

KAJIAN EKSPERIMENTAL PERILAKU BALOK BETON TULANGAN TUNGGAL BERDASARKAN TIPE KERUNTUHAN BALOK

Oscar Fithrah Nur¹

ABSTRAK

Keruntuhan yang terjadi pada balok tulangan tunggal dipengaruhi oleh dimensi balok dan rasio tulangan balok. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui besarnya perpindahan dan beban maksimum yang dapat ditahan oleh balok beton bertulang dan perilaku retak balok akibat lentur. Model balok yang digunakan adalah balok beton bertulang tunggal dengan tumpuan sederhana dengan ukuran balok $50 \times 75 \times 550$ mm dan $50 \times 100 \times 550$ mm. Penulangan balok dilakukan dengan tiga tipe keruntuhan yaitu keruntuhan tarik, keruntuhan seimbang dan keruntuhan tekan. Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai diperoleh keadaan dimana tegangan tarik beton dilampaui (terjadi retak) sampai balok mengalami keruntuhan. Pada setiap tahap pembebanan dibaca dan dicatat besar lendutan yang terjadi pada balok.

Kejadian retak yang dihasilkan dalam penelitian ini menunjukkan bahwa pada balok dengan tipe keruntuhan tarik pada umumnya keruntuhan diawali dengan retak dari daerah dibawah beban kemudian berlanjut pada daerah tengah bentang. Retak balok terjadi pada daerah momen maksimum serta merambat ke arah vertikal (arah tegak lurus sumbu batang) seiring peningkatan beban, balok dengan tipe keruntuhan tekan dan seimbang pada umumnya keruntuhan terjadi secara tiba-tiba, retak yang terjadi cenderung membentuk sudut 45° atau lebih terhadap sumbu balok, bersamaan dengan meningkatnya beban aksial yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, serta terjadi retak-retak baru disepanjang badan balok.

Kata Kunci : beban dan perpindahan, balok beton tulangan tunggal, pola retak, tipe keruntuhan.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan elemen struktur bangunan yang telah dikenal dan banyak dimanfaatkan sampai saat ini. Beton banyak mengalami perkembangan, baik dalam pembuatan campuran maupun dalam pelaksanaan konstruksinya. Perilaku keruntuhan yang dominan pada struktur balok pada umumnya adalah lentur, tentu saja itu akan terjadi jika rasio bentang (L) dan tinggi balok (h) cukup besar. Jika rasio L/h kecil maka digolongkan sebagai balok tinggi (*deep beam*), keruntuhan geser dominan. Berdasarkan pada kemungkinan regangan yang terjadi pada tulangan baja yang tertarik, keruntuhan pada penampang balok dapat dibagi menjadi keruntuhan tarik (*under reinforced*), keruntuhan tekan (*over reinforced*), keruntuhan seimbang (*balance reinforced*).

Struktur beton bertulang didesain untuk memenuhi kriteria keamanan (*safety*) dan layak pakai (*serviceability*). Untuk memenuhi kriteria tersebut maka besarnya retak struktur pada kondisi beban kerja harus diestimasi dan struktur harus didisain mempunyai suatu angka keamanan terhadap beban runtuh. Untuk mengevaluasi beban runtuh dari struktur balok beton bertulang maka penggambaran kurva beban-lendutan selama proses pembebanan struktur tersebut adalah mutlak.

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Andalas, e-mail: oscar@ft.unand.ac.id

Kurva tersebut juga dapat digunakan untuk menyelidiki perilaku keruntuhan struktur, apakah bersifat daktail (mengalami deformasi besar sebelum runtuh) atau bersifat tiba-tiba (non daktail).

1.2 Tujuan dan Manfaat

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara beban dan perpindahan yang terjadi pada balok beton bertulang berdasarkan tipe keruntuhan dan juga untuk mengetahui perilaku retak yang terjadi pada tiap balok berdasarkan tipe keruntuhan.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat untuk menambah pemahaman dan dapat mengetahui secara eksperimental tipe keruntuhan pada balok beton bertulang.

1.3 Batasan Masalah

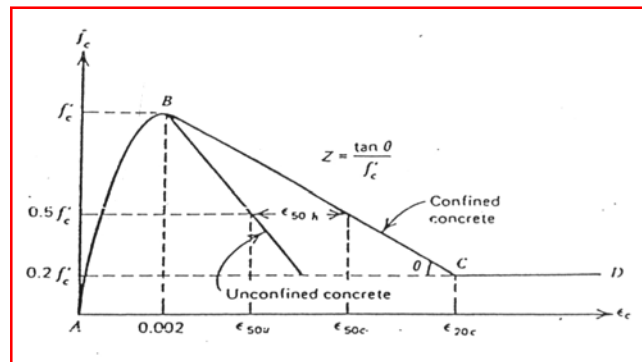
Untuk lebih memfokuskan permasalahan berdasarkan tujuan tadi, maka pada penelitian ini terdapat batasan-batasan masalah sebagai berikut :

- Benda uji yang diteliti adalah balok beton bertulang dengan penulangan tunggal, dengan ukuran 50 mm × 75 mm × 550 mm dan 50 mm × 100 mm × 550 mm.
- Percobaan dilakukan pada balok beton, dengan beberapa bentuk variasi tipe keruntuhan.
- Pembebanan dilakukan secara *pseudo static* sampai tegangan tarik beton dilampaui (terjadi retak) hingga balok mengalami keruntuhan.

