

ANALISA NONLINEAR BALOK TINGGI BETON BERTULANG DENGAN MODIFIED COMPRESSION FIELD THEORY

Reky Stenly Windah

Alumni Pascasarjana Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi
Dosen Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Sam Ratulangi

ABSTRACT

The modified compression field theory, MCFT, an analytical model that is capable of predicting not only the shear strength but also the load-deformation response of reinforced concrete elements subjected to in-plane shear and normal stresses, such as deep beams. This rational model satisfies the three fundamental principles of the mechanics of materials: stress equilibrium, strain compatibility, and the constitutive laws of materials.

The accuracy of MCFT method in predicting shear strength of reinforced concrete deep beam is very good. This indicated by the value P_{test}/P_{mcft} of 7,14 %.

Keywords: *the modified compression field theory, shear strength, load-deformation response, in-plane shear, deep beam.*

LATAR BELAKANG

Secara umum, struktur atau elemen struktur beton bertulang direncanakan dapat menahan gaya aksial (tarik atau tekan), momen lentur, gaya geser dan torsi. Salah satu atau kombinasi dari keempat jenis gaya ini dapat bekerja pada sebuah elemen struktur. Pada teori balok klasik (teori Bernoulli) potongan penampang diasumsi tetap bidang yang lurus sebelum dan sesudah dibebani. Teori ini sederhana, rasional dan efektif untuk mendisain elemen balok yang menahan momen lentur yang dikombinasikan dengan gaya aksial. Teori ini sudah digunakan lebih dari satu abad dan diterima secara umum oleh para peneliti, hal ini dapat dilihat dari kesamaan konsep yang mendasari peraturan-peraturan di berbagai negara. Pengetesan dan pengujian balok beton bertulang juga sudah memberikan hasil yang mendekati teori yang digunakan, bahkan dalam beberapa kasus memberikan hasil yang akurat.

Persoalan lentur berbeda dengan persoalan geser pada beton bertulang. Sampai saat ini, persoalan geser selalu terbuka untuk dipelajari dan didiskusikan. Teori dan hipotesa yang digunakan masih berkembang dan berbeda di antara para peneliti yang menyebabkan peraturan mengenai geser pada beton bertulang selalu

berbeda satu negara dengan negara yang lain di seluruh dunia.

Pada waktu dahulu, terdapat dua konsep mendasar yang digunakan untuk menganalisa masalah geser pada beton bertulang yaitu metode mekanika dan metode rangka batang. Metode mekanika adalah metode yang di adopsi oleh peraturan ACI. Persamaan-persamaan yang digunakan diperoleh hanya dengan mencocokkan hasil test sehingga peraturan di dalam ACI berbentuk empiris atau semi empiris.

Konsep kedua adalah Model Rangka Batang. Para peneliti sepakat bahwa model rangka batang merupakan jalan untuk memahami perilaku geser pada beton bertulang. Konsep ini pertama kali diusulkan oleh Ritter dan Morsch yang membawa perubahan pemahaman mengenai geser di awal abad ke-20. Teori ini memodelkan aliran gaya dari balok beton bertulang yang retak seperti sistem rangka batang. Sudut antara *strut* diagonal dan baja tulangan diasumsi 45^0 , sehingga model ini lebih dikenal dengan model rangka batang 45^0 .

Model rangka batang dari Ritter dan Morsch sangat sederhana untuk diterapkan, persamaan-persamaan yang digunakan diperoleh dengan menerapkan persamaan-persamaan keseimba-

ngan gaya dengan mengasumsi sudut retak 45 derajat. Berdasarkan hasil pengelasan terdapat perbedaan antara persamaan model rangka batang dan hasil test. Untuk masalah torsi murni (*pure torsi*) terdapat perbedaan sampai 30% dan untuk dinding geser yang rendah (*low-rise shearwall*) terdapat perbedaan sampai 50% (1).

