analisis semakin intens dilakukan. Model-model dikembangkan untuk mensimulasikan dan merepresentasikan perilaku kolom dan dinding geser baik perilaku linier maupun nonlinier (nonlinier bahan dan geometri) atau perilaku elemen lokal maupun global, atau perilaku yang mengalami degradasi (kekakuan, kekuatan atau keduanya) atau tidak.

Tulisan ini menyajikan ragam dan pengklasifikasian pemodelan yang telah dikenalkan dan dikembangkan oleh banyak peneliti. Model-model tersebut dapat dikelompokkan menjadi model mikro (elemen hingga dan serat/fiber) dan model makro meliputi model sendi plastis, model pegas (satu dan banyak), analogi truss, model rasional dan model-model kombinasi. Tujuan tulisan ini adalah memaparkan *state-of-the-art* pemodelan kolom dan dinding geser dan tantangannya.

**Kata kunci:** Beton bertulang, kolom, dinding geser, model mikro, model makro

### PENDAHULUAN

Kolom dan dinding geser merupakan elemen struktur penahan beban gravitasi dan lateral. Untuk struktur dengan kolom-kolom tanpa dinding geser umum digunakan pada struktur berlantai rendah sampai menengah dengan denah simetris sedangkan struktur kombinasi kolom dan dinding geser dapat digunakan untuk struktur berlantai menengah sampai berlantai banyak, hal ini karena dinding geser memberikan kekakuan lateral yang cukup besar sehingga simpangan lantai terjadi kecil.

Pada struktur yang dikenai beban lateral (angin atau gempa) yang melampaui kapasitas struktur, maka struktur akan mengalami proses inelastisasi/nonlinier sebelum mengalami keruntuhan. Kemampuan inelastis elemen maupun

struktur dipengaruhi oleh redaman, kekakuan dan daktilitas yang ada. Perilaku elemen sebelum runtuh merupakan persoalan kompleks yang dipengaruhi oleh banyak faktor dan sampai saat ini terus menjadi objek penelitian banyak peneliti. Banyak pengujian dan analisis telah dilakukan untuk mengamati dan memprediksi perilaku kolom dan dinding geser sampai mengalami keruntuhan.

Dalam beberapa tahun terakhir pemodelan elemen telah mengalami perkembangan signifikan baik kedalaman, keluasan maupun variasinya, hal ini ditunjang dengan kemajuan teknologi komputer. Pemodelan elemen maupun struktur ditujukan untuk menganalisis kapasitas elemen sehingga menjadi pertimbangan dalam *retrofitting* atau *strengthening* elemen. Tulisan ini

dimaksudkan untuk memaparkan variasi model dan perkembangannya, menguraikan turunan atau basis pemodelan, asumsi dan keterbatasan penerapan, dan mengelompokkan model-model berdasarkan bentuk analisisnya.

## TINJAUAN PUSTAKA

### 1. Faktor-faktor yang mempengaruhi respon kolom dan dinding geser

Perilaku kolom dan dinding geser dipengaruhi oleh lentur, geser, aksial-geser atau aksial-geser-lentur. Untuk kolom dan dinding geser pendek, perilaku elemen dikontrol oleh geser. Degradasi inelastisasi elemen terjadi lebih cepat dan daktilitas yang terjadi kecil. Untuk kolom-kolom dan dinding geser yang langsing perilaku elemen dikontrol oleh domonasi lentur. Inelastisasi dan daktilitas yang terjadi cukup besar. Beberapa faktor yang mempengaruhi perilaku *inelastisitas* atau *nonlinieritas* kolom dan dinding geser adalah: 1) Dimensi atau rasio aspek ( $MV/D$  untuk kolom dan  $L_w/h_w$  untuk dinding geser); 2) Kapasitas beban; 3) Jumlah tulangan longitudinal dan transversal; 4) Kapasitas lentur relatif terhadap kapasitas geser; 5) Kekakuan fondasi dan *interface* antara fondasi dan kolom/dinding geser; 6) Fleksibilitas pondasi dan slip antara tulangan kolom/dinding geser dan pondasi; 7) Lekatan antara tulangan dan beton; 8) Efek hubungan antara kolom dan dinding geser; 9) Pengaruh kondisi batas (*boundary*) pada dinding geser.

### 2. Klasifikasi model-model inelastis menurut beberapa peneliti

Model-model elemen inelastis terus mengalami perkembangan baik teknik maupun variasinya. Model-model inelastis menurut Otani (1979) terdiri dari 1) Model satu komponen (*One component model*); 2) Model banyak komponen (*Multi-component model*); 3) Model dua kantilever (*Connected two-cantilever model*); 4) Model elemen diskrit (*Discrete element model*); 5) Model distribusi fleksibilitas (*Distributed flexibility model*). Esmaily dan Xiao (2002) mengelompokkan model-model inelastis dalam; 1) Model elemen hingga; 2) Model permukaan leleh (*Yield surface*); 3) Model serat; 4) model; 5) Model banyak pegas (*Multi-spring model*); 6) Model sendi plastis. Galal dan El-Sokkari (2008) mengklasifikasikan pendekatan pemodelan elemen inelastis dalam dua model yakni model mikro (*micro-modeling*) dan model makro (*macro-modeling*). Daierlein dkk (2010) mengklasifikasikan model inelastis dalam dua bentuk plastis yakni plastis terkonsentrasi dan

plastis terdistribusi. Plastis terkonsentrasi terdiri dari sendi plastis dan sendi plastis nonlinier. Plastis terdistribusi terdiri dari panjang tertentu pada daerah sendi plastis, model serat dan model elemen hingga. PEER/ATC 721 (2010) mengidealiasikan model-model komponen struktur inelastis dalam tiga model yakni model kontinum (*continuum*); inelastis terdistribusi/serat (*distributed inelasticity/fiber*); dan sendi terkonsentrasi (*concentrated hinge*).

### 3. Re-Klasifikasi Model-Model Inelastis Kolom dan Dinding Geser

Klasifikasi-klasifikasi pemodelan diatas belum sepenuhnya menguraikan model-model yang menurut karakternya dapat dimasukkan satu kelompok yang sama dan juga belum mengkomodasi sebagian model-model yang ada atau model-model yang belakangan muncul. Diperlukan uraian pemodelan dan pendefinisian kembali klasifikasi pemodelan inelastis yang dapat mendiskripsikan perkembangan model-model terkini. Model-model tersebut dapat diklasifikasikan sebagai berikut: 1) model mikro dan model makro

#### a. Model Mikro

Dua model yang dikategorikan dalam model mikro yakni model elemen hingga dan model fiber/serat. Model-model tersebut membutuhkan proses numerik yang besar dan kompleks.

