

# KAJIAN EKSPERIMENTAL PADA STRUKTUR KANTILEVER BETON BERTULANG AKIBAT PEMBEBANAN MONOTONIK

Oleh :

1. Raja Marpaung 2. Suhadi

## ABSTRAK

Perancangan suatu struktur beton bertulang adalah untuk mencapai suatu struktur yang aman atau yang berperilaku baik selama masa layan struktur tersebut. Untuk itu dibutuhkan alternatif perencanaan struktur yang memenuhi syarat tetapi cukup ekonomis dalam pengertian, bahwa seluruh elemen dan sistem yang digunakan dalam struktur harus dapat bekerja sama secara optimal dan merespons gaya yang terjadi. Dalam perencanaan struktur disyaratkan bahwa struktur harus berperilaku baik sehingga struktur tersebut tidak mengalami kerusakan, baik kerusakan struktural maupun kerusakan non struktural. Salah satu ragam perilaku struktur beton yang harus dihindari adalah keruntuhan terhadap retak, retak-retak pada beton bertulang harus dibatasi, hal ini didasarkan pada pertimbangan tidak saja kemampuan struktur tetapi juga perlindungan terhadap berlangsungnya proses korosi pada baja tulangan

Dalam studi eksperimental ini pemodelan struktur dibuat dalam bentuk kantilever sedemikian rupa hingga mendekati yang sebenarnya di lapangan. Sedangkan pembebananan spesimen dilakukan dengan sistem pembebanan monotonik. Pembebanan ini dilakukan pada spesimen secara terus menerus sampai spesimen mencapai keruntuhan, sehingga melalui kurva beban – defleksi didapatkan beban kapasitas pada saat retak, leleh, ultimate, failure dan disipasi energi.

Dari hasil percobaan ini terlihat bahwa perilaku spesimen berubah-ubah pada setiap peningkatan beban. Perubahan perilaku ini disebabkan oleh sifat dari bahan yang tidak homogen, sehingga pada kondisi pembebanan melebihi kekuatan tarik beton timbul retak-retak yang mengakibatkan penurunan kekakuan. Secara keseluruhan dalam percobaan ini, perilaku spesimen mengalami perubahan dengan beban  $P$  rata-rata sebagai berikut : Kondisi retak  $P = 7,53$  KN, kondisi leleh  $P = 39,80$  KN, kondisi ultimate  $P = 51,38$  dan kondisi ultimate 1 tulangan  $P = 25,05$  KN. Sedangkan Energi kumulatif rata-rata yang terdisipasi pada kondisi leleh = 368,67 KNmm, kondisi ultimate = 6636,33 KNmm, dan kondisi Failure = 8793,33 KNmm

Dari hasil pengujian didapatkan bahwa kekuatan struktur sangat dipengaruhi oleh kondisi retak, pengujian kekuatan bahan, perbedaan kekuatan beton dari kekuatan rencana, perbedaan kekuatan tarik baja dalam pelaksanaan.

**Kata Kunci : Pemodelan Beton, Pembebanan, Perilaku spesimen**

### A. PENDAHULUAN

Didalam analisis perencanaan dan pembangunan struktur-struktur beton

bertulang selalu dilakukan penyederhanaan-penyederhanaan dari keadaan yang sebenarnya berupa asumsi dan idialisasi untuk

memudahkan. Biasanya tidak bisa dihindarkan akan adanya beberapa faktor yang diabaikan, kuat batas suatu penampang akan dipengaruhi oleh beberapa hal antara lain :

- Kekuatan material yang sesungguhnya mungkin berbeda dengan yang ditetapkan oleh perencana
- Strain hardening dalam perencanaan tidak diperhitungkan
- Beban sesungguhnya mungkin berbeda dengan beban yang direncanakan

Oleh karena itu, perilaku struktur beton bertulang penting di ketahui dengan baik untuk mengetahui kekuatan dan mekanisme keruntuhan yang sebenarnya akibat pembebanan, sehingga dalam memberikan asumsi-asumsi pada perencanaan dan pembangunan struktur beton bertulang tersebut tetap masih dalam batas-batas toleransi aman dan ekonomis.

Perilaku struktur beton bertulang ini sangat dipengaruhi oleh jenis pembebanan yang bekerja pada struktur, seperti misalnya pembebanan yang ditimbulkan oleh gempa, kekuatan dan mekanisme keruntuhan struktur berbeda dengan mekanisme keruntuhan yang ditimbulkan oleh beban secara terus-menerus (monotonik).

Dari uraian di atas, perilaku struktur beton tersebut sangat kompleks, yaitu mencakup kekuatan struktur yang menyebabkan runtuhnya struktur tersebut, pengaruh kekuatan bahan yang direncanakan oleh perencana dengan di lapangan berbeda.

## B. TINJAUAN PUSTAKA

Beton merupakan hasil pencampuran dari bahan-bahan agregat ditambah dengan bahan-bahan perekat semen serta air sebagai bahan pembantu guna keperluan reaksi kimia selama

proses pengerasan dan perawatan beton berlangsung.

Nilai kuat tekan beton didapat melalui tata cara pengujian standar, menggunakan mesin uji dengan cara memberikan beban tekan bertingkat dengan kecepatan peningkatan beban tertentu atas benda uji silinder beton (diameter 150 mm, tinggi 300 mm) sampai hancur.

