

# LENDUTAN DAN KEKAKUAN BALOK BETON BERTULANG DENGAN LUBANG SEGI EMPAT DI BADAN

Muhammad Ujjianto

Staf Pengajar Jurusan Teknik Sipil, FT-UMS

## ABSTRAKSI

*Balok sebagai salah satu elemen struktur mempunyai fungsi yang sangat penting, yaitu menahan beban-beban di atasnya berupa beban plat lantai, beban hidup, beban mati dan berat sendiri balok. Untuk mengakomodasi kebutuhan akan tersedianya fasilitas utilitas dari mekanikal dan elektrik maka dibuat lubang segi empat menembus badan balok. Pembuatan lubang segi empat dibadan balok beton bertulang akan mengurangi luasan beton sehingga akan mengurangi kekuatan dalam menahan beban. Pengurangan luas tersebut menuntut analisis yang baik sehingga dapat direncanakan sebuah balok berlubang yang mampu menahan beban-beban rencana, pelaksanaan serta ketika struktur dalam keadaan existing. Dalam penelitian ini dibuat 5 buah benda uji terdiri dari 1 buah balok beton bertulang tampang T tanpa lubang dan 4 buah benda uji balok beton bertulang tampang T dengan lubang segi empat. Pengujian dilakukan dengan beban titik di tengah bentang berupa beban statik dan beban siklik sampai balok mengalami runtuh. Penelitian ini mempelajari lendutan dan kekakuan balok beton bertulang dengan lubang segi empat yang mensimulasikan beban statik dan siklik. Hasil pengujian benda uji BTL dengan beban pra retak 24,52 kN menghasilkan lendutan 0,798 mm dan kekakuan 30,73 kN/mm, sedangkan pada beban maksimum 70,81 kN lendutan sebesar 4,335 mm dan kekakuannya sebesar 16,33 mm. Hasil pengujian lendutan terbesar balok berlubang terjadi pada benda uji BL-01 sebesar 8,98 mm dengan kekakuan 9,80 kN/mm.*

**Kata kunci;** lendutan, kekakuan, balok, lubang

---

## PENDAHULUAN

Pada konstruksi bangunan modern berlantai banyak, umumnya saluran utilitas ditempatkan pada bagian langit-langit. Dalam perkembangannya ada upaya menempatkan pipa-pipa air, pemanas ruangan, duct AC, saluran telepon dan kelistrikan melalui lubang (opening) yang dibuat menembus bagian badan balok. Penempatan saluran utilitas ke dalam lubang (opening) pada balok, akan mengurangi tinggi lantai bangunan karena ruang kosong diatas langit-langit tidak ada dan hasilnya memberikan pengaruh yang sangat berarti dalam mengurangi berat sendiri struktur sehingga membuat bangunan lebih kompak dan ekonomis.

Struktur bangunan dengan balok berlubang di badan harus mampu menahan beban termasuk beban fatigue yang disebabkan oleh getaran mesin. Pada bangunan industri, balok-balok mendukung beban lantai yang menerima tekanan hidraulik dari pompa maupun mesin yang menyebabkan struktur menerima getaran dengan amplitudo yang tinggi serta kemungkinan adanya resonansi. Balok-balok tersebut juga banyak digunakan pada bangunan industri ringan, seperti industri chip komputer, yang sangat sensitif terhadap eksitasi getaran.

Penempatan lubang pada bagian badan balok beton bertulang akan menimbulkan konsentrasi tegangan pada tepi lubang, mengurangi kekakuan balok dan menyebabkan respon struktur menjadi

lebih rumit. Oleh karena itu, pengaruh pembuatan lubang terhadap kuat ultimit dan perilaku beban layan balok harus diperhitungkan dalam perancangan. Meskipun peraturan beton SNI-03-XXXX-2002 membolehkan untuk menempatkan saluran, pipa, dan selubung yang terbuat dari material yang tidak berbahaya bagi beton dengan persetujuan perencana struktur dengan syarat bahan-bahan tersebut tidak dianggap menggantikan secara struktural bagian beton yang dipindahkan, namun peraturan tersebut belum secara khusus menjelaskan detail perancangannya

Berdasarkan latar belakang yang ada dan melihat kenyataan bahwa penggunaan struktur beton di lapangan masih merupakan salah satu alternatif bahan konstruksi yang penting dan diminati, maka diperlukan penelitian untuk memahami degradasi balok akibat adanya lubang (lendutan dan kekakuan).