#### 1) Model elemen hingga atau kontinum

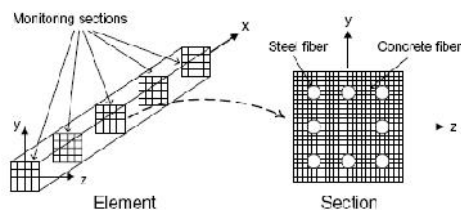
Pada model ini elemen kolom atau dinding geser 2D maupun 3D dibagi atau didiskritisasi menjadi elemen-elemen kecil (beton maupun tulangan) dengan bentuk tertentu. Antar diskritisasi/elemen satu dengan lainnya dihubungkan dengan titik nodal. Jumlah diskritisasi dipilih dengan mempertimbangkan akurasi dan konvergensi. Model ini lebih menekankan pada karakteristik fisik bahan dan model konstitutif elemen, tidak mensyaratkan definisi kekakuan batang, kekuatan atau kapasitas deformasi sebagai bagian yang berpengaruh pada karakteristik model. Model elemen hingga dikenalkan pertama kali oleh Ngo dan Scoderlis (1979) dengan menggunakan model retak diskrit. Sampai saat ini telah melahirkan beberapa perangkat lunak seperti ANSYS (2004); ABAQUS (2004), VecTOR 2 dan 3 (Vecchio 1989), ADINA (2005), ATENA (2008), DIANA (2002); LUSAS (1980); LS-DINA (2005) dan terus menjadi objek penelitian banyak peneliti. Karakteristik pemodelan beberapa peneliti belakangan dan beberapa *software* yang ada disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1 Karakteristik pemodelan dalam model elemen hingga

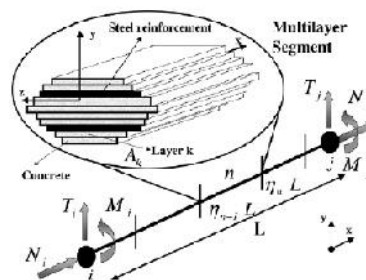
Peneliti/ <i>Software</i>	Tipe elemen	Pemodelan tulangan	Model retak	Hubungan konstitutif	Tranver teg. normal diantara retak	Transver geser pada muka retak	<i>Interface/ slip</i>
Beban Statis							
Nezem dkk. (2009)	Beton; <i>brick</i> : 8- titik nodal	Truss ( <i>embedded</i> )		Permukaan leleh, elastoplastis			lekat sempurna
Park dan Cho (2000)	Beton; <i>hexahedral</i> 8-titik nodal	Embedded, elemen garis isoparametrik	<i>smearred</i>	<i>hypoelastic</i> , <i>orthotropic</i> dengan tegangan-regangan uniaksial ekivalen	<i>Strain-softening</i> menggunakan model Yamaguchi	Trensver geser lewat saling kunci agregat menggunakan modulus retak geser	lekat sempurna
Beban siklik							
Balan dkk. (2001)	Beton: 3D, 8-titik nodal	Truss ( <i>embedded</i> )	<i>smearred</i> , retak terkekang	<i>hypoelastic</i> , <i>orthotropic</i> dengan regangan uniaksial ekivalen	Tegangan muka ultimit; modifikasi dari permukaan lima parameter Willam dan Warnke		lekat sempurna
Lykidis dan Spiliopoul os (2008)	Elemen solid; 3D	<i>embedded</i>	<i>smearred</i>	Perilaku beton; sebelum retak ( <i>isotropic</i> ) dan setelah retak, hanya tergantungan dari $f_c$ uniaksial		dimodelkan menggunakan faktor retensi geser	<i>interface</i> menggunakan model matematik dan slip juga ditinjau
<i>Software dengan skala besar</i>							
<i>Software</i>	Tipe elemen	Pemodelan tulangan	Model retak	Hubungan konstitutif	Tranver teg. normal diantara retak	Transver geser pada muka retak	<i>Interface</i>
ATENA	Beton: 8-20 titik nodal; 2D dan 3D	<i>Embedded</i> dan <i>smearred</i>	<i>Smearred</i> ; terkekang dan berotasi	Uniaksial dengan <i>softening</i> , tarik sebelum & setelah retak; tekan sebelum & setelah puncak; kriteria kegagalan biaksial menurut Kupfer	<i>Softening</i> didasarkan pada model bidang tekan hayal.	Reduksi modulus geser dengan menggunakan faktor retensi geser	Dimodelkan dengan 2 elemen garis dengan tebal tertentu 4 nodal
ADINA	Solid 2D dan 3D	Elemen truss (diskrit)	Diskrit	Konsep plastis dengan laju pengurangan reg. elastis & inelastis, elastisitas, leleh, <i>flow</i> & <i>hardening</i> . <i>Hypoelastic</i> . Teg.- regangan multiaksial, bidang runtuh 2D	<i>Tension stiffening</i> dengan linier menurun pasca puncak	Degradasi modulus geser dimodelkan dengan dua garis linier, mendatar dan menurun .	Menggunakan 2 – 4 nodal yang dapat dinyatakan dengan garis linier, lengkung (pangkat 2 & 3)
ANSYS	Solid 2D; 3D; 8 nodal.	<i>Smearred</i> , dan truss ( <i>embedded</i> )	<i>Smearred</i> , retak dapat tiga arah orthogonal	Tegangan- regangan: <i>linier elastic</i> atau <i>elastic perfectly</i> <i>plastic</i> , retak dan pecah; dan kriteria runtuh	Keruntuhan tarik berupa: a <i>tension</i> <i>cutoff</i> atau deformasi plastis tanpa <i>tension</i> <i>softening</i>	Reduksi kuat geser menggunakan koefisien transfer geser (retensi geser)	Material baru dimodelkan sebagai lapis solid dengan jumlah nodal dan DOF sama dengan beton
ABAQUS	Solid 3D; kombinasi elemen standar dengan tulangan	Satu batang elemen tulangan atau <i>embedded</i>	<i>Smearred</i> terkekang	Respon beton dimodelkan dengan leleh tekan/aliran permukaan dan dikombinasikan dengan kerusakan elastis untuk retak	<i>Tension stiffening</i> dan mengakomodir perilaku <i>strain</i> <i>softening</i> untuk retak beton	Reduksi modulus geser dengan faktor pengali (fungsi regangan retak terbuka)	Modifikasi beton tanpa tulangan dengan, <i>tension</i> <i>stiffening</i>
VEKTOR 2	Regangan konstan 3 sisi, Tegangan bidang dan <i>quadrilater</i> al 4 titik nodal	<i>Smearred</i> / diskrit	<i>Smearred</i> terkekang	Menggunakan MCFE dan DSFM dengan kombinasi <i>compression</i> <i>softening</i> , <i>tension</i> <i>stiffening</i> , <i>tension</i> <i>softening</i> , <i>tension</i> <i>splitting</i> , <i>concrete</i> <i>expansion and</i> <i>confinement</i>	<i>Tension stiffening</i> dimodelkan dengan linier atau nonlinier menurun pasca puncak	Menggunakan kesesuaian dan keseimbangan statik antara <i>aggregate</i> <i>interlock-the</i> <i>sliding friction &amp;</i> <i>crack-slip and</i> <i>shear slip strain</i>	Menggunakan 4 nodal dinyatakan dengan dengan garis linier yang dimodelkan dengan elemen diskrit

2) Model serat

Dalam model ini panjang/tinggi kolom atau dinding geser dibagi menjadi beberapa segmen. Setiap segmen terdiri dari beberapa lapis/serat yang sejajar atau saling tegak lurus yang mewakili karakteristik beton dan baja tulangan. Model ini menggunakan beberapa asumsi (antara lain panampang sebelum dan sesudah lentur tetap rata) dalam mengkombinasikan dengan pemodelan perilaku bahan uniaksial. Spacone dkk. (1996) menerapkan model serat dalam menganalisis elemen balok-kolom menggunakan statik nonlinier dan dinamis. Formulasi didasarkan pada fleksibilitas dan fungsi interpolasi. Monti dan Spacone (2000) menggunakan model fiber untuk menghitung *bond-slip* tulangan.. Zeris dan Mahin (1991) mengusulkan model diskritisasi elemen untuk memodelkan kolom biaksial. Baja menjadi elemen tunggal dan serat-serat beton ditempatkan pada tampang monitor sepanjang batang. Cheon dkk (2008) menggunakan model fiber yang dirangkai dalam elemen hingga menjadi program bernama RCAHEST (*Reinforced Concrete Analysis in Higher Evaluation System Tecnology*) yang digunakan untuk menghitung beban tekuk kritis dan mengevaluasi perilaku order-dua (*nonlinier*) kolom langsing beton bertulang. Lee dan Mosalam (2004) mengembangkan model *stochastic fiber* elemen untuk mengevaluasi kemungkinan-kemungkinan perilaku (sifat dan geometri) dalam beton bertulang. Model fiber dikombinasikan dengan metode titik tengah representasi dari medan random. Petrangeli dkk. (1999) menerapkan model fiber untuk mengevaluasi mekanisme/deformasi geser 2D dan 3D akibat beban siklik. Jehel dkk. (2009) menggunakan model untuk mengilustrasikan karakteristik redaman struktur. Kotronis dkk. (2005) menggunakan model serat untuk mengevaluasi perilaku dinding geser yang dikenai beban dinamik. Dinding geser diasumsikan mengalami deformasi geser linier dan pengaruh bond-slip diabaikan. Belmouden dan Lestuzzi (2007) menggunakan model serat untuk memprediksi perilaku nonlinier dinding geser akibat beban siklik. Pada model ini pengaruh bond-slip ikut diperhitungkan.