Para peneliti kemudian mengembangkan tiga hal yang mendasar untuk memperbaiki model rangka batang. Pertama, Thurliman dan Lampert menemukan bahwa sudut retak tidak sama dengan 45° seperti yang digunakan pada model rangka batang. Teori ini kemudian dikenal dengan nama *Variable Angle Truss Model*. Kedua, Collins melengkapi persamaan keseimbangan dengan hubungan kompatibilitas untuk menghitung sudut retak dengan asumsi bahwa sudut retak berimpit dengan sudut dari tegangan dan regangan utama. Ketiga ditemukannya *softening effect* oleh Robinson dan Demorieux, 1968 pada strut diagonal. Efek ini kemudian berhasil dihitung oleh Vecchio dan Collins yang memperkenalkan efek pelunakan pada hubungan tegangan dan regangan beton (*softened stress strain curve*) yang tergantung dari perbandingan dua regangan utama yang saling tegak lurus. Teori ini kemudian dikenal dengan nama *Modified Compression Field Theory, MCFT*.

Kombinasi persamaan keseimbangan, hubungan kompatibilitas dan kurva hubungan tegangan dan regangan dengan memperhitungkan efek pelunakan merupakan teori yang mampu memprediksi dengan akurat hasil test dari berbagai tipe struktur beton bertulang yang dibebani oleh tegangan geser dan torsi termasuk balok tinggi beton bertulang. Keberhasilan para peneliti mengkombinasikan ketiga persamaan yang mendasar untuk menganalisa struktur beton bertulang membuka tabir dan menjadi wabah bagi hampir seluruh peneliti di dunia untuk mengembangkan berbagai model untuk memprediksi respons dari struktur beton bertulang sampai saat ini.

Modified Compression Field Theory, MCFT adalah sebuah model untuk memprediksi respons dari element beton bertulang yang dibebani oleh tegangan normal dan tegangan geser dengan

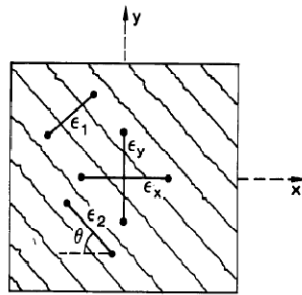
menggunakan model retak *rotating crack (smeared crack)*. Teori ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1974 dengan nama *Diagonal Compression Field Theory* kemudian menjadi *Compression Field Theory (CFT)* pada tahun 1978. Pada tahun 1982 Vecchio mendefinisikan bentuk original dari MCFT dengan melakukan testing terhadap 30 buah panel Beton Bertulang akibat beban geser. Pada tahun 1986 Frank Vecchio mempatenkan MCFT dengan paper ACI yang berjudul "*The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear*". Kemudian mengalami perubahan kecil pada tahun 1987 dan berkembang dengan pesat di Universitas Toronto, Kanada.

Model yang mirip dengan MCFT berkembang di Universitas Houston, Texas Amerika Serikat. Thomas Hsu, dkk. mengembangkan *the rotating-angle softened-truss model (RA-STM)* dan *the fixed-angle softened truss model (FA-STM)*. Model-model ini mempertimbangkan kondisi keseimbangan, hubungan kompatibiliti dan kurva hubungan tegangan dan regangan dengan mempertimbangkan pelunakan pada strut diagonal beton, sehingga untuk berbagai kasus beton bertulang model-model ini mampu memprediksi dengan baik dan memberikan hasil yang mendekati hasil test terutama struktur atau elemen struktur yang dibebani gaya geser.

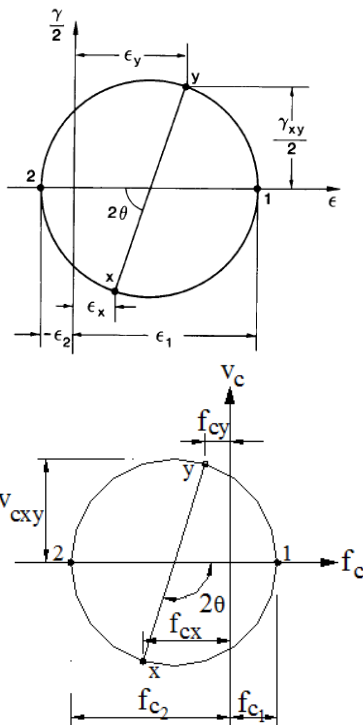
Penggunaan balok tinggi beton bertulang sebagai elemen struktur sudah menjadi kebutuhan penting bagi para perencana di dalam mendisain dan merencanakan berbagai bangunan tehnik sipil. Balok tinggi biasanya digunakan sebagai elemen transfer (transfer girder) baik hanya satu bentang atau balok menerus. Pada transfer girder, beban dari sebuah kolom lainnya disalurkan secara horizontal menuju kolom lainnya. Balok tinggi juga ditemui pada dinding struktur berpasangan (*coupling structural wall*), kepala pondasi tiang pancang (*pile cap*), brakets, korbels dan lain-lain. Elemen-elemen ini memiliki karakteristik dimana bentang relatif pendek dibandingkan dengan tinggi penampang, memiliki ketebalan yang kecil dibandingkan dengan bentang dan tinggi penampang.

