

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

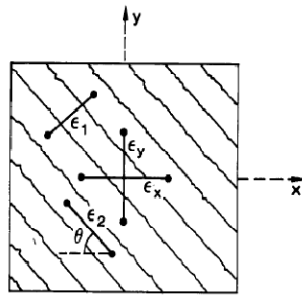
menggunakan model retak *rotating crack (smeared crack)*. Teori ini pertama kali diperkenalkan pada tahun 1974 dengan nama *Diagonal Compression Field Theory* kemudian menjadi *Compression Field Theory (CFT)* pada tahun 1978. Pada tahun 1982 Vecchio mendefinisikan bentuk original dari MCFT dengan melakukan 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.

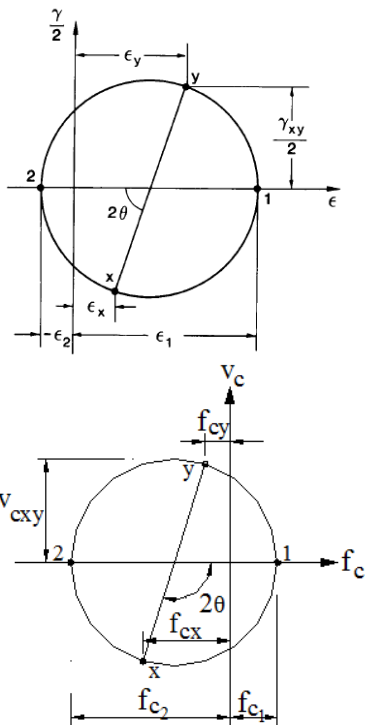
Penggunaan balok tinggi beton bertulang sebagai elemen struktur sudah menjadi kebutuhan penting bagi para perencana di dalam mendisain dan merencanakan berbagai bangunan tehnik sipil. Balok tinggi biasanya digunakan sebagai elemen transfer (transfer girder) baik hanya satu bentang atau balok menerus. 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*), braket, korbil 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:

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

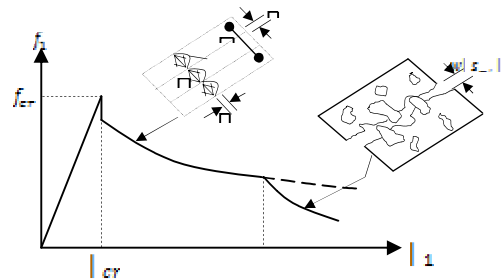
$$\rho_v f_{sy} = v \tan \theta - f_1 \quad \text{Persamaan 2}$$

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

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

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

Arah vertikal

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

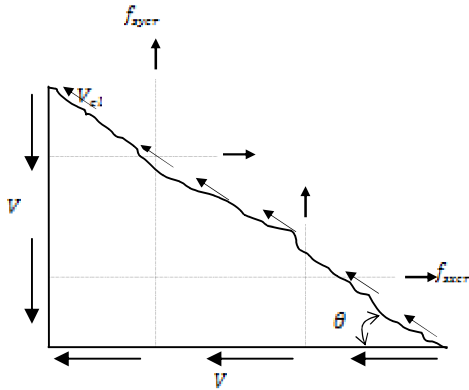
Dimana A_{cr} = luas bidang retak;

τ_{ci} = tegangan geser saat retak

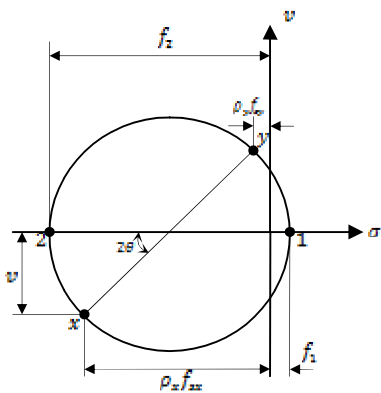
Sehingga persamaan dapat ditulis:

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

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



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

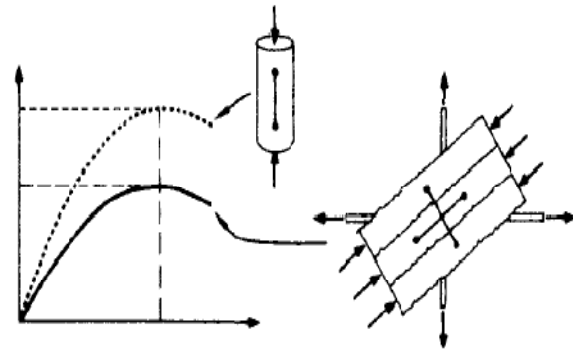
tegangan tarik yang bekerja tegak lurus. Fenomena ini dikenal dengan nama *softening effect* (Robinson dan Demorieux, 1972).