2. DASAR TEORI

2.1 Beton

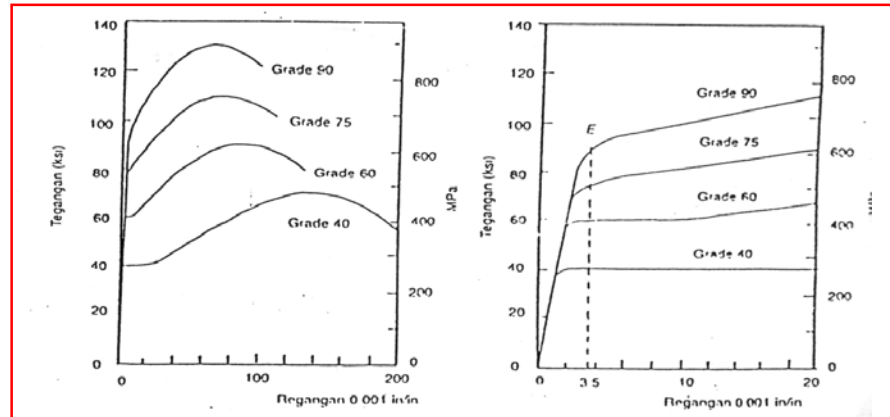
Beton adalah suatu material buatan manusia yang didapat dari campuran beberapa material dasar, yaitu semen, agregat halus (pasir atau kerikil halus yang lolos saringan #4), agregat kasar (batu kerikil atau batu pecah), air dan zat *additive* (tambahan) bila diperlukan. Beton harus dicampur dan diaduk dengan benar dan merata agar dapat diperoleh mutu beton yang baik. Hubungan antara tegangan dan regangan beton, dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Hubungan Tegangan – Regangan Beton (Park & Paulay, 1975)

2.2 Baja Tulangan

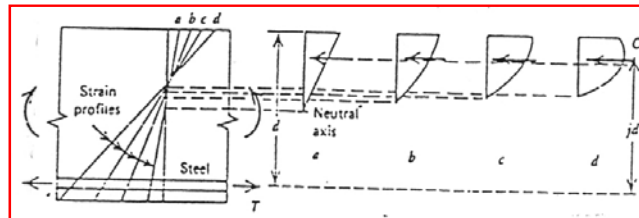
Dibandingkan dengan beton, tulangan merupakan material berkekuatan tinggi. Baja tulangan dapat memikul tarik maupun tekan, kekuatan lelehnya kurang lebih sepuluh kali dari kekuatan tekan struktur beton yang umum, atau seratus kali dari kekuatan tariknya. Sebaliknya baja merupakan material yang mahal harganya bila dibandingkan dengan beton. Hubungan tegangan dan regangan pada baja tulangan secara umum dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2. Hubungan Tegangan-Regangan pada Baja (Park & Paulay, 1975)

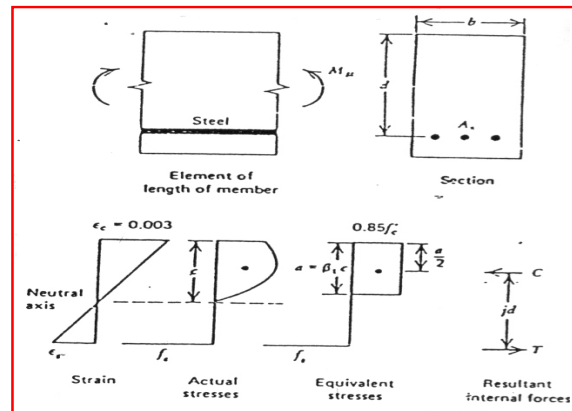
2.3 Analisa dan Disain Penampang Balok Beton Bertulang

Balok adalah anggota struktur yang paling utama mendukung beban luar serta berat sendirinya oleh momen dan gaya geser. Dua hal utama yang dialami oleh suatu balok adalah kondisi tekan dan tarik, yang antara lain karena adanya pengaruh lentur ataupun gaya lateral. Dari data percobaan diketahui bahwa kuat tarik beton sangatlah kecil, kira-kira 10% dibandingkan kekuatannya. Bahkan dalam problema lentur, kuat tarik ini sering tidak diperhitungkan, sehingga timbul usaha untuk memasang baja tulangan pada bagian tarik guna mengatasi kelemahan beton tersebut, menghasilkan beton bertulang. Hubungan tegangan-regangan pada penampang balok beton bertulang dapat dimodelkan seperti pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Distribusi Tegangan-Regangan pada Daerah Tekan Beton

Gaya-gaya pada balok bertulang tunggal akibat lentur murni dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Tulangan Tunggal pada Balok Beton Bertulang pada Kondisi Ultimit

Resultan tegangan tarik baja, T:

$$T = A_s f_s \quad \dots\dots\dots (1.a)$$

dimana A_s adalah luas penampang tulangan (mm^2) dan f_s adalah tegangan baja (MPa).

Resultan tegangan tekan beton, C,

$$C = 0.85 f_c' a b \quad \dots\dots\dots (1.b)$$

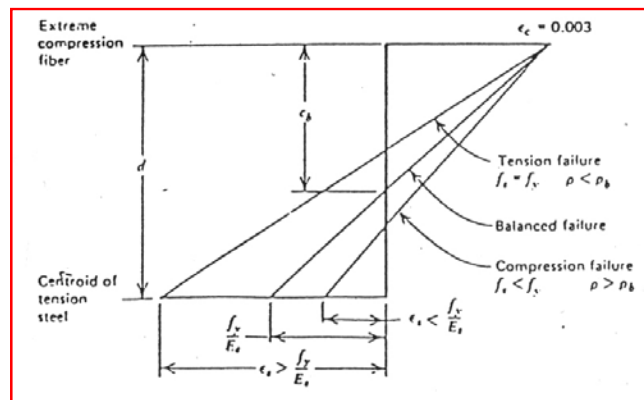
dimana a adalah tinggi dari tegangan balok segi empat (mm), b adalah lebar balok (mm) dan f_c' adalah tegangan karakteristik beton (MPa).

Dengan menerapkan persamaan keseimbangan, diperoleh momen batas (ultimate) :

$$M_u = T \times jd = C \times jd \quad \dots\dots\dots (2)$$

dimana d adalah tinggi penampang diukur dari tulangan baja (mm), jd adalah tinggi dari titik berat gaya C terhadap posisi tulangan baja.

