

MODEL-MODEL KOLOM BETON BERTULANG

Abdul Kadir¹, Iman Satyarno², Bambang Suhendro³, Andreas Triwiyono⁴

¹Mahasiswa Program Doktor UGM, Jurusan Teknik Sipil UHO

Kampus Hijau Bumi Tridharma Anduonohu, Kendari

Kadir12340@yahoo.com

^{2,3,4}Jurusan Teknik Sipil UGM

Abstrak

Kolom umumnya difungsikan sebagai penahan beban gravitasi atau kombinasi gravitasi dan lateral. Dalam tahun-tahun terakhir beberapa pengujian kolom baik uji statik, quasi statik (siklik) maupun dinamik dan analisis semakin intens dilakukan. Model-model dikembangkan untuk mensimulasikan dan merepresentasikan perilaku kolom baik perilaku linier maupun nonlinier.

Tujuan tulisan ini adalah memaparkan state-of-the-art pemodelan kolom dan tantangannya. Beragam pemodelan yang telah dikemukakan dan dikembangkan oleh banyak peneliti dikelompokkan dan diklasifikasikan berdasarkan karakter dan prinsip-prinsip dasarnya. Model-model tersebut dapat dikelompokkan menjadi model mikro, model makro, dan model-model kombinasi.

Kata kunci: beton bertulang; kolom; model makro; model mikro

Pendahuluan

Kolom 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 maupun tidak simetris. Pada struktur yang dikenai beban lateral (angin atau gempa) yang melampaui kapasitas struktur, maka struktur akan mengalami proses inelastisasi/nonlinier elemen 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 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 karakter dan prinsip-prinsip dasarnya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi respon kolom

Perilaku kolom umumnya berupa lentur, geser, aksial-geser atau aksial-geser-lentur. Pada kolom-kolom pendek, perilaku elemen dikontrol oleh geser. Degradasi inelastisasi elemen terjadi lebih cepat dan daktilitas yang terjadi kecil. Untuk kolom-kolom langsing perilaku elemen dikontrol oleh dominasi lentur. Inelastisasi dan daktilitas yang terjadi cukup besar. Beberapa faktor yang mempengaruhi perilaku *inelastisitas* atau *nonlinieritas* kolom adalah: 1) dimensi atau rasio aspek (MV/d, dengan M = momen, V = gaya geser dan d = tinggi efektif tampang); 2) kapasitas, pola dan kecepatan pembebanan; 3) volumetrik tulangan longitudinal dan transversal; 4) kekakuan/fleksibilitas fondasi 5) *interface* antara fondasi dan kolom; 6) lekatan antara tulangan dan beton.

Klasifikasi model-model inelastis menurut beberapa peneliti

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*). Esmaeily dan Xiao (2002) mengelompokkan model-model inelastis dalam; 1) Model elemen hingga; 2) Model permukaan leleh (*Yield surface*); 3) Model serat; 4) model satu pegas; 5) Model banyak pegas (*Multi-spring model*); 6) Model sendi plastis. Daierlein dkk (2010) mengklasifikasikan model inelastis dalam dua bentuk plastis yakni model konsentrasi plastis dan model distribusi plastis. Model konsentrasi plastis terdiri dari sendi plastis dan sendi plastis nonlinier. Model distribusi plastis terdistribusi terdiri dari sendi plastis dengan panjang tertentu, model serat dan model elemen hingga. PEER/ATC 721 (2010) mengidealisasikan model-model komponen struktur inelastis dalam tiga model yakni model kontinum (*continuum*); distribusi inelastis/serat (*distributed inelasticity/fiber*); dan konsentrasi sendi (*concentrated hinge*).

Klasifikasi-klasifikasi pemodelan diatas masih bersifat umum dan 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 kolom yang dapat mendiskripsikan perkembangan model-model terkini. Model-model tersebut dapat diklasifikasikan sebagai berikut: 1) model mikro, 2) model makro dan 3) model kombinasi

1) Model mikro

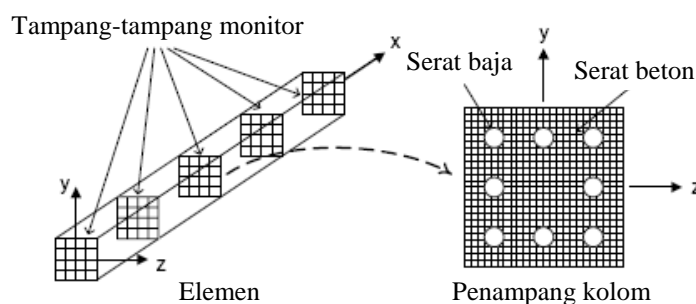
Dua model yang dikategorikan dalam model mikro yakni model elemen hingga dan model fiber/serat. Model-model tersebut membutuhkan proses numerik yang besar dan kompleks.