MODIFIED COMPRESSION FIELD THEORY

Pada tahun 1981, Vecchio dan Collins mengembangkan *Compression Field Theory (CFT)* dan mengalami perbaikan pada tahun 1986 dengan nama *modified compression field theory (MCFT)*. Persamaan-persamaan yang digunakan diperoleh dengan menggunakan persamaan keseimbangan, hubungan kompatibilitas dan hubungan tegangan dan regangan material.



Gambar 1. Elemen beton



Gambar 2. Lingkaran Mohr untuk Tegangan Rata-rata

Persamaan keseimbangan diperoleh dari gambar Lingkaran Mohr seperti di bawah ini:

$$\rho_x f_{sx} = v \cot \theta - f_1 \quad \text{Persamaan 1}$$

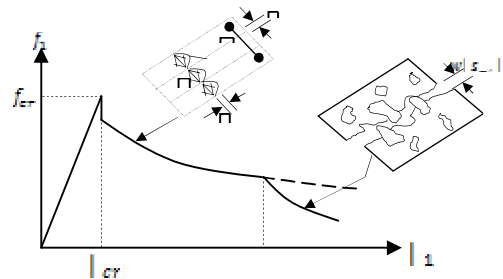
$$\rho_v f_{sy} = v \tan \theta - f_1 \quad \text{Persamaan 2}$$

$$f_2 = v(\tan \theta + \cot \theta) - f_1 \quad \text{Persamaan 3}$$

Tegangan rata-rata utama setelah retak, f_1 , diusulkan oleh Collins dan Mitchel (1991):

$$f_1 = \frac{f_{cr}}{1 + \sqrt{500\varepsilon_1}} \text{ (psi)} \quad \text{Persamaan 4}$$

$$f_{cr} = 4\sqrt{f_c'} \quad \text{Persamaan 5}$$



Gambar 3. Grafik hubungan tegangan tarik beton

Pada saat retak, tegangan tarik beton menurun menuju titik nol dan tegangan tarik di dalam baja tulangan meningkat secara signifikan. Asumsi retak adalah parallel, kondisi keseimbangan setelah retak diperoleh dari gambar 9.

Arah memanjang

$$f_{sxcr} \rho_x (A_{cr} \sin \theta) - (\tau_{ci} \cos \theta) A_{cr} - \tau (A_{cr} \cos \theta) = 0 \quad \text{Persamaan 6}$$

Arah vertikal

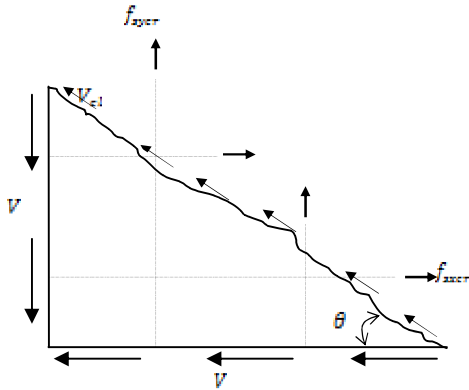
$$f_{syer} \rho_x (A_{cr} \cos \theta) - (\tau_{ci} \sin \theta) A_{cr} - \tau (A_{cr} \sin \theta) = 0 \quad \text{Persamaan 7}$$

