

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Pendahuluan

Pada bab ini diuraikan mengenai teori-teori serta pengujian yang akan dilakukan pada penelitian ini.

3.2 Bahan Penyusun Balok Beton Bertulang SCC

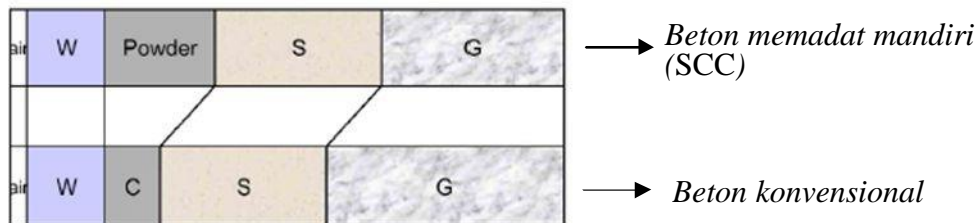
3.2.1 Beton Memadat Mandiri (*Self Compacting Concrete, SCC*)

SCC adalah beton yang mampu mengalir sendiri yang dapat dicetak dengan tingkat penggunaan alat pemadat yang sangat sedikit atau bahkan tanpa alat pemadat sama sekali. Beton ini dicampur dengan memanfaatkan pengaturan ukuran agregat, porsi agregat, komponen halus dan *admixture superplasticizer* untuk mencapai kekentalan khusus yang memungkinkannya mengalir sendiri. SCC merupakan penelitian yang sudah cukup lama dilakukan di Jepang mulai era tahun 1990-an. Dalam perkembangannya di masyarakat luas, SCC ini menawarkan banyak keuntungan, di antaranya pengerjaan pemadatan beton di lapangan tanpa memerlukan pekerja pemadat yang lebih banyak dan SCC ini juga dapat memenuhi tuntutan *desainer* untuk mewujudkan suatu bentuk struktur dan dengan tulangan yang kompleks (Okamura dan Ouchi, 2003).

SCC ini mampu mengalir melewati celah antar tulangan yang rumit tanpa *vibrator* karena viskositas atau kekentalan beton segar yang terkendali. Dalam pembuatan SCC, perlu pengendalian penggunaan *superplasticizer* supaya diperoleh kekentalan khusus yang memungkinkan beton ini dapat mengalir. Selain itu, dengan ukuran agregat kasar yang tidak terlalu besar, beton ini jauh lebih mudah mengalir melewati celah antar tulangan.

Perbedaan utama SCC dengan beton konvensional terletak pada komposisi campuran beton, yaitu penggunaan porsi bahan pengisi yang cukup besar, sekitar 40% dari volume total campuran beton. Bahan pengisi ini adalah pasir butiran halus dengan ukuran butiran maksimum (d_{max}) $\leq 0,125$ mm. Porsi besar bahan

pengisi ini menyebabkan campuran beton cenderung berperilaku sebagai pasta (Okamura dan Ouchi, 2003).



Gambar 3.1 Perbandingan Proporsi Campuran SCC dan Beton Konvensional

(Sumber: Okamura dan Ouchi, 2003)

Dari Gambar 3.1 dapat dilihat bahwa perbedaan proporsi campuran SCC dengan campuran konvensional terletak pada jumlah agregat kasar (G) dan jumlah *powder* (P) terhadap semen (C). *Powder* adalah semen yang dikombinasikan dengan partikel halus lainnya (ukuran butiran < 0,125 mm) seperti *fly ash* dan *silica fume*. Selain itu, pada SCC juga digunakan *admixture* berupa *superplasticizer*. Tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada jumlah air (W) dan pasir (S).

Menurut Muntu dan Gunawan (2004) dalam Adrianto (2010), suatu campuran beton dikatakan SCC jika memiliki sifat-sifat sebagai berikut ini.

1. Pada beton segar (*fresh concrete*)
 - a. *filling ability* atau kemampuan campuran beton segar untuk mengisi ruangan. Dapat diuji menggunakan *slumpflow*, *V-funnel*,
 - b. *passing ability* atau kemampuan campuran beton segar untuk melewati tulangan. Dapat diuji menggunakan *L-box*, *U-box*, dan
 - c. *segregation resistance* atau ketahanan campuran beton segar terhadap segregasi. Dapat diuji menggunakan *V-funnel*.
2. Pada beton keras (*hardened concrete*)
 - a. memiliki tingkat absorpsi dan permeabilitas yang rendah,
 - b. mempunyai tingkat durabilitas yang tinggi, dan
 - c. mampu membentuk campuran beton yang homogen.

Menurut *the European Federation of National Associations Representing for Concrete* (EFNARC), beberapa kriteria teknis dari SCC adalah seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Kriteria SCC menurut EFNARC

Metode pengujian	Satuan	Tipe jangkauan nilai	
		Minimal	Maksimal
<i>Slumpflow</i> dengan kerucut Abrams	mm	650	800
$T_{50\text{cm}}$ <i>slumpflow</i>	detik	2	5
<i>J-ring</i>	mm	0	10
<i>V-funnel</i>	detik	6	12
<i>L-box</i>	(h2/h1)	0,8	1,0

Sumber: *EFNARC Specification and Guidelines for SCC* (2002)

Metode pengujian pada Tabel 3.1 bukan merupakan syarat mutlak beton untuk dapat dikategorikan sebagai SCC. Beberapa pengujian memungkinkan untuk tidak dilakukan, tergantung dari kegunaan SCC yang akan diproduksi. Dari daftar metode pengujian yang terdapat pada Tabel 3.1 yang dilakukan hanya metode pengujian *slump flow* dengan kerucut *abrams*.