- Model elemen hingga atau kontinu

Pada model ini, elemen kolom 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. Model elemen hingga dikenalkan pertama kali oleh Ngo dan Scoderlis (1979) dengan menggunakan model retak diskrit. Kini pemodelan elemen berbasis elemen hingga berkembang sedemikian cepat dan beragam software telah dilahirkan baik yang sifatnya akademik maupun komersil. Beberapa software tersebut adalah: ANSYS (2005); ABAQUS (2007), VecTOR 2 (Wong dan Vecchio, 2002), ADINA (2010), ATENA (2009), DIANA (2002); LS-DINA (2005).

- Model serat

Dalam model ini panjang/tinggi kolom 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 fiber untuk mengilustrasikan karakteristik redaman struktur.



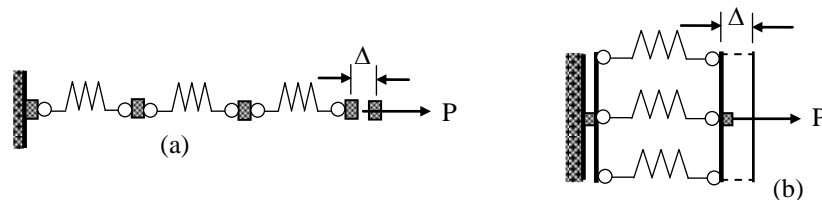
Gambar 1. Elemen dan diskritisasi penampang (Lee dan Mosalam, 2004)

2) Model makro

Model makro adalah model yang merepresentasikan perilaku elemen 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 model sendi plastis, dan analogi truss.

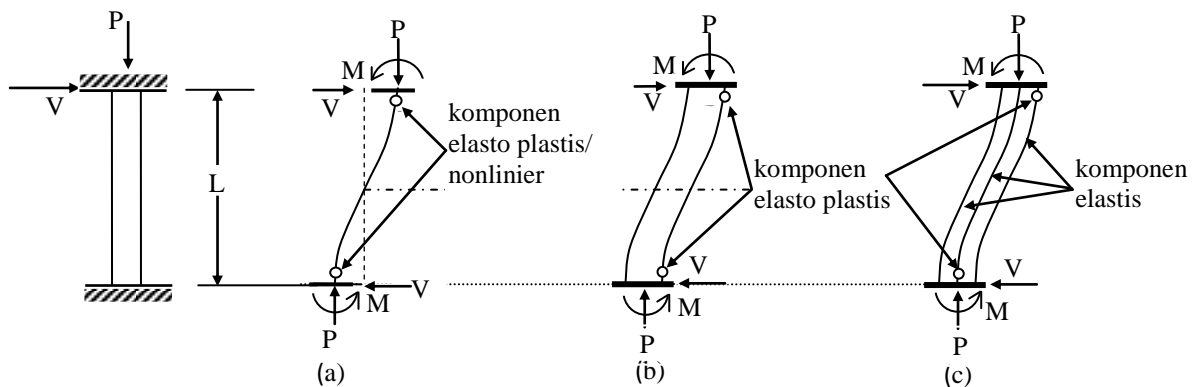
- Model sendi plastis

Model sendi plastis adalah model yang menggambarkan perilaku beban dan deformasi elemen dari hasil-hasil pengamatan dalam pengujian. Perilaku beban-deformasi selain dapat direpresentasikan dalam bentuk diagram interaksi gaya aksial-momen (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 sendi plastis meliputi model plastis satu komponen dan model banyak komponen. Sendi plastis merefleksikan daerah kritis yang terjadi diujung-ujung balok-kolom. Pendekatan pemodelan dilakukan dengan mengasumsikan sendi plastis dengan panjang nol sebagai pegas rotasi yang ditempatkan pada ujung-ujung balok-kolom, yang dihubungkan secara seri (Takayanadi dan Schnobrich (1976) atau paralel sebagaimana ditunjukkan dengan Gambar 2



Gambar 2. Idealisasi sendi plastis; (a) model seri; (b) model

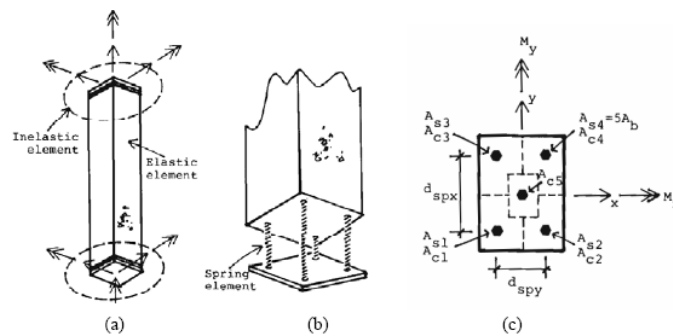
Model satu komponen dikembangkan pertama kali oleh Giberson (1967) dengan mengidealisasikan elemen terdiri dari dua segmen yaitu segmen linier elastis dan dua pegas rotasi nonlinier yang ditempatkan pada ujung elemen. Semua deformasi inelastis diasumsikan terjadi pada pegas tersebut. Ilustrasi model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



