

PERILAKU KERUNTUHAN BALOK BETON
MUTU NORMAL DAERAH TEKAN

YETRO BAYANO

Pegawai Negeri Sipil
Balai Besar Pelaksanaan Jalan Nasional XI
Direktorat Jenderal Bina Marga Kementerian Pekerjaan Umum

ABSTRAK

Tulangan sengkang vertikal berfungsi untuk mencegah terjadinya retak pada balok akibat gaya geser, karena berfungsi untuk mengikat antara bagian balok di bawah retak geser dan bagian balok di atas retak geser. Retak geser pada balok tidak akan terjadi jika tulangan sengkang vertikal direncanakan dengan tepat untuk menahan gaya geser tersebut. Pada daerah tekan/ditengah bentang, pengaturan jarak antar sengkang perlu dilakukan untuk menentukan perilaku keruntuhan dari suatu struktur balok.

Untuk menganalisis akibat pengaturan jarak antar sengkang ditengah bentang pada struktur balok, model dengan jarak antar sengkang ditengah bentang masing-masing 40; 80; 120; 150; 125; 100; 75 dan 50 mm. Analisis model menggunakan program komputasi ANSYS Ed.9.0. Model material beton menggunakan model SOLID65 dengan parameter nilai tegangan-regangan beton dihitung menggunakan persamaan usulan *Kent and Park* untuk beton mutu normal dan model material baja tulangan menggunakan model LINK8 dengan parameter nilai tegangan-regangan baja tulangan dihitung menggunakan persamaan usulan *Park and Paulay* untuk beton mutu normal. Model baja tumpuan perletakan balok dan tumpuan beban menggunakan SOLID45 dan diasumsikan bersifat linier. Analisis model balok untuk menentukan perubahan nilai beban-deformasi, daktilitas struktur balok.

Berdasarkan hasil analisis model balok dengan analisis model elemen hingga menggunakan ANSYS Ed.9.0 Nilai beban ultimit pada model dengan jarak antar sengkang ditengah bentang 40, 80 dan 120 mm, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.9621; 0.9242 menjadi sebesar 29.7000; 28.5750; 27.4500 kN. Nilai beban ultimit pada model dengan jarak antar sengkang ditengah bentang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.0256; 1.0351; 1.0586; 1.0628 menjadi sebesar 42.2250; 43.3350; 43.7400; 44.7300; 44.9100 kN. Nilai daktilitas kurvatur pada model dengan jarak antar sengkang ditengah bentang 40, 80 dan 120 mm, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.8667; 0.6842 menjadi sebesar 15.3864; 13.3333; 10.5263. Nilai daktilitas kurvatur pada model dengan jarak antar sengkang ditengah bentang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.1081; 1.1714; 1.2424; 1.3667 menjadi sebesar 4.8780; 5.4054; 5.7143; 6.0606; 6.6667.

Dari hasil analisis diperoleh beberapa persamaan untuk menentukan perilaku balok akibat variasi jarak antar sengkang didaerah tekan yaitu persamaan daktilitas kurvatur-dan jarak antar sengkang, dimana $\mu_{\phi} = -2.10^{-5} S^3 + 0.005.S^2 - 0.688.S + 30.58$; dengan nilai μ_{ϕ} adalah daktilitas kurvatur, satuan dalam 1/mm dan S adalah jarak antar sengkang ditengah bentang, satuan dalam mm, serta persamaan beban dan deformasi pada kondisi ultimit akibat variasi jarak antar sengkang didaerah tekan, dimana $P = 0,002A^2 + 0,817A$; dengan nilai P adalah beban yang terjadi pada balok, satuan dalam kN dan A adalah deformasi yang terjadi pada balok, satuan dalam mm.

Kata Kunci : *Balok Beton Mutu Normal; Jarak Antar Sengkang; Daerah Kritis; ANSYS Ed.9.0; Beban-Deformasi; Daktilitas Kurvatur.*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Beton adalah material konstruksi yang banyak dipakai sampai saat ini dibandingkan dengan material lain seperti kayu dan baja. Hal ini dikarenakan material penyusunnya mudah didapat, mempunyai kekuatan yang baik, keawetan, proses produksinya lebih cepat dan sederhana serta harga yang terjangkau.

Secara umum beton digolongkan menjadi 2 golongan, yaitu beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Beton mutu normal adalah beton yang mempunyai mutu berkisar 20 sampai dengan 58 MPa dan dibuat menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah. Sedangkan beton mutu tinggi adalah beton yang mempunyai mutu diatas 58 MPa dan dibuat menggunakan agregat alam yang dipecah atau agregat buatan dengan campuran bahan tambah serta metode pelaksanaan yang disesuaikan dengan kebutuhan kuat tekannya (*SNI-03-2847-2002*).

Penggunaan beton mutu normal dalam berbagai bidang konstruksi secara umum sudah banyak digunakan, salah satunya adalah struktur balok beton mutu normal. Aplikasi pembebanan yang besar pada balok beton mutu normal dan melebihi kapasitas penampang berdasarkan kuat tekannya, dapat membuat retak dan keruntuhan dari struktur balok tersebut. Perilaku retak dan keruntuhan yang terjadi pada balok beton mutu normal berupa keruntuhan lentur dan keruntuhan geser. Pada keruntuhan lentur, penggunaan tulangan tarik lentur bertulangan rangkap dengan pengaturan jarak sengkang dapat meminimalkan keruntuhan yang terjadi. Hal ini dikarenakan dengan penambahan tulangan lentur rangkap pada balok beton mutu normal membuat kapasitas rotasi penampang balok menjadi bertambah. Jarak sengkang yang lebih rapat membuat kekuatan beton yang terkekang didalam struktur balok menjadi bertambah karena struktur betonnya lebih termampatkan. Pada keruntuhan geser, penggunaan tulangan lateral dan pengaturan jarak sengkang dapat membuat perilaku keruntuhan berubah dari keruntuhan geser ke arah keruntuhan lentur dengan kapasitas penampang yang bertambah naik. Hal ini dikarenakan kekuatan beton yang terkekang tulangan tarik dan tekan serta tulangan lateral dan sengkang didalam struktur balok menjadi bertambah karena struktur betonnya lebih termampatkan kearah lentur (*Dipohusodo, I. 1994*).

Dari uraian diatas, bagian tulangan sengkang pada arah vertikal adalah tulangan yang berhubungan langsung dengan keretakan geser tersebut. Tulangan ini mencegah terbelahnya balok akibat adanya keretakan geser, karena berfungsi untuk mengikat antara bagian balok di bawah retak geser dan bagian balok di atas retak geser. Retak geser pada balok tidak akan terjadi jika direncanakan dengan tepat untuk menahan gaya geser tersebut (*Kennet, M.L. 1997*).

Perumusan Masalah

Dalam penelitian ini, dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Analisis dilakukan dengan memodelkan balok beton mutu normal dari hasil uji eksperimental terdahulu oleh *Basuki (Basuki, Hidayati, N. 2006)* dan divariasikan dengan jarak antar sengkang ditengah bentang, mutu dan diameter baja tulangan lentur dan tarik, mutu beton dan panjang bentang model balok.
2. Analisis model menggunakan ANSYS Ed.9.0 untuk menentukan nilai beban-deformasi, daktilitas kurvatur dan perilaku keruntuhan yang terjadi akibat variasi jarak antar sengkang ditengah bentang.

Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian adalah untuk menentukan perubahan nilai beban-deformasi, daktilitas kurvatur dan perilaku keruntuhan yang terjadi akibat variasi jarak antar sengkang di tengah bentang pada model balok beton mutu normal.

Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah dengan variasi model, maka dapat ditentukan pengaruh pengaturan jarak antar sengkang ditengah bentang pada model balok beton mutu normal terhadap peningkatan nilai kapasitas beban-deformasi, daktilitas kurvatur dan perilaku keruntuhan yang terjadi pada model balok.

Asumsi yang dipergunakan

Model beton dimodelkan menggunakan material *SOLID65*. Nilai tegangan dan regangan model balok beton mutu normal diperoleh berdasarkan hasil perhitungan tegangan-regangan beton mutu normal menggunakan usulan *Kent and Park (Park, R. Paulay, T. 1975)* untuk kondisi beton terkekang. Sedangkan model baja tulangan lentur dan tulangan sengkang dimodelkan menggunakan material *LINK8*. Nilai tegangan dan regangan baja

tulangan hasil analisis tegangan–regangan untuk baja tulangan untuk beton mutu normal menggunakan usulan dari *Park and Paulay* (*Park, R. Paulay, T. 1975*). Model tumpuan perletakan pada model balok persegi dan tumpuan beban menggunakan *SOLID45* dan model ini diasumsikan bersifat linier.