### 1. Kondisi Retak Pertama

Setiap komponen struktur harus memiliki cukup kekakuan struktural untuk mendukung beban rencana yang bekerja pada balok. Atau dengan kata lain, struktur dan segenap komponennya harus direncanakan penampangnya mempunyai kuat rencana minimum sama dengan kuat perlu yang dihitung berdasarkan beban kerja. Disamping itu komponen struktur harus memenuhi kemampuan kelayakan pada tingkat beban kerja atau mampu menjamin tercapainya perilaku cukup baik pada strata beban kerja.. Pada struktur kantilever yang dibebani dengan beban terpusat di ujungnya, lendutan maksimum adalah sebagai berikut :

$$\square = \frac{P L^3}{3 E I}$$

dimana :

P = Beban (N)

$\square$  = lendutan (mm)

E = modulus elastisitas (Mpa)

I = momen inersia (mm<sup>4</sup>)

Momen retak (Mcr) dihitung sebagai berikut :

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I_{ut}}{y_t}$$

dimana :

f<sub>r</sub> = modulus retak beton

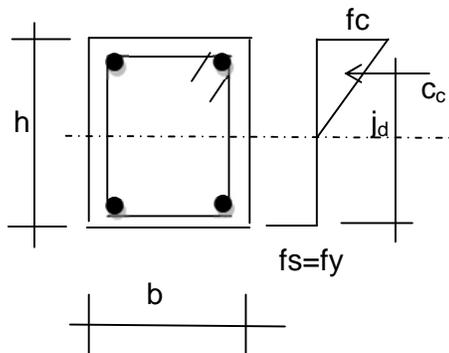
$$= 0,7 \sqrt{f_c}$$

y<sub>t</sub> = jarak dari sumbu netral

$I_{ut}$  = momen inersia transformasi

## 2. Kondisi Leleh (Elastik)

Metode perencanaan elastik didasarkan pada anggapan bahwa sifat dan perilaku bahan beton bertulang disamakan dengan batang homogen, sesuai dengan teori elastik tegangan dan regangan pada penampang balok telerut bahan homogen terdistribusi linier membentuk garis lurus dari nol di garis netral ke nilai maksimum di serat tepi terluar..



Gambar 1. Balok lentur elastis

Gaya tekan beton :

$$C_c = 0,5 b k d E_c y \frac{y - d'}{d - y}$$

Gaya dalam :  $T = A_s f_y$

Momen Leleh =  $M_y = T \times j_d$

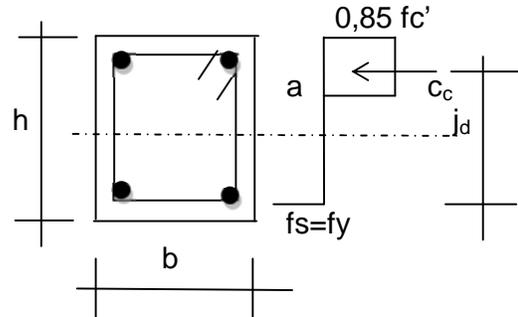
dimana:  $j_d = \text{Lengan momen}$   
 $= d - y_b$

Beban Leleh =  $P_y = M_y / L$

## 3. Kondisi Penampang Ultimate

Anggapan-anggapan sebagai dasar untuk metode kekuatan ultimate pada dasarnya mirip dengan yang digunakan untuk metode kerja. Perbedaannya terletak pada kenyataan yang didapat dari berbagai

hasil penelitian yang menunjukkan bahwa tegangan beton tekan kira-kira sebanding dengan regangannya hanya sampai pada tingkat pembebanan tertentu.



Gambar 2. Balok lentur Ulatimate

Gaya tekan beton =  $C_c = 0,85 f'_c a b$

Gaya dalam :  $T = A_s f_y$

Momen nominal :

$$M_n = C_c (d - a/2) + C_s (d - d')$$

$$= T j_d$$

dimana:  $j_d = \text{Lengan momen}$   
 $= d - y_b$

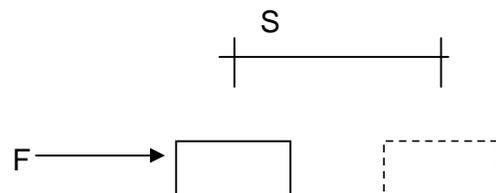
Beban Kapasitas Nominal :

$$P_n = M_n / L$$

dimana :  $L = \text{panjang balok dari tumpuan samapai titik beban}$

## 4. Disipasi Energi Struktur

Energi dapat didefinisikan sebagai usaha yang dilakukan oleh gaya untuk memindahkan suatu benda dalam jarak tertentu.



Gambar 3. Disipasi Energi

$$W = F \times S$$

dimana :

W = Energi

F = Gaya (KN)

S = Jarak perpindahan (mm)

Dalam hukum kekekalan energi dinyatakan bahwa energi dalam suatu benda akan tetap, artinya bahwa energi luar sama dengan energi dalam.

Dengan konsep energi di atas maka dapat diterapkan pada konstruksi kantilever yang dibebani dengan beban terpusat. Gaya P mengakibatkan struktur berdeformasi sebesar . Energi yang terjadi akibat gaya tersebut sama dengan gaya kali defleksi yang terjadi ( $W = P \times \delta$ ) dan energi ini disebut sebagai energi regangan. Selama proses struktur mengalami deformasi dari awal sampai mencapai defleksi maksimum, struktur tersebut akan mengalami perlawanan untuk mempertahankan bentuk (prinsip pegas) disebut energi kinetik struktur. Sesuai dengan hukum kekekalan energi, jumlah energi regangan dan energi kinetik selalu konstan yang disebut sebagai energi potensial struktur.

Persamaan keseimbangan energi dalam struktur akibat gempa dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$E = W_e + W_h + W_p$$

dimana :

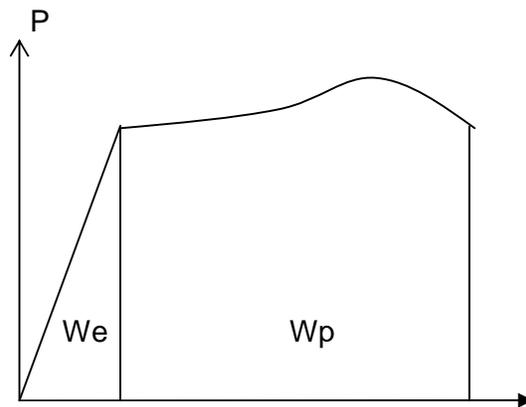
E = energi total akibat gempa terhadap struktur