Gambar 3. Kolom lengkung ganda; (a) Model satu komponen; (b) Dua komponen; (c) Model tiga komponen

Model dua atau lebih komponen banyak digunakan dalam pemodelan dinding geser. Model dua komponen pertama kali dikembangkan oleh Clough dkk. (1965) dimana elemen terdiri dari dua komponen yang diposisikan secara seri, satu komponen merepresentasikan perilaku elastis dan lainnya merepresentasikan perilaku elasto plastis atau *strain hardening*. Lai dkk. (1984) mengenalkan model banyak pegas aksial (*multi-axial spring model*) 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

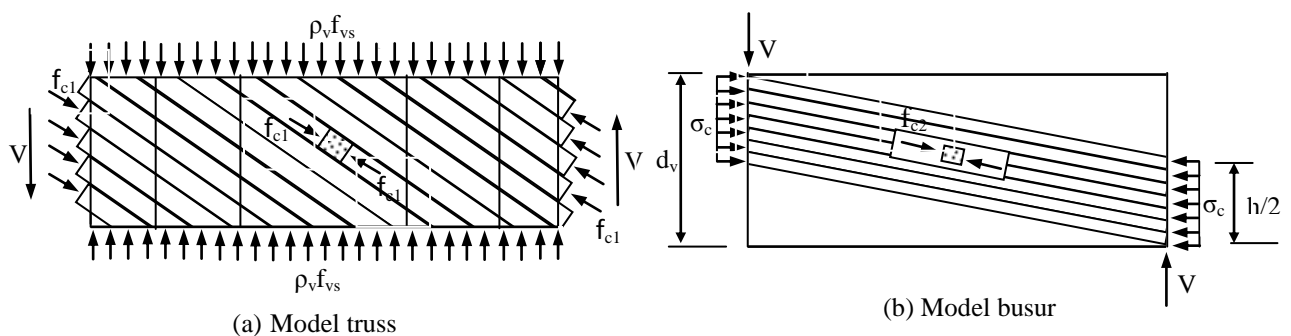
Saiidi (1990) meningkatkan modelnya dengan hanya menggunakan empat pegas saja. Li dan Otani (1993) mengembangkan jumlah pegas menjadi 16 pegas untuk beton dan 9 pegas untuk baja dan membedakan karakteristik beton inti dan selimut beton dalam menghitung pengaruh pengekanan.



Gambar 4. Model banyak pegas aksial Lai dkk., (1984); (a) Model elemen; (b) Elemen inelastis; (c) Pegas efektif beton dan baja

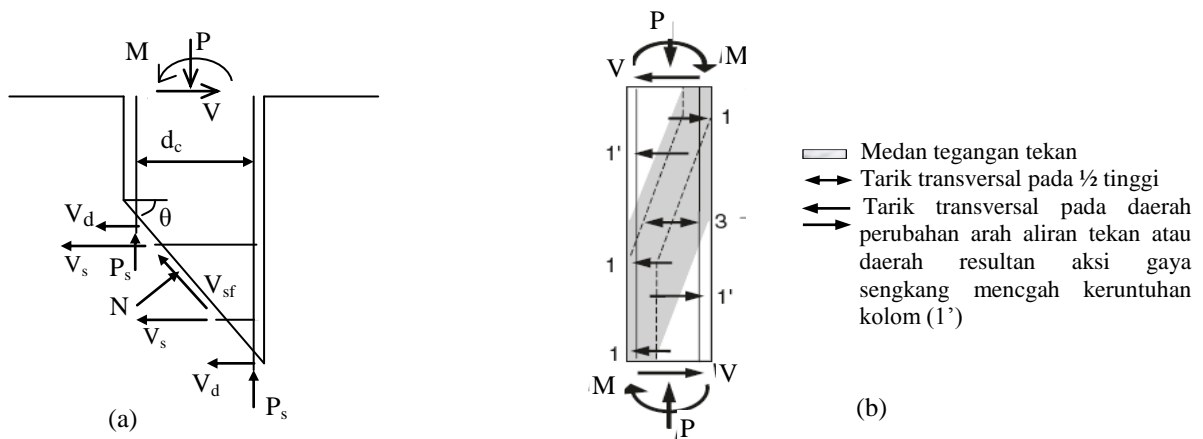
- Model Analogi truss

Model ini pertama kali dikenalkan oleh Ritter (1899) dan Mörsch (1902) dalam menjelaskan aliran gaya dalam balok retak. Model didasarkan pada keseimbangan gaya, mengabaikan kuat tarik beton dan mengasumsikan bahwa arah inklinasi *strut* (penunjang) tekan diagonal setelah retak tetap 45° terhadap sumbu aksial elemen. Bentuk dasar model analogi truss terdiri dari batang tekan, batang tarik tegak lurus longitudinal dan batang tekan yang merepresentasikan komponen geser dan lentur. Model-model yang terinspirasi dan pengembangan dari model analogi truss adalah: *Strut and Tie Model*, *Lattice Model* dan model rasional.