Analisis elemen hingga dengan bantuan program komputasi ANSYS Ed.9.0 pada model balok untuk menentukan perubahan nilai beban–deformasi, daktilitas kurvatur dan perilaku keruntuhan yang terjadi akibat variasi jarak antar sengkang ditengah bentang pada model balok beton mutu normal.

Batasan Masalah

Batasan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Model balok analisis menggunakan model balok berdasarkan hasil uji eksperimental oleh *Basuki* (*Basuki. Hidayati, N. 2006*).
2. Mutu beton mutu normal yang digunakan (f'_c) 20,38 dan 25,00 MPa.
3. Mutu baja tulangan lentur (f_y) yang digunakan adalah 252,01 dan 400,00 MPa.
4. Diameter baja tulangan lentur yang digunakan adalah 7,44 dan 16,00 mm.
5. Mutu baja tulangan sengkang (f_{ys}) yang digunakan adalah 240 MPa.
6. Diameter baja tulangan sengkang yang digunakan adalah 4,00 dan 8,00 mm.
7. Analisis tegangan–regangan untuk beton mutu normal menggunakan Persamaan usulan *Kent and Park* (*Park, R. Paulay, T. 1975*) untuk kondisi beton terkekang.
8. Analisis tegangan–regangan untuk baja tulangan untuk beton mutu normal menggunakan Persamaan usulan *Park and Paulay* (*Park, R. Paulay, T. 1975*).

KAJIAN PUSTAKA

Landasan Teori

Balok Beton Mutu Normal

Secara umum beton digolongkan menjadi 2 golongan, yaitu beton mutu normal dan beton mutu tinggi. Beton mutu normal adalah beton yang mempunyai mutu beton berkisar 20 sampai dengan 58 MPa dan dibuat menggunakan agregat alam yang dipecah atau tanpa dipecah. Dalam campuran beton, agregat kasar, agregat halus, dan semen yang bereaksi dengan air sebagai bahan perekat, yang

harus dicampur dan diaduk dengan benar dan merata agar dapat diperoleh mutu beton yang baik.

Umumnya pengadukan bahan beton dilakukan dengan menggunakan mesin, kecuali jika hanya untuk mendapatkan beton mutu rendah, maka pengadukan dapat dilakukan tanpa menggunakan mesin pengaduk (*SNI 03-2847-2002*).

Balok beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum, yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang berkerja (*SNI 03-2847-2002*).

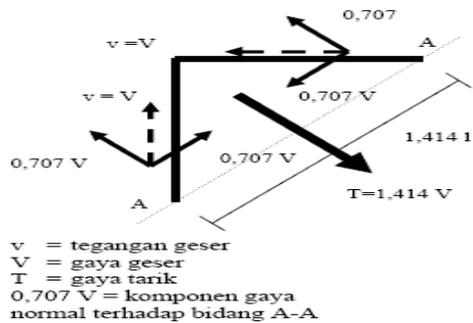
Kuat Tekan dan Kuat Tarik Beton Mutu Normal

Kuat tekan beton diwakili oleh tegangan tekan karakteristik, f'_c dengan satuan N/mm^2 atau MPa. Struktur beton mutu normal umumnya menggunakan beton dengan kuat tekan 20 sampai dengan 58 MPa (*Kusuma, G. 1997*).

Nilai regangan kerja maksimum yang diperhitungkan di serat tepi beton tekan terluar adalah 0,003 sebagai batas hancur. Regangan kerja maksimum 0,003 tersebut boleh jadi tidak konservatif untuk beton kuat tinggi dengan nilai kuat tekan beton antara 55 sampai dengan 80 MPa. Nilai kuat tekan dan tarik beton tidak berbanding lurus. Setiap usaha perbaikan mutu kekuatan tekan hanya disertai peningkatan kecil nilai kuat tariknya. Suatu perkiraan kasar yang dapat dipakai, bahwa nilai kuat tarik beton normal antara 9 sampai dengan 15 % (prosen) dari nilai kuat tekannya. Kuat tarik beton yang tepat sulit untuk diukur. Nilai pendekatan yang diperoleh dari hasil pengujian terdahulu mencapai kekuatan 0,50 sampai dengan 0,60 kali dari akar kuadrat nilai kuat tekannya. Sehingga untuk beton mutu normal, nilai kuat tarik beton digunakan $0,60 \cdot \sqrt{f'_c}$ (*SNI 03-2847-2002*).

Kuat Geser pada Balok Beton Mutu Normal

Lingkaran *Mohr* digunakan untuk menunjukkan bahwa tegangan normal maksimum dan minimum akan bekerja pada dua bidang yang saling tegak lurus satu sama lainnya. Bidang tersebut dinamakan bidang utama dan tegangan yang bekerja disebut tegangan utama seperti tercantum dalam gambar dibawah ini:



Perencanaan Penulangan Geser

Perencanaan geser untuk komponen struktur terlentur didasarkan pada anggapan bahwa beton menahan sebagian dari gaya geser, sedangkan kelebihan/kekuatan geser di atas kemampuan beton untuk menahannya dilimpahkan kepada tulangan baja geser. Cara yang umum dilaksanakan dan lebih sering dipakai untuk penulangan geser adalah menggunakan sengkang, selain pelaksanaannya lebih mudah juga menjamin ketepatan pemasangannya. Penulangan dengan sengkang hanya memberikan andil terhadap sebagian pertahanan geser karena formasi/arah retak yang miring. Cara penulangan demikian terbukti mampu memberikan sumbangan untuk peningkatan kuat geser ultimit komponen struktur yang mengalami lenturan.

Untuk komponen struktur yang menahan geser dan lentur saja, memberikan kapasitas kemampuan beton (tanpa penulangan geser) untuk menahan gaya geser adalah V_c , dimana V_c dihitung menggunakan persamaan 2.1 (SNI 03-2847-2002):

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w \cdot d$$

Atau menggunakan persamaan 2.1b (SNI 03-2847-2002):

$$V_c = \frac{1}{7} (\sqrt{f'_c} + 120 \cdot \rho_w \cdot \frac{V_u \cdot d}{M_u}) \cdot b_w \cdot d$$

dengan M_u adalah momen terfaktor yang terjadi bersamaan dengan gaya geser terfaktor maksimum V_u pada penampang kritis, sedangkan batas atas faktor pengali dan V_u dihitung menggunakan persamaan 2.1c dan 2.1d (SNI 03-2847-2002):

$$\frac{V_u \cdot d}{M_u} \leq 1,0$$

$$V_c \leq (0,3 \cdot f'_c) \cdot b_w \cdot d$$

Pada persamaan 2.1, V_c adalah kuat geser beton; f'_c adalah kuat tekan beton; b_w adalah lebar efektif penampang balok; ρ_w adalah ratio luas tulangan lentur dengan luas penampang balok; M_u adalah

momen akibat beban luar yang bekerja. Kuat geser ideal beton dikenakan faktor reduksi kekuatan dimana nilai ϕ adalah 0,60, sedangkan kuat geser rencana V_u didapatkan dari hasil penerapan faktor beban, nilai V_u lebih mudah ditentukan dengan menggunakan diagram gaya geser (SNI 03-2847-2002).

Meskipun secara teoritis tidak perlu penulangan geser apabila $V_u \leq \phi V_c$, peraturan mengharuskan untuk selalu menyediakan penulangan geser minimum pada semua bagian struktur beton yang mengalami lenturan meskipun hasil perhitungan tidak memerlukannya, kecuali untuk plat dan fondasi plat, struktur balok beton rusuk, balok yang tinggi totalnya tidak lebih dari 250 mm, atau 2,5 kali tebal flens, atau 1,5 kali lebar badan balok, diambil yang lebih besar dihitung dengan persamaan 2.1e. Ketentuan tulangan geser minimum tersebut untuk menjaga apabila timbul beban yang tak terduga pada komponen.

Dimana, A_v adalah luas penampang tulangan geser total dengan jarak spasi antar tulangan S , untuk sengkang keliling tunggal $A_v = 2 \cdot A_s$, dengan A_s luas penampang batang tulangan sengkang; b_w adalah lebar balok, untuk balok persegi $b_w = b$; S adalah jarak pusat ke pusat batang tulangan geser ke arah sejajar tulangan pokok memanjang; f_{ys} adalah kuat leleh tulangan geser (SNI 03-2847-2002).

Apabila gaya geser yang bekerja V_u lebih besar dari kapasitas geser beton ϕV_c , maka diperlukan penulangan geser untuk memperkuatnya. Apabila gaya geser yang bekerja di sembarang tempat sepanjang bentang lebih besar dari $\frac{1}{2} \phi V_c$, peraturan mengharuskan memasang paling tidak tulangan geser minimum yang disyaratkan. Persamaan dasar untuk perencanaan tulangan geser adalah:

$$\begin{aligned}
 V_u &\leq \phi \cdot V_n \\
 V_n &= V_c + V_s
 \end{aligned}
 \tag{2.1b}$$

Dimana, V_u adalah beban geser terfaktor; ϕ adalah faktor reduksi kuat geser; V_c adalah kuat geser beton; V_n adalah kuat geser ideal atau nominal; V_s adalah kuat geser nominal yang dapat disediakan oleh tulangan geser (SNI 03-2847-2002).