## STUDI PUSTAKA

### Perilaku beton terhadap beban siklik

Beton merupakan bahan yang kuat terhadap tekan tetapi lemah terhadap tarik. Akibat beban gempa yang bersifat siklik, beton terbebani oleh tekan dan tarik. Kemampuan tarik beton biasanya tidak diperhitungkan dalam setiap proses analisis struktur terhadap beban gempa, bahkan tampang elemen struktur beton sering dianggap hanya berfungsi sebagian (75% inersia tampang utuh).

Kemampuan tarik beton dapat ditingkatkan dengan pemasangan sengkang yang lebih rapat, sehingga meningkatkan kemampuan geser dan memaksakan struktur rusak oleh lentur (kerusakan daktil/liat).

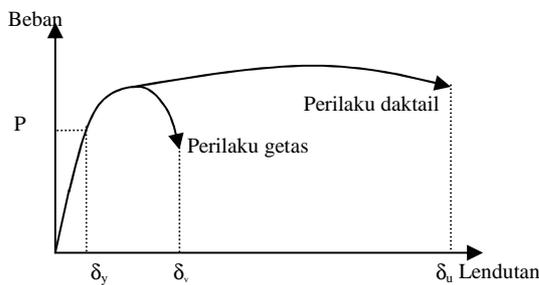
Pada keadaan elemen struktur mencapai tegangan leleh, bila jumlah sengkang cukup maka retak tarik oleh lentur pada beton umumnya sudah cukup lebar, yang diikuti oleh retak-retak mengelupas pada bagian tekan (*spalling*). Keadaan ini berbeda dari elemen struktur yang jumlah sengkangnya tidak cukup. Keretakan geser akan mendominasi yang diawali oleh retak lentur dan diikuti oleh retak geser berupa retak miring yang semakin melebar.

**Perilaku baja terhadap beban siklik**

Baja lunak dan sedang memiliki sifat yang baik terhadap beban siklik/gempa karena dapat menunjukkan sifat daktilitas yang cukup melalui proses pelelehan. Pelelehan pada baja dapat meredam getaran gempa dan menyerap energi sehingga proses dissipasi pada struktur dapat berlangsung dengan baik. Baja mutu tinggi mempunyai sifat daktilitas yang lebih rendah dan cenderung getas karena kadar karbon di dalamnya cukup tinggi. Proses pembebanan berulang (siklik) sampai mencapai titik leleh oleh beban gempa menyebabkan perubahan molekul yang pada proses pembebanan berikutnya menyebabkan kenaikan titik leleh hingga 20-25 %, namun di sisi lain beban siklik mengurangi daktilitas yang ditunjukkan oleh berkurangnya daerah leleh sebelum baja mengalami *strain hardening*.

**Daktilitas**

Daktilitas merupakan kemampuan dari suatu struktur untuk mengalami lendutan yang besar sebelum mengalami keruntuhan, seperti ditunjukkan dalam gambar 1.



Gambar 1 Diagram beban-lendutan balok beton bertulang

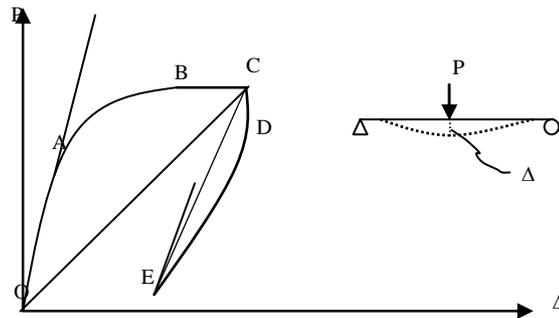
Dengan nilai *displacement ductility factor*  $\mu = \delta_u/\delta_y$ . Pada uji lentur balok, nilai  $\delta_u$  diambil dari grafik hubungan beban-lendutan saat terjadinya penurunan pembebanan sampai 15% dari beban

maksimum pengujian sedangkan lendutan diambil  $\delta_y$  saat struktur leleh.

**Kekakuan**

Kekakuan untuk struktur merupakan suatu yang penting. Pembatasan kekakuan berguna untuk menjaga konstruksi agar tidak melendut lebih dari lendutan yang disyaratkan. Kekakuan didefinisikan sebagai gaya yang diperlukan untuk memperoleh satu unit *displacement*. Nilai kekakuan merupakan sudut kemiringan dari hubungan antara beban dan lendutan. Makin kaku suatu struktur makin besar nilai kekakuannya.