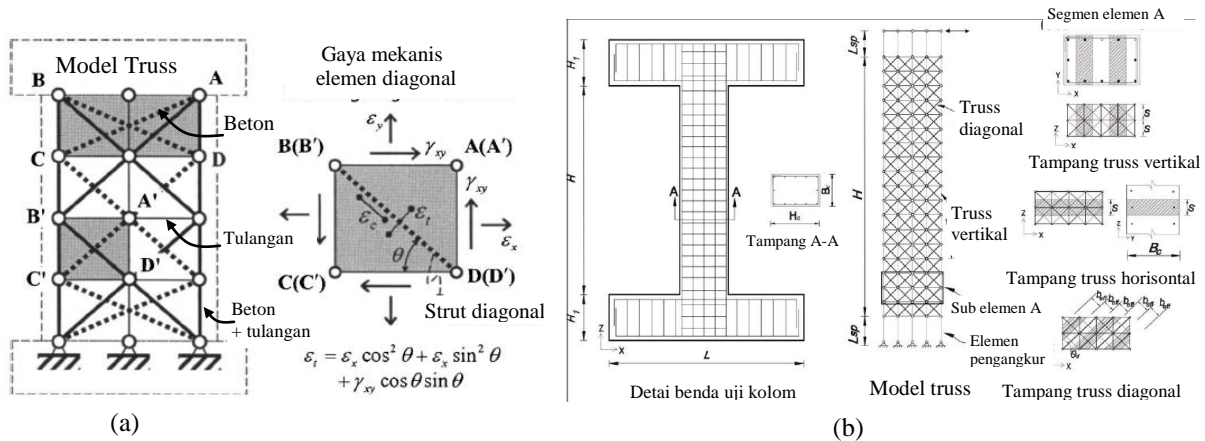


Gambar 5. Model busur-truss (Ichinose, 1992)

Model penunjang dan pengikat (*Strut and Tie Model*) dipresentasikan oleh Schlaich dkk. (1987), Collins dan Mitchell (1987) dan MacGregor (1997) pada balok terutama pada daerah D (diskontinyu atau *disturb*) menurut definisi Schlaich dkk. (1987). Metode ini lebih menekankan pada pemilihan bentuk, arah lintasan atau pola distribusi tegangan, baik sebelum retak maupun pasca retak. Distribusi tegangan dapat diidealisasikan sebagai penunjang/tekan (*strut*), pengikat/batang tarik (*tie*), join, aksi kipas (*fan action*) berupa kipas tekan dan aksi busur. Ang dkk. (1989), Ichinose (1992), Priestley, dkk. (1994), Pan dan Li (2013), dan Tran dan Li (2014) mengembangkan model ini dalam mengevaluasi kuat geser kolom. Model yang juga identik dengan model penunjang dan pengikat adalah model yang dikembangkan oleh Elwood dan Moehle (2004; 2005b), Qusalem dkk. (2004) dalam memformulasikan hubungan kapasitas aksial dan drif setelah gagal geser. Strut atau penunjang dimodelkan dengan geser-friksi klasik (Gambar 6(a)). Kotsovos (2014) mengembangkan model aliran gaya tekan (*Compressive-force path method*) dalam mensimulasikan bidang potensial keruntuhan kolom. Gaya-gaya yang terjadi pada kolom ditunjukkan seperti pada Gambar 6(b). Kim dan Mander (2007) juga mengembangkan model dalam mengevaluasi kekakuan dan sudut retak kolom. Park dan Eom (2007) mengembangkan STM untuk menganalisis perilaku nonlinier kolom dan dinding geser akibat beban siklik. Girgin dkk. (2013) menggunakan model truss nonlinear dalam mengevaluasi geser kritis kolom.

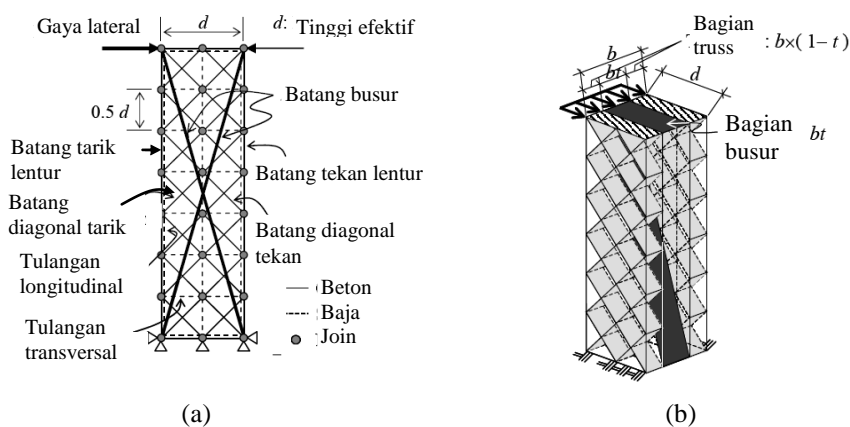


Gambar 6. Model penunjang dan pengikat; (a) Elwood dan Moehle (2004); (b) Kotsovos, (2014)