Nilai V_s untuk sengkang vertikal, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$V_{vs} = \frac{A_v \cdot f_{ys} \cdot d}{S} \tag{2.1d}$$

Kurva Tegangan–Regangan Tekan Beton Mutu Normal

Nilai tegangan-regangan beton untuk beton mutu normal menggunakan usulan *Kent and Park* (Park, R. Paulay, T. 1975) dengan parameter perhitungan tercantum dalam

Pada kurva tegangan-regangan usulan *Kent and Park* dalam Gambar 2.4, kurva dimulai dari tegangan awal dititik A yang nilainya terus naik sampai mencapai puncak tegangan di B dengan nilai tegangan sama dengan f'_c dan regangan puncak beton pada nilai 0,002. Setelah mencapai puncak tegangan di titik B, tegangan yang terjadi turun namun nilai regangannya terus bertambah sampai mencapai keruntuhan dititik C dengan nilai tegangan sebesar $0,2f'_c$ dan nilai regangan sebesar ϵ_{20c} . Setelah mencapai nilai regangan ϵ_{20c} nilai tegangan yang terjadi adalah konstan.

$$Z = \frac{0,5}{\epsilon_{su} + \epsilon_{sh} - 0,002}$$

Berdasarkan kurva dalam Gambar 2.4, diperoleh persamaan dengan membagi kurva menjadi 3 daerah, yaitu:

Daerah AB : $\epsilon_c \leq 0,002$

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{0,002} - \left(\frac{\epsilon_c}{0,002} \right)^2 \right]$$

Daerah BC : $0,002 < \epsilon_c < \epsilon_{20c}$

$$f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon_c - 0,002)]$$

Daerah CD : $\epsilon_c \geq \epsilon_{20c}$

$$f_c = 0,2f'_c$$

dimana :

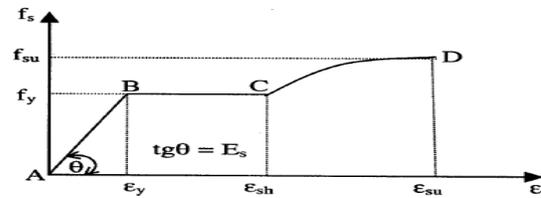
$$\epsilon_{su} = \frac{3 + 0,002f'_c}{f'_c - 1000}$$

$$\epsilon_{sh} = \frac{3}{4} \rho_s \sqrt{\frac{b''}{s_h}}$$

Pada Persamaan 2.5, f'_c adalah kuat tekan beton, satuan dalam *psi*; ρ_s adalah perbandingan volume tulangan melintang terhadap inti beton yang diukur terhadap bagian luar sengkang; b'' adalah lebar inti kekekangan diukur terhadap bagian luar sengkang, satuan dalam mm; s_h adalah jarak antar sengkang, satuan dalam mm; ϵ_c adalah regangan tekan beton; ϵ_{20c} adalah regangan tekan beton pada saat nilai tegangan tekan beton mencapai $0,2f'_c$.

Kurva Tegangan-Regangan Baja Tulangan

Perhitungan untuk menentukan nilai tegangan dan regangan baja tulangan menggunakan usulan *Park and Paulay* (Park, R. Paulay, T. 1975) dengan parameter perhitungan tercantum dalam Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Kurva hubungan tegangan-regangan baja tulangan usulan *Park and Paulay* (Park, R. Paulay, T. 1975).

Pada kurva tegangan-regangan usulan *Park and Paulay* dalam Gambar 2.5, kurva dimulai dari tegangan awal dititik A yang nilainya terus naik sampai mencapai puncak tegangan di B dengan nilai tegangan sama dengan f_y dan regangan leleh pada nilai ϵ_y . Setelah mencapai puncak tegangan di titik B, tegangan yang terjadi adalah tetap namun nilai regangannya terus bertambah sampai regangan plastis ϵ_{sh} dititik C. Pada saat mencapai batas regangan plastis dititik C, nilai tegangan yang terjadi akan naik kembali sampai mencapai kondisi keruntuhan dititik D dengan nilai tegangan sebesar f_{su} dan nilai regangan sebesar ϵ_{su} . Berdasarkan kurva dalam Gambar 2.5, diperoleh persamaan dengan membagi kurva menjadi 3 daerah, yaitu:

Daerah AB : $\epsilon_s \leq \epsilon_y$ (2.5b)

$$f_s = \epsilon_s E_s \quad (2.5c)$$

Daerah BC : $\epsilon_y \leq \epsilon_s < \epsilon_{sh}$ (2.5c)

$$f_s = f_y$$

Daerah CD : $\epsilon_{sh} \leq \epsilon_s < \epsilon_{su}$

$$f_s = f_y \left[\frac{m(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2}{60(\epsilon_s - \epsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\epsilon_s - \epsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right]$$

dimana : (2.5f)

$$m = \frac{\left(\frac{f_{su}}{f_y} \right) (30r + 1)^2 - 60r - 1}{15r^2}$$

$$r = \epsilon_{su} - \epsilon_{sh}$$

Pada Persamaan 2.6, f_s adalah kuat tarik baja tulangan, satuan dalam MPa; ϵ_s adalah regangan tarik baja tulangan; ϵ_{sh} adalah regangan tarik baja tulangan pada saat mencapai batas plastis; ϵ_{su} adalah regangan tarik baja tulangan pada saat mencapai kondisi ultimit. E_s adalah modulus elastisitas baja tulangan, satuan dalam MPa.

Analisis Daktilitas Kurvatur Beton Mutu Normal Kondisi Terkekang

Nilai daktilitas kurvatur adalah membandingkan antara sudut kelengkungan saat

ultimit dan sudut kelengkungan pada saat terjadi leleh pertama pada tulangan tarik dari model balok akibat beban lentur, sehingga diperoleh suatu hubungan nilai momen–kurvatur. Dalam penelitian ini, analisis untuk menentukan nilai momen dan kurvatur menggunakan modifikasi blok tegangan–regangan usulan *Kent and Park* untuk beton mutu normal kondisi terkekang (*Park, R. Paulay, T. 1975*). Dari analisis modifikasi blok tegangan–regangan pada kondisi awal retak, leleh dan ultimit, maka dapat ditentukan nilai daktilitas kurvatur dari balok beton mutu normal dengan pengaturan jarak antar sengkang ditengah bentang balok.

Berdasarkan persamaan usulan *Kent and Park* pada Persamaan 2.5 dan Gambar 2.4, diperoleh 3 daerah kurva, yaitu kurva naik AB, kurva turun BC dan kurva datar CD. Dengan modifikasi blok tegangan–regangan pada Gambar 2.4, dapat ditentukan nilai parameter perhitungan menggunakan blok tegangan–regangan balok beton mutu normal yaitu nilai α dan γ untuk setiap daerah. Untuk memperoleh nilai α_i dan γ_i dari setiap daerah kurva secara langsung, maka perhitungannya harus memenuhi syarat–syarat sebagai berikut (*Park, R. Paulay, T. 1975*):

- 1) Luas daerah diagram tegangan beton sebenarnya harus sama dengan luas blok tegangan ekuivalen. Luas daerah dibagi dalam 3 (*tiga*) zona seperti tercantum dalam Gambar 2.6.
- 2) Sentroid diagram tegangan beton sebenarnya berlokasi sama dengan sentroid blok tegangan ekuivalen.