3.2.2 Komposisi Beton SCC

Nugraha (2017) melakukan penelitian terhadap karakteristik beton SCC dengan dengan menambahkan *sika fume* dengan kadar 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, dan 5% dari berat semen serta *superplasticizer viscocrete 3115N* dengan kadar 0,9% dari berat semen yang bertujuan untuk mengetahui kadar optimum dari penambahan *sika fume*. Perhitungan perencanaan campuran beton menggunakan kombinasi antara EFNARC 2002 serta SNI 03-2834-2000 dengan kuat desak rencana 43 MPa. Pengujian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi kuat desak, modulus elastisitas beton, penyerapan air pada beton, kecepatan rambat gelombang yang melalui beton, *slump flow*, serta T_{50} *slump flow* dengan umur sampel 28 hari.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kadar optimum penambahan *sika fume* terdapat pada kadar 3% dengan nilai modulus elastisitas sebesar 32992,4

MPa, kuat desak sebesar 50,54 MPa, penyerapan air sebesar 4,468%, diameter *slump flow* sebesar 620 mm, T_{50} selama 4,3 detik, serta kecepatan rambat gelombang sebesar 4774 m/s.

Dari hasil tersebut diadopsi proporsi bahan yang menunjukkan kadar optimum dan melanjutkan penelitian yang meliputi kuat lentur, kuat geser, lendutan, daktilitas, dan pola retak pada benda uji balok beton bertulang.

3.2.3 Baja Tulangan

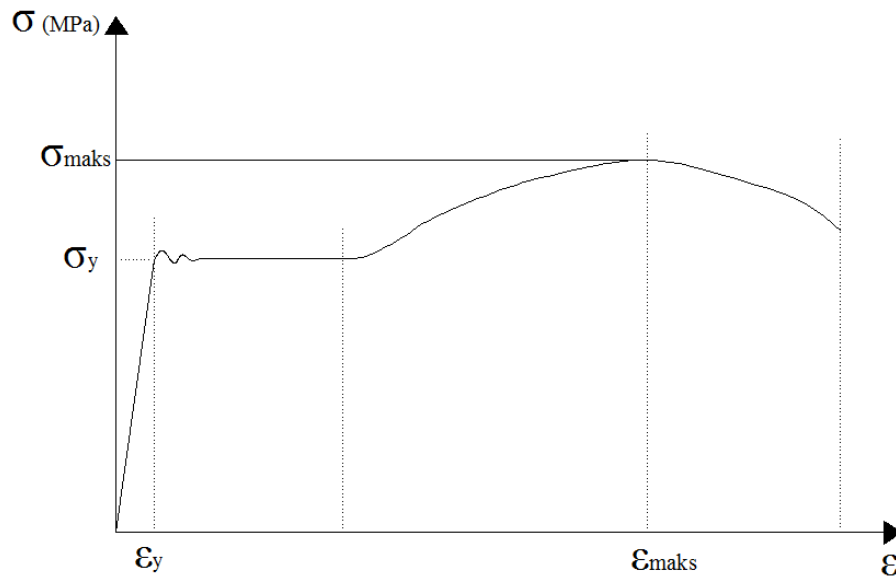
1. Macam-macam Baja Tulangan

Menurut SNI 03-2847 (2013), tulangan yang dapat digunakan pada elemen beton bertulang harus tulangan ulir, kecuali untuk tulangan spiral atau baja prategang diperkenankan tulangan polos dan tulangan yang mengandung *stud* geser berkepala, baja profil struktural, pipa baja, atau tabung baja dapat digunakan sesuai dengan persyaratan. Baja Tulangan yang tersedia di pasaran ada 2 jenis yaitu sebagai berikut ini.

- a. Baja Tulangan Polos (BJTP) biasanya digunakan untuk tulangan geser/begel/sengkan, dan mempunyai tegangan leleh (f_y) minimal sebesar 240 MPa (disebut BJTP-24), dengan ukuran $\emptyset 6$, $\emptyset 8$, $\emptyset 10$, $\emptyset 12$, $\emptyset 14$ dan $\emptyset 16$ (dengan \emptyset menyatakan simbol diameter polos).
- b. Baja Tulangan Ulir atau *Deform* (BJTD) biasanya digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang, dan mempunyai tegangan leleh (f_y) minimal 300 MPa (disebut BJTD-30).

2. Kuat Tarik Baja Tulangan

Meskipun baja tulangan mempunyai sifat tahan terhadap beban tekan, tetapi karena harganya yang mahal, maka baja tulangan ini hanya diutamakan untuk menahan beban tarik pada struktur beton bertulang, sedangkan beban tekan yang bekerja cukup ditahan oleh betonnya. Hubungan antara tegangan dan regangan tarik baja digambarkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Grafik Hubungan Tegangan dan Regangan Tarik Baja
(Sumber: Buku Ajar Praktikum Teknologi Bahan Konstruksi Teknik Sipil UII)