$W_e$  = energi elastik, yaitu jumlah energi kinetik dan energi elastik

$W_h$  = energi yang diserap oleh sistem redaman

$W_p$  = energi regangan plastik kumulatif

Pada struktur dengan pembebanan monotonik sampai mencapai kehancurannya, energi yang diserap oleh struktur adalah energi regangan elastik ( $W_e$ ) dan energi regangan inelastik ( $W_p$ ) sehingga total energi yang dapat diserap oleh struktur adalah jumlah energi regangan elastik dan energi regangan inelastik yang ditunjukkan sebagai luas daerah di bawah kurva beban – deformasi



Gambar 4. Kurva Beban – Deformasi pembebanan Monotonik

### C. METOLOGI PENELITIAN

Kajian eksperimental ini dilakukan dengan pembebanan monotonik. Data hasil pengujian spesimen dengan pembebanan monotonik diperoleh dari hasil pengujian yang dilakukan di Laboratorium Mekanika Struktur PAU Ilmu Rekayasa ITB Bandung. Pada percobaan spesimen dengan pembebanan monotonik adalah pembebanan yang dilakukan pada spesimen secara terus menerus sampai spesimen mencapai keruntuhan. Dari hasil percobaan ini didapat data beban dan defleksi pada setiap perilaku spesimen.

Tujuan utama dari eksperimental ini adalah untuk mempelajari perilaku dan mekanisme kekuatan lentur yang merupakan fungsi dari gaya dan jarak,

dengan maksud untuk mendapatkan kurva beban – defleksi, beban kapasitas pada saat retak, leleh, ultimate, failure serta kerusakan-kerusakan yang terjadi pada struktur kantilever yang dibebani secara monotonik.

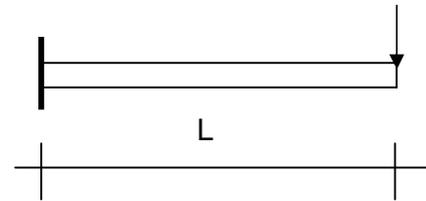
Selanjutnya membandingkan beban kapasitas hasil percobaan dengan beban kapasitas secara teoritis pada kekuatan tekan beton dan kekuatan tarik baja yang bervariasi. Dari hasil di atas kemudian dikaji terhadap faktor keamanan dari struktur tersebut.

Dalam percobaan ini beton dirancang menggunakan mutu beton  $f_c' = 35$  Mpa dan mutu baja tulangan  $f_y = 400$  Mpa. Percobaan ini dilakukan terhadap beberapa benda uji balok bertulang dengan spesifikasi sama. Pengujian melibatkan pemodelan struktur kantilever yang dibebani dengan pembebanan terpusat secara monotonik dengan menggunakan rangka beban (Loading Frame). Dengan pembebanan tersebut pengujian dilakukan hingga balok spesimen mencapai kehancurannya. Kecepatan pembebanan diatur sama besar untuk seluruh percobaan. Beban diatir melalui loading frame, defleksi yang terjadi di ujung bebas diketahui melalui alat ukur Linier Variabel Displacement Traducer (LVDT), sementara regangan tulangan lentur utama diketahui melalui strain gauge yang telah dipasang pada baja tulangan sebelum pengecoran spesimen dilakukan.

Selama pembebanan berlangsung, retak, leleh, ultimate, failure diamati secara langsung. Hal ini dimaksudkan untuk mendapatkan data aktual mengenai kekuatan karakteristik dari balok spesimen.

### 1. Pemodelan Struktur

Struktur dimodelkan sebagai balok kantilever dengan tumpuan jepit dan diberi gaya terpusat di ujungnya.



Gambar 5. Balok Kantilever dengan Beban Terpusat

Dengan pemodelan seperti ini, maka balok dapat berdefleksi secara maksimal di ujung bebasnya akibat beban terpusat. Pemodelan ini juga merupakan pendekatan di lapangan.

### 2. Pembuatan Pemodelan

Dalam pembuatan pemodelan ini struktur tumpuan dibuat dari pelat-pelat baja tersusun membentuk profil IWF yang dijangkarkan pada strong-floor. Seluruh profil disatukan dengan menggunakan las listrik, sedangkan pelat alas dengan strong-floor dihubungkan dengan menggunakan 9 buah baut mutu tinggi diameter 25,4 mm.

Struktur tumpuan ini di desain untuk menahan beban tekan dan momen yang terjadi akibat beban yang diterima balok spesimen. Struktur penahan atas digunakan untuk menjepit bagian kolom dari spesimen. Pengikat antara struktur tumpuan IWF di sebelah bawah dengan struktur baja penahan sebelah atas, digunakan sebanyak 4 buah as baja berdiameter 25,4 mm dengan panjang masing-masing 1500 mm dan diulir pada kedua ujungnya. Strain gauge dipasang pada as baja ini untuk melihat regangan yang terjadi selama proses penjepitan spesimen sebelum percobaan dimulai.

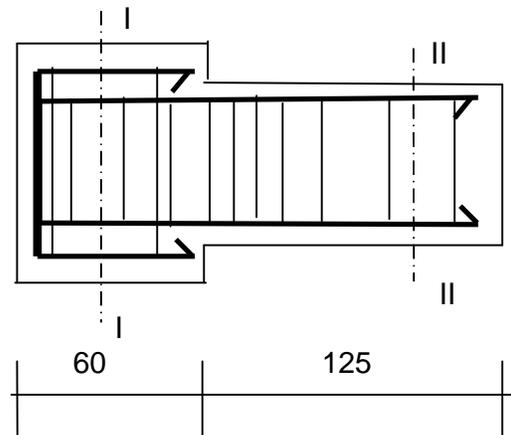
### 3. Desain Spesimen

Spesimen balok beton bertulang yang digunakan mempunyai bentuk persegi panjang dengan dimensi 150 mm x 300 mm dan panjang total 1250 mm. Pada percobaan ini panjang total yang