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

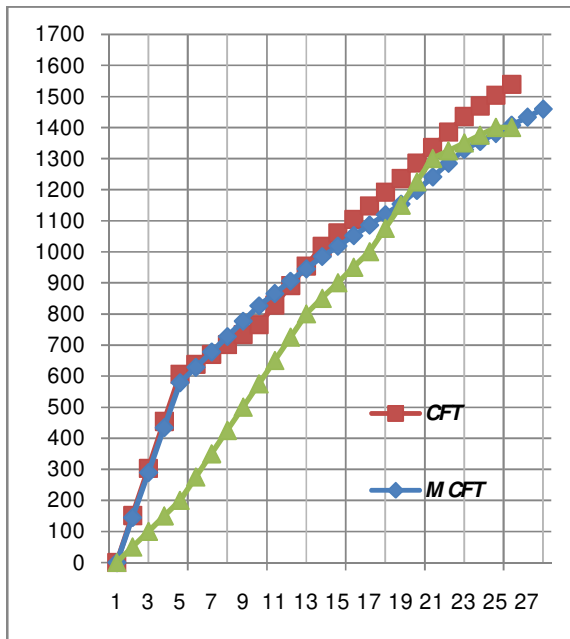
| | |
|-------------------------------|---------|
| Total jumlah elemen segiempat | 220 |
| Total elemen batang | 44 |
| Jumlah penambahan beban | 51 |
| Tipe beban | Monoton |