3. Modulus Elastisitas Baja Tulangan

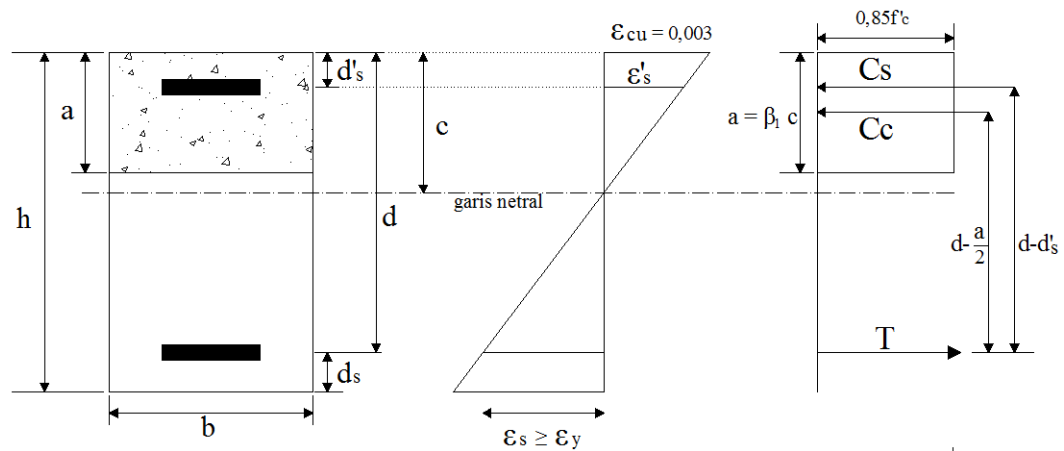
Dari hubungan tegangan-regangan tarik baja tulangan, terlihat sudut α (*alpha*), yaitu antara garis lurus kurva yang ditarik dari kondisi tegangan nol sampai tegangan leleh (f_y) dan garis regangan (ϵ_y). Modulus elastisitas baja tulangan (E_s) merupakan tangens dari sudut α (*alpha*) tersebut. Menurut Pasal 8.5.2 SNI 03-2847-2013, modulus elastisitas baja, E_s , untuk tulangan nonprategang diizinkan untuk diambil sebesar 200.000 MPa.

3.3 Kuat Lentur Balok

Kuat lentur beton adalah kemampuan beton untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu memanjang serat di tengah-tengah balok yang disangga kedua ujungnya. Pada setiap penampang terdapat gaya-gaya dalam yang dapat diuraikan menjadi komponen-komponen yang saling tegak lurus dan menyinggung terhadap penampang tersebut. Komponen-komponen yang tegak lurus terhadap penampang tersebut merupakan tegangan-tegangan lentur (tarik pada salah satu sisi di daerah sumbu netral dan tekan pada sisi penampang lainnya). Fungsi dari komponen ini adalah untuk memikul momen lentur pada penampang.

Kuat lentur balok beton terjadi karena berlangsungnya mekanisme

tegangan-regangan yang timbul di dalam balok, pada keadaan tertentu dapat diwakili oleh gaya-gaya dalam. Kuat lentur balok dikenal sebagai modulus runtuh (*modulus of rupture*). Seperti tampak pada Gambar 3.3 dengan C_c merupakan resultan gaya tekan beton dan C_s merupakan resultan gaya tekan baja yang berada diatas garis netral. Sedangkan T merupakan resultan gaya tarik dalam dan merupakan seluruh gaya tarik yang direncanakan untuk daerah yang berada di bawah garis netral.



Gambar 3.3 Analisis Balok Tulangan Rangkap

Langkah-langkah analisis balok persegi bertulangan rangkap adalah sebagai berikut ini.

1. Anggap bahwa tulangan tarik dan tulangan tekan telah leleh seperti pada Persamaan 3.1.

$$f_s = f_s' = f_y \quad (3.1)$$

2. Dengan menggunakan persamaan pasangan kopel beton tekan dan tulangan baja tarik dan tekan, tinggi balok tekan (a) dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.2, Persamaan 3.3 dan Persamaan 3.4.

$$T = C_c + C_s \quad (3.2)$$

$$A_s f_y = (0.85 f'_c) a b + A_s' f_y \quad (3.3)$$

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f'_c} \quad (3.4)$$

3. Tentukan letak garis netral seperti pada Persamaan 3.5.

$$c = \frac{a}{\beta_1} \quad (3.5)$$

4. Cari nilai β_1 seperti pada persamaan 3.6 dan Persamaan 3.7.

- jika $f'_c < 28$ MPa maka $\beta_1 = 0,85$ (3.6)

- jika $f'_c > 28$ MPa maka $\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7}$ (3.7)

- jika nilai β_1 didapatkan kurang dari 0,65, maka nilai β_1 diambil 0,65.

5. Periksa regangan yang terjadi pada tulangan baja tekan dan baja tarik dengan menggunakan diagram regangan seperti pada Persamaan 3.8 dan Persamaan 3.9.

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d'_s}{c} \varepsilon_{cu} \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_s = \frac{d - c}{c} \varepsilon_{cu} \quad (3.9)$$

Dengan menganggap $\varepsilon_s \geq \varepsilon_y$, yang berarti tulangan baja tarik telah leleh, akan timbul salah satu dari kedua antara kondisi I dan kondisi II.

- a. Kondisi I: $\varepsilon_s' \geq \varepsilon_y$, menunjukkan bahwa tulangan baja tekan leleh.
- b. Kondisi II: $\varepsilon_s' \leq \varepsilon_y$, menunjukkan bahwa tulangan baja tekan belum leleh.

6. Hitung momen nominal seperti pada Persamaan 3.10, Persamaan 3.11 dan Persamaan 3.12.

$$C_c = (0,85f'_c)ab \quad (3.10)$$

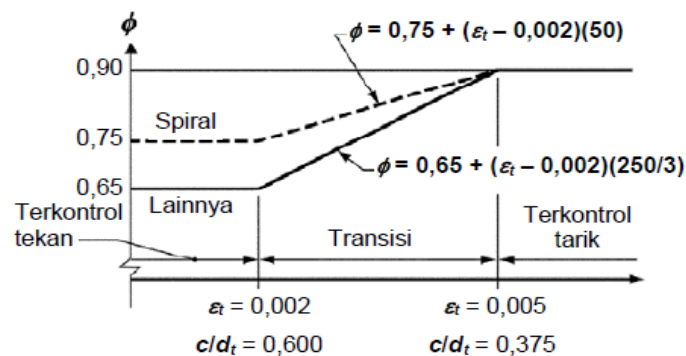
$$M_n = C_c(d - \frac{a}{2}) + C_s(d - d'_s) \quad (3.11)$$

$$M_u = \phi M_n \quad (3.12)$$

ϕ = faktor reduksi, diambil dari SNI 03-2847-2013 seperti pada Gambar 3.4.