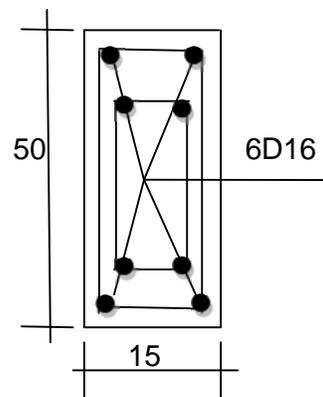
menjadi perhitungan adalah 110 mm, sedangkan sisa balok sepanjang 150 mm dipakai untuk mencegah hancurnya ujung balok akibat bebanyang digunakan. Dimensi balok ditentukan dengan pertimbangan agar pengaruh geser yang terjadi tidak terlalu besar, sehingga kehancuran balok tidak disebabkan oleh kehancuran geser tetapi didominasi oleh kehancuran lentur. Spesifikasi lengkap dari spesimen uji dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Tabel 1. Spesifikasi Balok Spesimen

Spesifikasi Balok Spesimen Uji	
Kuat tekan beton	35 Mpa
Modulus elastisitas beton	27806 Mpa
Modulus elastisitas baja	200000 Mpa
Tegangan tulangan leleh	400 Mpa
Tegangan tulangan geser leleh	240 Mpa
Panjang bentang balok	1100 mm
Diameter tulangan	16 mm
Lebar balok	150 mm
Tinggi balok	300 mm
Diameter sengkang	8 mm
Jarak tulangan tekan	31 mm
Jarak tulangan tarik	269 mm
Luas tulangan lentur	402,29 mm <sup>2</sup>
Luas tulangan geser	100,57 mm <sup>2</sup>



Gambar 6. Balok Spesimen Benda Uji



Gambar 7 . Potongan 1-1

#### 4. Pembebanan Spesimen

Pola pembebanan yang digunakan pada percobaan ini adalah pembebanan monotonik (monotonic loading). Pembebanan monotonik adalah pembebanan satu arah terhadap struktur dari beban nol hingga beban yang menyebabkan struktur mencapai kehancurannya, dalam hal ini jika salah satu atau kedua tulangan lentur tarik putus. Pengaturan kecepatan pembebanan (stroke rate) merupakan hal yang sangat penting dalam percobaan ini karena akan mempengaruhi karakteristik kurva beban defleksi.

Dalam percobaan ini stroke rate yang digunakan sebesar 0,1 mm/det. Besar kecepatan ini dipilih agar didapat pencatatan serta data pengamatan kerusakan visual yang lebih akurat.

Kecepatan percobaan ini ditetapkan sama untuk setiap jenis pembebanan yang dilakukan.

### 5. Peralatan

Untuk mengukur regangan yang terjadi pada tulangan, baik baja tulangan lentur maupun regangan tulangan geser digunakan strain gauge yang terdiri atas suatu foil tipis (setebal 0,02 mm) yang direkatkan pada suatu backing material yang terbuat dari polyamide (jenis plastik bersifat linier). Dalam percobaan ini digunakan 2 tipe strain gauge untuk mengukur regangan yang terjadi pada baja tulangan, baik regangan baja tulangan lentur maupun regangan baja tulangan geser. Tipe strain gauge yang digunakan adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Tipe Strain Gauge yang digunakan

Tipe	FLA-5-11	YFLA-5
Gauge Length	5 mm	5 mm
Gauge resistance	120 ± 0,3	120 ± 0,3
Gauge factor	2,13 ± 1 %	2,12 ± 2 %
Transverse Sensitivity	0,2 %	0,1 %

Untuk mengukur displacement atau perpindahan yang terjadi pada bagian-bagian tertentu benda uji digunakan alat displacement transducers (LVDT). Pada percobaan ini digunakan 2 buah LVDT, satu diletakkan di ujung bebas balok untuk mengukur defleksi ujung balok, dan yang lainnya diletakkan di pangkal balok untuk mengukur pergeseran horizontal relatif balok terhadap tumpuan. Sedangkan untuk mengukur displacement vertikal balok digunakan dial gauge.

## D. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

### 1. Hasil Pengujian Beton

Kekuatan beton didapat dari pengujian tekan terhadap benda uji beton berbentuk silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm yang diambil sebelum dilakukan pengecoran spesimen balok beton.

Kuat tekan benda beton masing-masing benda uji ditentukan sebagai berikut :

$$f'c = P/A$$

dimana :

$f'c$  = kuat tekan beton (Mpa)

P = Beban tekan (N)

A = Luas penampang benda uji (mm<sup>2</sup>)

Hasil yang didapat dari tes uji beton sebagai berikut :

Tabel 3. Hasil Uji Beton Benda Uji

No.	Kuat Tekan $f'c$ (Mpa)
1	27,22
2	32,49
3	32,88
Rata-rata : $f'c = 30,86$ MPa	

### 2. Hasil Pengujian Tarik Tulangan

Pengujian tarik baja tulangan dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat baja tulangan : kekuatan leleh, kekuatan batas  $f_u$ , ukuran atau diameter tulangan.

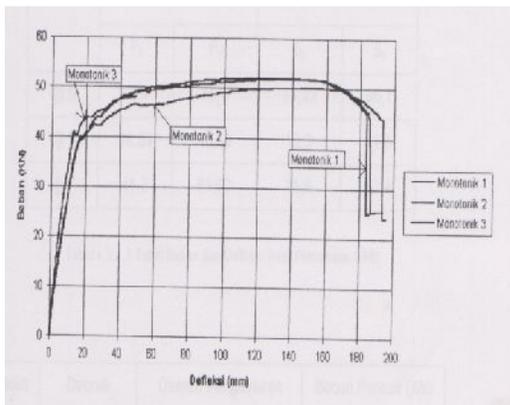
Hasil uji tarik dari tes uji baja tulangan sebagai berikut :

Tabel 4. Hasil Uji Tari Tulangan

	Tes 1	Tes 2	Tes 3
Berat	0,75 kg	0,75 kg	0,75 kg
Diameter	505 mm	507 mm	503 mm
Beban leleh	98 KN	97,25 Kn	97,825 KN
Regangan leleh	2584,78 $\mu$	2555,13 $\mu$	2586,82 $\mu$
Beban Ultimate	134,286 KN	131,429 Kn	132,857 KN
<b>Rata-rata Tegangan leleh : 515,12 Mpa</b>			
<b>Rata-rata regangan leleh : 2575,58 <math>\mu</math></b>			

### 3. Hasil Percobaan dengan Pembebanan Monotonik

Data hasil percobaan yang dilakukan pada pembebanan monotonik, kemudian dibuat dalam bentuk grafik beban-defleksi seperti terlihat pada gambar 8 di bawah ini. Beban kapasitas pada saat retak pertama (Pr), saat leleh (Py), saat ultimate (Pu) dan saat putus (Pf) dapat dilihat pada tabel 5 di bawah ini. Sedangkan defleksi saat retak pertama (r), saat leleh (y), saat ultimate (u), dan defleksi pada saat putus (f), dapat dilihat pada tabel 6.