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Elemen dan diskritisasi penampang (Lee dan Mosalam, 2004); (b) Model banyak lapis/serat (Belmouden dan Lestuzzi, 2007)

**b. Model makro**

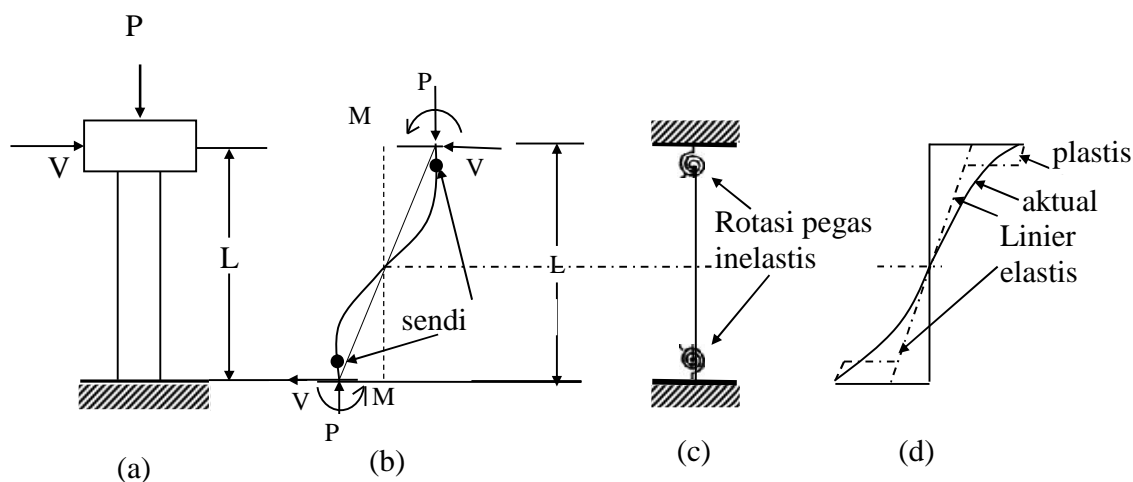
Model makro adalah model yang merepresentasikan perilaku elemen (kolom dan dinding geser) seperti deformasi, kekakuan, kekuatan, daktilitas, disipasi energi yang didasarkan pada hasil-hasil pengujian statis, siklik maupun dinamik. Model ini tidak membutuhkan proses numerik yang kompleks. Beberapa model yang digolongkan dalam model makro adalah model satu elemen atau model sendi plastis dan model banyak pegas (*multispring model*).

1) Model sendi plastis

Model sendi plastis adalah model yang menggambarkan perilaku beban dan perpindahan elemen dari hasil-hasil pengamatan dalam pengujian. Perilaku beban-perpindahan selain dapat direpresentasikan dalam bentuk diagram interaksi gaya aksial-momen melalui resultan tegangan permukaan leleh (P-M) juga dapat divisualisasikan dalam bentuk kurva histerisis. Model ini dapat mendiskripsikan perilaku *pincihing* maupun degradasi kekakuan, kekuatan elemen dan juga perilaku lentur maupun geser. Model ini terdiri dari model satu komponen dan model banyak komponen.

a) Model satu komponen

Model ini dikembangkan pertama kali oleh Giberson (1967) dengan mengidealisasikan elemen terdiri dari dua segmen yaitu segmen linier elastis dan dua pegas rotasi nonlinier yang ditempatkan pada ujung elemen. Semua deformasi inelastis diasumsikan terjadi pada pegas tersebut. Ilustrasi model sendi plastis satu komponen ditunjukkan pada Gambar 2.

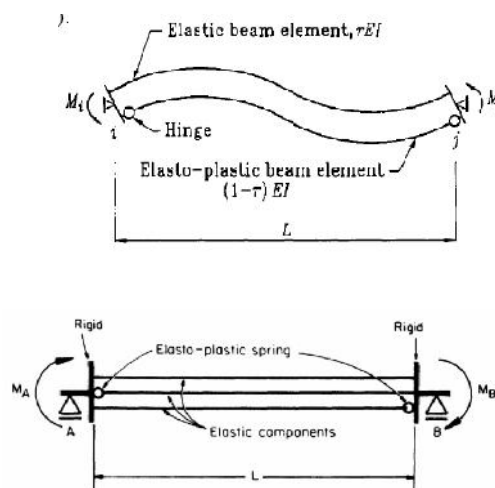


Gambar 2 Model satu komponen. (a) Kolom lengkung ganda; (b) Rotasi elastis dan plastis; (c) Asumsi pegas inelastic; (d) Distribusi dan idealisasi distribusi kelengkungan

Evaluasi perilaku kolom dan dinding geser dengan model satu komponen telah dilakukan banyak peneliti. Al-Sulaimani dan Roessett (1985) menggunakan model satu komponen untuk mengamati pengaruh degradasi kekakuan, kekuatan atau keduanya akibat beban siklik. Takeda (1970), Sina (1974), Q-Hist (1979) menerapkan model satu komponen untuk mengamati histerisis elemen dominasi lentur. Roufael dan Meyer (1987), Ozcebe dan Saatcioglu (1989), D'Ambrisi dan Filippou (1999), menerapkan model satu komponen untuk mengamati histerisis elemen dominasi geser. Fillipou, dkk (1983), Saatcioglu dan Alwasiat (1987) menggunakan model satu komponen untuk memprediksi perilaku slip akibat beban siklik. Sezen dan Chowdhury (2009) menggunakan model satu komponen untuk menganalisis deformasi elemen akibat kombinasi lentur, slip dan geser. Fema 440 (2005) dan P440A (2009) menggunakan model satu komponen untuk mensimulasikan perilaku histerisis elemen akibat degradasi kekakuan, kekuatan dan kombinasi keduanya.

b) Model banyak komponen

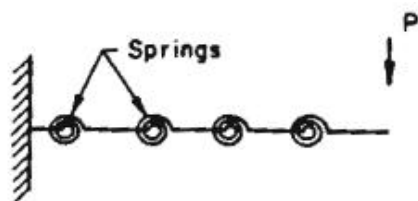
Termasuk dalam ini adalah model dua komponen atau lebih. Model dua komponen balok-kolom adalah model pertama yang digunakan dalam pemodelan dinding geser. Model ini pertama kali dikembangkan oleh Clough dkk. (1965). Model ini terdiri dari dari dua komponen hayal yang sejajar, satu komponen merepresentasikan perilaku elastis dan lainnya merepresentasikan perilaku elasto plastis atau *strain hardening*.