Dengan menetapkan harga regangan beton 0,003 dalam kondisi *ultimate*, ada tiga kemungkinan regangan yang terjadi pada daerah tulangan seperti yang ditunjukkan **Gambar 5**.



Gambar 5. Regangan Baja pada Keadaan Batas Lentur

Kemungkinan 1 : Keruntuhan Tarik (*under-reinforced*)

Keruntuhan tarik terjadi bila regangan yang terjadi pada daerah baja tulangan lebih besar dari regangan lelehnya sehingga diperoleh persamaan keseimbangan :

$$\begin{aligned} C &= T \\ 0.85 f_c' a b &= A_s f_y \\ a &= \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

Dengan demikian :

$$\begin{aligned} M_u &= A_s f_y (d - \frac{1}{2} a) \\ M_u &= A_s f_y \left(d - \frac{1}{2} \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b} \right) \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$M_u = \rho b d^2 f_y \left(1 - \frac{0.59 \rho f_y}{f_c'} \right) \quad \dots\dots\dots (5)$$

dimana $\rho = \frac{A_s}{b d}$

Kemungkinan 2 : Keruntuhan Tekan (*over-reinforced*)

Keruntuhan tekan terjadi bila regangan yang terjadi pada daerah baja tulangan lebih kecil dari regangan leleh baja, sehingga diperoleh persamaan keseimbangan :

$$\varepsilon_s = 0.003 \left(\frac{d - c}{c} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$f_s = \varepsilon_s E_s = 0.003 \left(\frac{d - c}{c} \right) E_s \dots\dots\dots (7.a)$$

Karena $a = \beta_1 c$, maka :

$$f_s = 0.003 \left(\frac{\beta_1 d - a}{a} \right) E_s \dots\dots\dots (7.b)$$

Persamaan keseimbangan :

$$\begin{aligned} C &= T \\ 0.85 f_c' a b &= A_s f_y \\ 0.85 f_c' a b &= 0.003 \left(\frac{\beta_1 d - a}{a} \right) E_s A_s \\ \left(\frac{0.85 f_c'}{0.003 E_s \rho} \right) a^2 + d a - \beta_1 d^2 &= 0 \end{aligned}$$

Dari kedua harga diatas diambil a yang berharga terkecil. Selanjutnya diperoleh :

$$M_u = A_s f_y (d - \frac{1}{2} a) \dots\dots\dots (8)$$

Kemungkinan 3 : Keruntuhan Seimbang (*balanced reinforced*)

Keruntuhan tekan terjadi bila regangan baja tulangan sama besar dengan regangan lelehnya, dimana $\varepsilon_s = f_y / E_s$. Dengan demikian :

$$\frac{f_y E_s}{0.003} = \frac{d - c_b}{c_b} \dots\dots\dots (9)$$

dimana c_b adalah tinggi garis netral saat kondisi seimbang.

$$c_b = \left(\frac{0.003 E_s}{0.003 E_s - f_y} \right) d \dots\dots\dots (10)$$

$$a_b = \left(\frac{0.003 E_s}{0.003 E_s - f_y} \right) \beta_1 d \dots\dots\dots (11)$$

Dari persamaan keseimbangan :

$$\begin{aligned} C &= T \\ 0.85 f_c' a_b b &= A_s f_y \\ 0.85 f_c' a_b b &= \rho_b b d f_y \end{aligned} \dots\dots\dots (12)$$

Karena :

$$\rho_b = \frac{A_s}{b d} \dots\dots\dots (13)$$

Dalam keadaan keruntuhan seimbang :

$$\rho_b = \frac{0.85 f_c' a_b}{f_y d} \dots\dots\dots (14)$$

Dengan mensubtitusikan harga a_b , diperoleh :

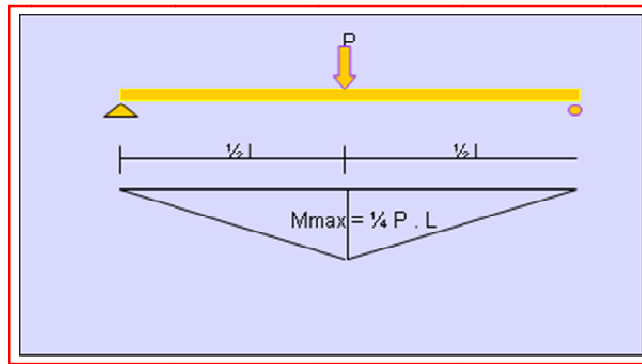
$$\rho_b = \left(\frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y} \right) \left(\frac{0.003 E_s}{0.003 E_s + f_y} \right) \dots\dots\dots (15)$$

Dengan harga $E_s = 2 \times 10^5$ MPa, diperoleh :

$$\rho_b = \left(\frac{0.85 f_c' \beta_1}{f_y} \right) \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) \quad \dots\dots\dots (16)$$

2.4 Lentur pada Balok

Beban-beban yang bekerja pada struktur, baik yang berupa beban gravitasi (berarah vertikal) maupun beban-beban lain, seperti beban angin (dapat berarah horizontal), atau juga beban karena susut dan beban karena perubahan temperatur, menyebabkan adanya lentur dan deformasi pada elemen struktur. Lentur yang terjadi pada balok merupakan akibat adanya regangan yang timbul karena adanya beban luar yang bekerja pada balok tersebut.



Gambar 6. Asumsi Lentur Murni

$$\delta_{max} = \frac{P L^3}{48 EI} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$M = \frac{1}{4} PL \quad \dots\dots\dots (18)$$

dimana : δ_{max} adalah lendutan balok (mm), L adalah panjang bentang balok (mm), E adalah modulus elastisitas balok (MPa), P adalah beban (N), I adalah momen inersia balok (mm⁴) dan M adalah momen maksimum balok (N-mm).