Menurut Kenneth-Belanger (1981), kekakuan balok beton merupakan fungsi dari modulus elastis (E) dan momen inersia (I). Inersia saat balok belum retak dipergunakan  $I_g$ , setelah mengalami retak dipergunakan  $I_{cr}$ , sedang nilai momen inersia efektif aktual disebut  $I_e$  yang nilainya diantara  $I_g$  dan  $I_{cr}$ . Pengertian tersebut dapat dilihat dari perilaku beban –lendutan statik pada gambar 2.6.



Gambar 2 Perilaku beban-lendutan (Kenneth-Belanger, 1981)

Lintasan OABC merupakan lintasan beban siklik awal, slope OA adalah  $E_{ig}$ , retak terjadi didekat A, slope BC kekakuan menurun dibanding OA, dengan beban relatif sedikit mengakibatkan lendutan besar, ini adalah  $E_{is}$ . Slope OC adalah  $I_e$ , lintasan CDE merupakan pemalangan beban yang menurunkan slope, lendutan serta “penutupan” retak.

**Lendutan**

Satu hal yang penting dari struktur beton bertulang adalah masalah lendutan yang terjadi akibat beban yang bekerja. Struktur beton bertulang yang mengalami lentur harus direncanakan agar mempunyai kekakuan yang cukup untuk membatasi lendutan yang mungkin memperlemah kekuatan maupun kemampuan layan struktur pada beban kerja.

Berkaitan dengan hal tersebut, bila bentang panjang maka lendutan akan besar. Untuk memperkecil lendutan biasanya dengan memperbesar kekakuan penampang (EI).

Secara mekanika hubungan lendutan ( $v$ ), kekakuan penampang ( $EI$ ) dan momen lentur ( $M$ ) adalah:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = \frac{M}{EI} \tag{1}$$

Dengan persamaan differensial, persamaan diatas dapat dicari nilai lendutan di tengah bentang. Lendutan untuk balok yang ditumpu oleh tumpuan sederhana dengan beban terpusat di tengah bentang adalah:

$$\delta = v_{\max} = \frac{PL^3}{48 \times EI} \tag{2}$$

Pada dasarnya untuk menghindari keruntuhan, lendutan yang terjadi dibatasi oleh lendutan ijin maksimum, yaitu tidak boleh lebih besar dari  $\frac{L}{240}$

**METODE PENELITIAN**

**Benda Uji**

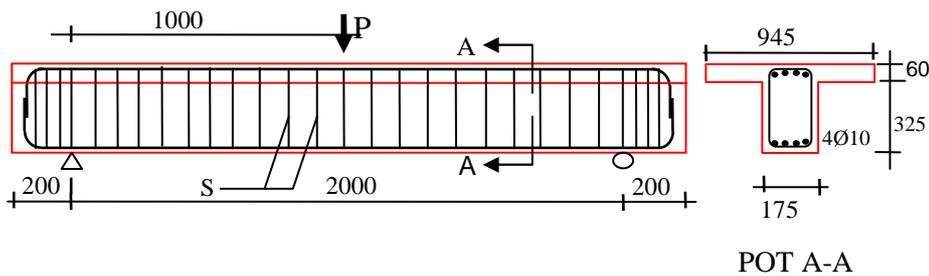
Pada penelitian ini dibuat lima buah benda uji berupa balok tampang T dengan skala geometri 1:2 dan skala bahan 1:1 untuk mempelajari pengaruh bentuk dan ukuran lubang akibat beban mesin berupa beban siklik. Kapasitas geser balok dirancang berdasarkan persyaratan SNI T15-1991-03.

Benda uji berupa balok T berukuran 325 mm x 175 mm panjang bentang 2000 mm dengan tulangan longitudinal  $4\phi 9,72$  untuk bagian atas dan  $4\phi 9,72$  untuk bagian bawah. Ukuran dan detail penulangan benda uji dapat dilihat pada tabel 1 dan gambar 3, gambar 4.