Dimana A_{cr} = luas bidang retak;
 τ_{ci} = tegangan geser saat retak

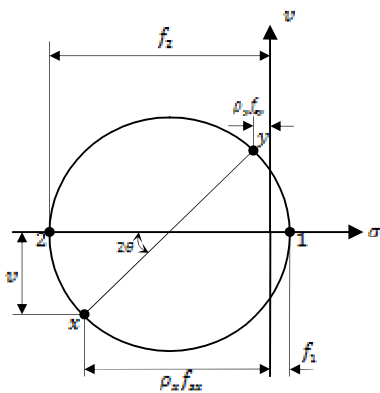
Sehingga persamaan dapat ditulis:

$$\rho_x f_{sxcr} = \tau \cot \theta + \tau_{ci} \cot \theta \quad \text{Persamaan 8}$$

$$\rho_v f_{syer} = \tau \tan \theta + \tau_{ci} \tan \theta \quad \text{Persamaan 9}$$



Gambar 4a. Kondisi keseimbangan setelah retak



Gambar 4b. Kondisi keseimbangan setelah retak

Persamaan 6 dan 7 memperlihatkan tegangan tulanjang arah memanjang meningkat tetapi tegangan dalam arah tulanjang vertikal akan menurun. Tegangan geser dapat ditransformasikan memotong retak, τ_{ci} , dapat diekspresikan dan merupakan fungsi dari lebar retak. Pada tahun 1986, Vecchio dan Collins mengusulkan nilai τ_{ci} , dan disederhanakan oleh Bhide dan Collins pada tahun 1989, yaitu:

$$\tau_{ci} \leq \frac{2.16\sqrt{f_c'}}{0.3 + \frac{24w}{a + 0.63}} \text{ (psi / in)} \quad \text{Persamaan 10}$$

Hubungan tegangan dan regangan untuk beton biasanya didefinisikan dari response benda uji silinder. Persamaan kurva tegangan dan regangan didekati dengan persamaan parabola dengan nilai tegangan terbesar f_c' yang memiliki hubungan dengan regangan ϵ' . Untuk beton bertulang yang retak akibat geser, tegangan tekan dalam salah satu arah akan direduksi oleh

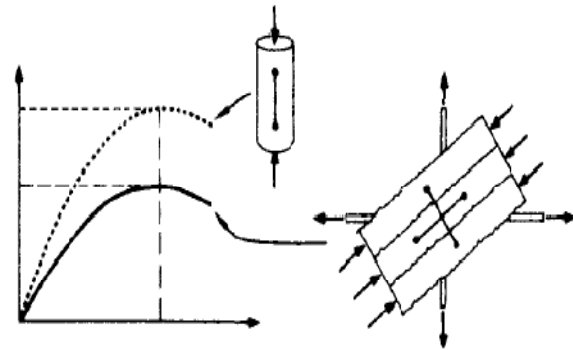
tegangan tarik yang bekerja tegak lurus. Fenomena ini dikenal dengan nama *softening effect* (Robinson dan Demorieux, 1972).

Tahun 1986, Vecchio dan Collins mengusulkan hubungan tegangan dan regangan menggunakan persamaan di bawah ini.

$$f_2 = f_{2max} \left[2 \left(\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_c'} \right) - \left(\frac{\epsilon_2'}{\epsilon_c'} \right)^2 \right] \quad \text{Persamaan 11}$$

Dimana,

$$\frac{f_{2max}}{f_c'} = \frac{1}{0.8 + 170\epsilon_1} \leq 1.0 \quad \text{Persamaan 12}$$



Gambar 5. Hubungan tegangan dan regangan beton yang retak

Persamaan ini mengekspresikan perlemahan kuat tekan beton yang retak di dalam regangan tarik utama, ϵ_1 . Tegangan rata-rata dan regangan rata-rata adalah istilah yang digunakan dalam persamaan di atas. Regangan tarik utama dapat diperoleh dari gambar di atas,

$$\epsilon_1 = \epsilon_x + \epsilon_y - \epsilon_2 = \epsilon_x + (\epsilon_x - \epsilon_2) \cot^2 \theta \quad \text{Persamaan 13}$$

Persamaan regangan dalam arah memanjang, ϵ_x , dapat ditulis

$$\epsilon_x = \frac{(\epsilon_1 \tan^2 \theta + \epsilon_2)}{(1 + \tan^2 \theta)} \quad \text{Persamaan 14}$$

Persamaan regangan dalam arah memanjang, ϵ_y , dapat ditulis

$$\epsilon_y = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2 \tan^2 \theta}{(1 + \tan^2 \theta)} \quad \text{Persamaan 15}$$