Dengan penurunan rumus dari Persamaan 5 pada kurva tegangan–regangan beton mutu normal kondisi beton terkekang usulan *Kent and Park* seperti yang tercantum dalam Gambar 2.4, maka diperoleh nilai α_i dan γ_i dari setiap daerah kurva, yaitu (*Park, R. Paulay, T. 1975*):

Zona 1, Kurva naik, A–B ($\epsilon_{c1} \leq 0,002$):

$$\alpha_1 = \frac{\epsilon_{c1}}{0,002} \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_{c1}}{0,006} \right) \dots\dots\dots (2.7a)$$

$$\gamma_1 = \frac{0,008 - \epsilon_{c1}}{0,024 - 4 \cdot \epsilon_{c1}} \dots\dots\dots (2.7b)$$

Zona 2, Kurva turun, B–C ($0,002 \leq \epsilon_{c2} \leq \epsilon_{c20}$):

$$\alpha_2 = \frac{0,004}{3 \cdot \epsilon_{c2}} + \left(1 - \frac{0,002}{\epsilon_{c2}} \right) \cdot \left(1 - \frac{Z}{2} \cdot (\epsilon_{c2} - 0,002) \right) \dots\dots\dots (2.7c)$$

$$\gamma_2 = 1 - \frac{-3334 \cdot 10^{-7} + 0,5 \cdot \epsilon_{c2} - 0,333 \cdot Z \cdot \epsilon_{c2}^2 + 0,001 \cdot Z \cdot \epsilon_{c2} - \frac{1334 \cdot 10^{-9}}{\epsilon_{c2}} \cdot Z}{-(6,667 \cdot 10^{-4}) + \epsilon_{c2} - 0,5 \cdot Z \cdot \epsilon_{c2}^2 + 0,002 \cdot Z \cdot \epsilon_{c2} - 2 \cdot 10^{-6} \cdot Z} \dots\dots\dots (2.7d)$$

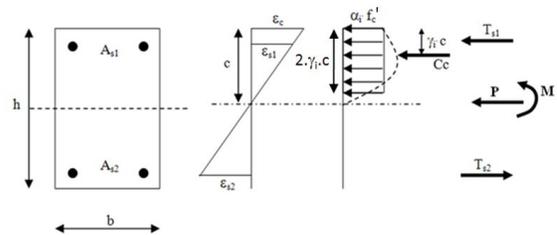
Zona 2, Kurva datar, C–D ($\epsilon_{c3} \geq \epsilon_{c20}$):

$$\alpha_3 = \frac{-6,667 \cdot 10^{-4}}{\epsilon_{c3}} + 0,8 \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}} - 0,5 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}^2}{\epsilon_{c3}^2} + 0,002 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}} - \frac{2 \cdot 10^{-6}}{\epsilon_{c3}} \cdot Z + 0,2 \dots\dots\dots (2.7e)$$

$$\gamma_3 = 1 - \frac{-3334 \cdot 10^{-7} + 0,40 \cdot \frac{\epsilon_{c20}^2}{\epsilon_{c3}} - 0,333 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}^3}{\epsilon_{c3}^3} + 0,001 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}^2}{\epsilon_{c3}^2} - \frac{(1334 \cdot 10^{-9}) \cdot Z}{\epsilon_{c3}} + 0,1 \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}}}{-(6,667 \cdot 10^{-4}) + 0,80 \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}} - 0,50 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}^2}{\epsilon_{c3}^2} + 0,002 \cdot Z \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}} - 2 \cdot 10^{-6} \cdot Z + 0,2 \cdot \frac{\epsilon_{c20}}{\epsilon_{c3}}} \dots\dots\dots (2.7f)$$

Dari persamaan 2.7, α_1 adalah koefisien pengali lebar blok tegangan ekuivalen beton mutu normal pada zona 1; γ_1 adalah koefisien pengali tinggi blok tegangan ekuivalen beton mutu tinggi pada zona 1; α_2 adalah koefisien pengali lebar blok tegangan ekuivalen beton mutu normal pada zona 2; γ_2 adalah koefisien pengali tinggi blok tegangan ekuivalen beton mutu normal pada zona 2; α_3 adalah koefisien pengali lebar blok tegangan ekuivalen beton mutu normal pada zona 3; γ_3 adalah koefisien pengali tinggi blok tegangan ekuivalen beton mutu normal pada zona 3.

Koefisien tinggi dan lebar blok tegangan ekuivalen pada model balok seperti yang tercantum dalam Gambar 2.6, nilai parameter tegangan regangan disubstitusikan menggunakan nilai α_i dan γ_i pada setiap zone luasan. Modifikasi blok tegangan–regangan dilakukan untuk memperhitungkan pengaruh mutu beton pada nilai α_i dan γ_i dari model balok.

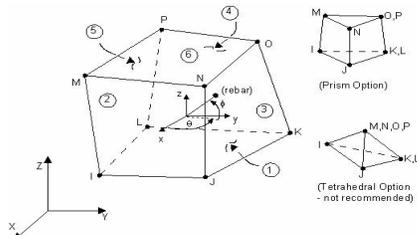


Gambar 2.7 Analisis Penampang Balok Beton Mutu Normal Menggunakan Parameter Blok Tegangan–Regangan Usulan *Kent and Park* untuk Menghitung Momen–Kurvatur (*Park, R. Paulay, T. 1975*).

Analisa Elemen Hingga Model Menggunakan ANSYS Ed.9.0

Model Beton

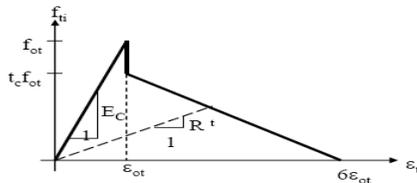
Model balok dalam ANSYS Ed.9.0 menggunakan model material *concrete SOLID65* yang mampu menggambarkan perilaku retak dan pecah dari beton, seperti tercantum dalam Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Geometri elemen *concrete SOLID65* (ANSYS Ed.9.0, 2007)

- 1) *Input* data material model *concrete SOLID65* sebagai berikut :
 - a. Kuat tekan beton diperoleh dari hasil pengujian terdahulu.
 - b. Modulus elastisitas beton (E_c)
 - c. *Poisson* rasio untuk beton digunakan 0,20.
 - d. Kuat tarik beton
 - e. Nilai tegangan–regangan hasil pengujian dimasukan kedalam *multilinier kinematic hardening plasticity*.

- 2) Retak dan kehancuran beton
 Perilaku *elastic isotropic* pada beton terjadi pada saat sebelum beton mengalami retak awal atau posisi akan mengalami kehancuran awal, seperti yang tercantum dalam Gambar 2.9 dan 2.10. Kehancuran (*crushing*) beton didefinisikan sebagai pelepasan suatu unsur dari satu kesatuan material (ANSYS Manual, 2007).



Gambar 2.9 Kurva tegangan–regangan beton dalam ANSYS Ed.9.0 (ANSYS. 2007).

- 3) Parameter kegagalan pada permukaan beton dalam ANSYS dimodelkan dalam 5 (*lima*) pada *nonlinier nonmetal plasticity concrete*, seperti yang tercantum dalam Gambar 2.10, yaitu :
 - a. Koefisien transfer geser awal untuk retak pada beton, dengan nilai antara 0.00 sampai dengan 1.00, dimana nilai 0.00 menggambarkan retak halus dan nilai 1.00 menggambarkan retak yang kasar. Untuk beton mutu normal digunakan nilai 0.10 sebagai nilai referensi, sedangkan untuk beton mutu tinggi, tidak ada literatur maupun referensi mengenai nilai yang pasti. Untuk itu digunakan nilai pendekatan dalam penelitian ini, yaitu sebesar 0.90.

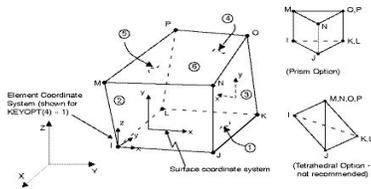
- b. Koefisien transfer geser akhir untuk retak pada beton, pada penelitian ini digunakan nilai sebesar 1.00.
- c. Kuat tarik uniaksial (f_t), yaitu tegangan tarik retak beton dimana nilainya mendekati atau sama dengan nilai modulus pecah beton.
- d. Tegangan tekan hancur beton uniaksial (f'_{cu}), yaitu tegangan tekan beton dengan nilai antara sama dengan nilai tegangan ultimitnya. Nilai -1,00 menggambarkan model balok tidak akan mengalami keruntuhan pada kondisi nilai pembebanan yang tak terbatas sedangkan nilai ultimitnya

Model baja tulangan

- 1) Model baja tulangan pada model balok menggunakan material model elemen *spar LINK8*. Digunakannya material model elemen *spar LINK8* karena material ini mampu menggambarkan tegangan dan regangan plastis, rayapan, pengembangan, kekakuan tegangan dan deformasi yang besar seperti perilaku baja tulangan. Model *spar LINK8* merupakan elemen tiga dimensi yang didefinisikan dengan 2 *nodes* dan merupakan sebuah material yang *isotropic*. Geometri struktur elemen *spar LINK8* tercantum dalam Gambar 2.11.
- 2) Data masukan untuk *material model* baja tulangan menggunakan elemen *non linier rate independent multilinier isotropic hardening* dan *von-mises yield criterion* dengan nilai *modulus young*, *poisson ratio* dan kurva tegangan–regangan baja tulangan.