Apabila bebannya bertambah, maka pada balok terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya (atau bertambahnya) retak lentur disepanjang bentang balok. Bila bebannya semakin bertambah, pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan elemen struktur, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas elemen. Taraf pembebanan demikian disebut *keadaan limit dari keruntuhan pada lentur*.

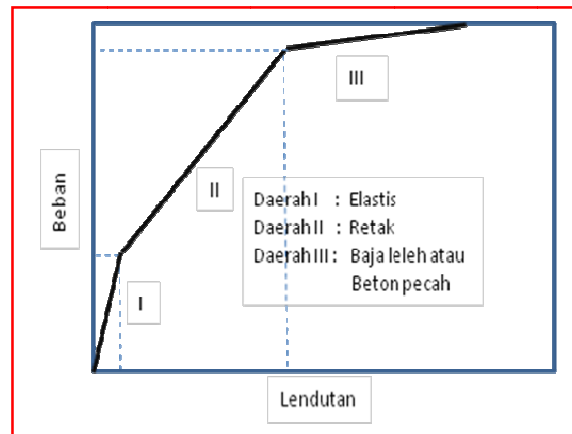
Tegangan-tegangan lentur merupakan hasil dari momen lentur akibat beban luar. Tegangan ini hampir selalu menentukan dimensi geometris penampang beton bertulang. Proses desain yang mencakup pemilihan dan analisis penampang biasanya dimulai dengan pemenuhan persyaratan terhadap lentur, kecuali untuk komponen struktur yang khusus seperti pondasi. Setelah itu faktor-faktor lain seperti kapasitas geser, defleksi, retak dan panjang penyaluran tulangan dianalisis sampai memenuhi persyaratan yang ditentukan.

2.5 Perilaku Keruntuhan Balok Beton Bertulang

Beton bertulang terdiri dari dua material yang berbeda sifatnya, yaitu beton dan baja tulangan. Jika baja dianggap sebagai material homogen yang propertinya terdefinisi jelas, maka sebaliknya

beton merupakan material yang heterogen. Beton terdiri dari semen, mortar dan agregat batuan, yang properti mekaniknya bervariasi dan tidak terdefinisi dengan pasti. Hanya untuk memudahkan dalam analisa perhitungan, maka umumnya beton dianggap sebagai material homogen.

Perilaku keruntuhan yang dominan pada struktur balok pada umumnya adalah keruntuhan lentur, tentu saja itu akan terjadi jika rasio bentang (L) dan tinggi balok (h) cukup besar. Jika rasio L/h kecil, maka digolongkan sebagai balok tinggi (*deep beam*), maka keruntuhan geser yang dominan. Apabila perilaku keruntuhan balok beton bertulang diatas dua tumpuan dapat digambarkan dalam bentuk kurva beban-lendutan, maka bentuk kurva tersebut adalah sebagai berikut :



Gambar 7. Perilaku Beban – Lendutan Struktur Beton

Hubungan serupa juga diperlihatkan pada struktur beton bertulang jenis lain khususnya yang didominasi perilaku lentur. Perilaku keruntuhan dapat dibagi dalam tiga tahapan, yaitu : elastis penuh (belum retak), tahapan mulai terjadi retak-retak dan tahapan plastis (leleh pada baja atau beton pecah). Respons non-linier disebabkan dua hal utama, yaitu keretakan beton di daerah tarik dan tulangan mengalami leleh atau beton pecah (*crushing*) pada daerah tekan. Selain itu juga disebabkan perilaku lain yang terkait, misalnya *bond-slip* antara tulangan baja dan beton disekitarnya, aksi penguncian agregat pada daerah retak dan akhirnya aksi angkur (*dowel action*) dari tulangan yang melintas di sekitar retak. Perilaku sebagai fungsi waktu, misalnya *creep*, *shrinkage* dan variasi temperatur juga menyumbang perilaku non-linier. Hubungan tegangan-regangan beton tidak hanya bersifat non-linier, tetapi juga berbeda antara beban tekan dan tarik, sifat mekaniknya tergantung dari umur waktu dibebani dan kondisi lingkungan (suhu dan kelembaban).

Untuk mencari beban ultimit maka kurva beban-lendutan digunakan untuk memprediksi yaitu pada bagian kurva yang mendekati horizontal. Keruntuhan lentur dimulai dari tulangan baja yang mengalami leleh. Pada kondisi tersebut, momen nominal yang menyebabkan keruntuhan lentur, dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$M_n = A_s f_y (d - \frac{1}{2} a)$$

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85 f_c' b}$$

dengan M_n adalah momen nominal balok (N mm), A_s adalah luas tulangan (mm^2), f_y adalah tegangan leleh baja (MPa), f_c' adalah kuat tekan beton (MPa), b adalah lebar balok (mm) dan d adalah tinggi balok sebenarnya (mm).

Dari momen nominal yang diperoleh, berdasarkan panjang bentang balok (L), maka dapat dihitung beban batasnya :

$$P_u = 4 (M_u / L) \quad \dots\dots\dots (19)$$

dengan P_u adalah beban ultimate (N), M_u adalah momen ultimate (N mm) dan L adalah panjang span balok (mm).

Sedangkan gaya geser pada balok tanpa sengkang sepenuhnya dipikul oleh beton. Gaya geser nominal yang dapat disumbangkan beton adalah :

$$v_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_c'} b_w d \quad \dots\dots\dots (20)$$

dengan v_c adalah kuat geser beton (N), f_c' adalah kuat tekan beton (MPa), b_w adalah lebar badan balok (mm) dan d adalah tinggi balok sebenarnya (mm).

Sifat keruntuhan balok beton tanpa tulangan sengkang tergantung dari rasio bentang (L) dan tinggi balok (h). Untuk rasio yang kecil atau kategori balok tinggi maka keruntuhan geser akan mendominasi balok tersebut. Keruntuhan geser secara fisik ditandai dengan timbulnya retak arah diagonal akibat adanya *diagonal tension*. Sedangkan perilaku lentur bersifat keruntuhan daktail. Balok runtuh karena terjadi *crushing* (pecah) akibat tekan dan mengalami deformasi dengan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu. Balok tanpa sengkang dengan keruntuhan geser, kekuatannya sangat tergantung dari kuat tarik material beton yang digunakan. Semakin besar kuat tariknya maka beban runtuh yang diperlukan untuk keruntuhan geser semakin besar.