Element Numbers

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|
| 188 | 207 | 217 | 222 | 232 | 244 | 258 | 268 | 277 | 285 | 293 | 311 | 321 | 333 | 344 | 358 | 374 | 384 | 393 | 401 | 409 | 417 | 425 | 433 | 441 | 449 | 457 | 465 | 473 | 481 | 489 | 497 | 505 | 513 | 521 | 529 | 537 | 545 | 553 | 561 | 569 | 577 | 585 | 593 | 601 | 609 | 617 | 625 | 633 | 641 | 649 | 657 | 665 | 673 | 681 | 689 | 697 | 705 | 713 | 721 | 729 | 737 | 745 | 753 | 761 | 769 | 777 | 785 | 793 | 801 | 809 | 817 | 825 | 833 | 841 | 849 | 857 | 865 | 873 | 881 | 889 | 897 | 905 | 913 | 921 | 929 | 937 | 945 | 953 | 961 | 969 | 977 | 985 | 993 | 1001 | 1009 | 1017 | 1025 | 1033 | 1041 | 1049 | 1057 | 1065 | 1073 | 1081 | 1089 | 1097 | 1105 | 1113 | 1121 | 1129 | 1137 | 1145 | 1153 | 1161 | 1169 | 1177 | 1185 | 1193 | 1201 | 1209 | 1217 | 1225 | 1233 | 1241 | 1249 | 1257 | 1265 | 1273 | 1281 | 1289 | 1297 | 1305 | 1313 | 1321 | 1329 | 1337 | 1345 | 1353 | 1361 | 1369 | 1377 | 1385 | 1393 | 1401 | 1409 | 1417 | 1425 | 1433 | 1441 | 1449 | 1457 | 1465 | 1473 | 1481 | 1489 | 1497 | 1505 | 1513 | 1521 | 1529 | 1537 | 1545 | 1553 | 1561 | 1569 | 1577 | 1585 | 1593 | 1601 | 1609 | 1617 | 1625 | 1633 | 1641 | 1649 | 1657 | 1665 | 1673 | 1681 | 1689 | 1697 | 1705 | 1713 | 1721 | 1729 | 1737 | 1745 | 1753 | 1761 | 1769 | 1777 | 1785 | 1793 | 1801 | 1809 | 1817 | 1825 | 1833 | 1841 | 1849 | 1857 | 1865 | 1873 | 1881 | 1889 | 1897 | 1905 | 1913 | 1921 | 1929 | 1937 | 1945 | 1953 | 1961 | 1969 | 1977 | 1985 | 1993 | 2001 | 2009 | 2017 | 2025 | 2033 | 2041 | 2049 | 2057 | 2065 | 2073 | 2081 | 2089 | 2097 | 2105 | 2113 | 2121 | 2129 | 2137 | 2145 | 2153 | 2161 | 2169 | 2177 | 2185 | 2193 | 2201 | 2209 | 2217 | 2225 | 2233 | 2241 | 2249 | 2257 | 2265 | 2273 | 2281 | 2289 | 2297 | 2305 | 2313 | 2321 | 2329 | 2337 | 2345 | 2353 | 2361 | 2369 | 2377 | 2385 | 2393 | 2401 | 2409 | 2417 | 2425 | 2433 | 2441 | 2449 | 2457 | 2465 | 2473 | 2481 | 2489 | 2497 | 2505 | 2513 | 2521 | 2529 | 2537 | 2545 | 2553 | 2561 | 2569 | 2577 | 2585 | 2593 | 2601 | 2609 | 2617 | 2625 | 2633 | 2641 | 2649 | 2657 | 2665 | 2673 | 2681 | 2689 | 2697 | 2705 | 2713 | 2721 | 2729 | 2737 | 2745 | 2753 | 2761 | 2769 | 2777 | 2785 | 2793 | 2801 | 2809 | 2817 | 2825 | 2833 | 2841 | 2849 | 2857 | 2865 | 2873 | 2881 | 2889 | 2897 | 2905 | 2913 | 2921 | 2929 | 2937 | 2945 | 2953 | 2961 | 2969 | 2977 | 2985 | 2993 | 3001 | 3009 | 3017 | 3025 | 3033 | 3041 | 3049 | 3057 | 3065 | 3073 | 3081 | 3089 | 3097 | 3105 | 3113 | 3121 | 3129 | 3137 | 3145 | 3153 | 3161 | 3169 | 3177 | 3185 | 3193 | 3201 | 3209 | 3217 | 3225 | 3233 | 3241 | 3249 | 3257 | 3265 | 3273 | 3281 | 3289 | 3297 | 3305 | 3313 | 3321 | 3329 | 3337 | 3345 | 3353 | 3361 | 3369 | 3377 | 3385 | 3393 | 3401 | 3409 | 3417 | 3425 | 3433 | 3441 | 3449 | 3457 | 3465 | 3473 | 3481 | 3489 | 3497 | 3505 | 3513 | 3521 | 3529 | 3537 | 3545 | 3553 | 3561 | 3569 | 3577 | 3585 | 3593 | 3601 | 3609 | 3617 | 3625 | 3633 | 3641 | 3649 | 3657 | 3665 | 3673 | 3681 | 3689 | 3697 | 3705 | 3713 | 3721 | 3729 | 