METODOLOGI PENELITIAN

Respons struktur balok tinggi beton bertulang dapat dianalisa dengan berbagai cara. Salah satu cara yang digunakan adalah melakukan simulasi keruntuhan balok tinggi dengan menggunakan program elemen hingga seperti yang dilakukan pada tulisan ini. Sebagai validasi dalam studi ini digunakan data-data dari hasil penelitian yang sudah pernah dilakukan. Struktur beton yang akan dianalisa dalam tesis ini adalah struktur balok tinggi beton bertulang di atas tumpuan sederhana yang dibebani dengan beban terpusat ditengah bentang. Benda uji yang akan digunakan adalah benda uji balok tinggi yang pernah diuji oleh Rogowsky, D.M., MacGregor J.G., Ong, S.Y., 1983. Penelitian mereka dituangkan dalam bentuk laporan teknik dengan judul *Test of Reinforced Concrete Deep Beams*.

1. Material yang digunakan

a. Tulangan/ Baja

Luas tulangan sengkang adalah 37,8 mm dengan diameter tulangan sengkang adalah 6 mm dan memiliki tegangan leleh sebesar 428 MPa. Gaya tarik ($A_s \times f_y$) tulangan adalah 16,2 KN.

Luas tulangan negative (atas) = 56,50 mm

Luas Tulangan positif (bawah) = 1800 mm

Modulus Young = 200000 kg/cm²

b. Beton

Mutu Beton (f'_c) - 26,8 MPa

Kuat Tarik (f_t) - 2,65 MPa

2. Pemodelan Balok Tinggi Beton Bertulang

Beban diasumsi bekerja pada bidangnya sehingga struktur dapat diasumsi sebagai struktur dua dimensi (tegangan bidang, plane stress). Elemen beton menggunakan elemen *quadrilateral* empat titik nodal sedangkan tulangan diasumsi terdistribusi secara merata baik dalam arah longitudinal maupun dalam arah transversal (*smearred crack model*)

Adapun benda uji yang akan disimulasikan memiliki data sebagai berikut

Lebar Penampang = 200 mm

Tinggi Penampang = 1000 mm

Jarak dari tumpuan ke titik beban= 750 mm

Total jumlah node 253

Total jumlah elemen 264

Total jumlah elemen segiempat	220
Total elemen batang	44
Jumlah penambahan beban	51
Tipe beban	Monoton