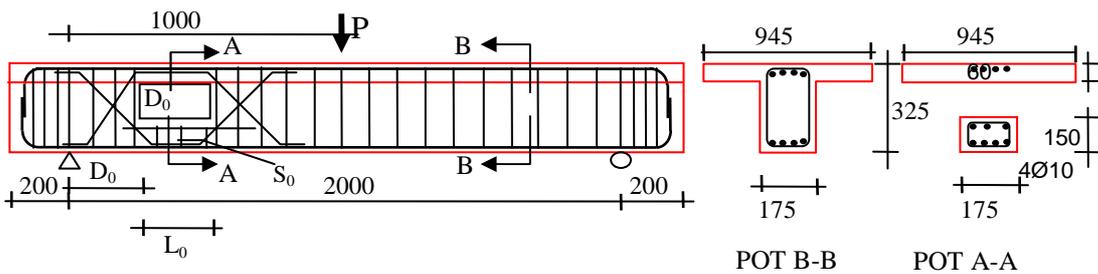
Benda uji dibuat menggunakan beton ready mix yang diproduksi oleh PT. Jaya Alam Sarana Beton Yogyakarta dengan perbandingan bahan semen, agregat halus, dan agregat kasar adalah 1 : 1,45 : 2,44 dengan ukuran agregat maksimum 10 mm. Kuat tekan benda uji silinder pada umur 28 hari adalah 22,64 MPa dengan modulus elastis 22363,2833 MPa. Secara keseluruhan baja tulangan bersifat daktail dan tulangan  $\phi 6$  memiliki diameter terukur rata-rata 5,5 mm dengan kuat leleh 314,03 MPa. Sementara tulangan  $\phi 10$  memiliki diameter terukur rata-rata 9,72 mm dengan kuat leleh 410,4 MPa.

Tabel 1. Detail benda uji

| Nama benda uji | Lo (mm) | Do (mm) | Db (mm) | S (mm)         | s <sub>o</sub> (mm) | Pembebanan |        | Dia. bar     |
|----------------|---------|---------|---------|----------------|---------------------|------------|--------|--------------|
|                |         |         |         |                |                     | beban      | Jumlah |              |
| BTL            | -       | -       | -       | $\phi 5,5-120$ | -                   | siklik     | 100000 | -            |
| BL-01          | 100     | 100     | 150     | $\phi 5,5-120$ | $\phi 5,5-40$       | siklik     | 100000 | $3\phi 9,72$ |
| BL-02          | 200     | 100     | 150     | $\phi 5,5-120$ | $\phi 5,5-40$       | siklik     | 100000 | $3\phi 9,72$ |
| BL-03          | 100     | 100     | 400     | $\phi 5,5-120$ | $\phi 5,5-40$       | siklik     | 100000 | $3\phi 9,72$ |
| BL-04          | 200     | 100     | 400     | $\phi 5,5-120$ | $\phi 5,5-40$       | siklik     | 100000 | $3\phi 9,72$ |



Gambar 3 Detail penulangan benda uji BTL



Gambar 4 Detail penulangan benda uji BL

Pengukuran yang dilakukan pada benda uji berupa pengukuran defleksi balok dan pengukuran regangan tulangan. Untuk mengukur defleksi dipasang 3 buah LVDT pada tengah bentang dan seperempat bentang.

Pembebanan yang diberikan pada benda uji berupa beban siklik dengan jumlah siklus 100000 dan beban statik diberikan pada siklus ke 0, 25000, 50000, dan 75000. Setelah siklus mencapai 100000 benda uji balok diberikan beban statik sampai runtuh dilakukan dua tahap, tahap pertama adalah *load controlled* dilakukan sampai terjadi *first crack* yang ditandai dengan tidak liniernya (terjadi kemiringan) kurva beban-lendutan. Tahap kedua dilakukan *displacement controlled* setelah terjadi kemiringan pada kurva beban-lendutan dengan kelipatan 1 mm sampai balok runtuh.

Pembebanan siklik tipe sinusoidal dilakukan dengan menggunakan alat *Closed Loop Dynamic Testing System* atau *Multi Purpose Testing System* (MTS). Metode yang digunakan adalah *load controlled*, yakni dengan cara benda uji balok beton diberi beban maksimum-minimum tertentu serta jumlah siklus tertentu. Dan oleh keterbatasan kemampuan alat, serta modifikasi sistem pengujian yang cukup rumit, maka pengujian ini hanya dilakukan pada 100000 siklus dengan frekuensi 5 Hz dan beban minimum diambil dengan memperhitungkan pembebanan yang setara dengan berat sendiri balok sebesar 4,6 kN serta beban maksimum 16 kN diambil dari 50% beban yang menyebabkan *first crack* (analitis). Dalam bentuk grafik, pembebanan siklik dapat dilihat pada gambar 4.