Gambar 8. Grafik Beban – Defleksi Percobaan Monotonik

Tabel 5. Beban Hasil Percobaan Monotonik

Spesimen	Beban Retak KN	Beban Leleh KN	Beban Ultimate KN	Beban Failure KN	Beban Putus Tulangan KN
1	7,09	39,50	52,11	45,00	25,51
2	6,65	39,00	50,18	43,83	25,65
3	8,85	40,90	51,85	44,00	24,00
Rata-rata	7,53	39,80	51,38	44,28	25,05

Tabel 6. Defleksi Hasil Percobaan Monotonik

Spesimen	Defleksi Retak Mm	Defleksi Leleh mm	Defleksi Ultimate mm	Defleksi Failure mm	Defleksi Putus Tulangan mm
1	1,88	15,70	132,5	183,8	193,82
2	1,48	15,30	153,3	193,6	186,90
3	1,71	15,90	146,3	185,8	196,40
Rata-rata	1,68	15,63	144,0	187,7	192,04

### 4. Hasil Perhitungan Beban Kapasitas

Beban kapasitas secara teoritis didapat dari analisa penampang. Perhitungan beban kapasitas ini dilakukan pada beberapa kondisi antara lain ; pada kondisi beton retak pertama, kondisi tulangan tarik leleh (elastik) dan kondisi ultimate dengan variasi kekuatan beton dan baja tulangan hasil pengujian yang diperoleh dari analisa penampang dibagi dengan lengan momen terhadap beban,  $L = 1100$  mm. Sedangkan defleksi secara teoritis hanya dianalisa pada saat retak pertama saja, karena pada kondisi beton setengah retak besarnya kekakuan tidak dapat diperhitungkan secara teoritis.

Hasil perhitungan kapasitas beban dan defleksi saat retak pertama dapat dilihat pada tabel di bawah ini

Tabel 7. Beban Kapasitas dan defleksi teoritis

Mutu Bahan fy dan f'c Mpa	Beban Kapasitas (KN)			Defleksi retak pertama	Keterangan
	Retak	leleh	Ultimate		
fy=515, 12 dan f'c = 30,86	9,74	45,5	46,51	0,40	
fy=515, 12 dan f'c = 35	10,2	45,6	46,776	0,40	
fy=400 dan f'c = 35	10,2	35,4	36,75	0,40	
fy=400 dan f'c = 30,86	9,74	35,3	36,53	0,40	
fy=515, 12 dan f'c = 30,86	9,74	-	24,09	-	1 Tulang tarik putus

## 5. Hasil Perhitungan Energi

Energi yang terdisipasi oleh spesimen percobaan monotonik didapatkan dengan menggunakan metode interpolasi cubic spline.

Hasil perhitungan energi regangan kumulatif yang terdisipasi pada percobaan monotonik dibatasi hingga defleksi failure sebagai berikut :

Tabel 8. Energi Pada Kondisi Leleh

No.	Leleh		
	y	y	Energi
Uji 1	15,7	1,0	345,38
Uji 2	15,3	1,0	334,99
Uji 3	15,9	1,0	425,63
Rata-rata	368,67 KNmm		

Tabel 9. Energi Pada Kondisi Ultimate

No.	Leleh		
	y	y	Energi
Uji 1	132,56	8,44	6125,00
Uji 2	153,30	9,20	6528,00
Uji 3	146,34	10,02	7256,00
Rata-rata	6636,33 KNmm		

Tabel 10. Energi Pada Kondisi Failure

No.	Leleh		
	y	y	Energi
Uji 1	183,88	11,71	8714,00
Uji 2	193,60	12,65	8828,00
Uji 3	180,82	11,69	8838,00
Rata-rata	8793,33 KNmm		

## 6. Analisa Hasil Percobaan

### a. Perbandingan Kekuatan Spesimen Berdasarkan Mutu Bahan Hasil Percobaan

Dari hasil percobaan spesimen beton yang dibebani secara monotonik terlihat bahwa perilaku spesimen berubah-ubah pada setiap peningkatan beban. Perubahan perilaku ini disebabkan oleh sifat dari bahan spesimen yang tidak homogen, sehingga pada kondisi pembebanan melebihi kekuatan tarik beton timbul retak-retak yang mengakibatkan penurunan kekuatan pada spesimen. Penurunan kekuatan ini sangat mempengaruhi perilaku dari spesimen seperti ditunjukkan pada grafik beban-defleksi, kemiringan grafik tidak linier. Secara keseluruhan dalam percobaan ini, perilaku spesimen mengalami perubahan dalam beberapa kondisi yaitu kondisi kondisi elastis, kondisi ultimate dimana keadaan ini beton dan

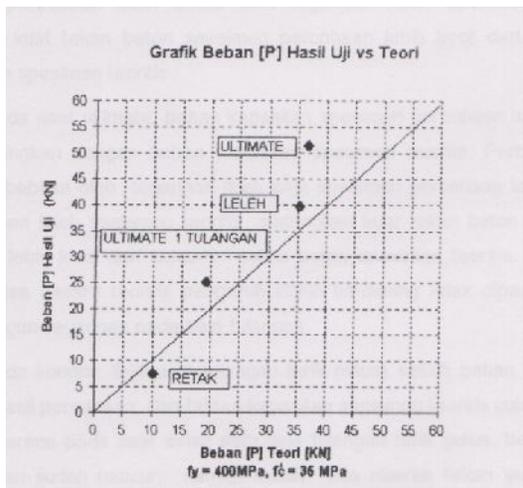
baja tidak lagi berada dalam daerah elastis dan kondisi failure.