Untuk mengevaluasi besarnya beban runtuh dari struktur balok beton bertulang maka penggambaran kurva beban-lendutan selama proses pembebanan struktur tersebut adalah mutlak. Kurva tersebut juga dapat digunakan menyelidiki perilaku keruntuhan struktur, apakah daktail atau tidak, suatu sifat yang penting yang dapat meningkatkan keamanan dari struktur tersebut.

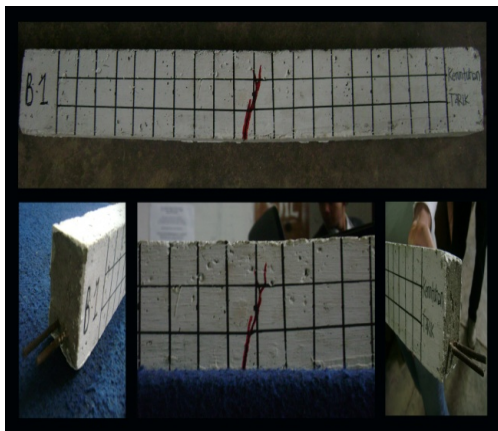
3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

3.1 Kuat Lentur Balok

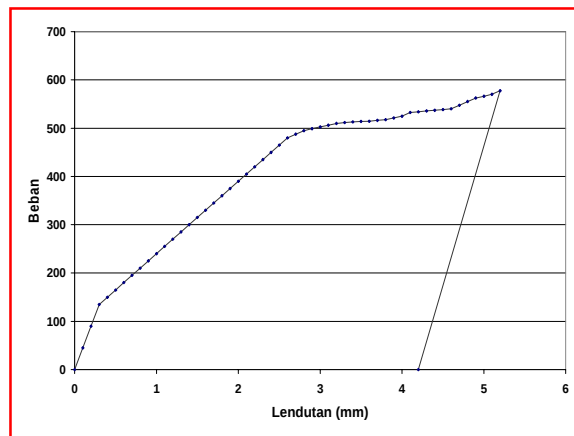
Pada pengujian balok beton, selain diperoleh beban maksimal yang dapat dipikul balok, dapat juga dilihat pola retak yang terjadi pada tiap benda uji. Retak yang terjadi merupakan retak lentur dan retak geser diagonal yang terjadi pada kedua sisi balok dimana arah beban aksial bekerja. Penambahan retak untuk setiap peningkatan beban tidak selalu merupakan kelanjutan dari retak sebelumnya. Peningkatan beban dapat menimbulkan retak baru di tempat lain, tetapi ada juga yang memperlebar atau memperpanjang retak sebelumnya.

3.1.1 Benda Uji B1

(Dimensi Balok 50 mm × 75 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 2 Ø 6 mm)



Gambar 8. Benda Uji Balok Beton B1

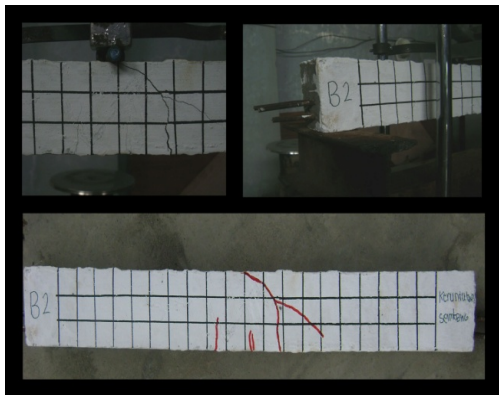


Gambar 9. Grafik Beban – Lendutan Balok B1

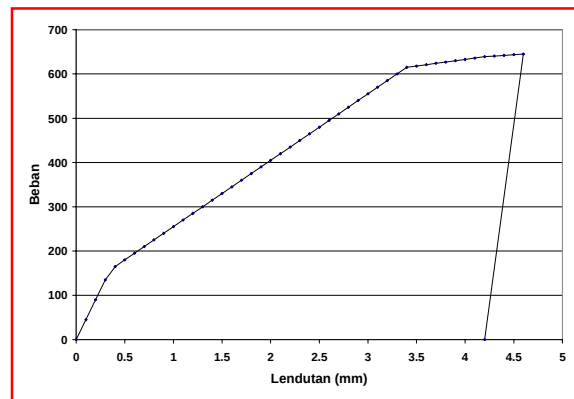
- a). Retak Awal
 - Retak pertama pada benda uji balok B1 merupakan retak lentur yang terjadi pada kedua sisi balok dimana arah beban bekerja. Retak ini berupa retak lentur karena arah retak yang tegak lurus sumbu balok. Retak lentur ini ditemukan pada daerah tengah bentang.
 - Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban sebesar 13,50 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 0,30 mm.
- b). Penyebaran Pola Retak
 - Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji B1, retak dimulai di bawah balok dekat dengan beban. Dengan meningkatnya beban yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, tetapi tidak terjadi retak-retak baru disepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
 - Balok runtuh dalam pola lentur yang ditandai dengan membesarnya retak lentur pada bagian tarik balok dibawah daerah beban kerja.
 - Balok runtuh lentur setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 5,20 mm. Lebar retak lentur yang teramati sebesar 1.0 mm.
 - Kerusakan yang dapat dilihat dari pola retak adalah akibat beban lentur dan kerusakan terjadi pada daerah tengah bentang. Benda uji B1 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tarik dan rasio L/h yang cukup besar, jadi pada waktu pengujian terjadi keruntuhan yang bersifat duktail, yaitu mengalami deformasi yang cukup besar dan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu (**Gambar 8**).