Model tumpuan balok

- 1) Model tumpuan perletakan dan tumpuan beban pada model balok menggunakan pelat baja solid. Dalam ANSYS Ed.9.0 digunakan model material elemen *bricknode8 SOLID45*. Model *bricknode8 SOLID45* mempunyai 8 (delapan) nodes
- 2) Digunakannya material model elemen *bricknode8 SOLID45* karena material ini mampu menggambarkan tegangan dan regangan elastis, kekakuan tegangan dan deformasi yang besar seperti perilaku pelat baja tumpuan. Model elemen *bricknode8 SOLID45* merupakan material yang *isotropic* dan dapat bekerja dengan material lain seperti model beton *concrete SOLID65*. Geometri dan letak nodes dari elemen *bricknode8 SOLID45* dalam Gambar 2.29.

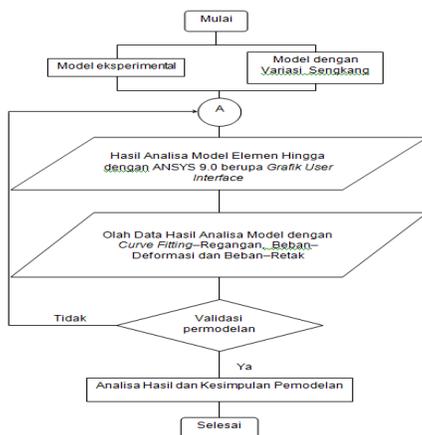


METODE PENELITIAN

Pendekatan Sistem

Model balok beton mutu normal dengan pengaruh pengekanan didaerah tekan akan dimodelkan berdasarkan variabel dalam batasan penelitian pada bab sebelumnya. Analisa model balok persegi menggunakan analisa elemen hingga dengan bantuan program komputasi ANSYS Ed.9.0. Model beton mutu normal pada balok dimodelkan menggunakan material *SOLID65*. Nilai tegangan dan regangan beton mutu normal diperoleh berdasarkan dari perhitungan matematik menggunakan usulan *Kent and Park*. Sedangkan model baja tulangan pada Model balok persegi dimodelkan menggunakan material *LINK8*. Nilai tegangan dan regangan baja tulangan diperoleh berdasarkan dari perhitungan matematik menggunakan usulan *Park and Paulay (Park, R. Paulay, T. 1975)*. Model tumpuan perletakan pada model balok dan tumpuan menggunakan model material *SOLID45* dan model ini diasumsikan bersifat linier.

Analisa elemen hingga dengan bantuan program komputasi ANSYS Ed.9.0 pada model balok untuk menentukan perubahan nilai beban–deformasi; beban–retak; dan perilaku retak akibat pengaturan jarak sengkang pada daerah tekan. Sehingga dapat dihitung nilai daktilitas kurvatur dan perilaku keruntuhan dari model balok tersebut. Kurang atau sama dengan 20 %, maka data telah tervalidasi dan dapat digunakan untuk mengambil kesimpulan dari hasil analisis model yang dimaksud.



Gambar 3.1a. Bagan alir pemodelan secara umum.

Model Beton

- 1) Model beton pada model balok dalam program ANSYS Ed.9.0 menggunakan elemen model *concrete SOLID65*. Digunakannya material model *concrete SOLID65* karena mampu menggambarkan perilaku retak dalam tiga sumbu koordinat, kehancuran, deformasi plastis dan rayapan seperti
- 2) Model beton. Material model *concrete SOLID65* dapat bekerja bersama dengan material lain, misalnya baja tulangan. Model ini didefinisikan dalam delapan *nodes* dan merupakan material yang *isotropic*.
- 3) Perilaku *elastic isotropic* pada model beton terjadi pada saat sebelum beton mengalami retak awal atau posisi akan mengalami kehancuran awal pada kurva tegangan–regangan beton dalam ANSYS Ed.9.0. Kehancuran (*crushing*) beton didefinisikan sebagai pelepasan suatu unsur dari satu kesatuan material. Parameter retak dan kehancuran pada permukaan beton dalam ANSYS Ed.9.0 dimodelkan pada data masukan *material model nonlinier nonmetal plasticity concrete*:
 - e. Koefisien transfer geser awal untuk retak pada beton, dengan nilai antara 0,00 sampai dengan 1,00, dimana nilai 0,00 menggambarkan retak halus dan nilai 1,00 menggambarkan retak yang kasar. Untuk beton mutu normal digunakan nilai 0.30 sebagai nilai referensi, sedangkan untuk beton mutu tinggi,
 - f. Penelitian ini digunakan nilai pendekatan yaitu sebesar 0,50. Hal ini dimungkinkan dapat mendekati gambaran retak yang terjadi pada beton mutu tinggi.
 - g. Koefisien transfer geser akhir untuk retak pada beton, pada penelitian ini digunakan nilai sebesar 1,00.
 - h. Kuat tarik uniaksial (f_t), yaitu tegangan tarik retak beton dimana nilainya mendekati atau sama dengan nilai modulus pecah beton.
 - i. Tegangan tekan hancur beton uniaksial (f'_{cu}), yaitu tegangan tekan beton dengan nilai sama dengan tegangan ultimit beton yang menggambarkan model dapat mengalami keruntuhan pada saat beban ultimit diberikan. Kuat tekan ultimit untuk tekanan hidrostatis uniaksial (f_2), yaitu tegangan tekan hidrostatis beton arah uniaksial dengan nilainya sebesar $1,725.f'_c$.

Model Baja Tulangan

- 1) Model baja tulangan pada model balok dalam program ANSYS Ed.9.0 menggunakan material model elemen *spar LINK8*. Digunakannya material model elemen *spar LINK8* karena material ini mampu menggambarkan tegangan dan regangan plastis, rayapan, pengembangan, kekakuan tegangan dan deformasi yang besar seperti perilaku baja tulangan. Model ini merupakan elemen tiga dimensi yang didefinisikan dengan 2 *nodes* dan merupakan sebuah material yang *isotropic*.
- 2) Data untuk *material model* baja tulangan menggunakan elemen *non linier rate independent multilinier isotropic hardening* dan *von-Mises yield criterion* dengan nilai *Young modulus*, *poisson ratio* dan nilai kurva tegangan-regangan baja berdasarkan persamaan usulan *Park and Paulay*.

Model Baja Tumpuan

- 1) Model tumpuan perletakan dan tumpuan beban pada model balok menggunakan pelat baja solid. Dalam ANSYS Ed.9.0 digunakan model material elemen *bricknode8 SOLID45*. Model *bricknode8 SOLID45* mempunyai 8 (delapan) nodes dengan 3 (tiga) derajat kebebasan translasi pada arah sumbu koordinat x, y dan z.
- 2) Digunakannya material model elemen *bricknode8 SOLID45* karena material ini mampu menggambarkan tegangan dan regangan elastis, kekakuan tegangan dan deformasi yang besar seperti perilaku pelat baja tumpuan. Model elemen *bricknode8 SOLID45* merupakan material yang *isotropic* dan dapat bekerja dengan material lain seperti model beton *concrete SOLID65*. Geometri dan letak nodes dari elemen *bricknode8 SOLID45* dalam Gambar 2.29.
- 3) Dalam penelitian ini sifat tegangan dan regangan model elemen *bricknode8 SOLID45* adalah elastis linier dan diasumsikan tidak terpengaruh akibat pembebanan. Hal ini karena sifat dari model pelat baja tumpuan harus mempunyai kekuatan yang cukup dan tidak hancur meskipun model balok sudah mengalami keruntuhan.

Prosedur Pelaksanaan

Pembuatan model balok dalam ANSYS Ed.9.0 dijelaskan dibawah ini:

- 1) Jenis referensi model yang akan dibuat.
Ansys main menu, preferences pilih *structural*.
- 2) Model beton dan baja tulangan dibuat tipe materialnya.

Ansys main menu, preprocessor, element type pilih *add*

Type 1, model beton, pilih *solid concrete65*.

Type 2, model baja tulangan utama, pilih *link spar 8*.

Type 3, model baja tulangan geser, pilih *link spar 8*.

- 3) *Setting* untuk definisi tipe elemen.

Ansys main menu, preprocessor, real constant pilih *add*

Set 1 untuk model definisi tipe material 1 dengan elemen tipe 1

Set 2 untuk model definisi tipe material 2 dengan elemen tipe 2, dan seterusnya sampai semua tipe model material terdefinisi (beton, baja tulangan utama, baja tulangan sayap, baja tulangan sengkang)

Data masukan parameter *real constant* untuk model validasi eksperimental dan model eksperimental dengan variasi jarak sengkang tercantum dalam Tabel 3.1.

- 1) Model dibentuk dan dimensinya disesuaikan dengan batasan parameternya
- 2) Model disusun dari beberapa bagian *meshing nodes* yang disusun menjadi blok *nodes*. Pembuatan bagian *meshing nodes* disesuaikan dengan jarak antar as tulangan utama, tulangan sayap, tulangan sengkang serta baja tumpuan beban dan tumpuan perletakan balok. Blok *nodes* yang telah disusun menjadi beberapa blok *nodes* kemudian dibentuk menjadi sebuah balok yang tipikal dengan dimensi yang telah disesuaikan.