3737 | 3745 | 3753 | 3761 | 3769 | 3777 | 3785 | 3793 | 3801 | 3809 | 3817 | 3825 | 3833 | 3841 | 3849 | 3857 | 3865 | 3873 | 3881 | 3889 | 3897 | 3905 | 3913 | 3921 | 3929 | 3937 | 3945 | 3953 | 3961 | 3969 | 3977 | 3985 | 3993 | 4001 | 4009 | 4017 | 4025 | 4033 | 4041 | 4049 | 4057 | 4065 | 4073 | 4081 | 4089 | 4097 | 4105 | 4113 | 4121 | 4129 | 4137 | 4145 | 4153 | 4161 | 4169 | 4177 | 4185 | 4193 | 4201 | 4209 | 4217 | 4225 | 4233 | 4241 | 4249 | 4257 | 4265 | 4273 | 4281 | 4289 | 4297 | 4305 | 4313 | 4321 | 4329 | 4337 | 4345 | 4353 | 4361 | 4369 | 4377 | 4385 | 4393 | 4401 | 4409 | 4417 | 4425 | 4433 | 4441 | 4449 | 4457 | 4465 | 4473 | 4481 | 4489 | 4497 | 4505 | 4513 | 4521 | 4529 | 4537 | 4545 | 4553 | 4561 | 4569 | 4577 | 4585 | 4593 | 4601 | 4609 | 4617 | 4625 | 4633 | 4641 | 4649 | 4657 | 4665 | 4673 | 4681 | 4689 | 4697 | 4705 | 4713 | 4721 | 4729 | 4737 | 4745 | 4753 | 4761 | 4769 | 4777 | 4785 | 4793 | 4801 | 4809 | 4817 | 4825 | 4833 | 4841 | 4849 | 4857 | 4865 | 4873 | 4881 | 4889 | 4897 | 4905 | 4913 | 4921 | 4929 | 4937 | 4945 | 4953 | 4961 | 4969 | 4977 | 4985 | 4993 | 5001 | 5009 | 5017 | 5025 | 5033 | 5041 | 5049 | 5057 | 5065 | 5073 | 5081 | 5089 | 5097 | 5105 | 5113 | 5121 | 5129 | 5137 | 5145 | 5153 | 5161 | 5169 | 5177 | 5185 | 5193 | 5201 | 5209 | 5217 | 5225 | 5233 | 5241 | 5249 | 5257 | 5265 | 5273 | 5281 | 5289 | 5297 | 5305 | 5313 | 5321 | 5329 | 5337 | 5345 | 5353 | 5361 | 5369 | 5377 | 5385 | 5393 | 5401 | 5409 | 5417 | 5425 | 5433 | 5441 | 5449 | 5457 | 5465 | 5473 | 5481 | 5489 | 5497 | 5505 | 5513 | 5521 | 5529 | 5537 | 5545 | 5553 | 5561 | 5569 | 5577 | 5585 | 5593 | 5601 | 5609 | 5617 | 5625 | 5633 | 5641 | 5649 | 5657 | 5665 | 5673 | 5681 | 5689 | 5697 | 5705 | 5713 | 5721 | 5729 | 5737 | 5745 | 5753 | 5761 | 5769 | 5777 | 5785 | 5793 | 5801 | 5809 | 5817 | 5825 | 5833 | 5841 | 5849 | 5857 | 5865 | 5873 | 5881 | 5889 | 5897 | 5905 | 5913 | 5921 | 5929 | 5937 | 5945 | 5953 | 5961 | 5969 | 5977 | 5985 | 5993 | 6001 | 6009 | 6017 | 6025 | 6033 | 6041 | 6049 | 6057 | 6065 | 6073 | 6081 | 6089 | 6097 | 6105 | 6113 | 6121 | 6129 | 6137 | 6145 | 6153 | 6161 | 6169 | 6177 | 6185 | 6193 | 6201 | 6209 | 6217 | 6225 | 6233 | 6241 | 6249 | 6257 | 6265 | 6273 | 6281 | 6289 | 6297 | 6305 | 6313 | 6321 | 6329 | 6337 | 6345 | 6353 | 6361 | 6369 | 6377 | 6385 | 6393 | 6401 | 6409 | 6417 | 6425 | 6433 | 6441 | 6449 | 6457 | 6465 | 6473 | 6481 | 6489 | 6497 | 6505 | 6513 | 6521 | 6529 | 6537 | 6545 | 6553 | 6561 | 6569 | 6577 | 6585 | 6593 | 6601 | 6609 | 6617 | 6625 | 6633 | 6641 | 6649 | 6657 | 6665 | 6673 | 6681 | 6689 | 6697 | 6705 | 6713 | 6721 | 6729 | 6737 | 6745 | 6753 | 6761 | 6769 | 6777 | 6785 | 6793 | 6801 | 6809 | 6817 | 6825 | 6833 | 6841 | 6849 | 6857 | 6865 | 6873 | 6881 | 6889 | 6897 | 6905 | 6913 | 6921 | 6929 | 6937 | 6945 | 6953 | 6961 | 6969 | 6977 | 6985 | 6993 | 7001 | 7009 | 7017 | 7025 | 7033 | 7041 | 7049 | 7057 | 7065 | 7073 | 7081 | 7089 | 7097 | 7105 | 7113 | 7121 | 7129 | 7137 | 7145 | 7153 | 7161 | 7169 | 7177 | 7185 | 7193 | 7201 | 7209 | 7217 | 7225 | 7233 | 7241 | 7249 | 7257 | 7265 | 7273 | 7281 | 7289 | 7297 | 7305 | 7313 | 7321 | 7329 | 7337 | 7345 | 7353 | 7361 | 7369 | 7377 | 7385 | 7393 | 7401 | 7409 | 7417 | 7425 | 7433 | 7441 | 7449 | 7457 | 7465 | 7473 | 7481 | 7489 | 7497 | 7505 | 7513 | 7521 | 7529 | 7537 | 7545 | 7553 | 7561 | 7569 | 7577 | 7585 | 7593 | 7601 | 7609 | 7617 | 7625 | 7633 | 7641 | 7649 | 7657 | 7665 | 7673 | 7681 | 7689 | 7697 | 7705 | 7713 | 7721 | 7729 | 7737 | 7745 | 7753 | 7761 | 7769 | 7777 | 7785 | 7793 | 7801 | 7809 | 7817 | 7825 | 7833 | 7841 | 7849 | 7857 | 7865 | 7873 | 7881 | 7889 | 7897 | 7905 | 7913 | 7921 | 7929 | 7937 | 7945 | 7953 | 7961 | 7969 | 7977 | 7985 | 7993 | 8001 | 8009 | 8017 | 8025 | 8033 | 8041 | 8049 | 8057 | 8065 | 8073 | 8081 | 8089 | 8097 | 8105 | 8113 | 8121 | 8129 | 8137 | 8145 | 8153 | 8161 | 8169 | 8177 | 8185 | 8193 | 8201 | 8209 | 8217 | 8225 | 8233 | 8241 | 8249 | 8257 | 8265 | 8273 | 8281 | 8289 | 8297 | 8305 | 8313 | 8321 | 8329 | 8337 | 8345 | 8353 | 8361 | 8369 | 8377 | 8385 | 8393 | 8401 | 8409 | 8417 | 8425 | 8433 | 8441 | 8449 | 8457 | 8465 | 8473 | 8481 | 8489 | 8497 | 8505 | 8513 | 8521 | 8529 | 8537 | 8545 | 8553 | 8561 | 8569 | 8577 | 8585 | 8593 | 8601 | 8609 | 8617 | 8625 | 8633 | 8641 | 8649 | 8657 | 8665 | 8673 | 8681 | 8689 | 8697 | 8705 | 8713 | 8721 | 8729 | 8737 | 8745 | 8753 | 8761 | 8769 | 8777 | 8785 | 8793 | 8801 | 8809 | 8817 | 8825 | 8833 | 8841 | 8849 | 8857 | 8865 | 8873 | 8881 | 8889 | 8897 | 8905 | 8913 | 8921 | 8929 | 8937 | 8945 | 8953 | 8961 | 8969 | 8977 | 8985 | 8993 | 9001 | 9009 | 9017 | 9025 | 9033 | 9041 | 9049 | 9057 | 9065 | 9073 | 9081 | 9089 | 9097 | 9105 | 9113 | 9121 | 9129 | 9137 | 9145 | 9153 | 9161 | 9169 | 9177 | 9185 | 9193 | 9201 | 9209 | 9217 | 9225 | 9233 | 9241 | 9249 | 9257 | 9265 | 9273 | 9281 | 9289 | 9297 | 9305 | 9313 | 9321 | 9329 | 9337 | 9345 | 9353 | 9361 | 9369 | 9377 | 9385 | 9393 | 9401 | 9409 | 9417 | 9425 | 9433 | 9441 | 9449 | 9457 | 9465 | 9473 | 9481 | 9489 | 9497 | 9505 | 9513 | 9521 | 9529 | 9537 | 9545 | 9553 | 9561 | 9569 | 9577 | 9585 | 9593 | 9601 | 9609 | 9617 | 9625 | 9633 | 9641 | 9649 | 9657 | 9665 | 9673 | 9681 | 9689 | 9697 | 9705 | 9713 | 9721 | 9729 | 9737 | 9745 | 9753 | 9761 | 9769 | 9777 | 9785 | 9793 | 9801 | 9809 | 9817 | 9825 | 9833 | 9841 | 9849 | 9857 | 9865 | 9873 | 9881 | 9889 | 9897 | 9905 | 9913 | 9921 | 9929 | 9937 | 9945 | 9953 | 9961 | 9969 | 9977 | 9985 | 9993 | 10001 | 10009 | 10017 | 10025 | 10033 | 10041 | 10049 | 10057 | 10065 | 10073 | 10081 | 10089 | 10097 | 10105 | 10113 | 10121 | 10129 | 10137 | 10145 | 10153 | 10161 | 10169 | 10177 | 10185 | 10193 | 10201 | 1020 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|

kecondongan yang sama dengan pola retak pada berbagai literatur.

3. Kurva Hubungan Gaya dan Perpindahan

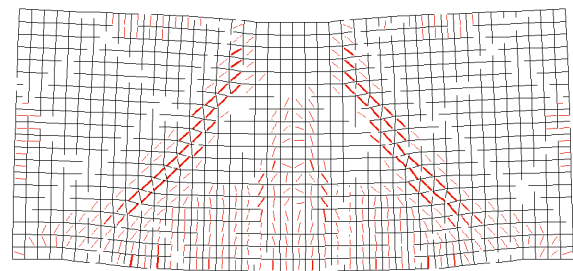


Gambar 9 Grafik hubungan beban dan perpindahan balok tinggi

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



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.