3.1.2 Benda Uji B2

(Dimensi Balok 50 mm × 75 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 4 Ø 6 mm)



Gambar 10. Benda Uji Balok Beton B2



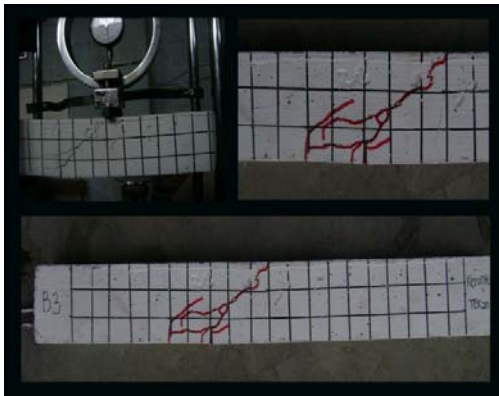
Gambar 11. Grafik Beban – Lendutan Balok B2

- a). Retak Awal
 - Retak ini berupa retak lentur karena arah retak yang tegak lurus sumbu balok. Retak lentur ini ditemukan pada daerah tengah bentang.
 - Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban sebesar 16,50 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 0,40 mm.
- b). Penyebaran Pola Retak
 - Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji B2, retak dimulai dibawah balok dekat dengan beban. Dengan meningkatnya beban aksial yang diberikan pada balok, retak bertambah panjang dan lebar serta terjadi retak-retak baru disepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
 - Balok runtuh dalam pola lentur yang ditandai dengan membesarnya retak lentur pada bagian tarik balok dibawah daerah beban kerja.

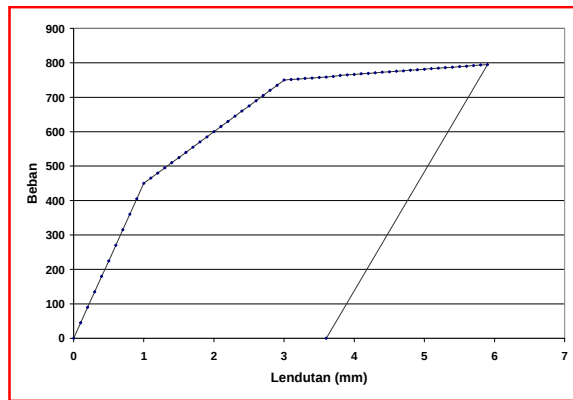
- Balok runtuh lentur setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 4,60 mm. Lebar retak lentur yang teramati sebesar 1,50 mm.
- Kerusakan yang dapat dilihat dari pola retak adalah akibat beban lentur dan kerusakan terjadi pada daerah tengah bentang. Benda uji B2 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan seimbang dan rasio L/h yang cukup besar, jadi pada waktu pengujian terjadi keruntuhan yang bersifat duktail, yaitu mengalami deformasi dan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu (**Gambar 10**).

3.1.3 Benda Uji B3

(Dimensi Balok 50 mm × 75 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 5 Ø 6 mm)



Gambar 12. Benda Uji Balok Beton B3



Gambar 13. Grafik Beban – Lendutan Balok B3

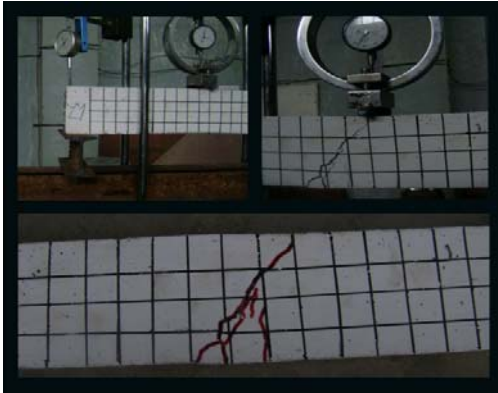
- a). Retak Awal
 - Retak ini berupa retak miring atau geser karena arah retak yang tidak tegak lurus sumbu balok. Arah retak bergerak miring ke atas badan balok dan berakhir mendekati beban yang bekerja.
 - Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban aksial sebesar 45.0 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 1.0 mm.
- b). Penyebaran Pola Retak
 - Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji B3, retak yang terjadi cenderung membentuk sudut 45° atau lebih terhadap sumbu balok. Bersamaan dengan meningkatnya beban aksial yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, tetapi tidak terjadi retak-retak baru disepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
 - Balok runtuh setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 4,90 mm. Lebar retak yang teramati sebesar 2,0 mm.
 - Kerusakan yang dapat dilihat dari pola retak adalah akibat beban geser ditandai dengan adanya retak diagonal. Benda uji B3 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tekan. Pada waktu pengujian tidak terjadi keruntuhan tiba-tiba, tetapi terjadi keruntuhan duktail dengan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu dikarenakan rasio L/h yang cukup besar (**Gambar 12**).

3.1.4 Benda Uji C1

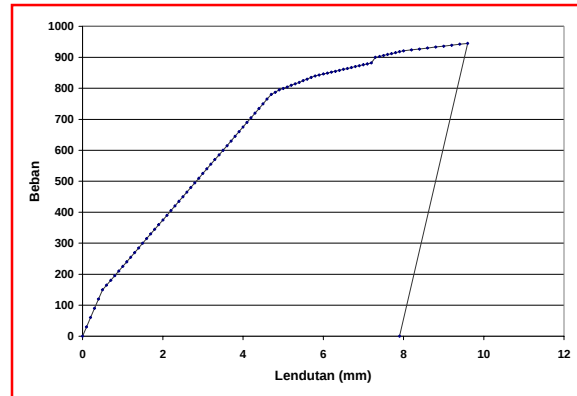
(Dimensi Balok 50 mm × 100 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 2 Ø 6 mm)

- a). Retak Awal
 - Retak pertama pada balok C1 merupakan retak lentur yang terjadi pada kedua sisi balok dimana arah beban bekerja. Retak lentur ini ditemukan pada daerah tengah bentang.

- Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban aksial sebesar 15,0 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 0,50 mm.