Kemampuan struktur dalam menahan beban berubah-ubah seiring dengan perubahan perilaku spesimen yang dibebani secara monotonik.

Hasil beban kapasitas spesimen yang didapat dari hasil percobaan ini kemudian dianalisa terhadap beban kapasitas spesimen hasil perhitungan secara teoritis.

Tabel 11. Beban Kapasitas Teoritis ( $f_y = 515,12$  Mpa dan  $f_c' = 30,86$  MPa dan Beban Hasil Percobaan

Kondisi	Beban P Teoritis KN	Beban P Hasil Percobaan KN
Retak	9,743	7,53
Leleh	45,585	39,80
Ultimate	45,512	51,38
Ultimate 1 Tulangan	24,096	25,05



Gambar 9. Grafik Beban Kapasitas Hasil Pengujian dan Beban Kapasitas Hasil Percobaan

Dari tabel dan grafik di atas terlihat bahwa menjelang spesimen mencapai retak pertama selisih beban kapasitas relatif kecil, beban P teoritis lebih

besar dari P hasil percobaan. Hal ini terjadi karena hasil yang didapat dari P percobaan tidak memperhitungkan berat sendiri spesimen dan juga beban P teoritis tegangan retak yang digunakan bukan hasil pengujian.

Pada kondisi saat leleh, perbedaan P teoritis dan P hasil percobaan cukup besar. Beban P teoritis lebih besar dari P hasil percobaan, hal ini disebabkan beban kapasitas leleh pada saat pengujian tidak menunjukkan tanda-tanda kelelahan. Dalam penentuan beban kapasitas disini penulis mengambil harga dari pendekatan pada grafik beban – defleksi saat mulai memasuki daerah elasto plastis, jadi tidak bisa tepat pada posisi leleh sesuai yang diharapkan.

Pada saat ultimate, selisih P teoritis dan P hasil percobaan cukup besar. Beban P teoritis lebih kecil dari P hasil percobaan, hal ini terjadi karena anggapan-anggapan penyederhanaan pada analisis penampang tidak memperhitungkan strain hardening atau dengan kata lain menggunakan idealisasi tegangan-tegangan pada baja tulangan.

Pada kondisi failure ( 1 tulangan tarik putus), dengan  $f_y = 515,12$  Mpa dan  $f_c' = 30,86$  Mpa selisih P teoritis dan P hasil percobaan relatif kecil. Ini terjadi karena pada perhitungan beban kapasitas teoritis pengaruh strain hardening tidak diperhitungkan.

Jadi dari uraian diatas ternyata perbedaan beban kapasitas yang terjadi pada percobaan spesimen dengan kapasitas beban hasil analisa teoritis dipengaruhi beberapa faktor antara lain :

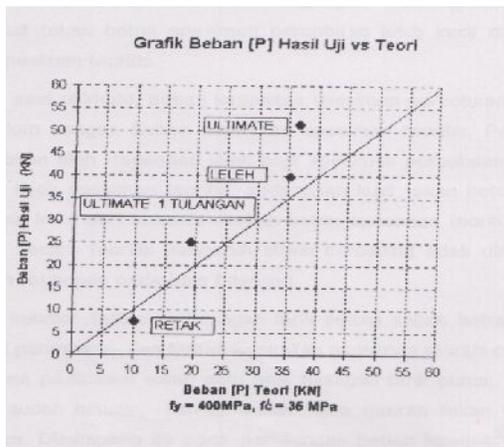
- Idealisasi tegangan-tegangan pada baja tulangan
- Kekuatan retak yang sebenarnya
- Tidak ada tanda-tanda kelelahan pada pengujian spesimen

## b. Kajian Kekuatan Spesimen Berdasarkan Mutu Bahan Perencanaan

Untuk mengetahui pengaruh perbedaan kekuatan bahan ini terhadap beban kapasitas spesimen, maka beban kapasitas hasil percobaan spesimen dibandingkan dengan beban kapasitas spesimen hasil analisa secara teoritis sesuai dengan mutu bahan rencana adalah sebagai berikut :

Tabel 12. Beban Kapasitas Teoritis ( $f_y = 400 \text{ Mpa}$  dan  $f_c' = 35 \text{ MPa}$ ) dan Beban Hasil Percobaan

Kondisi	Beban P Teoritis KN	Beban P Hasil Percobaan KN
Retak	10,24	7,53
Leleh	35,46	39,80
Ultimate	36,757	51,38
Ultimate 1 Tulangan	19,227	25,05



Gambar 10. Grafik Kapasitas Teoritis dan Beban Kapasitas Hasil Percobaan

Dari tabel dan grafik di atas terlihat ternyata ada perbedaan beban kapasitas yang dicapai spesimen pada saat retak pertama terjadi. Beban kapasitas yang dicapai spesimen hasil

percobaan lebih kecil dari beban kapasitas teoritis. Berdasarkan analisa teori bahwa momen retak hanya dipengaruhi oleh kekuatan beton. Jadi perbedaan beban kapasitas di atas disebabkan oleh kekuatan beton spesimen lebih kecil dari kekuatan beton teoritis, dan juga pada perencanaan spesimen pengaruh berat sendiri spesimen tidak diperhitungkan.

Pada kondisi memasuki leleh, beban kapasitas spesimen hasil percobaan lebih besar dari beban kapasitas spesimen teoritis. Ini terjadi karena karena pengaruh kekuatan bahan yang digunakan pada percobaan spesimen dan kekuatan bahan spesimen teoritis. Tegangan leleh baja tulangan spesimen percobaan lebih besar dari tegangan leleh spesimen teoritis, sedangkan kuat tekan beton spesimen percobaan lebih kecil dari kekuatan tekan beton spesimen teoritis.