7. Dalam SNI 03-2847 (2013), nilai ε_t menentukan kriteria penampang dari komponen struktur lentur yang ditinjau. Apabila nilai ε_t kurang dari 0,002 maka penampang dikategorikan sebagai penampang terkendali tekan, sedangkan jika nilai ε_t lebih dari 0,005 maka penampang dikategorikan sebagai

penampang terkendali tarik. Apabila nilai berada di antara 0,002 dan 0,005, maka penampang dikategorikan berada dalam daerah transisi. Untuk perencanaan komponen struktur lentur yang tidak memikul beban aksial tekan lebih dari $0,1f_c A_g$, nilai ε_t dalam SNI 03-2847 (2013) dibatasi untuk tidak kurang dari 0,004. Dengan adanya batasan terhadap nilai ε_t ini, maka sebenarnya ada batasan pula terhadap rasio tulangan tarik, ρ , yang tidak dituliskan secara eksplisit dalam SNI 03-2847 (2013). Hal ini merupakan perubahan dari SNI 03-2847 (2002) yang mengacu pada ACI 318 (1999) yang secara eksplisit dituliskan bahwa nilai rasio tulangan baja tidak boleh lebih dari 0,75 kali rasio tulangan dalam kondisi seimbang ($\rho_{maks} < 0,75\rho_b$). Perubahan ini sebenarnya sudah diadopsi pada peraturan ACI 318 (2002), yang disebut sebagai *Unified Design Method*. Metode desain yang berbasiskan regangan ini hendak menjamin bahwa semua keruntuhan komponen struktur lentur sifatnya adalah daktail, sehingga syarat keamanannya lebih terjamin. Nilai dari ε_t turut menentukan pula faktor reduksi kekuatan, ϕ . Pada SNI 03-2847 (2002), nilai ϕ untuk semua kondisi komponen struktur lentur diambil seragam sebesar 0,8. Namun pada SNI 03-2847 (2013), nilai ϕ dapat diambil hingga maksimum 0,9, untuk penampang dengan $\varepsilon_t = 0,005$, dan dapat direduksi secara linier hingga ε_t mencapai 0,004. Berikut ini merupakan Gambar 3.4 yang menunjukkan hubungan antara nilai ε_t dan ϕ .



Interpolasi pada c/d_t :
 Spiral $\phi = 0,75 + 0,15[(1/(c/d_t) - (5/3))]$
 Lainnya $\phi = 0,65 + 0,25[(1/(c/d_t) - (5/3))]$

Gambar 3.4 Variasi ϕ dengan Regangan Tarik Neto dalam Baja Tarik Terluar, ε_t dan c/d_t untuk Tulangan Mutu 420 dan untuk Baja Prategang

(Sumber: SNI 03-2847-2013)

3.4 Kuat Geser Balok

Suatu perencanaan struktur balok beton bertulang bertujuan untuk menghasilkan batang daktil yang dapat memberikan peringatan apabila keruntuhan terjadi. Untuk mencapai tujuan ini, maka nilai geser rencana memiliki faktor keamanan yang lebih besar terhadap keruntuhan geser dibandingkan dengan yang diberikan untuk keruntuhan lentur.

Keruntuhan balok beton bertulang dalam geser akan terjadi secara tiba-tiba dengan peringatan kecil, atau tanpa peringatan sebelumnya. Oleh karena itu, balok direncanakan runtuh dalam lentur akibat beban yang lebih kecil dari beban yang menyebabkan keruntuhan geser. Batang tersebut dapat retak dan melendut cukup besar jika mendapat beban lebih, tetapi tidak akan patah seperti halnya jika terjadi keruntuhan geser (McCormac, 2004).

Kekuatan geser pada balok beton bertulang diberikan oleh kekuatan geser beton dan tulangan gesernya, sehingga dapat ditentukan dengan rumus seperti pada Persamaan 3.13.

$$V_n = V_c + V_s \quad (3.13)$$

Kekuatan geser batang yang diijinkan ϕV_n , sama dengan ϕV_c ditambah ϕV_s (dimana menurut SNI 03-2847-2013 nilai ϕ adalah 0.75) yang harus sama dengan atau lebih besar dari gaya geser maksimum (V_u) seperti pada Persamaan 3.14.

$$V_u = \phi(V_c + V_s) \quad (3.14)$$

Kekuatan geser yang diberikan oleh beton dapat ditentukan dengan rumus pada Persamaan 3.15.

$$V_c = \left(\frac{1}{6}\sqrt{f'_c}\right) b_w d \quad (3.15)$$

Dimana:

b_w = lebar balok, dan

d = tinggi efektif balok.

Kekuatan geser yang diberikan oleh tulangan geser dihitung dengan rumus pada Persamaan 3.16.

$$V_s = (A_v f_y d_s) / s \quad (3.16)$$

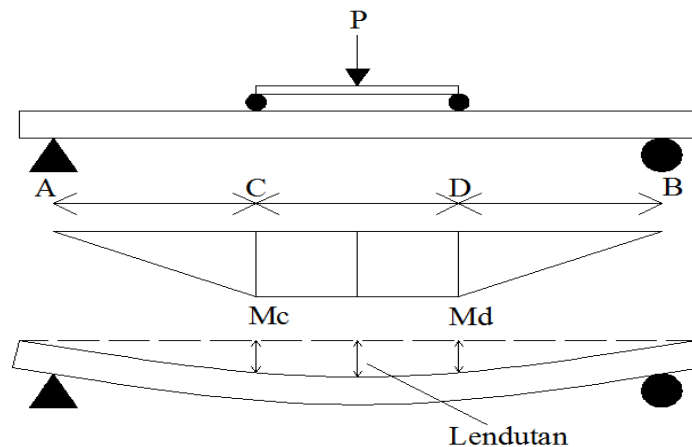
Dimana:

A_v = luas area tulangan sengkang, dan

s = jarak antar tulangan sengkang.