Gambar 3 Model dua dan tiga komponen

c) Model banyak pegas (*Multiple spring model*)

Model ini dikenalkan oleh Takayanadi dan Schnobrich (1976). Model banyak pegas terdiri dari sejumlah pegas elastis yang dihubungkan secara seri menggunakan batang kaku. Karakteristik inelastis setiap pegas bervariasi sesuai karakteristik dan tingkat beban aksial segmen, akan tetapi umumnya karakteristik elemen diasumsikan konstan sepanjang batang.

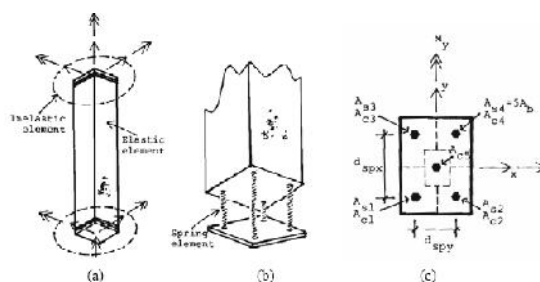


Gambar 4 Model banyak pegas (Takayanadi dan Schnobrich, 1976)

d) Model banyak pegas aksial (*Multi-axial spring model*)

Model banyak pegas aksial dikenalkan oleh Lai dkk. (1984) dalam mensimulasikan perilaku histerisis dan degradasi kekakuan elemen yang dibebani interaksi aksial-momen. Dalam model ini batang diuraikan menjadi dua bagian inelastis yang masing-masing elemen terdiri dari pegas tunggal yang mensimulasikan pengaruh-pengaruh inelastis batang. Formulasi ini hanya didasarkan pada keseimbangan statis saja dan model tidak memberikan informasi mengenai momen-kelengkungan tampang. Saiidi dkk. (1989) memperbaiki model Lai dkk. (1984) dengan mereduksi dari sembilan pegas menjadi 5 pegas. Empat sisi sebagai pegas komposit beton dan baja dan satu pegas beton yang terletak ditengah elemen. Selanjutnya Jiang dan Saiidi (1990) meningkatkan modelnya dengan hanya menggunakan empat pegas saja. Li dan Otani (1993) mengembangkan jumlah pegas menjadi 16 pegas untuk beton dan 9 pegas untuk baja dan membedakan karakteristik beton inti

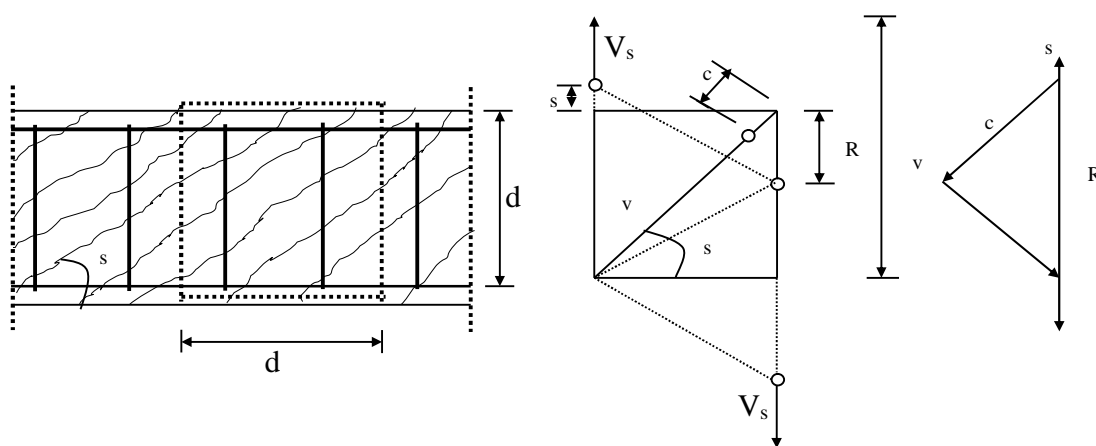
dan selimut beton dalam menghitung pengaruh pengengkangan.



Gambar 5. Model banyak pegas aksial (a) Model elemen; (b) elemen inelastis; (c) Pegas efektif beton dan baja (Lai dkk. (1984);

e) Model Analogi truss

Model ini pertama kali dikenalkan oleh Ritter (1899) dan Mörsch (1902). Model didasarkan pada keseimbangan gaya, mengabaikan kuat tarik beton dan mengasumsikan bahwa arah inklinasi *strut* (penunjang) tekan diagonal setelah retak tetap  $45^\circ$  terhadap penampang lintang elemen. Penerapan model ini pada kolom beton bertulang diinisiasi oleh Park dan Paulay (1975) dalam mengevaluasi perilaku atau deformasi kolom akibat geser, Park dan Paulay (1975) mengasumsikan bahwa kekakuan geser pada tampang kritis dipengaruhi oleh onset retak seperti ditunjukkan dalam Gambar 6. Kekakuan geser perunit panjang dihitung berdasarkan dua kondisi yakni kondisi sebelum retak dan kondisi pasca retak.

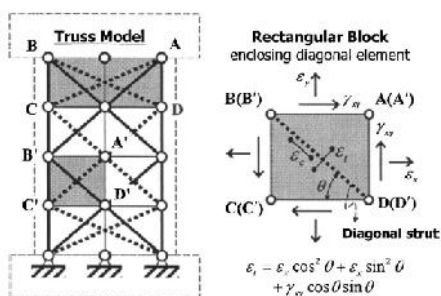


Gambar 6 Deformasi geser pada penampang kritis akibat gaya geser (Park dan Paulay, 1975).



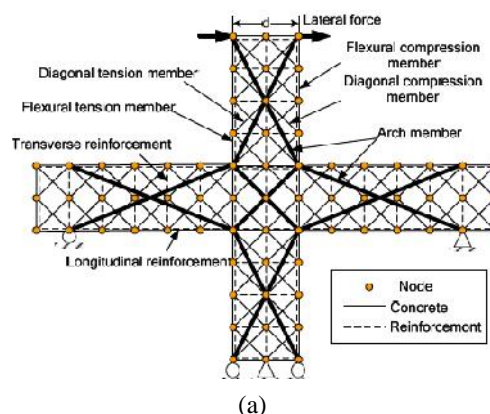
Model ini digunakan oleh Mander (1983), Kim dan Mander (2007), Priestley dkk. (2007) dalam mengevaluasi perilaku dan mengestimasi perpindahan geser kolom. Oosterle dkk. (1984) menggunakan model ini untuk mengevaluasi respon geser pada dinding geser.

Metode yang juga didasarkan pada analogi truss adalah *Strut and Tie Model* dan *Lattice Model*. *Strut and Tie Model* (model penunjang dan pengikat) dipresentasikan oleh Schlaich dkk. (1987), Collins dan Mitchell (1987) dan MacGregor (1997). Metode ini lebih menekankan pada pemilihan bentuk, arah lintasan atau pola distribusi tegangan, baik sebelum retak maupun pasca retak. Distribusi tegangan dapat diidealisasikan sebagai batang tekan (penunjang atau *strut*), batang tarik (pengikat atau *tie*), titik simpul (joint atau nodal), aksi kipas (*fan action*) berupa kipas tekan (*compression fans*) dan aksi pelengkung (*arching action*). Park dan Eom (2007) mengembangkan STM untuk menganalisis perilaku nonlinier kolom dan dinding geser akibat beban siklik.