Gambar 7. Model penunjang dan pengikat; (a) Park dan Eom (2007); (b) Girgin, dkk.,

Model Lattice (*Lattice model*) adalah model numerik yang ditujukan untuk analisis retak dan kegagalan beton. Digunakan pertama kali oleh Hrennikoff (1941) untuk menyelesaikan persoalan elastisitas kontinum. Model ini dikembangkan dan dimodifikasi oleh Niwa dkk. (1995) dalam mengevaluasi mekanisme tahanan geser kolom. Miki dan Niwa (2004) menggunakan model lattice 3D untuk mensimulasikan torsi dan respon kolom biaksial. Wang dan Hsu (2008) menggunakan model lattice untuk memprediksi respon sistem rangka penahan momen.



Gambar 8. (a) Skema model lattice; (b) Luas tampang (Miki dan Niwa, 2003)

Pada model lattice, 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 horisontal dan vertikal. Wang dan Hsu (2008) menggunakan model lattice untuk menganalisis perilaku sistem rangka pemikul momen (kolom dam join).

Model rasional dikembangkan berdasarkan prinsip-prinsip keseimbangan, kesesuaian dan kaidah-kaidah konstitutif pada elemen dominasi geser. Kaidah konstitutif diturunkan dan diverifikasi dari hasil-pengujian panel biaksial. Perbedaannya dengan model analogi truss awal 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 Softened 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. Bentz (2000) menerapkan model MCFT dalam menganalisis perilaku nonlinier kolom.

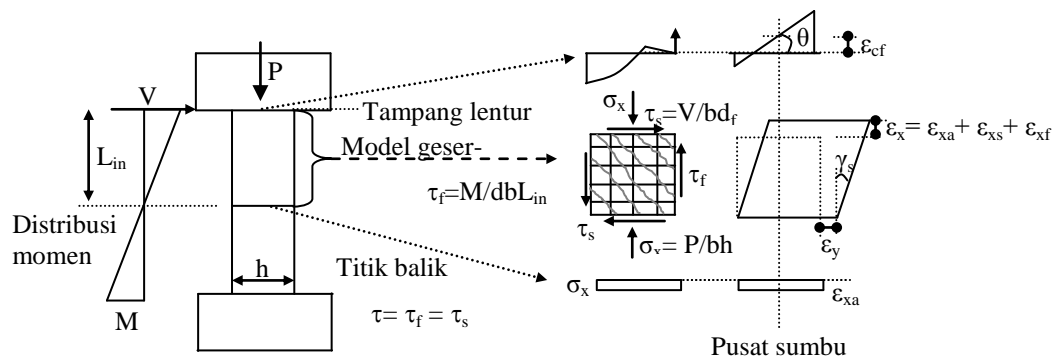
Model *Rotating Angle Softened Truss* (RA-STM), (Hsu, 1988; Belarbi, 1991) memiliki prinsip-prinsip yang sama dengan *Modified Compression Field Theory* (MCFT), (Vecchio dan Collins, 1986), perbedaan kedua metode terletak pada pembatasan tegangan tulangan. Model (FA-STM) pada dasarnya sama dengan RA-STM. Pada *Fixed Angle Softened Truss Model* (FA-STM), (Pang dan Hsu, 1996, Hsu dan Mo, 2010) aksi tegangan normal pada muka retak diabaikan, tegangan geser pada muka retak dan regangan geser rata-rata akibat slip dinyatakan secara empirik.

3. Model-model kombinasi

Pemodelan kolom dengan sendi plastis umumnya dilakukan pada kolom-kolom yang didominasi lentur atau geser saja. Pada kolom yang mengalami aksial-geser-lentur pemodelan dilakukan dengan kombinasi model yakni kombinasi model makro (model sendi plastis + truss model) atau kombinasi model mikro dan makro.