3.5 Hubungan Beban dan Lendutan

Menurut Spiegel dan Limbrunner (1991) dalam Septian (2010), apabila suatu beban menyebabkan timbulnya lentur, maka balok pasti akan mengalami defleksi atau lendutan seperti pada Gambar 3.5. Meskipun sudah terkontrol dan aman terhadap lentur dan geser, suatu balok bisa tidak layak apabila terlalu fleksibel. Dengan demikian, tinjauan defleksi balok merupakan salah satu bagian dari proses desain.



Gambar 3.5 Momen dan Lendutan pada Tampang Memajang Balok

(Sumber: Spiegel dan Limbrunner, 1991)

Menurut Dipohusodo (1996), dalam lendutan pada komponen struktur merupakan fungsi dari panjang batang, perletakan dan kondisi ujung batang (perletakan sederhana, menerus atau jepit), jenis beban (terpusat dan merata) dan kekakuan lentur komponen (EI).

Dari persamaan umum lendutan maksimum Δ_{maks} seperti pada Persamaan 3.17.

$$\Delta_{maks} = \frac{Pa}{24EI} (3L_n^2 - 4x^2) \quad (3.17)$$

Apabila beton tarik diabaikan, maka inersia penampang adalah seperti pada Persamaan 3.18.

$$I_x = \frac{1}{3} a^3 b + A_s (d-a)^2 \frac{E_s}{E_c} \quad (3.18)$$

dengan:

L_n = panjang bentang bersih,

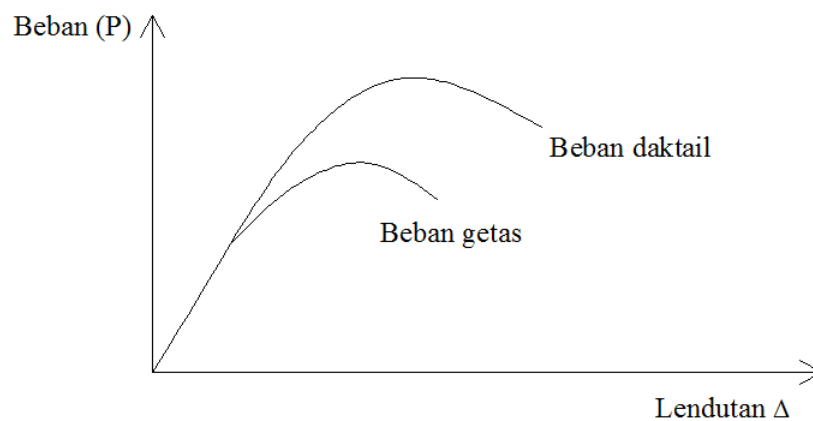
E_c = modulus elastis beton,

I_x = momen inersia penampang,

P = beban titik, dan

x = jarak P ke tumpuan.

Park dan Paulay (1975) dalam Septian (2010) mengemukakan hubungan beban dan lendutan akibat beban seperti pada Gambar 3.6.



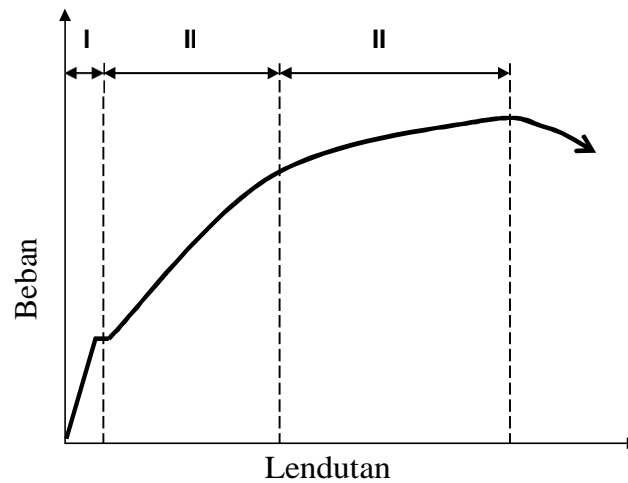
Gambar 3.6 Hubungan Beban dan Lendutan

(Sumber: Park dan Paulay, 1975)

Dari hubungan beban (P) dan lendutan (Δ) pada Gambar 3.7 didapat kekakuan balok (k) seperti pada persamaan 3.19.

$$k = \frac{P}{\Delta} \quad (3.19)$$

Hubungan beban dan lendutan balok beton bertulang pada dasarnya dapat diidealisasikan menjadi bentuk *trilinier* sebelum terjadi *rupture* seperti pada diagram Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Grafik Hubungan antara Beban-Lendutan pada Balok

(Sumber: Nawy, 1998)