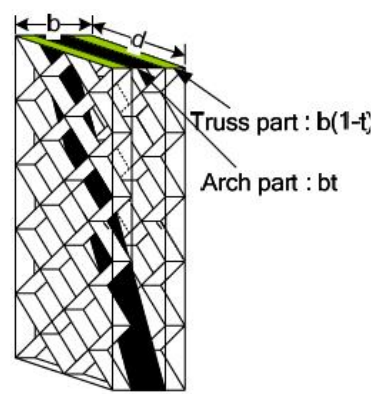


Gambar 7 STM Nonlinier dan perhitungan regangan tarik transversal dalam penunjang (*strut*) diagonal (Park dan Eom 2007)

Pada Lattice Model, beton dan tulangan dimodelkan dengan beragam bentuk yang merepresentasikan perilaku beton dan tulangan, dan setiap batang memiliki karakter tertentu yang khas. Beton dimodelkan sebagai batang tekan-lentur, tarik-lentur, diagonal-tekan, diagonal-tarik dan batang busur (*arch members*). Batang diagonal mensimulasikan retak pada beton, batang busur ditempatkan pada posisi tertentu untuk mensimulasikan arah aliran tegangan tekan sebagai representasi mekanisme tahanan geser. Tulangan longitudinal dan geser dimodelkan sebagai batang horizontal dan vertikal. Wang dan Hsu (2008) menggunakan Lattice model untuk menganalisis perilaku sistem rangka pemikul momen (kolom dan joint).



(a)



(b)

Gambar 8 (a) *Lattice Model* (b) Penampang lintang model kolom (Wang dan Hsu 2008)

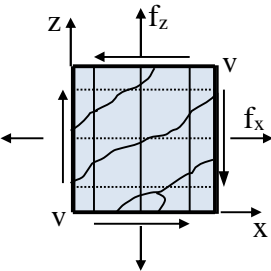
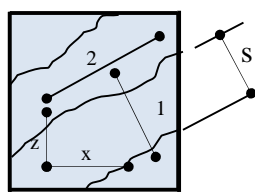
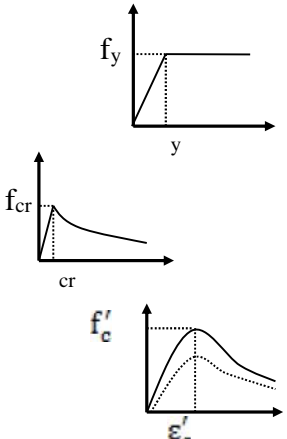
f) Model rasional

Model ini merupakan turunan dari model analogi truss. Model ini kemudian dikembangkan dengan menekankan prinsip-prinsip keseimbangan, kesesuaian dan kaidah-kaidah konstitutif pada elemen dominasi geser. Perbedaannya dengan model analogi truss awal/*strut and tie model* adalah pada model rasional tulangan diasumsikan tersebar merata pada elemen (*smearred model*) dan retak diperlakukan sebagai elemen/bahan baru. Model-model yang termasuk dalam kelompok ini adalah model-model yang dikembangkan grup peneliti Universitas Toronto dan Universitas Houston. Model-model dari grup Toronto yakni: (1) *Compression Field Theory* (CFT), (Collins, 1978); (2) *Modified Compression Field Theory* (MCFT), (Vecchio dan Collins, 1986); dan (3) *Disturbed Stress Field Model* (DSFM), (Vecchio, 2000). Model-model dari grup Houston adalah: (1) Model *Rotating Angle Softened Truss* (RA-STM), (Hsu,

1988); dan (2) *Fixed Angle Softed Truss Model* (FA-STM), (Pang dan Hsu, 1996).

Pada model CFT dan Model MCFT diasumsikan bahwa arah tegangan-regangan utama beton saling tegak lurus sedangkan pada model DSFM lebih fleksibel dan tidak harus saling tegak lurus. Pada konsep MCFT prinsip-prinsip keseimbangan (*equilibrium*), kesesuaian (*compatibility*) dan

hubungan tegangan-regangan diformulasikan dalam bentuk tegangan rata-rata dan regangan rata-rata. Retak pada beton diperlakukan sebagai material baru dalam merumuskan karakteristik tegangan-regangan. Metode ini menggunakan proses iterasi yang tahapan-tahapannya disajikan dalam Gambar 9.

	Tegangan dan regangan	Retak
Keseimbangan	 <p><u>Tegangan rata-rata</u>  <u>Regangan rata-rata</u>                      6. <math>\tan^2 \theta = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{\sigma_x - \sigma_z}</math>                      7. <math>\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \cot \theta</math>                      8. <math>\sigma_{xz} = 2 \left( \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} \right) \cot \theta</math></p>	<p><u>Tegangan dalam retak</u>                      4. <math>f_{sxcr} = \frac{(f_x + v \cot \theta + v_{ci} \cot \theta) \rho_x}{(f_z + v \tan \theta + v_{ci} \tan \theta) \rho_z}</math>                      5. <math>f_{szcr} = \frac{(f_z + v \tan \theta + v_{ci} \tan \theta) \rho_z}{(f_x + v \cot \theta + v_{ci} \cot \theta) \rho_x}</math></p>
Kesesuaian		<p><u>Lebar retak</u>                      9. <math>w = s_1 \epsilon_1</math>                      10. <math>s_\theta = \frac{1}{\left( \frac{\sin \theta}{s_{mx}} + \frac{\cos \theta}{s_{mz}} \right)}</math></p>
Bahan	 <p><u>Tegangan-regangan</u>                      Baja:                      11. <math>f_{sx} = E_s \epsilon_x</math>    <math>f_{yz} = E_s \epsilon_z</math>                      12. <math>f_{sz} = E_s \epsilon_z</math>    <math>f_{yx} = E_s \epsilon_x</math>                      Beton:                      13. <math>f_1 = \frac{f_{cr}}{(1 + \sqrt{500 \epsilon_1})}</math>                      14. <math>f_2 = \frac{f'_c}{0.8 + 170 \epsilon_1} \left[ 2 \frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} - \left( \frac{\epsilon_2}{\epsilon'_c} \right)^2 \right]</math></p>	<p>15. <math>v_{ci} \leq \frac{0.18 \sqrt{f'_c}}{0.3 + 24w / (a_g + 16)}</math></p>

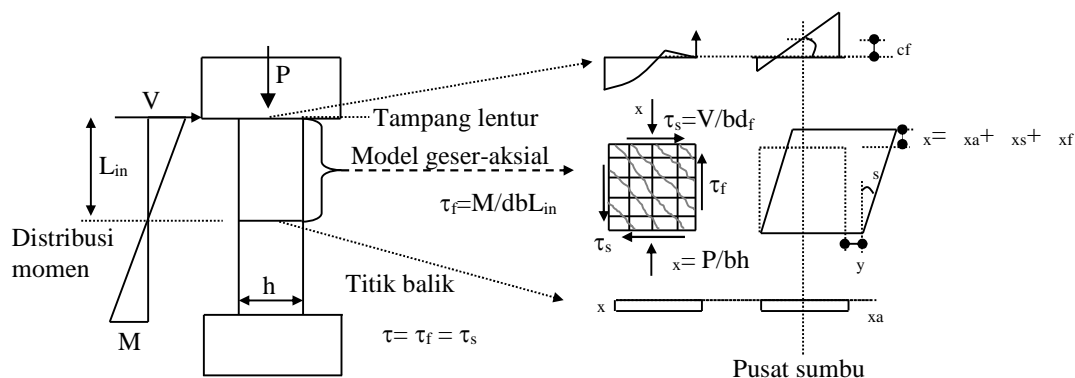
Gambar 9 Ringkasan hubungan keseimbangan, kesesuaian dan konstitutif dari MCFT (Vecchio dan Collins, 1986).

Model *Rotating Angle Softened Truss* (RA-STM), (Hsu, 1988; Belarbi, 1991 dan Pang, 1991) memiliki prinsip-prinsip yang dengan *Modified Compression Field Theory* (MCFT), (Vecchio dan Collins, 1986), perbedaan kedua metode terletak pada pembatasan tegangan tulangan. Model (FA-STM) pada dasarnya sama dengan RA-STM. Pada *Fixed Angle Softened Truss Model* (FA-STM), (Pang dan Hsu, 1996).