Ansys main menu, preprocessor, modeling, create, volume, block, by dimensions.

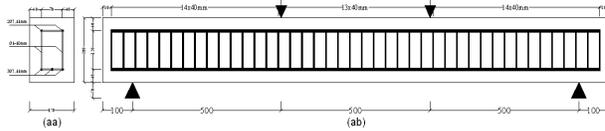
Implementasi Model

Balok persegi yang digunakan dalam analisis elemen hingga dengan ANSYS Ed.9.0 ada 2 (dua) jenis model, yaitu balok persegi sesuai hasil eksperimental oleh *Basuki (Basuki, Hidayati, N. 2006)* dan balok persegi sesuai uji eksperimental terdahulu

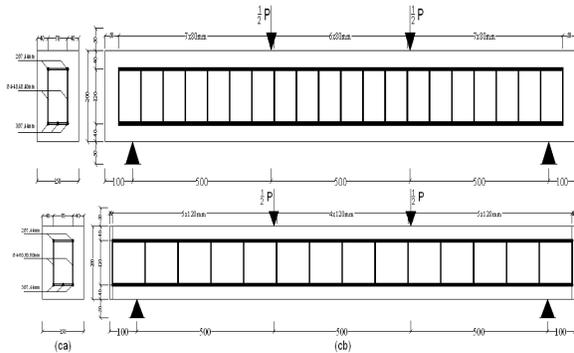
Jumlah model

Jumlah model ditentukan berdasarkan variasi parameter yang tertera dalam batasan penelitian. Adapun jumlah model analisa elemen hingga menggunakan ANSYS Ed.9.0 dengan variasi material *properties* model tercantum dalam Tabel 3.2.

Gambar 3.2a. Model Balok YT40.40.01 untuk validasi eksperimental terdahulu. (aa) penampang melintang. (ab) penampang memanjang (satuan dalam mm)

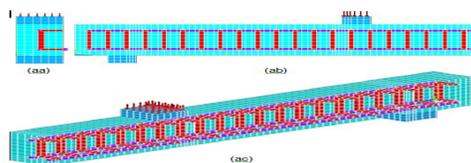


Gambar 3.2b. Model Balok YT80.80.02 untuk validasi eksperimental terdahulu. (ba) penampang melintang. (bb) penampang memanjang (satuan dalam mm)

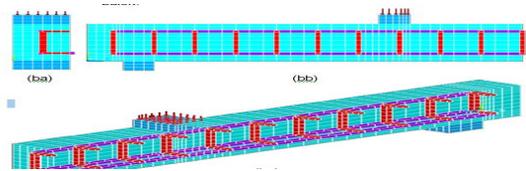


T120.120.03 untuk validasi eksperimental terdahulu. (ca) penampang melintang. (cb) penampang memanjang (satuan dalam mm)

Dalam ANSYS Ed.9.0, sebelum dilakukan analisis adalah mengkondisikan batas perletakan yang digunakan, yaitu pada ujung balok bentang parsial (pada bentang penuh berada ditengah bentang) dan ujung penampang melintang (pada penampang penuh berada ditengah penampang), dibuat perletakan rol-rol agar model balok dapat bertranslasi-rotasi arah Y dan Z seperti pada kondisi balok ditengah bentang pada model balok bentang dan penampang penuh. Hal ini dilakukan agar tercapai kondisi model balok simetris dan sama dengan model balok bentang dan penampang penuh. Analogi model balok parsial simetris dengan analisis model elemen hingga menggunakan ANSYS Ed.9.0 tercantum dalam Gambar



Gambar 3.4a. Implementasi model balok kondisi simetris untuk YT40.40.01 dalam ANSYS Ed.9.0. (aa) penampang melintang balok. (ab) penampang memanjang balok. (ac) penampang tiga dimensi balok.



Gambar 3.4b. Implementasi model balok kondisi simetris untuk YT80.80.02 dalam ANSYS Ed.9.0. (ba) penampang melintang balok. (bb) penampang memanjang balok. (bc) penampang tiga dimensi balok

Gambar 3.4c. Implement Model balok kondisi simetris untuk YT120.120.03 dalam ANSYS Ed.9.0. (ca) penampang melintang balok. (cb) penampang memanjang balok. (cc) penampang tiga dimensi balok.

3.4 Validasi dan Verifikasi Model

Analisis awal yang dilakukan adalah memodelkan balok persegi dengan data masukan yang sesuai dengan hasil uji eksperimental oleh Basuki (Basuki, Hidayati, N. 2006). Model kemudian dianalisis dan kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil uji eksperimental. Apabila hasil sudah tervalidasi maka akan dilanjutkan dengan pembuatan model dengan variasi yang telah ditetapkan dalam batasan penelitian. Hasil analisis model ini akan dibandingkan dengan hasil model awal.

Dari hasil analisa model elemen hingga dengan bantuan program ANSYS Ed.9.0 tersebut diperoleh data berupa nilai tegangan-regangan, beban-deformasi, dan beban-retak. Nilai tersebut diolah menjadi sebuah data yang menyerupai data koordinat. Data berupa koordinat yang ada merupakan data koordinat yang acak. Dari data koordinat tersebut, maka dapat ditentukan persamaan kurvanya menggunakan regresi polinomial metode *curve fitting power model* fungsi parabolik dalam suatu persamaan *polynomial* yang baru yang dapat dijadikan usulan untuk hasil penelitian ini.

IMPLEMENTASI MODEL DAN VALIDASI

Analisis Model Menggunakan Pendekatan Matematik

Model balok yang akan dianalisis manual menggunakan model pendekatan dengan perhitungan matematik. Langkah ini dilakukan agar diperoleh nilai validasi yang mendekati hasil eksperimental terdahulu. Dari hasil analisis model

menggunakan model pendekatan dengan perhitungan matematik tersebut diperoleh data berupa nilai momen-kurvatur-daktilitas, beban-deformasi dari model balok yang dianalisis.

Momen–Kurvatur-Daktilitas Model Balok

Perhitungan momen dan kurvatur yang terjadi pada model balok menggunakan modifikasi blok tegangan–regangan untuk beton mutu normal kondisi terkekang berbagai kondisi pembebanan, yaitu kondisi awal retak, kondisi leleh pertama dan kondisi ultimit. Rincian perhitungan untuk memperoleh nilai momen–kurvturnya tercantum dalam lampiran perhitungan analisis daktilitas kurvatur menggunakan metode *Kent and Park*.

Tabel 4.1a. Nilai Momen dan Kurvatur Model Balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03 pada Kondisi Awal Retak, Leleh dan Ultimit Hasil

No	Model Validasi	Kondisi Awal Retak		Kondisi Leleh		Kondisi Ultimit	
		M_{crack}	ϕ_{crack}	M_{ny}	ϕ_y	M_{nu}	ϕ_u
		(kNm)	($\frac{1}{mm}$)	(kNm)	($\frac{1}{mm}$)	(kNm)	($\frac{1}{mm}$)
1	YT40.40.01	3.40	6.60E-06	5.15	1.2E-05	6.31	1.63E-04
2	YT80.80.02	3.40	6.60E-06	5.15	1.2E-05	6.03	1.48E-04
3	YT120.120.03	3.40	6.60E-06	5.15	1.2E-05	6.16	1.50E-04

Perhitungan Menggunakan Kurva Tegangan–Regangan *Kent and Park*

Berdasarkan perhitungan yang tercantum dalam Lampiran perhitungan analisis daktilitas kurvatur menggunakan metode *Kent and Park*, maka dapat dibuat kedalam suatu kurva hubungan nilai momen dan kurvatur yang terjadi dari model balok seperti tercantum dalam Tabel 4.1a; 4.1b; 4.1c; 4.1d dan Gambar 4.1a; 4.1b; 4.1c.

Tabel 4.1a; 4.1b; 4.1c; 4.1d dan Gambar 4.1a; 4.1b; 4.1c, untuk model YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03, nilai momen ultimit terhadap jarak antar sengkang 40, 80 dan 120 mm, nilainya turun berturut–turut pada rasio 1.00; 0.96; 0.82 sebesar 6.31; 6.03; 5.16 kNm. Untuk model YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08, nilai momen ultimit terhadap jarak antar sengkang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm, nilainya naik berturut–turut pada rasio 1.00; 1.0001; 1.0002; 1.0017; 1.0022 menjadi sebesar 33.20; 33.20; 33.22; 33.25; 33.27 kNm.