1. Pada daerah I (taraf praretak) batang-batang strukturalnya bebas retak. Segmen praretak dari kurva beban-defleksi berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Tegangan tarik maksimum pada balok lebih kecil dari kekuatan tariknya akibat lentur atau lebih kecil dari *modulus of rupture* (f_r) beton.
2. Pada daerah II (taraf beban pasca retak) batang-batang struktural mengalami retak-retak terkontrol yang masih dapat diterima, baik distribusinya maupun lebarnya. Balok pada tumpuan sederhana retakan terjadi semakin lebar pada daerah lapangan, sedangkan pada tumpuan hanya terjadi retak minor yang tidak lebar. Apabila sudah terjadi retak lentur, maka kontribusi kekuatan tarik beton sudah dapat dikatakan tidak ada lagi. Ini berarti pula kekakuan lentur penampangnya telah berkurang, sehingga kurva beban-defleksi di daerah ini akan semakin landai dibanding pada taraf praretak. Momen inersia retak disebut I_{cr} .
3. Pada daerah III (taraf retak pasca *serviceability*) tegangan pada tulangan tarik sudah mencapai tegangan lelehnya. Diagram beban defleksi daerah III jauh lebih datar dibanding daerah sebelumnya. Ini diakibatkan oleh hilangnya kekuatan penampang karena retak yang cukup banyak dan lebar sepanjang bentang. Jika beban terus ditambah, maka regangan ϵ_s pada tulangan sisi yang tertarik akan terus bertambah melebihi regangan

lelehnya ε_y tanpa adanya tegangan tambahan. Balok yang tulangan tariknya telah leleh dikatakan telah runtuh secara struktural. Balok ini akan terus mengalami defleksi tanpa adanya penambahan beban dan retaknya semakin terbuka, sehingga garis netral terus mendekati tepi yang tertekan. Pada akhirnya terjadi keruntuhan tekan sekunder yang mengakibatkan kehancuran total pada beton daerah momen maksimum dan segera diikuti dengan terjadinya *rupture*.

3.6 Daktilitas

Menurut Kwan, Ho et al (2002), dalam desain balok beton bertulang terutama yang terbuat dari beton normal mutu tinggi dan merupakan struktur tahan gempa, kekuatan lentur dan daktilitasnya perlu dipertimbangkan. Meskipun biasanya lebih banyak perhatian diberikan kepada kekuatan lentur dan hanya dilakukan pengecekan sederhana yang dilakukan untuk memastikan tingkat minimum daktilitas lentur yang disediakan oleh balok. Hal ini membuktikan bahwa daktilitas tidaklah penting. Dari sudut pandang keamanan struktural, daktilitas setidaknya sama pentingnya dengan kekuatan. Sebuah daktilitas yang baik akan memberikan balok yang baik untuk bertahan ketika mendapat kelebihan beban ataupun ketika terjadi guncangan yang kuat seperti gempa bumi.

Pada level pembebanan tertentu elemen struktur beton sudah mulai retak-retak akibat adanya regangan tulangan tarik yang cukup besar. Pada intensitas beban tertentu, maka regangan tarik baja tulangan semakin besar, sehingga retak betonpun semakin besar. Agar elemen beton mampu menahan beban, maka beton tersebut harus mempunyai daktilitas yang baik.

Elemen struktur beton boleh relatif kecil dan berperilaku inelastik, tetapi beton tersebut harus daktil. Daktil itu sendiri adalah kemampuan dari suatu elemen beton untuk berdeformasi inelastik secara berkelanjutan akibat beban siklik tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti. Lawan dari daktil adalah getas, yang mana struktur yang getas kekuatannya turun secara tajam setelah mencapai kekuatan maksimum. Secara teoritik semakin tinggi tingkat daktilitasnya maka akan semakin baik dalam keberlanjutan menahan beban.

Pada dasarnya daktilitas dibagi atas beberapa jenis, hal ini terjadi karena adanya beberapa pengertian yang timbul. Pengertian daktilitas dapat ditinjau dari tiga jenis metode perhitungan. Daktilitas dapat ditinjau dari segi tegangan (*strain*), lengkungan (*curvature*), dan lendutan (*displacement*).

1. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Pengertian dasar dari daktilitas adalah kemampuan dari material/struktur untuk menahan tegangan plastis tanpa penurunan yang drastis dari tegangan. Daktilitas tegangan dapat diberikan pada Persamaan 3.20 berikut ini.

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \quad (3.20)$$

Dimana:

μ_{ϵ} = daktilitas regangan,

ϵ_u = regangan ultimit, dan

ϵ_y = regangan leleh.

Dengan ϵ_u adalah total regangan yang terjadi dan ϵ_y adalah regangan pada saat leleh. Daktilitas yang sangat berpengaruh pada struktur dapat tercapai pada panjang tertentu pada salah satu bagian dari struktur tersebut. Jika tegangan inelastik dibatasi dengan panjang yang sangat pendek, maka akan terjadi penambahan yang besar pada daktilitas tegangan. Daktilitas tengangan merupakan daktilitas yang dimiliki oleh material yang digunakan.

2. Daktilitas Lengkungan (*Curvature Ductility*)

Pada umumnya sumber yang paling berpengaruh dari lendutan struktur inelastis adalah rotasi pada sambungan plastis yang paling potensial, sehingga ini sangat berguna untuk menghubungkan rotasi per unit panjang (*curvature*) dengan moment bending ujung. Daktilitas lengkungan maksimum dapat ditunjukkan pada Persamaan 3.21 berikut,

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (3.21)$$

Dimana:

μ_φ = daktilitas lengkungan,

φ_u = kelengkungan ultimit, dan

φ_y = kelengkungan leleh.

3. Daktilitas Simpangan (*Displacement Ductility*)

Daktilitas simpangan adalah rasio antara simpangan ultimit dengan simpangan saat luluh pertama, sehingga daktilitas simpangan dapat dirumuskan dengan persamaan 3.22 berikut ini.

$$\mu_\delta = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (3.22)$$

Dimana:

μ_δ = daktilitas simpangan,

δ_u = simpangan ultimit, dan

δ_y = simpangan leleh.