Aksi tegangan normal pada muka retak diabaikan, tegangan geser pada muka retak dan regangan geser rata-rata akibat slip dinyatakan secara empirik.

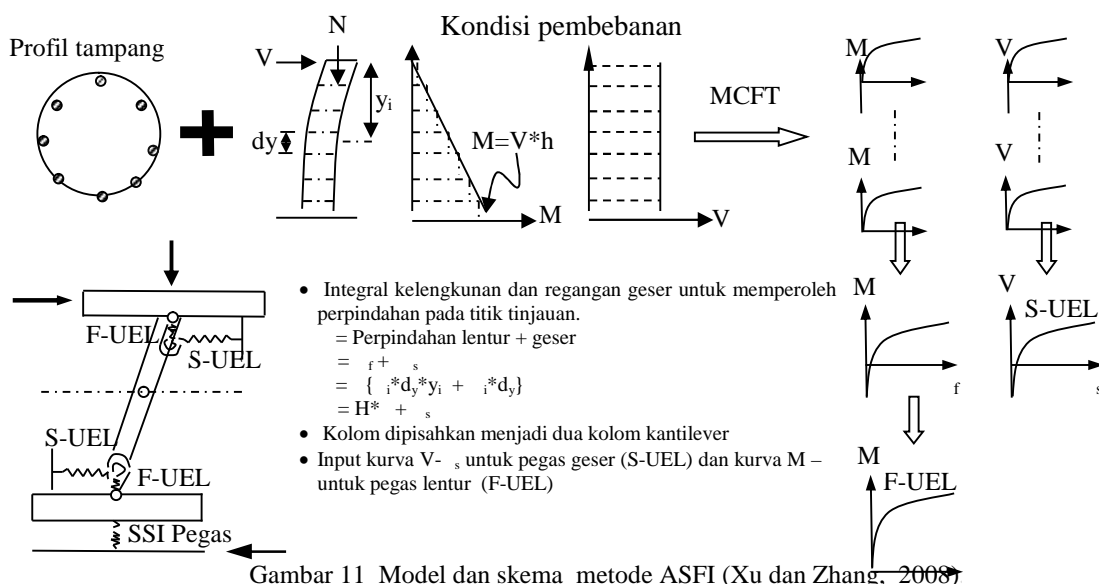
## 2) Model-model gabungan

a) Model-model gabungan pada kolom Mostafaei dan Kabeyasawa (2007; 2008) mengembangkan metode analitik berbasis perpindahan untuk memodelkan respon beban-perpindahan kolom beton bertulang terhadap interaksi beban aksial, geser dan lentur (Gambar 9). Komponen deformasi utama dari interaksi tersebut adalah deformasi aksial yang diperoleh dari model aksial lentur dan dibawah ke model geser-aksial. Pada metode ASFI ini mekanisme lentur dimodelkan dengan menerapkan teknik analisis tampang biasa dan perilaku geser didasarkan pada teori medan tekan (MCFT) (Vecchio dan Collins 1986)



Gambar 10 Model Interaksi aksial-geser-lentur (Mostafaei dan Kabeyasawa, 2007)

Xu dan Zhang (2008) mengusulkan metode *Axial-Shear-Flexure-Interaction* (ASFI) untuk menghitung kurva utama. Total respon kurva utama ekuivalen dengan kurva *pushover* monotonik yang merupakan kombinasi dari aksial, geser dan lentur. Skema model ini terdiri dari kurva lentur yang diperoleh dari formula tampang serat (*fiber formulation*) dan kurva geser diperoleh dari *Modified Compression Field Theory* (MCFT).

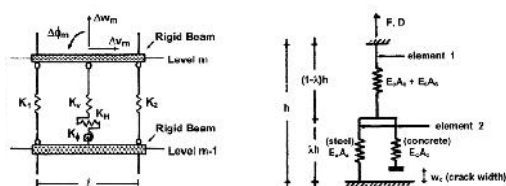


Gambar 11 Model dan skema metode ASFI (Xu dan Zhang, 2008)

b) Model-model gabungan pada dinding geser Model ini dapat dikelompokkan kedalam model-model garis, model panel dan model kombinasi garis dan panel. Model-model garis terdiri dari model tiga elemen garis vertikal (*Three Vertical Line Element (TVLE) Model*) dan model banyak elemen garis vertikal (*Multiple Vertical Line Element (MVLE) Model*).

- Model Tiga Garis Vertikal (*Three Vertical Line Element (TVLE) Model*)

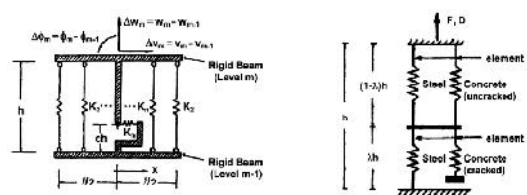
Model ini dikenalkan oleh Kabeyasawa dkk. (1983). Terdiri dari tiga garis yang masing masing dihubungkan dengan balok kaku bagian atas dan bawah dinding. Dua garis bagian sisi-sisi elemen dimulaskan dengan pegas aksial yang mereprestasikan elemen batas (*boundary element*) dan satu garis bagian tengah elemen dengan tiga pegas untuk mengontrol deformasi vertikal, horisontal dan rotasi (Gambar 12(a)). Keterbatasan dari model ini adalah ketidakserasian deformasi antara dinding dan elemen batas dan kesulitan dalam mendefinisikan propertis pegas. Modifikasi dilakukan Vulcano dan Bertero (1986) untuk mengurangi kompleksitas dalam mendefinisikan propertis histerisis dari model pegas. Pegas aksial pada elemen batas diganti dengan dua elemen aksial yang dihubungkan secara seri yang dinamakan axial-elemen-in-seriaes model (AESM) (Gambar 12(b)). Modifikasi model telah juga dilakukan oleh Kunnath dkk. (1990), Kim dan Foutch (2007). Model-model diatas umumnya hanya dapat mensimulasikan perilaku dinding geser dominasi lentur



Gambar 12 (a) Model elemen tiga garis vertikal (Kabeyasawa dkk, 1983); (b) Model seri elemen aksial (Vulcano dan Bertero, 1986)

- Model banyak garis vertikal (*Multiple Vertical Line Element (MVLE) Model*)

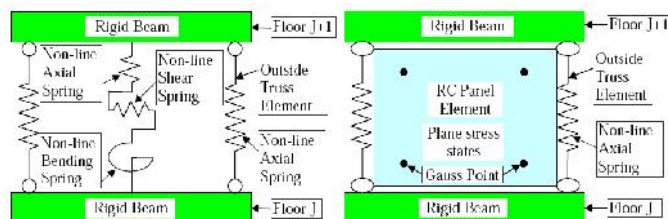
Model ini dikenalkan oleh Vulcano dkk. (1988). Dalam model ini (Gambar 13 (b)) elemen dinding direpresentasikan dengan sejumlah elemen uniaksial yang dihubungkan secara paralel menggunakan batang sangat kaku pada bagian atas dan bawahnya. Dua elemen luar kiri dan kanan mensimulasikan elemen batas. Elemen tengah mensimulasikan perilaku kombinasi aksial dan lentur. Pegas horisontal digunakan untuk merepresentasikan perilaku geser inelastis pada dinding. Vulcano dkk. (1988) kemudian memodifikasi model (AESM) dengan menggunakan dua elemen yang masing-masing merepresentasikan pasangan tulangan dan beton belum retak dan pasangan tulangan beton retak. Meskipun model ini dapat mensimulasikan perilaku lentur dan geser namun belum dapat memprediksi kontribusi perilaku lentur maupun geser.