- Kombinasi model makro

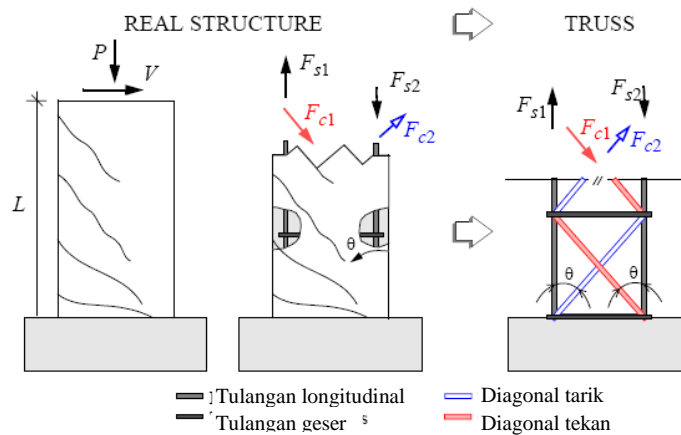
Pincheira dkk. (1999), Lee dan Elnashai (2001), Sezen dan Chowdhury (2009) mengembangkan model histerisis yang mensimulasikan perilaku siklik kolom. Model kurva terdiri dari kurva utama yang diperoleh dari hubungan beban-deformasi monotonik yang diset sebagai punggung kurva dan kurva histerisis yang merupakan kombinasi histerisis lentur dan geser atau kombinasi lentur, geser dan slip. Mostafaei dan Kabeyasawa (2007) 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). Jirawattanasomkul dkk. (2013) mengembangkan model interaksi lentur dan geser (*flexure-shear interaction*, AFI). Perilaku lentur dimodelkan dengan analisis tampang biasa dan perilaku geser presentasikan sebagai model truss.



Gambar 9. Model Interaksi aksial-geser-lentur (Mostafaei dan Kabeyasawa,

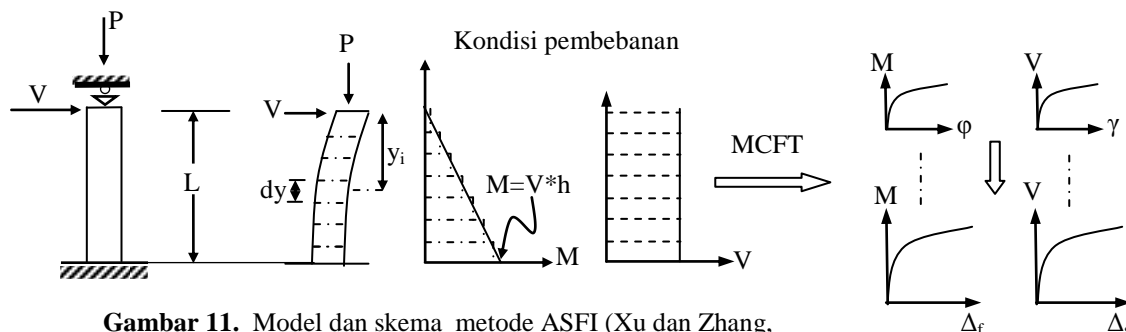
- Kombinasi model mikro dan makro

Guedes, (1997) mengusulkan model 3D dua titik nodal elemen balok-kolom yang didasarkan pada fungsi linier perpindahan aksial dan rotasi. Setiap nodal terdiri dari enam derajat kebebasan, tiga buah perpindahan translasi dan tiga perpindahan rotasi. Tampang kolom dibagi menjadi beberapa serat terhadap sumbu aksial kolom dan komponen geser dianalisis terpisah menggunakan model truss. Model fiber kemudian diintegrasikan dengan model penopang dan pengikat (*strut and tie*) (Gambar 10) melalui regangan aksial rata-rata yang dihitung setiap tampang serat



Gambar 10. Model Analogi truss (Guedes, (1997))

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. Deformasi dipeoleh dengan mengintegrasikan kelengkungan dan regangan geser. 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,

Cardinetti dkk. (2011) mengembangkan model dengan mengkombinasikan model serat elemen balok-kolom yang didasarkan pada formulasi fleksibilitas dengan teori MCFT sebagai hubungan konstitutifnya. Model serat didasarkan pada peningkatan prakiraan beban dan matriks kekakuan tangen.

Pembahasan dan Kesimpulan

Peningkatan pemahaman yang sedemikian cepat dan dinamis perihal perilaku dan parameter-parameter yang mempengaruhi perilaku inelastis kolom membuka ruang dan kemungkinan untuk terus munculnya pemodelan kolom. Hingga kini ragam dan variasi model yang telah dikemukakan oleh banyak peneliti dapat diklasifikasikan dalam tiga model pendekatan utama yakni pendekatan atau model mikro, model makro dan model-model kombinasi. Termasuk dalam kelompok model mikro adalah model elemen hingga dan model fiber. Model makro meliputi model sendi plastis dan analogi truss dan model kombinasi adalah model kombinasi makro atau model kombinasi makro dan mikro. 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 sekaligus peluang para peneliti kedepan.