Secara umum daktilitas dibagi menjadi 3 level, yaitu elastik penuh, daktilitas terbatas dan daktilitas penuh dengan nilai nilai daktilitas dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2 Tingkatan Daktilitas

No	Tingkat Daktilitas	Nilai Daktilitas SNI-1726-2002	Faktor Reduksi SNI-02,2002
1	Elastik penuh	1,0	R = 1,6
2	Daktilitas terbatas	1,5	R = 2,4
		2,0	R = 3,2
		2,5	R = 4,0
		3,0	R = 4,8
		3,5	R = 5,6
		4,0	R = 6,4
		4,5	R = 7,2
3	Daktilitas penuh	5,0	R = 8,0
		5,3	R = 8,5

Pada penelitian kali ini hanya dicari daktilitas lengkungan dan daktilitas simpangan saja, karena dalam eksperimen tidak menggunakan alat penghitung regangan (*strain gauge*) sehingga daktilitas regangan tidak bisa dicari.

3.7 Kerusakan Balok

3.7.1 Jenis Kerusakan

Jenis keruntuhan yang terjadi pada balok tergantung pada sifat-sifat penampang balok dan dapat dibedakan menjadi 3 jenis sebagai berikut ini.

1. Keruntuhan tekan (*over reinforced concrete*).

Pada keruntuhan tekan ini, beton hancur sebelum baja tulangan leleh. Jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan besar, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan belum mencapai regangan lelehnya sedangkan beton sudah mencapai regangan maksimumnya yaitu 0.003.

Balok dengan kondisi keruntuhan tekan ini bersifat getas, sehingga pada saat beton mulai hancur baja tulangannya masih kuat, sehingga lendutan pada balok relatif tetap. Tetapi jika balok ditambahkan beban yang besar, maka baja tulangan akan meleleh dan dapat menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba, tanpa adanya peringatan atau tanda-tanda tentang lendutan yang membesar pada balok.

2. Keruntuhan seimbang (*balance*).

Pada penampang balok dengan keruntuhan seimbang, keadaan beton hancur dan baja tulangan leleh terjadi bersamaan, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum baja tulangan dan beton hancur secara bersamaan. Hal ini berarti regangan tekan beton telah mencapai regangan maksimum yaitu 0.03 dan regangan tarik baja tulangan telah mencapai leleh pada saat yang sama, atau $\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$ dan $\epsilon_s = \epsilon_y$ terjadi pada saat yang sama.

Karena beton dan baja tulangan mengalami kerusakan pada saat yang sama, maka kekuatan beton dan baja tulangan dapat dimanfaatkan sepenuhnya, sehingga penggunaan material beton dan baja tulangan tersebut menjadi lebih efisien. Sistem perencanaan beton bertulang yang seperti ini merupakan sistem perencanaan beton bertulang yang ideal, tetapi sulit dipraktikan di lapangan.

3. Keruntuhan tarik (*under reinforced concrete*).

Pada keadaan penampang beton dengan kondisi keruntuhan tarik, baja tulangan sudah leleh sebelum beton hancur. Jenis keruntuhan seperti ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan kecil, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum baja tulangan sudah mencapai regangan lelehnya sedangkan beton belum hancur (belum mencapai regangan maksimumnya yaitu sebesar 0.003).

Karena kerusakan terjadi pada baja tulangan yang menahan beban tarik lebih dulu dan baja tulangan bersifat liat, maka keruntuhan beton seperti ini kadang disebut dengan keruntuhan liat. Keruntuhan jenis ini memberi keuntungan karena pada saat baja mulai leleh betonnya masih kuat (belum hancur), sehingga dapat terjadi lendutan pada balok. Jika balok ditambahkan beban yang lebih besar maka lendutan pada balok semakin besar dan pada akhirnya akan runtuh. Lendutan yang ditimbulkan oleh balok ini merupakan peringatan sebelum runtuh.

3.7.2 Retak pada Balok

Retak terjadi pada umumnya menunjukkan bahwa lebar celah retak sebanding dengan besarnya tegangan yang terjadi pada batang tulangan baja tarik dan beton pada ketebalan tertentu yang menyelimuti batang baja tersebut. Meskipun retak tidak dapat dicegah, namun ukurannya dapat dibatasi dengan cara menyebar atau mendistribusikan tulangan. Apabila struktur dibebani suatu beban yang menimbulkan momen lentur masih lebih kecil dari momen retak maka tegangan yang timbul masih lebih kecil dari *modulus of rupture* beton seperti pada Persamaan 3.23.

$$f_r = 0,70\sqrt{f'_c} \quad (3.23)$$

Apabila beban ditambah sehingga tegangan tarik mencapai f_r , maka retak kecil akan terjadi. Apabila tegangan tarik sudah lebih besar dari f_r , maka penampang akan retak.

Ada tiga kasus yang dipertimbangkan dalam masalah retak di antaranya sebagai berikut ini.