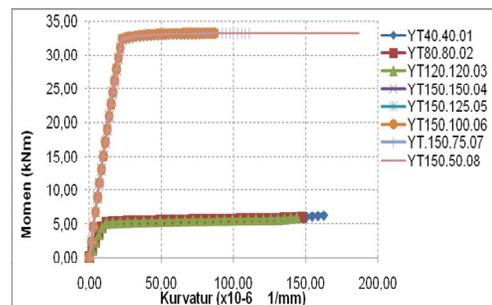
Tabel 4.1b. Nilai Mom dan Kurvatur Model Balok YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 pada Kondisi Awal Retak, Leleh dan Ultimit Hasil

No	Model Validasi	Kondisi Ultimit		Rasio M_u/M_{u40}	Rasio ϕ_u/ϕ_{u40}
		M_u	ϕ_u		
		(kN)	(mm)		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	YT40.40.01	6.31	1.63E-04	1.0	1.00
2	YT80.80.02	6.03	1.48E-04	0.98	0.92
3	YT120.120.03	6.16	1.50E-04	0.96	0.91

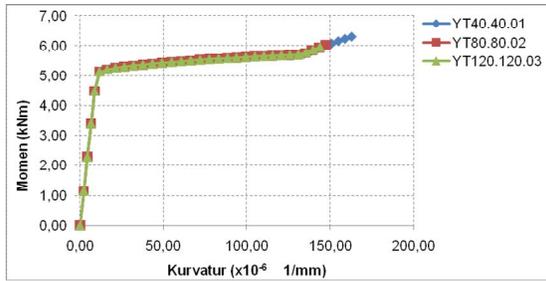
Terjadi kenaikan momen ultimit untuk model balok YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 yang lebih tinggi dibanding model balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03.

Tabel 4.1c. Nilai Momen dan Kurvatur Model Balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; pada Kondisi Ultimit Hasil Perhitungan Menggunakan Kurva Tegangan–Regangan *Kent and Park*

No	Model Variasi	Kondisi Ultimit		Rasio M_u/M_{u150}	Rasio ϕ_u/ϕ_{u150}
		M_u	ϕ_u		
		(kN)	(mm)		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1	YT150.150.04	33.20	6.89E-05	1.0000	1.00
2	YT150.125.05	33.20	7.62E-05	1.0001	1.11
3	YT150.100.06	33.22	8.71E-05	1.0008	1.26
4	YT150.75.07	33.25	9.87E-05	1.0017	1.43
5	YT150.50.08	33.27	1.84E-04	1.0022	2.67

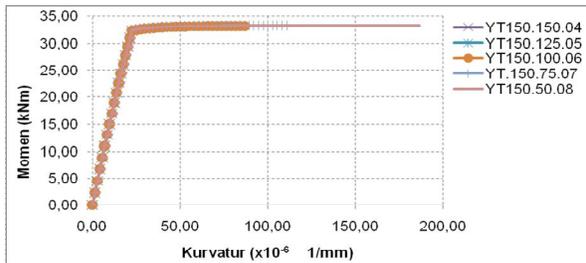


Gambar 4.1a. Kurva Momen dan Kurvatur Model Balok Hasil Perhitungan Menggunakan Kurva Tegangan–Regangan *Kent and Park* Untuk Model YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan YT150.50.08



Gambar 4.1b. Kurva Momen dan Kurvatur Model Balok Hasil Perhitungan Menggunakan Kurva Tegangan–Regangan *Kent and Park* Untuk Model Validasi Hasil Eksperimental Terdahulu YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03

Gambar 4.1b adalah kurva hubungan nilai momen dan kurvatur pada model balok hasil eksperimental terdahulu YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; sebagai model validasi. Gambar 4.1c, adalah kurva hubungan nilai momen dan kurvatur pada model balok dengan variasi dari hasil eksperimental terdahulu YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan YT150.50.08 sebagai model variasi.



Berdasarkan penjelasan diatas dapat diperoleh suatu persamaan usulan untuk menentukan besarnya daktilitas kurvatur terhadap jarak antar sengkang berdasarkan Gambar 4.3a; 4.3b; 4.3c; 4.3d dan 4.3e seperti tercantum dalam Gambar 4.3f. Gambar 4.3g adalah kurva persamaan daktilitas kurvatur terhadap jarak antar sengkang dari hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0. Persamaan kurva regresi *polynomial curve fitting* berderajat 2 untuk nilai daktilitas kurvatur terhadap jarak antar sengkang adalah:

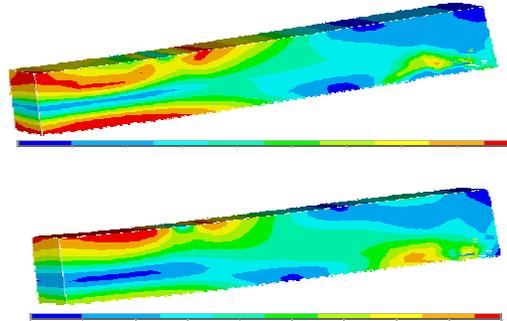
$$\mu_{\phi} = -2.10 \cdot S^3 + 0.005 \cdot S^2 - 0.688 \cdot S + 30.58,$$

dengan nilai μ_{ϕ} dan S masing–masing:
 μ_{ϕ} = Daktilitas kurvatur, satuan dalam 1/mm;
 bentang, satuan dalam mm.

Beban–Deformasi Model Balok.

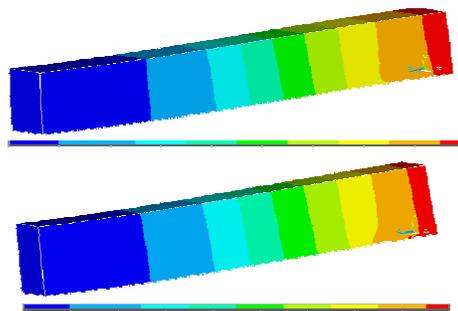
Besarnya nilai beban dan deformasi yang terjadi pada model balok, diperoleh dari hasil

konversi nilai tegangan-regangan beton pada model balok hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0 seperti tercantum dalam Gambar 4.4. Pada Gambar 4.4, adalah kontur tegangan (*von misses stress*) pada model balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan YT150.50.08.



YT150.50.08 tercantum dalam gambar 4.5. Dari Gambar 4.4 untuk model validasi YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; dengan rapatnya jarak sengkang pada daerah tengah bentang, kontur tegangan yang terjadi pada model balok cenderung turun dan perilaku model balok menjadi lebih kuat. Untuk model variasi YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan YT150.50.08; dengan penambahan mutu beton menjadi 25 MPa, naiknya diameter dan mutu baja tulangan menjadi 400 MPa, rapatnya jarak sengkang pada daerah tengah bentang, tegangan yang terjadi cenderung turun. Perilaku model balok variasi menjadi lebih kuat dan momen yang mampu ditahan lebih tinggi dibanding model validasi.

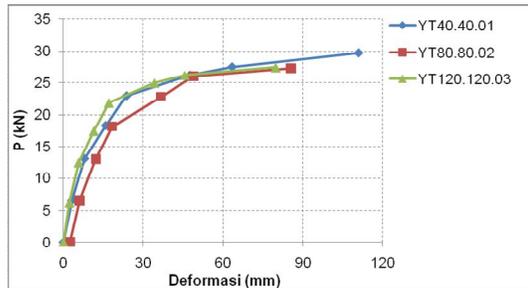
Sedangkan kontur deformasi arah Y pada model balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan



Gambar 4.5. Kontur Deformasi Arah Y (Vertikal) Hasil ANSYS Ed.9.0 untuk Model Balok (a). YT40.40.01;(b). YT80.80.02; (c). YT120.120.03; (d). YT150.150.04;(e).YT150.125.05;(f) YT150.100.06;(g).YT150.75.07;(h). YT150.50.08.

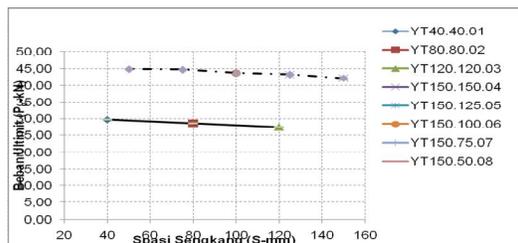
Berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0 diperoleh suatu data hubungan beban dan deformasi seperti yang tercantum dalam Tabel 4.4 dan Gambar 4.5.

Gambar 4.5c. Kurva Beban dan Deformasi Model Balok Variasi dari Hasil Eksperimental Terdahulu YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06;



Gambar 4.5c. Kurva Beban dan Deformasi Model Balok Variasi dari Hasil Eksperimental Terdahulu YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 Hasil ANSYS Ed.9.0

Gambar 4.5d, adalah kurva hubungan nilai beban ultimit dan jarak antar sengkang model balok hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0. Untuk model balok validasi hasil eksperimental terdahulu YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; garis kurvanya adalah berupa garis lurus. Untuk model balok variasi dari hasil eksperimental terdahulu YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 garis kurvanya adalah berupa garis titik garis.