Daftar notasi

d	= tinggi efektif tampang, mm
d_v	= kedalam geser efektif, mm
d_c	= jarak antar tulangan lentur terluar, mm
L, L_{in}	= tinggi kolom, tinggi setengah kolom, mm
M	= momen, Nmm
N	= gaya normal, N
P	= gaya aksial, N
P_s	= gaya aksil kontribusi tulangan memanjang, N
V	= gaya geser kolom, N
V_s	= geser yang diberikan oleh tulangan, N
V_d	= aksi pasak, N
V_{sf}	= gaya geser-friksi, N
f_{ys}	= mutu baja tulangan lateral, MPa
f_{c1}, f_{c2}	= tegangan-tegangan tekan utama masing-masing pada model truss dan busu, MPa
$\varepsilon_{xa}, \varepsilon_{xs}, \varepsilon_{xf}$	= regangan aksial, regangan geser dan regangan lentur
Δ_f, Δ_s	= defoemasi lentur dan deformasi geser, mm
ϕ, γ	= kelengkungan, regangan geser
σ_x	= tegangan total, MPa
τ_f, τ_s	= tegangan lentur dan geser dalam model aksial-geser, MPa
ρ_s	= rasio volumetrik tulangan lateral terhadap inti beton

Daftar Pustaka

- ABAQUS, (2007), “*ABAQUS Analysis User's Manual*”, ABAQUS Inc. 2007.
- ADINA, (2010), “*ADINA Theory and Modelling Guide Volume I*”, ADINA Solids and Structures, ADINA R & D, Inc.
- ANSYS, (2005), “*ANSYS Manual Version 9.0*”, ANSYS Inc., Canonsburg, PA.
- Al-Sulaimani, G., dan Roessett, J. M., (1984), “Design Spectra for Degrading System”, *Journal Structural Engineering*, © ASCE/December 2611-2623pp.
- Belarbi, A., Zhang, L.X., dan Hsu, T.T.C., (1996), “Constitutive Laws of Reinforced Concrete Membrane Elements”, *Eleventh World Conference of Earthquake Engineering*.
- Bentz, E.C., (2000), “*Sectional Analysis of Reinforced Concrete Members*”, PhD Thesis Departement of Civil Engineering, University of Toronto.
- Cardinetti, F., Viola, E., Diotallevi, P.P., dan Landi, L., (2011), “Fiber Beam-Columns Models with Flexure-Shear Interaction for Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Structures”, PhD Thesis Universita di Bologna.
- Cervenka, V. Jendele, L. dan Cervenka, J., (2009), “*ATENA Program Documentation Part 1*”, Theory, Cervenka Consulting, Praha, Czech Epublic.
- Clough, R. W., Benuska, K. L. dan 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., dan Mitchell, D., (1987), “Prestressed Concrete Basics”, *CPCI Canadian Prestressed Concrete Intitute*, Otaawa, Canada.
- 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., dan Willford, M.R., (2010), “Nonlinier Structural Analysis for Seismic Design”, *NIST GCR 10-917-5*, Departement of Commerce, USA.
- DIANA, (2002), “DIANA finite element analysis user's manual release 8.1, *TNO DIANA BV*, Delft, The Netherlands
- Elwood, K.J. dan Moehle, J.P., (2004), “Evaluation of Existing Reinforced Concrete Columns”, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada
- Elwood, K. J. dan Moehle, J. P., (2005b), “Axial Capacity Model for Shear-Damaged Columns”, *ACI Strctural Journal*. July, 578-587pp.
- Esmaily, A.G., dan Xiao, Y., (2002), “Seismic Behavior of Bridge Subjected to Various Loading Patterns”, *PEER Report 2002/15*, University of California, Berkeley.
- FEMA, (2005), “Improvement of Nonlinier 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 Stiffnes 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., dan Issa, A., (1992), Nonlinier Static and Dinamic 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 Joins", *Report No. UCB/EERC 83/19*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Aug. 184pp
- 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.
- Girgin, S.C., Lu, Y., dan Panagiotou, M., (2003), "Nonlinear Cyclic Truss Model for Shear-Critical Reinforced Concrete Columns", *2nd Turkish Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, TDMSK September, Antakya, Hatay/Turkey
- Guedes, J.P.S.C.M., (1997), "Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Bridges. Modeling, Numerical Analysis and Experimental Assessment", *European Commission*, Science, research and development-Joint Research Centre Safety Technology Institute.
- Hsu, T.T.C., (1998), "Unified Approach to Shear Analysis and Design", *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 419-435pp
- Hsu, T.T.C., (1988), "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion", *ACI Structural Journal*, 85(6), 624-635pp.
- Hsu, T.T.C., dan Mo, Y.L., (2010), "Unified Theory of Concrete Structures", John Wiley and Sons, Ltd.
- Ichinose, I., (1992), "A Shear Design Equation for Ductile R/C Members", *Earthquake Engineering and Structural Dynamic* Vol. 21, 197-214pp
- Jehel, P., Ibrahimbegovic, A., L'eger, P., dan Davenne, L., (2009), "A New Fiber Element for Refined Nonlinear Modeling of RC Frame Structures in Seismic Loading" june, COMPDYN, Greece.
- Jiang, Y. dan Saiidi, S. M., (1990), "Four-Spring Element for Cyclic Response of R/C columns", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1018-1029pp