1. Ketika tegangan tarik $f_{kap} < f_r$, maka penampang dipertimbangkan untuk

tidak terjadi retak seperti pada Persamaan 3.24.

$$I_y = 1/12b.h^3 \quad (3.24)$$

2. Ketika tegangan tarik $f_{kap} = f_r$, maka retak mulai timbul. Momen yang timbul disebut momen retak seperti pada Persamaan 3.25.

$$M_{cr} = \frac{f_r I_y}{y} \quad (3.25)$$

dengan:

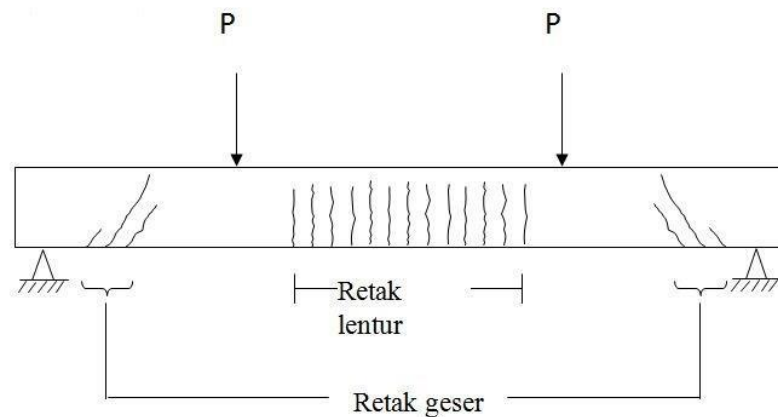
$$y = h/2$$

3. Apabila momen yang bekerja sudah lebih besar dari momen retak, maka retak penampang sudah meluas. Untuk perhitungan digunakan momen inersia retak (I_{cr}), transformasi balok beton yang tertekan dan transformasi dari tulangnya A_s .

Pada dasarnya ada tiga jenis keretakan pada balok (Gilbert, 1990), di antaranya sebagai berikut.

1. Retak lentur (*flexural crack*), terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok.
2. Retak geser (*shear crack*), terjadi pada bagian balok yang sebelumnya terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.
3. Retak geser pada bagian balok (*web shear crack*), yaitu keretakan miring yang terjadi pada daerah garis netral penampang dengan gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil.

Jenis-jenis retak pada balok tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Retak Lentur dan Geser pada Balok Bertulang

(Sumber: Gilbert, 1990)

3.8 Analisis Penampang Balok Menggunakan Response 2000

Program Response-2000 merupakan program untuk menganalisis sifat-sifat balok dan kolom hasil yang didapat adalah momen, kelengkungan (*curvature*), lendutan (defleksi), tegangan geser (*shear strain*), gaya geser (*shear force*), beban aksial (*aksial load*) dan pola retak (*crack*). Menurut Amir (2010) Program Response-2000 yang dikembangkan oleh Benz dan Vecchio merupakan salah satu program yang dengan mudah dapat digunakan untuk menganalisis balok yang dibebani suatu gaya tertentu dengan kombinasi beban aksial, momen dan geser. Dalam penelitian yang dilakukan adalah pengujian lentur dan geser terhadap balok tampang persegi di laboratorium dan sebagai pembandingnya digunakan program Response-2000. Langkah-langkah analisis menggunakan program Response-2000 sebagai berikut ini.

1. *Klik* program Response -2000.
2. Kemudian *Klik* menu *Define* → *Quick define 1* yaitu bertujuan untuk memberi nama penelitian dan juga memilih mutu baja dan mutu beton. *Klik next*.
3. *Define* → *Material Properties* menu ini untuk memasukkan mutu material yang akan digunakan yaitu mutu beton (f_c') dan mutu baja (f_y).
4. *Define* → *Concrete Section* dalam menu ini pengguna bisa menentukan bentuk balok yang akan dianalisis dan memasukkan dimensinya.

5. *Define* → *Transverse Reinforcement* untuk memasukan diameter tulangan sengkang, jarak sengkang dan selimut beton, dengan langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - a. *Name* diisi dengan nama sengkang.
 - b. *Stirrup spacing* memasukkan angka jarak sengkang.
 - c. *Bar Area* memasukkan luasan tulangan sengkang.
 - d. *Dist. to top* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang paling atas.
 - e. *Dist, to bottom* memasukan angka, jarak dari ujung beton bawah sampai ke as tulangan sengkang bawah.
 - f. *Bar Type* memasukan jenis sengkang yang akan digunakan, karena jenis sengkang tertutup maka dimasukkan closed stirrup.
 - g. *Rebar type* diisi long.
6. *Define* → *Longitudinal Reinforcement* menu ini berfungsi untuk memasukan tulangan pokok. Langkah-langkah sebagai berikut ini.
 - a. *Name* memberi nama tulangan tersebut tulangan tarik maupun tulangan tekan.
 - b. *Number of bar menu* untuk memasukkan jumlah tulangan.
 - c. *Bar area* untuk memasukan luas tulangan per satu batang.
 - d. *Dist, from bottom* memasukan angka, pada jarak berapakah tulangan tersebut dipasang, yaitu dihitung dari ujung balok paling bawah. Kemudian klik *add*, karena balok benda uji tulangan rangkap maka harus membuat dua jenis tulangan pokok dengan memasukan angka pada menu *Dist, from bottom* yang berbeda.
7. *Load* → *load menu* ini untuk memasukan jenis pembebanan dan besar beban yang akan dimasukan ke benda uji, yaitu berupa beban aksial, momen dan shear.
8. *Load* → *full member properties menu* untuk memasukan jenis pembebanan, jarak beban terpusat dan jenis tumpuan. karena kita hanya memakai beban merata dan tumpuan sendi rol maka kita hanya mengisi pada *length subjected*

to shear dengan nilai setengah bentang benda uji, dan memasukan jenis tumpuan pada *left side properties* kita pilih *support on bottom*.

9. *Solve* → *section response* untuk melihat respon balok dan deformasi benda uji hasil dari hasil analisis program Response-2000.
10. *Solve* → *member response menu* ini untuk melihat hasil analisis dari data benda uji yang telah di input ke dalam langkah-langkah diatas yaitu berupa grafik *curvature distribution, deflection, shear strain distribution* dan *load* → *max deflection*.
11. Untuk mengambil data hasil analisis kita bisa mengcopy dengan cara *klik* dua kali pada grafik, maka akan muncul data dan kemudian *klik copy*.