Element Numbers

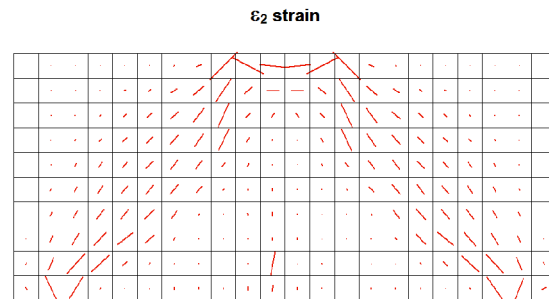
188	207	217	222	232	244	258	268	277	285	293	311	321	333	344	358	374	384	397	407	418	431	444	458	474	484	497	507	518	531	544	558	574	584	597	607	618	631	644	658	674	684	697	707	718	731	744	758	774	784	797	807	818	831	844	858	874	884	897	907	918	931	944	958	974	984	997	1007	1018	1031	1044	1058	1074	1084	1097	1107	1118	1131	1144	1158	1174	1184	1197	1207	1218	1231	1244	1258	1274	1284	1297	1307	1318	1331	1344	1358	1374	1384	1397	1407	1418	1431	1444	1458	1474	1484	1497	1507	1518	1531	1544	1558	1574	1584	1597	1607	1618	1631	1644	1658	1674	1684	1697	1707	1718	1731	1744	1758	1774	1784	1797	1807	1818	1831	1844	1858	1874	1884	1897	1907	1918	1931	1944	1958	1974	1984	1997	2007	2018	2031	2044	2058	2074	2084	2097	2107	2118	2131	2144	2158	2174	2184	2197	2207	2218	2231	2244	2258	2274	2284	2297	2307	2318	2331	2344	2358	2374	2384	2397	2407	2418	2431	2444	2458	2474	2484	2497	2507	2518	2531	2544	2558	2574	2584	2597	2607	2618	2631	2644	2658	2674	2684	2697	2707	2718	2731	2744	2758	2774	2784	2797	2807	2818	2831	2844	2858	2874	2884	2897	2907	2918	2931	2944	2958	2974	2984	2997	3007	3018	3031	3044	3058	3074	3084	3097	3107	3118	3131	3144	3158	3174	3184	3197	3207	3218	3231	3244	3258	3274	3284	3297	3307	3318	3331	3344	3358	3374	3384	3397	3407	3418	3431	3444	3458	3474	3484	3497	3507	3518	3531	3544	3558	3574	3584	3597	3607	3618	3631	3644	3658	3674	3684	3697	3707	3718	3731	3744	3758	3774	3784	3797	3807	3818	3831	3844	3858	3874	3884	3897	3907	3918	3931	3944	3958	3974	3984	3997	4007	4018	4031	4044	4058	4074	4084	4097	4107	4118	4131	4144	4158	4174	4184	4197	4207	4218	4231	4244	4258	4274	4284	4297	4307	4318	4331	4344	4358	4374	4384	4397	4407	4418	4431	4444	4458	4474	4484	4497	4507	4518	4531	4544	4558	4574	4584	4597	4607	4618	4631	4644	4658	4674	4684	4697	4707	4718	4731	4744	4758	4774	4784	4797	4807	4818	4831	4844	4858	4874	4884	4897	4907	4918	4931	4944	4958	4974	4984	4997	5007	5018	5031	5044	5058	5074	5084	5097	5107	5118	5131	5144	5158	5174	5184	5197	5207	5218	5231	5244	5258	5274	5284	5297	5307	5318	5331	5344	5358	5374	5384	5397	5407	5418	5431	5444	5458	5474	5484	5497	5507	5518	5531	5544	5558	5574	5584	5597	5607	5618	5631	5644	5658	5674	5684	5697	5707	5718	5731	5744	5758	5774	5784	5797	5807	5818	5831	5844	5858	5874	5884	5897	5907	5918	5931	5944	5958	5974	5984	5997	6007	6018	6031	6044	6058	6074	6084	6097	6107	6118	6131	6144	6158	6174	6184	6197	6207	6218	6231	6244	6258	6274	6284	6297	6307	6318	6331	6344	6358	6374	6384	6397	6407	6418	6431	6444	6458	6474	6484	6497	6507	6518	6531	6544	6558	6574	6584	6597	6607	6618	6631	6644	6658	6674	6684	6697	6707	6718	6731	6744	6758	6774	6784	6797	6807	6818	6831	6844	6858	6874	6884	6897	6907	6918	6931	6944	6958	6974	6984	6997	7007	7018	7031	7044	7058	7074	7084	7097	7107	7118	7131	7144	7158	7174	7184	7197	7207	7218	7231	7244	7258	7274	7284	7297	7307	7318	7331	7344	7358	7374	7384	7397	7407	7418	7431	7444	7458	7474	7484	7497	7507	7518	7531	7544	7558	7574	7584	7597	7607	7618	7631	7644	7658	7674	7684	7697	7707	7718	7731	7744	7758	7774	7784	7797	7807	7818	7831	7844	7858	7874	7884	7897	7907	7918	7931	7944	7958	7974	7984	7997	8007	8018	8031	8044	8058	8074	8084	8097	8107	8118	8131	8144	8158	8174	8184	8197	8207	8218	8231	8244	8258	8274	8284	8297	8307	8318	8331	8344	8358	8374	8384	8397	8407	8418	8431	8444	8458	8474	8484	8497	8507	8518	8531	8544	8558	8574	8584	8597	8607	8618	8631	8644	8658	8674	8684	8697	8707	8718	8731	8744	8758	8774	8784	8797	8807	8818	8831	8844	8858	8874	8884	8897	8907	8918	8931	8944	8958	8974	8984	8997	9007	9018	9031	9044	9058	9074	9084	9097	9107	9118	9131	9144	9158	9174	9184	9197	9207	9218	9231	9244	9258	9274	9284	9297	9307	9318	9331	9344	9358	9374	9384	9397	9407	9418	9431	9444	9458	9474	9484	9497	9507	9518	9531	9544	9558	9574	9584	9597	9607	9618	9631	9644	9658	9674	9684	9697	9707	9718	9731	9744	9758	9774	9784	9797	9807	9818	9831	9844	9858	9874	9884	9897	9907	9918	9931	9944	9958	9974	9984	9997	10007
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	-------