Pada saat ultimate, beban kapasitas spesimen hasil percobaan lebih besar jika dibandingkan dengan beban kapasitas spesimen teoritis. Perbedaan ini terjadi disebabkan oleh tegangan leleh baja tulangan spesimen percobaan lebih besar dari tegangan leleh spesimen teoritis, sedangkan kuat tekan beton spesimen percobaan lebih kecil dari kekuatan tekan beton spesimen teoritis. Dan juga dalam analisa secara teoritis pengaruh strain hardening tidak diperhitungkan pada tegangan-regangan baja tulangan.

Pada kondisi failure (1 tulangan tarik putus) selisih beban kapasitas spesimen hasil percobaan dan beban kapasitas spesimen teoritis cukup besar. Ini terjadi karena pada saat salah satu baja tulangan tarik putus, beton pada daerah tekan sudah hancur, namun masih ada daerah tekan yang dapat menahan beban.

Disamping itu pada perhitungan beban kapasitas spesimen teoritis pengaruh strain hardening tidak diperhitungkan. Jadi dari uraian diatas ternyata perbedaan kekuatan beban sangat berpengaruh terhadap beban kapasitas spesimen. Pengaruh perbedaan kekuatan bahan tersebut dipengaruhi beberapa faktor antara lain :

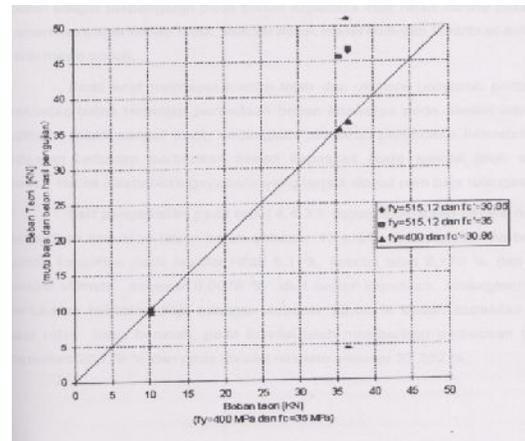
- Perbedaan kekuatan beton sangat berpengaruh terhadap perbedaan beban kapasitas pada saat retak
- Perbedaan tegangan leleh baja tulangan dan kekuatan beton sangat berpengaruh terhadap perbedaan beban kapasitas pada kondisi leleh dan ultimate
- Idealisasi tegangan-tegangan pada baja tulangan
- Kekuatan retak bukan hasil pengujian

### c. Pengaruh Perbedaan Tegangan Beton dan Baja Tulangan terhadap Beban Kapasitas

Perencanaan dan pelaksanaan struktur beton bertulang didasarkan pada peraturan yang meliputi persyaratan-persyaratan umum serta ketentuan-ketentuan teknis struktur. Salah satu persyaratan tersebut adalah pengujian terhadap pemodelan guna menunjang analisis teoritis dan pengujian kuat tekan dan tarik baja tulangan. Dengan dasar inilah dilakukan pengujian-pengujian kekuatan bahan beton dan baja untuk mengetahui perbedaan kekuatan beton maupun kekuatan baja tulangan terhadap kekuatan bahan rencana serta pengaruhnya terhadap kekuatan struktur yang didapat. Untuk mengetahui pengaruh tersebut ditunjukkan dalam tabel berikut :

Tabel 13. Beban Kapasitas Teoritis (Mutu Bahan Rencana) dan Beban Kapasitas Teoritis (Mutu Bahan Hasil Pengujian)

Kekuatan Bahan Mpa	Beban Kapasitas (KN)		
	Retak	Leleh	Ultimate
$f_y = 400$ $f_c' = 35$	10,24	35,46	36,75
$f_y = 515,12$ $f_c' = 30,86$	9,743	45,585	46,51
$f_y = 512,12$ $f_c' = 35$	10,24	45,672	46,77
$f_y = 400$ $f_c' = 30,86$	9,743	35,397	35,53



Gambar 11. Grafik Kapasitas Teoritis dan Beban Kapasitas Teoritis

Dari tabel dan grafik di atas pengaruh perubahan nilai kekuatan baja tulangan dan kekuatan beton dapat dijelaskan sebagai berikut :

Pada kondisi retak pertama, perubahan kekuatan baja tulangan tidak mempengaruhi perubahan kapasitas saat reak, sedangkan perubahan kekuatan beton sangat berpengaruh pada beban kapasitas saat retak karena pada saat beban mencapai retak kondisi beton masih

utuh dan kontribusi kekuatan tarik masih penuh.

Pada saat mencapai kondisi leleh dan ultimate pengaruh perbedaan kekuatan beton terhadap perbedaan beban kapasitas pada kondisi leleh dan ultimate relatif sangat kecil, sedangkan pengaruh perbedaan kekuatan baja tulangan terhadap perbedaan beban kapasitas pada kondisi leleh sangat besar. Hal ini disebabkan gaya tarik yang terjadi hanya dipikul oleh baja tulangan.

Dari pengamatan di atas bahwa dengan perbedaan kekuatan tekan beton sebesar 13,415 % memberikan perbedaan beban kapasitas pada kondisi retak 5,1 %, kondisi leleh 0,178 % dan pada kondisi ultimate sebesar 0,0076 % dari beban kapasitas, sedangkan untuk perbedaan kekuatan baja tulangan sebesar 28,03 %, beban kapasitas pada saat retak tidak mengalami perubahan, pada kondisi leleh memberikan perbedaan beban kapasitas 28,779 % dan pada kondisi ultimate sebesar 27,257 %.

Dari hasil uraian di atas ternyata perubahan kekuatan beton maupun kekuatan baja tulangan terlihat adanya pengaruh yang sangat berarti terhadap beban kapasitas. Kekuatan beton sangat sensitif terhadap perubahan beban kapasitas pada saat beton retak dan kekuatan baja tulangan sangat sensitif terhadap perubahan beban kapasitas pada saat leleh dan ultimate. Untuk itu kekuatan baja tulangan tidak boleh lebih kecil dari kekuatan baja tulangan rencana untuk mendapatkan struktur yang aman dan nyaman.

#### d. Faktor Reduksi Kekuatan

Faktoe reduksi kekuatan pada komponen struktur dimaksudkan untuk memperhitungkan kemungkinan perbedaan kekuatan bahan, pengerjaan, dan ketepatan ukuran.