Gambar 4.5d. Trend Kurva Beban Ultimit dan Jarak Antar Sengkang Model Balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07 dan YT150.50.08 Hasil ANSYS Ed.9.0

Pada Gambar 4.5e, adalah kurva hubungan nilai deformasi ultimit dan jarak antar sengkang

model balok hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0 YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03; garis kurvanya adalah berupa garis lurus. Untuk model balok variasi dari hasil eksperimental terdahulu YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 garis kurvanya adalah berupa garis titik garis.

Dari Tabel 4.4a; 4.4b dan Gambar 4.5a; 4.5b dan 4.5c, untuk model YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03, nilai beban ultimit terhadap jarak antar sengkang 40, 80 dan 120 mm berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.9621; 0.9242 menjadi sebesar 29.7000; 28.5750; 27.4500 kN. Untuk model YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08, nilai beban ultimit terhadap jarak antar sengkang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.0256; 1.0351; 1.0586; 1.0628 menjadi sebesar 42.2250; 43.3350; 43.7400; 44.7300; 44.9100 kN. Terjadi kenaikan momen ultimit untuk model balok YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 dibanding model balok

YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03. Kenaikan nilai beban ultimit pada model balok YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 karena nilai mutu beton bertambah menjadi 25 MPa dan diameter serta mutu baja tulangan tarik dan tekan bertambah menjadi 16 mm dan 400 MPa sehingga kapasitas beban yang mampu ditahan balok juga bertambah.

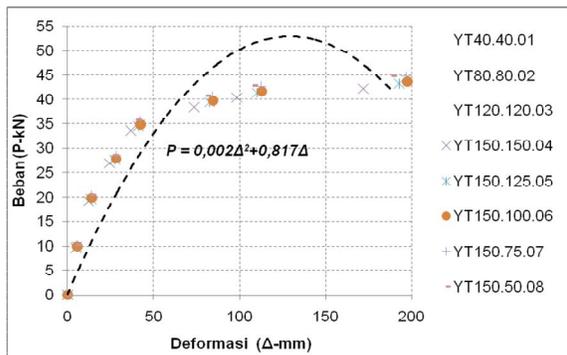
Nilai deformasi ultimit untuk model YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03, terhadap jarak antar sengkang 40, 80 dan 120 mm berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.7715; 0.7196 menjadi sebesar 110.8897; 85.5533; 79.7952 mm. Untuk model YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08, nilai deformasi ultimit terhadap jarak antar sengkang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm berdasarkan hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.1199; 1.1475; 1.1426; 1.0958 menjadi sebesar 152.51; 170.37; 193.37; 222.95; 220.37 mm. Terjadi kenaikan kurvatur ultimit untuk model balok YT150.150.04; YT150.125.05; YT150.100.06; YT150.75.07; YT150.50.08 dibanding model balok YT40.40.01; YT80.80.02; YT120.120.03

Berdasarkan penjelasan diatas dapat diperoleh suatu persamaan usulan untuk menentukan

besarnya beban dan deformasi terhadap jarak antar sengkang berdasarkan Gambar 4.5a; 4.5b; 4.5c; 4.5d; 4.5e seperti tercantum dalam Gambar 4.3f. Gambar 4.3f adalah kurva persamaan daktilitas kurvatur terhadap jarak antar sengkang dari hasil analisis menggunakan ANSYS Ed.9.0. Persamaan kurva regresi *polynomial curve fitting* berderajat 2 untuk nilai beban - deformasi terhadap kenaikan jarak antar sengkang adalah:

$P = 0,002\Delta^2 + 0,817\Delta$; dengan nilai P dan Δ masing-masing:

P = Beban yang terjadi pada balok, satuan dalam kN;
 Δ = Deformasi yang terjadi pada balok, satuan dalam mm.



Gambar 4.5f. Persamaan Usulan Kurva Beban dan Deformasi Model Balok Hasil Regresi *Polynomial Curve Fitting* Berderajat 2.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dalam yang dilakukan terhadap model balok dengan variasi jarak antar sengkang didaerah tekan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Dengan rapatnya jarak antar sengkang didaerah tekan membuat nilai momen ultimit dan kurvatur ultimit dari model balok bertambah naik. Nilai momen ultimit pada model dengan jarak antar sengkang 40, 80 dan 120 mm, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.9621; 0.9242 menjadi sebesar 5.5688; 5.3578; 5.1469 kNm. Nilai momen ultimit pada model dengan jarak antar sengkang 150; 125; 100; 75; dan 50, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.0256; 1.0351; 1.0586; 1.0628 menjadi sebesar 7,9288; 8.1253; 8.2013; 8.3869; 8.4209 kNm
2. Dengan rapatnya jarak antar sengkang didaerah tekan membuat nilai daktilitas kurvatur dari model balok semakin besar. Nilai daktilitas kurvatur pada model dengan jarak antar

sengkang 40, 80 dan 120 mm, nilainya turun berturut-turut pada rasio 1.0000; 0.8667; 0.6842 menjadi sebesar 15.3864; 13.3333; 10.5263. Nilai daktilitas kurvatur pada model dengan jarak antar sengkang 150; 125; 100; 75; dan 50 mm, nilainya naik berturut-turut pada rasio 1.0000; 1.1081; 1.1714; 1.2424; 1.3667 menjadi sebesar 4.8780; 5.4054; 5.7143; 6.0606; 6.6667.

3. Besarnya kenaikan daktilitas kurvatur terhadap jarak antar sengkang ditengah bentang balok, nilainya dapat dihitung dari persamaan regresi *polynomial curve fitting* berderajat 2, yaitu:

$$\mu_{\phi} = -2.10^{-5}S^3 + 0.005.S^2 - 0.688.S + 30.58;$$

dengan nilai μ_{ϕ} dan S masing-masing:

μ_{ϕ} = Daktilitas kurvatur;

S = Jarak antar sengkang ditengah bentang, satuan dalam mm.

P = Beban yang terjadi pada balok, satuan dalam kN;

Δ = Deformasi yang terjadi pada balok, satuan dalam mm.

4. Dengan rapatnya jarak antar sengkang didaerah tekan, tidak mempengaruhi beban dan deformasi pada retak pertama model balok.

Saran

Dalam penelitian ini terdapat beberapa kelemahan yang perlu dilakukan kajian lebih dalam lagi, diantaranya:

1. Dengan rapatnya jarak sengkang ditengah bentang balok, maka nilai momen-kurvatur ultimit dan daktilitas kurvatur menjadi naik.
2. Dengan meningkatnya mutu beton, mutu baja tulangan dan diameter baja tulangan, nilai daktilitas kurvatur yang terjadi menjadi lebih kecil. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai mutu beton, mutu baja tulangan dan diameter baja tulangan yang sesuai terhadap nilai daktilitas kurvatur yang direncanakan.

DAFTAR PUSTAKA

- ANSYS Release 9.0. (2007). Programmer's Manual for ANSYS. ANSYS Incorporations and ANSYS Europe, Ltd. (<http://ansys.com> diakses tanggal 5 September 2009)
- Basuki. Hidayati, N. (2006). Tinjauan Kuat Geser Sengkang Alternatif Dan Sengkang Konvensional Pada Balok Beton Bertulang. *Dinamika Teknik Sipil*. Volume 6. Nomor 1. pp. 36-45

Institut Teknologi Sepuluh November Surabaya.
(2007). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03-2847-2002)*. Edisi pertama. ITS Press. Surabaya. Indonesia

Dipohusodo, I. (1994). *Struktur Beton Bertulang*. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Kenneth, M.L. (1997). *Reinforced Concrete Design*. Mc. Graw Hill. Singapore

Park, R. Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley & Sons. New York. USA

Purwono, R. (2005). *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Bertulang Tahan Gempa (SNI 03-1726-2002)*. Edisi ketiga ITS Press. Surabaya. Indonesia

Taufik, S. (2009). *Curve Fitting*. Modul Kuliah Metode Numerik Terapan. Jurusan Teknik Struktur Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil Universitas Lambung Mangkurat.

Tjitradi, D. Taufik, S. Kosasih, B.L. (2003). Perhitungan Kapasitas Penampang Kolom Beton Mutu Tinggi Yang Terkekang Dengan Blok Tegangan Segiempat Ekuivalen. *Civil Engineering Dimension. Vol.5 No.1*. pp. 45–50

Wahyudi, L. (1997). *Struktur Beton Bertulang*. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Bambang Suhendro, Teori Model Struktur dan Teknik Eksperimental

Standar Nasional Indonesia (SNI), SNI 03-2847-2002 & S-2002, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton, Untuk Bangunan Gedung.