Gambar 13 (a) Model elemen banyak garis vertikal (Vulcano dkk., 1988); (b) Modifikasi model seri elemen aksial (Vulcano dkk., 1988)

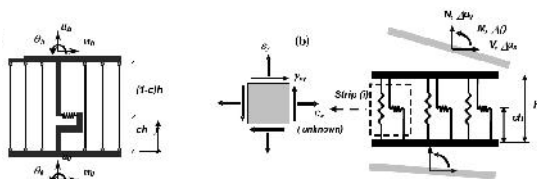
- Model panel dan kombinasi garis dan panel

Colotti, (1993) melaporkan bahwa model dengan garis-garis tidak dapat mendiskripsikan perilaku dinding geser secara akurat untuk tegangan geser yang tinggi. Modifikasi terhadap model dengan garis dilakukan Chen dan Kabeyasawa (2000), Massone dkk. (2008,2010). Chen dan Kabeyasawa (2000) menggunakan panel persegi *incompatible* 4 nodal dan 4 titik gauss sebagai pengganti garis pada tengah elemen TVLEM, sedangkan dua garis sebagai pegas aksial pada masing-masing elemen sama dengan TVLEM.



Gambar 14 (a) Model TVLEM; (b) Model Panel (Chen dan Kabeyasawa (2000))

Massone dkk. (2008) memodifikasi MVLEM dengan mensimulasikan panel-panel pada MVLEM sebagai pegas geser. Setiap panel diasumsikan sebagai membran yang dibebani gaya aksial dan tegangan geser pada bidangnya secara merata. Interaksi antara lentur dan geser diterapkan pada setiap panel. Perilaku konstitutif panel dapat dimodelkan dengan menggunakan *Modified Compression Field Theory* (MCFT, Vecchio and Collins, 1986) atau *Rotating-Angle Softened-Truss-Model* (RA-STM, Pang and Hsu, 1995



Gambar 15 (a) Model TVLEM; (b) Modifikasi model TVLEM (Massone dkk., 2008)

## KESIMPULAN

Banyaknya parameter yang mempengaruhi perilaku inelastis kolom maupun dinding geser melahirkan banyak pendekatan model dalam mensimulasikan dan merepresentasikan perilaku tertentu atau kombinasi beberapa perilaku elemen tersebut. Dalam satu pendekatan baik pendekatan mikro (*micro model*) maupun makro (*macro model*) terdapat banyak variasi dalam pemodelan propertis atau karakteristik bahan dan perilaku elemen. Terkadang model yang dikembangkan hanya valid pada kondisi tertentu dan belum tentu valid pada kondisi lainnya dan tidak berarti bahwa semakin kompleks suatu model semakin tinggi tingkat akurasi atau sebaliknya karena setiap model memiliki asumsi atau batasan dalam terapannya. Model-model yang efisien yang dapat mensimulasikan perilaku tertentu atau kombinasi perilaku yang dikehendaki dengan tingkat akurasi yang tinggi menjadi tantangan dan peluang para peneliti kedepan.

## DAFTAR PUSTAKA

- ABAQUS, 2004, *ABAQUS Version 6.5. Documentation*, ABAQUS Inc. 2004.  
 ADINA, *ADINA System 8.7. Release Notes*, ADINA, R&D Inc., 2011.  
 ADINA, *ARD 10-10, Theory and Modeling Guide*, Volume 1: ADINA, R&D Inc.

- ANSYS, 2004, *ANSYS Release 9.0, Documentation*, SAS IP, Inc.  
 Al-Sulaimani, G., dan Roessett, J. M., 1984, *Design Spectra for Degrading System*, *Journal Structural Engineering*, © ASCE/December 2611-2623pp.  
 Belmouden, Y. and Lestuzzi, P., 2007, *Analytical model for predicting nonlinear reversed cyclic behaviour of reinforced concrete structural walls*, *Journal of Engineering Structures*, 1263-1276pp.  
 Cervenka, V. Jendele, L. and Cervenka, J., 2009, *ATENA Program Documentation Part I, Theory*, Cervenka Consulting, Praha, Czech Epublic.  
 Cervenka, V., 1985, *Constitutif Model for Cracked Reinforced Concrete*, *ACI Journal*, November-December, 877-882pp.  
 Chen, S., And Kabeyasawa, T., 2000, *Modeling of Reinforced Concrete Shear Wall for Nonlinier Analysis*, The 12<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering  
 Chen, W.F., and Salleb, A.F., 1982, *Constitutive Equations for Engineering Materials*, Vol 1: Elasticity and Modeling, John Wiley & Sons, Inc., Canada.  
 Cheon, J.H., dkk. 2008, *Nonlinier Finite Elemen Analysis on Slender Reinforced Concrete Columns*, The 3<sup>rd</sup> ACF International Conference ACF/VCA.  
 Cho, C.G., and Park, M.H., 2000, *A 3-D Finite Element Model for R/C Structures Based on Orthotropic Hypoelastic Constitutive Law*, *KCI Concrete Journal*, V.13. January, 19-25pp.  
 Clough, R. W., Benuska, K. L. and Wilson, E. L., 1965, *Inelastic Earthquake Response of Tall Buildings*, *Proc.3rd World Conference on Earthquake Engineering* 11, New Zealand  
 Collins, M.P., 1978, *Towards a Rational Theory for RC Members in Shear*, *Journal of Structural Engineering ASCE*, 104(4), 649-666PP.  
 Collins, M.P., and Mitchell, D., 1987, *Prestressed Concrete Basics*, *CPCI Canadian Prestressed Concrete Intitute*, Otaawa, Canada.  
 Colotti, V., 1993, *Shear Behavior of RC Structural Walls*, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 119, 728-746pp.  
 D'Ambrisi, A., dan Filippou, F. C., 1999, *Modeling of Cyclic Shear Behavior in RC Members*, *Journal of Structural Engineering* ©ASCE, October, 1143 – 1150pp.  
 Deierlein, G.G., Reinhorn, A.M., and Willford, M.R., 2010, *Nonlinier Structural Analysis for Seismic Design*, NIST GCR 10-917-5, Departement of Commerce, USA.