Dalam pembahasan ini faktor reduksi kekuatan di analisa dari momen kapasitas spesimen percobaan dan beban kapasitas teoritis yang dianalisa berdasarkan variasi kekuatan beton dan kekuatan baja tulangan seperti tabel berikut ini :

Tabel 14. Faktor Reduksi Kekuatan Spesimen Percobaan

Variasi Mutu Bahan Momen Kapasitas (KNmm)			Momen Kapasitas Hasil Percobaan (KNmm)		
			Retak 8503	Leleh 43780	Ultimate 56518
fy = 400 Mpa fc' = 35 MPa	Retak	11264	0,74		
	Leleh	39006		1,12	
	Ultimate	40436			1,40
fy = 515,12 Mpa fc' = 30,86 MPa	Retak	10714	0,77		
	Leleh	50149		0,87	
	Ultimate	51161			1,10
fy = 515,12 Mpa fc' = 35 MPa	Retak	11264	0,74		
	Leleh	50237		0,87	
	Ultimate	51458			1,10
fy = 400 Mpa fc' = 30,86 MPa	Retak	10714	0,77		
	Leleh	38940		1,124	
	Ultimate	40194			1,40

Dari tabel diatas ternyata bahwa pada kondisi retak pengaruh perbedaan kekuatan beton terhadap perbedaan faktor reduksi kekuatan lentur relatif kecil, sedangkan pengaruh perbedaan kekuatan baja tulangan tidak mempengaruhi faktor reduksi kekuatan lentur.

Pada kondisi memasuki leleh dan ultimate, pengaruh penyimpangan mutu bahan sangat besar pengaruhnya terhadap faktor reduksi kekuatan lentur terutama penyimpangan yang disebabkan oleh kekuatan baja tulangan, sedangkan penyimpangan yang disebabkan oleh kekuatan beton relatif sangat kecil.

Menurut ketentuan SKSNI T-15-1991-03, faktor reduksi kekuatan penampang beton bertulang yang memikul lentur = 0,80. Jika dibandingkan faktor reduksi kekuatan yang diperoleh pada tabel 4.4.4.1 diatas, ternyata faktor reduksi kekuatan lentur yang diperoleh dari hasil percobaan ternyata pada kondisi leleh dan ultimate relatif lebih besar dari faktor reduksi kekuatan lentur yang disyaratkan, sedangkan faktor reduksi kekuatan lentur pada kondisi retak relatif lebih kecil.

## E. KESIMPULAN DAN SARAN

### 1. Kesimpulan

Berdasarkan pengamatan selama percobaan dan dari analisa data yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan yang berkaitan dengan beban kapasitas dan energi yang terdisipasi dengan pola pembebanan spesimen yang berbeda serta kerusakan secara visual dari balok kantilever beton bertulang yang dibebani secara monotonik, sebagai berikut:

1. Kekuatan struktur dipengaruhi oleh retak yang terjadi pada spesimen. Sebelum terjadi retak kekuatan struktur sepenuhnya dipikul oleh kontribusi tarik dan tekan baik baja tulangan maupun beton. Semakin besar beban yang dipikul struktur, retak semakin banyak dan semakin menjalar mendekati garis netral yang mengakibatkan kekuatan struktur makin menurun.
2. Dalam pelaksanaan struktur beton bertulang, pengujian kekuatan bahan sangat penting dilakukan untuk memenuhi kekuatan bahan rencana dan menghindari perbedaan kekuatan struktur.
3. Perbedaan kekuatan tekan beton dari kekuatan rencana sangat berpengaruh terhadap nilai hitungan kekuatan struktur saat mencapai retak, sedangkan terhadap kekuatan struktur pada saat mencapai leleh dan ultimate pengaruhnya relatif sangat kecil.
4. Perbedaan kekuatan tarik baja tulangan dalam pelaksanaan beton bertulang sangat mempengaruhi kekuatan struktur pada kondisi leleh dan ultimate sedangkan pada kekuatan struktur pada kondisi retak tidak berpengaruh.
5. Dengan dilakukan pengujian bahan dalam perhitungan digunakan tegangan hasil pengujian akan mendapatkan struktur yang aman dan ekonomis.
6. Dalam pengujian retak lentur terlihat sangat dominan karena pada retak pertama ditandai retak yang tegak lurus dengan sumbu balok.
7. Pada struktur yang direncanakan dengan metoda kekuatan batas, ternyata faktor reduksi kekuatan cukup besar sehingga penerapan perancangan dengan analisis kekuatan batas mungkin menghasilkan spesimen yang jauh lebih kuat dalam pengertian bahwa spesimen sangat aman.
8. Semakin besar beban awal pada percobaan siklik, beban puncak yang dicapai spesimen semakin besar, penurunan beban puncak semakin besar, selisih penurunan disipasi energi semakin besar, disipasi

energi kumulatif semakin kecil dan tingkat kerusakan semakin berat.

## 2. Saran

1. Untuk penelitian lebih lanjut spesimen sebaiknya dibuat dalam jumlah yang cukup banyak agar karakteristik percobaan dapat ditentukan dengan lebih tepat.
2. Untuk penelitian lebih lanjut tinjauan beban kapasitas tidak hanya ditinjau terhadap lentur saja tetapi juga ditinjau terhadap geser.

## DAFTAR PUSTAKA

1. ACI 318-95, "*Building Code Requirement and Commentary (ACI 318R-95)*", American Concrete Institut, PO. Box 9094 Farmington Hills, MI 4833.
2. Chu-Kia Wang 7 Charles G. Salmon., 1989, "*Disain Beton Bertulang*", Erlangga.
3. Park, R., and Paulay, T., 1975, "*Reinforced Concrete Structures*", John Wiley & Sons.
4. Phil M. Ferguson., "*Reinforced Concrete Fundamentals*", Fourt Edition, New York Chichester Brisbane Toronto.
5. Winter, G & Nilson, Arthur H., 1983 "*Perencanaan Struktur Beton Bertulang*", Cetakan Pertama, Pradnya Paramita. PT.