- Jirawattanasomkul, T., Dawei, Z., dan Ueda, T., (2013), " Prediction of the post-peak behavior of reinforced concrete columns with and without FRP-jacketing", *Engineering structur* 56, 1511-1526pp.
- Kim, J.H., dan Mander, J.B., (2007), "Influence of Transverse Reinforcement on Elastic Shear Stiffness of Cracked Concrete Elements", *Engineering Structures*, 1798-1807pp.
- Kotsovos, M.D., (2014), "Compressive Force-Path Method Unified Ultimate Limit-State Design of Concrete Structures", © Springer International Publishing Switzerland.
- Kunnath, S. K., Reinhorn, A., M. dan Park, Y. J., (1990), "Analytical Modeling of Inelastic Seismic Response of R/C Structures", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 116(4), 996-1016pp
- Lai, S.S., Will, G.T., dan Otani, S., (1984), "Model for Inelastic Biaxial Bending of Concrete Members", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 110:11, 2563-2584pp.
- Lee, T.H., dan Mosalam, K.M., (2004), "Probabilistic fiber element modeling of reinforced concrete structures", *Computers and Structures*, 2285–2299pp.
- Lee, D.H., dan Elnashai, A.S., (2001), "Seismic Analysis of RC Bridge Columns with Flexure-Shear Interaction", *Journal of Structural Engineering*, Vol 127 No. 5 May 546-553pp.
- Li, K. N. dan 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.*
- MacGregor, J.G., (1997), "Reinforced Concrete Mechanics and Design", Prentice Hall
- Miki, T., dan Niwa, J., (2004), "Nonlinear Analysis of RC Structural Using 3D Lattice Model", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2. 343-358pp
- 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., dan 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., dan Kabeyasawa, T., (2008), "Nonlinear Displacement-Based Response Prediction of Reinforced Concrete Columns", *Engineering Structure*, Elsevier..
- Ngo, D., dan Scoderlis, A.C., (1967), "Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam", *ACI Structural Journal* 64:3, 153-163pp.
- Niwa, J., Choi, J.C., dan Tanabe, T., (1995), "Analytical Study for Shear Resisting Mechanism Using Lattice Model", *Journal of Material, Concrete Structures and Pavements of JSCE*, No. 508/V-26, 95-109pp
- Palermo, D., dan 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., dan Hsu, T.T.C., (1996), "Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, 93(2), 197-207pp.
- Pan, Z., dan Li., (2013), "Truss-Arch Model for Shear Strength of Shear-Critical Reinforced Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering* © ASCE, April Vol. 4, 548-560pp.
- Park, H., dan 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.
- Pang, X.B., dan Hsu, T.T.C., (1996), "Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, 93(2), 197-207pp.
- Petrangeli, M., Pinto, P.M., dan Ciampi, V., (1999), "Fiber Element for Cyclic Bending and Shear of RC Structures. 1: Theory", *Journal of Engineering Mechanics*, Sep. 994-1001pp.
- Pincheira, J.A., Dotiwala, F.S., dan D'Sauza, J.T., (1999), "Seismic Analysis of Older Reinforced Concrete Columns", *Earthquake Spectra*, 15(2), 245-272pp.
- Priestley, N.M.J., Verma, R., dan Xiao, Y., (1994), "Seismic Shear Strength of Reinforced Concrete Columns", *Journal of Structural Engineering* © ASCE, August, 2310-2329pp
- Qusalem, H., Kabeyasawa, T., dan Tasai, A., (2004), "Evaluation of Ultimate Deformation Capacity at Axial Load Collapse of Reinforced Concrete Columns", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada.
- 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., Ghosn, G.E., dan Jiang, Y., (1989), "A Five-Spring Element for Biaxially bent R/C Columns", *Journal of 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., dan 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 of 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 1. Formulation", John Wiley & Sons Ltd. USA.
- Takayanagi, T. dan Schnobrich, W. C., (1976), "Computed Behaviour of R/C Coupled Shear Walls", *Civil Engineering Studies*, SRS 434, University of Illinois, Urbana
- Tran, C.T.N., dan Li, B., (2014), "Shear Strength Model for Reinforced Concrete Columns with Low Transverse Reinforcement Ratios", *Advances in Structural Engineering* Vol. 17 No.10, 1373-1385pp
- Vecchio, F.J., dan Collins, M.P., (1986), "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear", *ACI Structural 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.
- Wang, Y.C., dan Hsu, K., (2008), "Truss Analysis for Evaluating the Behavior of Reinforced Concrete Moment-Resisting Frames with Poorly Reinforcing Details", *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China
- Wong, P.S., dan Vecchio, F.J., (2002), "VekTor2 & FormWork User's Manual".
- Xu, S. Y., dan Zhang, J., (2008), "Hysteretic Models for Reinforced Concrete Columns Considering Axial-Shear-Flexural Interaction", *Proceedings of the 14th 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.