Gambar 14. Benda Uji Balok Beton C1

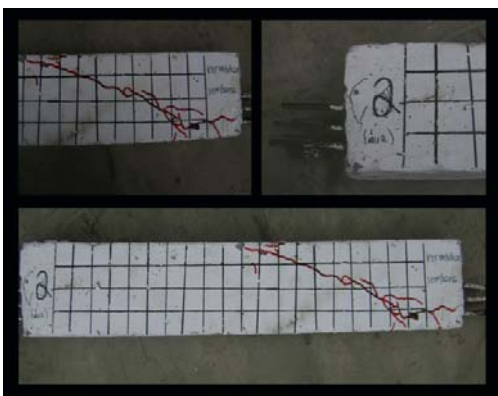


Gambar 15. Grafik Beban – Lendutan Balok C1

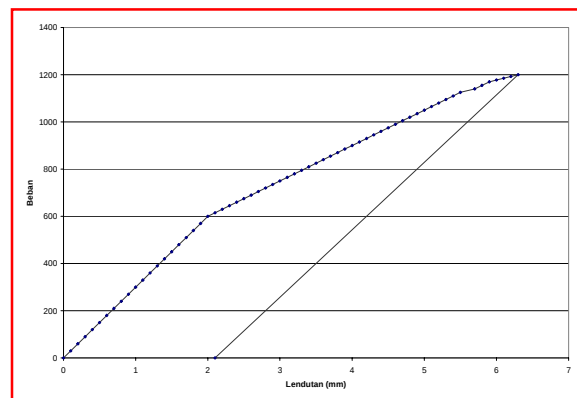
- b). Penyebaran Pola Retak
- Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji C1, retak dimulai dibawah balok dekat dengan beban, bersamaan dengan meningkatnya beban yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, terjadi retak-retak baru disepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
- Balok runtuh lentur setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 9,60 mm. Lebar retak lentur yang teramati sebesar 1,0 mm.
 - Kerusakan yang dapat dilihat dari pola retak adalah akibat beban lentur dan kerusakan terjadi pada daerah tengah bentang. Benda uji C1 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tarik, jadi pada waktu pengujian terjadi keruntuhan yang bersifat duktail yaitu, mengalami deformasi yang cukup besar dan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu (**Gambar 14**).

3.1.5 Benda Uji C2

(Dimensi Balok 50 mm × 100 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 4 Ø 6 mm)



Gambar 16. Benda Uji Balok Beton C2



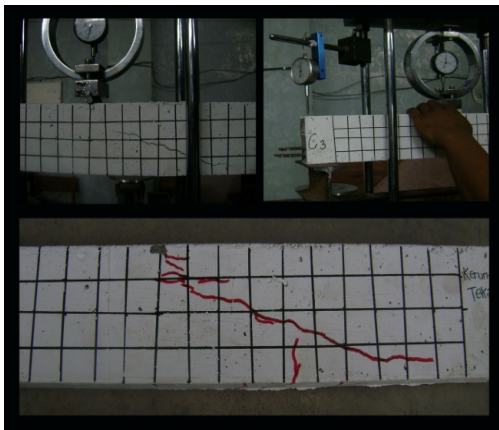
Gambar 17. Grafik Beban – Lendutan Balok C2

- a). Retak Awal
- Retak berupa retak miring atau geser karena arah retak yang tidak tegak lurus sumbu balok. Arah retak bergerak miring ke atas badan balok dan berakhir mendekati beban yang bekerja.

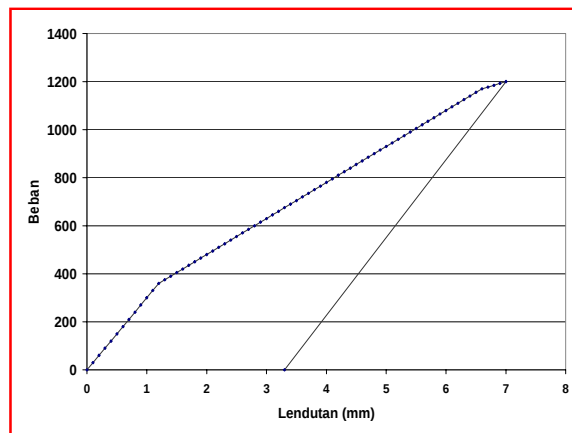
- Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban aksial sebesar 60,0 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 2,0 mm.
- b). Penyebaran Pola Retak
 - Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji C2, retak yang terjadi cenderung membentuk sudut 45° atau lebih terhadap sumbu balok. Bersamaan dengan meningkatnya beban yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, tetapi tidak terjadi retak-retak baru di sepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
 - Balok runtuh setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 6,30 mm. Lebar retak yang teramati sebesar 2,0 mm.
 - Kerusakan yang dapat dilihat dari pola retak adalah akibat beban geser ditandai dengan adanya retak diagonal. Benda uji balok C2 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan seimbang dan rasio L/h yang kecil, pada waktu pengujian terjadi keruntuhan yang bersifat non-daktail, yaitu keruntuhan tiba-tiba tanpa menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu (**Gambar 16**).