- DIANA version 8.1, 2002, TNO Building and Construction Research, Delft The Netherlands
- Esmaily, A.G., and Xiao, Y., 2002, *Seismic Behavior of Bridge Subjected to Various Loading Patterns*, PEER Report 2002/15, University of California, Berkeley.
- FEMA, 2005, *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*, FEMA 440 Report prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- FEMA, 2009, *Effect of Strength and Stiffness Degradation on Seismic Response*, FEMA P440 prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Filippou, F.C., D'Ambrisi, A., and Issa, A., 1992, *Nonlinear Static and Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Subassemblages*, Report No. UCB/EERC-92/08 Earthquake Engineering Research Center College of Engineering University of California, Berkeley.
- Filippou, F. C., Popov, E. P., dan Bertero, V. V., 1983, *Effects of Bond Deterioration on Hysteretic Behavior of Reinforced Concrete Joints*, Report No. UCB/EERC 83/19, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Aug. 184pp
- Galal, K. and El-Sokkary, H., 2008, *Advancement in modeling of Shear Walls*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Giberson, M., 1967, *The response of nonlinear multi-story structures subjected to earthquake excitation*, Tech. report, Earthquake Engineering Research Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California.
- Hsu, T.T.C., 1988, *Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion*, ACI Structural Journal, 85(6), 624-635pp.
- Jehel, P., Ibrahimbegovic, A., L'eger, P., and Davenne, L., 2009, *A New Fiber Element for Refined Nonlinear Modeling of RC Frame Structures in Seismic Loading*, june, COMPDYN, Greece.
- Jiang, Y. and Saiidi, S. M., 1990, *Four-Spring Element for Cyclic Response of R/C columns*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 1018-1029pp
- Kabayesawa, T. H., Shiohara, S., Otani, S. and Aoyama, H., 1983, *Analysis of the Full-Scale 7-Story R.C. Test Structure*, Journal The Faculty of Engineering, University of Tokyo, Vol. XXXVII, No. 2, 432 – 478pp.
- Kim, J.H., and Mander, J.B., 2007, *Influence of Transverse Reinforcement on Elastic Shear Stiffness of Cracked Concrete Elements*, Engineering Structures, 1798-1807pp.
- Kim, T. and Foutch, D.A., 2007, *Application of FEMA methodology to RC shear wall buildings governed by flexure*, Journal of Engineering Structures, 2514-2522pp
- Kotronis, P., Ragueneau, F. and Mazars, J., 2005, *A simplified model strategy for R/C walls satisfying PS92 and EC8 design*, Journal Engineering Structures, 1197-1208pp.
- Kunnath, S. K., Reinhorn, A., M. and Park, Y. J., 1990, *Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 116(4), 996-1016pp
- Kwon, M., and Spacone, E., 2002, *Three Dimensional Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Columns*, Computer & Structures, 199-212pp.
- Lai, S.S., Will, G.T., and Otani, S., 1984, *Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members*, Journal of Structural Engineering, ASCE, 110:11, 2563-2584pp.
- Lee, T.H., and Mosalam, K.M., 2004, *Probabilistic fiber element modeling of reinforced concrete structures*, Computers and Structures 2285–2299pp.
- Li, K. N. and Otani, S., 1993, *Multi-Spring Model for 3-Dimensional Analysis of RC Members*, Journal of Structural Engineering and Mechanics, 17-30pp.
- LS-DYNA, 2005, *Theoretical Manual*, Livermore Software Tech. Corp.
- LUSAS, 1980, FEA Ltd., UK.
- MacGregor, J.G., 1997, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall
- Mander, J.B., 1983, *Seismic Design of Bridges*, Dissertation Doctor in Civil Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Massone, L., Orakcal, K., and Wallace, J.W., 2008, *Modeling of Squat Shearwall Controlled by Shear*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- Mehlhorn, G., Kollegger, J., Keuser, M., and Kolmar, W., 1985, *Nonlinear Contact Problems-A Finite Element Approach Implemented in ADINA*, Computers & Structures, 69-80pp.
- Monti, G., dan Spacone, E., 2000, *Reinforced Concrete Fiber Beam Element with Bond-*

- Slip, Journal of Structural Engineering, ASCE, 126:6, 654-661pp.
- Mostafaei, H. and Kabeyasawa, T., 2007, *Axial-Shear-Flexure Interaction Approach for Reinforced Concrete Columns*, ACI Structural Journal, V. 104, No. 2, Mar-Apr, 218-226pp.
- Mostafaei, H. Vecchio, F.J., and Kabeyasawa, T., 2008, *Nonlinear Displacement-Based Response Prediction of Reinforced Concrete Columns*, Engineering Structure, Elsevier..
- Nazem, M., Rahmani, I., and Pajand, M.R., 2009, *Nonlinear FE Analysis of Reinforced Concrete Structures Using a Tresca-Type Yield Surface*, Scinta Iranica, V.16. 512-519pp.
- Ngo, D., and Scoderlis, A.C., 1967, *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam*, ACI Journal 64:3, 153-163pp.
- Oesterle, R. G., Aristizabal-Ochoa, J. D., Shiu, K. N. and Corely, W. G., 1984, *Web Crushing of Reinforced Concrete Structural Walls*, ACI journal Proceedings, 231-241pp
- Otani, S., 1979, *Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Building Structures*, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada M5S 1A4
- Palermo, D., and Vecchio, F.J., 2003, *Compression Field Modeling of Reinforced Concrete Subjected to Reversed Loading: Formulation*, ACI Structural Journal, September-October, 616-625pp.
- Pang, X.B., and Hsu, T.T.C., 1996, *Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete*, ACI Structural Journal, 93(2), 197-207pp.
- Park, R., and Paulay, T., 1975, *Reinforced Concrete Structures*, John Wiley & Sons, New York.
- Park, H., and Eom, T., 2007, *Truss Model for Nonlinear of RC Members Subject to Cyclic Loading*, Journal of Structural Engineering © ASCE/October, 1351-1363pp.
- PEER/ATC 72-1, 2010, *Modeling and Acceptance Criteria for Seismic Design and Analysis of Tall Building*, Applied Technology Council, Redwood City, California.
- Petrangeli, M., Pinto, P.M., and Ciampi, V., 1999, *Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. I: Theory*, Journal of Engineering Mechanics, Sep. 994-1001pp.
- Priestley, N.M.J., Calvi, M., and Kowalsky, M.J., 2007, *Displacement-Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Saatcioglu, M., dan Alsiwat, J., M., 1992, *Hysteretic Behavior of Anchorage Slip in R/C Members*, Journal of Structural Engineering, ASCE, September, 2439 – 2458pp
- Saiidi, M., Ghusn, G.E., and Jiang, Y., 1989, *A Five-Spring Element for Biaxially bent R/C Columns*, Journal Structural Engineering, ASCE, 115:2, 398-416pp.
- Saiidi, M. dan Sozen, M. A., 1979, *Simple and Complex Models for Non-linear Seismic Response of Reinforced Concrete Structures*, Structural Research Series 465, Civil Engineering Studies, University of Illinois, Urbana.
- Schlaich, J., Schäfer, K., and Jennewein, M., 1987, *Toward a consistent design of structural concrete*, PCI J., 75–150pp
- Sezen, H. dan Chowdhury, T., 2009, *Hysteretic Model for Reinforced Concrete Columns Including the Effect os Shear and Axial Load Failure*, Journal of Structural Engineering ©ASCE, February, 139 – 146pp
- Spacone, E., Filippou, F.C., dan Taucer, F.F., 1996, *Fibre Beam-Column Model for Nonlinear Analysis of R/C Frame: Part I. Formulation*, John Wiley & Sons Ltd. USA.
- Takayanagi, T. and Schnobrich, W. C., 1976, *Computed Behaviour of R/C Coupled Shear Walls*, Civil Engineering Studies, SRS 434, University of Illinois, Urbana
- Tao, W., Jingjiang, S., and Liyan, M., 2008, *Inelastic Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame-Shear Wall Structures*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- Vecchio, F.J., and Collins, M.P., 1986, *The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear*, ACI Journal, March-April, 219-231pp.
- Vecchio, F.J., 2000, *Disturbed Stress Field Model for Reinforced Concrete: Formulation*, Journal of Structural Engineering ASCE, 126(9), 1070-1077PP.
- Vulcano, A., and Bertero, V.V., 1986, *Nonlinear Analysis of Structural Wall*, Proceeding , 8<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Vucano, A., Bertero, V.V., and Colotti, V., 1988, *Analytical Modeling of RC Structural Wall*, Proceeding , 9<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo-Kyoto, Japan.
- Wang, Y.C., and Hsu, K., 2008, *Truss Analysis for Evaluating the Behavior of Reinforced Concrete Moment-Resisting Frames with Poorly Reinforcing Details*, The 14<sup>th</sup> World

- Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China
- Wong, P.S., and Vecchio. F.J., 2002, *VekTor2 & FormWork User's Manual*.
- Xu. S. Y., and Zhang, J., 2008, *Hysteritic Models for Reinforced Concrete Columns Considering Axial-Shear-Flexural Interaction*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.
- Zeris, C.A., dan Mahin, S.A., 1991, *Behavior of Reinforced Concrete Structures Subjected to Biaxial Excitation*, Journal of Structural Engineering ASCE, Sep. Vol 117, No 9, 2657-2673pp.