Definisi 2: Element Numbers DisplacementFactor = 0,00

Gambar 6. Pemodelan Struktur Balok Tinggi

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Arah Regangan Utama



Definisi 2: DisplacementCracks: ε2 strain DisplacementFactor = 1,00

Gambar 7. Tipe Strut Berbentuk Botol

Gambar 7 memperlihatkan arah regangan membentuk strut seperti botol. Arah regangan ini memiliki kecondongan yang sama dengan arah regangan yang diperlihatkan pada ACI Code 318/318R-372, Appendix A, gambar 1.3.

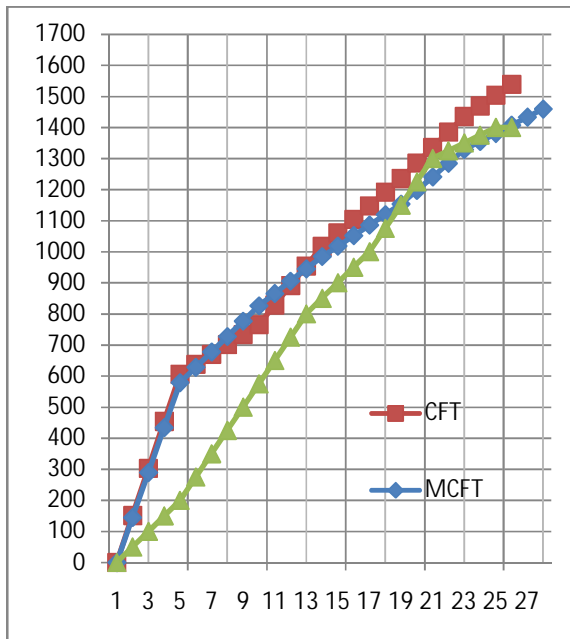
2. Pola Retak Balok Tinggi

Pada gambar 8 terlihat pola retak memperlihatkan garis lurus yang tegas antara titik beban dan tumpuan. Pola retak balok tinggi berdasarkan hasil simulasi VecTor2 memiliki

Gambar 8. Pola retak untuk beban maksimum

kecondongan yang sama dengan pola retak pada berbagai literatur.

3. Kurva Hubungan Gaya dan Perpindahan

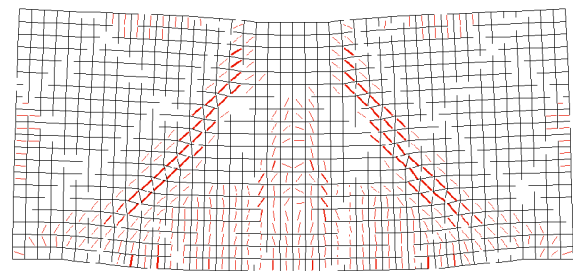


Gambar 9 Grafik hubungan beban dan perpindahan balok tinggi

Gambar 9 memperlihatkan grafik hubungan antara beban dan perpindahan yang hasil simulasi VecTor2 dengan grafik hubungan gaya dan perpindahan hasil pengujian di laboratorium oleh Rogowsky dkk. Berdasarkan grafik yang ada terlihat bahwa respons balok tinggi dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu respons linear dan respons nonlinear. Respons linear berbentuk garis lurus dengan beban maksimum mendekati 600 kN. Hasil simulasi ini memperlihatkan kemiripan dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Rogowsky dkk yang melaporkan retak pertama kali terjadi pada beban di antara 500 kN sampai 600 kN. Respons yang kedua adalah respons nonlinear dengan setelah beban melewati 500 kN, respons balok tinggi menjadi non linier, kemudian mengalami keruntuhan pada beban 1500 kN.