3.1.6 Benda Uji C3

(Dimensi Balok 50 mm × 100 mm × 550 mm ; Tulangan Balok 5 Ø 6 mm)



Gambar 18. Benda Uji Balok Beton C3



Gambar 19. Grafik Beban – Lendutan Balok C3

- a). Retak Awal
 - Retak berupa retak miring atau geser karena arah retak yang tidak tegak lurus sumbu balok. Arah retak bergerak miring ke atas badan balok dan berakhir mendekati beban yang bekerja.
 - Retak pertama (*first crack*) yang ditandai dengan tidak liniernya kurva beban dengan lendutan akibat beban sebesar 36,0 N. Lendutan yang terjadi pada retak pertama sebesar 1,20 mm.
- b). Penyebaran Pola Retak
 - Dari pengamatan pola retak yang terjadi pada benda uji C3, retak yang terjadi cenderung membentuk sudut 45° atau lebih terhadap sumbu balok. Bersamaan dengan meningkatnya beban yang diberikan, retak bertambah panjang dan lebar, serta terjadi retak baru di sepanjang badan balok.
- c). Keruntuhan Balok
 - Balok runtuh setelah mengalami deformasi dengan lendutan sebesar 7,0 mm. Lebar retak yang teramati sebesar 2,0 mm.
 - Kerusakan yang dilihat dari pola retak adalah akibat beban geser ditandai dengan adanya retak diagonal. Benda uji C3 merupakan balok beton bertulang tunggal dengan tipe

keruntuhan tekan dan rasio L/h yang kecil. Saat pengujian terjadi keruntuhan yang bersifat non-daktail, yaitu secara tiba-tiba tanpa ada gejala keretakan terlebih dahulu (Gambar 18).

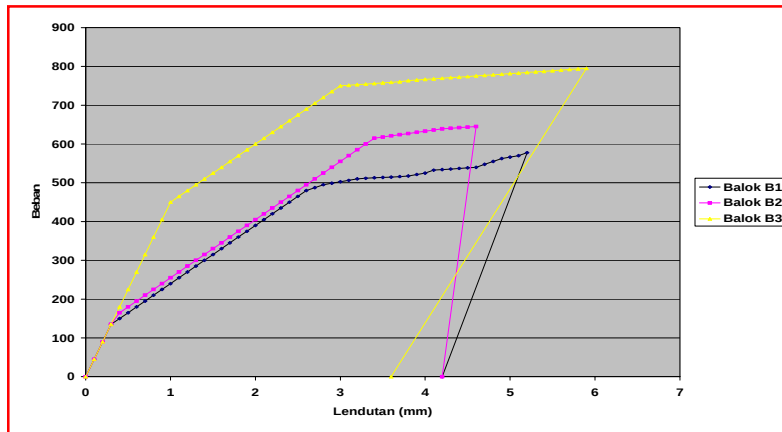
3.2 Hubungan Beban dan Lendutan

3.2.1 Balok B

- Beban maksimum dan lendutan yang paling besar terjadi pada balok bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tekan (Balok B3).
- Lendutan yang cukup besar pada balok dengan keruntuhan tekan (Balok B3) terjadi karena rasio L/h yang besar.



Gambar 20. Benda Uji Balok Beton B1, B2 dan B3

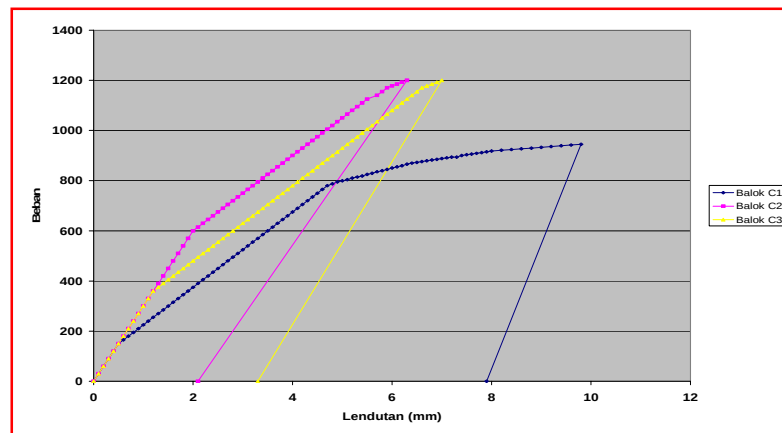


Gambar 21. Grafik Beban – Lendutan Balok B1, B2 dan B3

3.2.2 Balok C



Gambar 22. Benda Uji Balok Beton C1, C2 dan C3



Gambar 23. Grafik Beban – Lendutan Balok C1, C2 dan C3

- a). Lendutan yang paling besar terjadi pada balok bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tarik (Balok C1). Beban maksimum terjadi pada balok bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tekan (Balok C3).
- b). Lendutan yang kecil dan terjadi keruntuhan secara tiba-tiba pada balok dengan keruntuhan tekan (Balok C3) terjadi karena rasio L/h yang kecil.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan dan tujuan terhadap penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tarik, pada waktu pengujian terjadi keruntuhan lentur yang bersifat duktail, yaitu mengalami lendutan yang cukup besar dan menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu.
2. Balok beton bertulang tunggal dengan tipe keruntuhan tekan dan seimbang, pada waktu pengujian balok dengan rasio bentang (L) dan tinggi balok (h) cukup besar keruntuhan yang dominan pada struktur balok umumnya adalah lentur. Jika rasio L/h kecil keruntuhan yang dominan adalah geser yang bersifat non-duktail yaitu, tiba-tiba tanpa menunjukkan gejala keretakan terlebih dahulu.
3. Dalam perencanaan penampang balok beton bertulangan tunggal, keruntuhan yang diharapkan terjadi pada balok adalah keruntuhan tarik. Hali ini disebabkan karena tanda-tanda keruntuhan akan terlihat dengan adanya lendutan yang cukup besar dan terjadinya retak pada badan balok pada daerah di dekat beban yang diberikan.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Dewobroto, Wiryanto, (2005), "*Simulasi Keruntuhan Balok Beton Bertulang Tanpa Sengkang dengan ADINATM*", Universitas Pelita Harapan, Bandung.
- Miko, Martrianus, (2008), "*Pemanfaatan Rotan Sebagai Bahan Alternative Perkuatan Struktur Bangunan Masyarakat Menengah Kebawah*", Universitas Andalas, Padang.
- McCormac, J., (2000), "*Desain Beton Bertulang Jilid 1*", Erlangga, Jakarta.
- Park, R., Paulay, T., (1975), "*Reinforced Concrete Structure*", John Wiley & Sons, New York.
- Schodeck, D. L., (1999), "*Struktur*", Penerbit Erlangga, Jakarta.