Berdasarkan hasil pengujian dengan menggunakan program elemen hingga VecTor2 diperoleh beban maksimum sebesar 1500 kN dengan memperhitungkan efek softening dan efek

Combined View



DisplaceCracks: Combined View, Displacement Factor: 2.50
Crack Widths: Min = 1.00 mm, Max = 2.00 mm

stiffening. Prosentase kesalahan dengan hasil pengujian eksperimen sebesar 7,14%.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi komputer diperoleh kesimpulan bahwa beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok tinggi beton bertulang dengan menggunakan analisa *Modified Compression Field Theory* adalah sebesar 1500 kN dengan prosentase kesalahan terhadap hasil pengujian Rogowsky dkk adalah sebesar 7,14 %.

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 318. 1989. Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), Appendix A. *Reporte by ACI Committee 318*.
2. Cervenka V. December 1985. Constitutive Model for Cracked Reinforced Concrete. *ACI Journal*. Title no. 82-82. pp 877-882.
3. Chen W.F., 1982. *Plasticity in Reinforced Concrete*. McGraw-Hill Book Company.
4. Collins M., D. Mitchell, P. Adebar and F.J. Vecchio. February 1996. A General Shear Design. *ACI Structural Journal* Vol. 93 No.1. pp 36-60.
5. Collins M. and D. Mitchell. 1987. *Prestressed Concrete Basics*. Canadian Prestressed Concrete Institute. 85 Albert Street Ottawa, Ontario, K1P 6A4, Canada.

6. Hsu, Thomas T.C., 2000. *Unified Theory of Reinforced Concrete*. University of Houston, Texas. USA.
7. Hsu Thomas.T.C., 1997. Concrete Stiffness Matrices for Membrane Elements. Department of Civil & Environmental Engineering, University of Houston, Houston, USA. *Structural Engineering and Mechanics* Vol.5. No 5. pp 599-608.
8. Hsu Thomas T.C. and Zhang Li-Xin Bob. Oktober 1997. Nonlinear Analysis of Membrane Elements by Fixed-Angle Softened-Truss Model. *ACI Structural Journal*. V. 93, No.94. pp 483-492.
9. Hsu Thomas T.C., 1988. Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion. *ACI Structural Journal*. pp 624-635.
10. Hsu Thomas T.C., and Y.L. Mo. August 1985. Softening of Concrete in Torsional Members-Design. *ACI Journal*. pp 443-452.
11. Hsu Thomas T.C., and Y.L. Mo. June 1985. Softening of Concrete in Torsional Members- Theory and Test. *ACI Journal*. pp 290-303.
12. Kong F.K., 2002. *Reinforced Concrete Deep Beams*. Van Nostrand Reinhold. New York.
13. Pang X. D.,T.T.C.Hsu, April 1996. Fixed Angle Softened Truss Model for Reinforced Concrete. *ACI Structural Journal*, V. 93 No. 2. pp 197-207.
14. Pang X. D., T.T.C. Hsu December 1995. Behavior of Reinforced Concrete Membrane Elements in Shear. *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 6.
15. Rogowsky D.M., J.G.MacGregor and S.Y.Ong, 1983. Test of Reinforced Concrete Deep Beams. *Structural Engineering Report No. 109*. Department of Civil Engineering The University of Alberta Edmonton Alberta, Canada.
16. Rogowsky D.M. and J.G. MacGregor. 1986. Design of Reinforced Concrete Deep Beams. *Concrete International*.
17. Vecchio, F.J. De Roo A., June 1995. Smeared Crack Modeling of Concrete Tension Splitting . *ASCE. Journal of Structural Engineering* Vol. 121 No. 6. pp 702-708.
18. Vecchio, F.J. February 1989. Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Membranes. *ACI Structural Engineering Journal*. Title No. 86-S4. pp 26-35
19. Vecchio, F.J. and M.P. Collins, M.P. June 1988. Predicting the Response of Reinforced Concrete Beams Subjected to Shear Using Modified Compression Field Theory. *Journal of American Concrete Institute*. Title No. 85-S27. pp 258-268.
20. Vecchio, F.J. and M.P. Collins. 1986. The Modified Compression Filed Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, *Journal of American Concrete Institute*, Proceedings Vol.83, No. 2, Mar-Apr., pp. 219-231.
21. Vecchio, F.J. and M.P. Collins. 1982. The Response of Reinforced Concrete to in Plane Shear and Normal Stresses, Publication No. 82-03 (ISBN 0-7727-7029-8), Department of Civil Engineering, University of Toronto, Toronto, Canada, 332 pp.