Pengamatan yang dilakukan saat pengujian adalah berupa pola retak, defleksi, dan regangan tulangan. Untuk mengamati defleksi yang terjadi, digunakan tiga buah LVDT yang masing-masing dipasang pada setengah bentang (LVDT 2) dan seperempat bentang (LVDT 1 dan 3). Sementara *strain gauges* dipasang pada benda uji BL-01 dan BL-04 masing-masing sebanyak empat buah. Untuk pembacaan defleksi dan regangan, LVDT dan *strain gauges* dihubungkan dengan *data logger* (untuk menyimpan data).

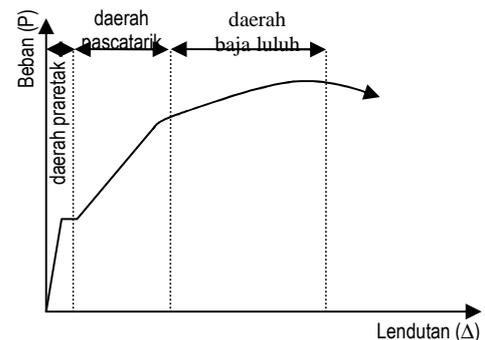
## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hubungan beban-retak

Beban retak awal statik balok ini dapat dikontrol dengan perhitungan taraf praretak. Segmen praretak dari kurva beban-lendutan pada dasarnya berupa garis lurus yang memperlihatkan perilaku elastis penuh. Daerah praretak berhenti pada saat

dimulainya retak awal, dimana tegangan beton mencapai kekuatan modulus *rupture* (Nawy, 1985).

Beban retak awal akibat beban siklik benda uji BTL terjadi pada siklus ke 83500, sedangkan beban retak awal akibat beban statik sebesar 25,57 kN terjadi pada kondisi balok mengalami tekan. Pola retakan yang terjadi pada *first crack* untuk benda uji BTL berupa retak lentur dengan arah tegak lurus sumbu utama balok pada permukaan bagian bawah balok. Kapasitas beban hasil pengujian dapat dilihat pada tabel 2. Beberapa faktor keterbatasan alat dan set up pengujian mempengaruhi beban yang dapat diterima benda uji balok.



Gambar 5. Hubungan beban-lendutan balok (Nawy, 1985)

Penurunan beban retak awal akibat beban yang bekerja untuk masing-masing benda uji BL-01, BL-02, BL-03, BL-04, berturut-turut adalah sebesar 16,97%, 14,23%, 15,33%, 37,62%. Fenomena lain yang dapat dilihat dari hasil pengujian adalah kecenderungan beban maksimum yang menurun sejalan dengan besarnya lubang. Kemungkinan penurunan ini disebabkan berkurangnya luasan penampang balok, juga riwayat beban siklik sinusoidal yang diberikan.

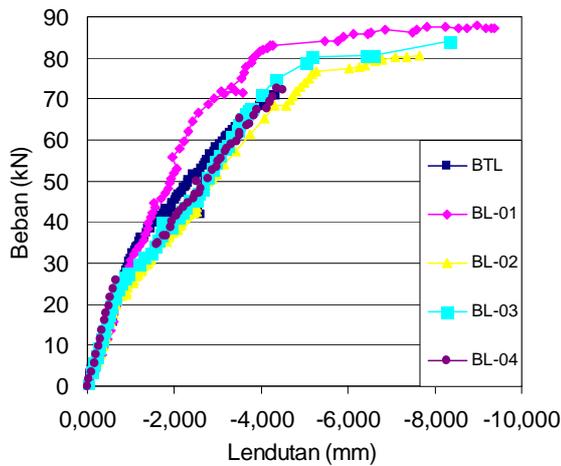
Tabel 2. Kapasitas beban hasil pengujian

| Benda uji | Beban retak pertama (kN) | Beban maksimum (kN) |
|-----------|--------------------------|---------------------|
| BTL       | 25,57                    | 70,81               |
| BL-01     | 21,23                    | 88,01               |
| BL-02     | 21,93                    | 80,52               |
| BL-03     | 21,65                    | 84,00               |
| BL-04     | 15,95                    | 72,50               |

### Hubungan beban-defleksi

**a. Daktilitas.** Dari gambar grafik hubungan beban-lendutan, dapat dilihat bahwa daktilitas balok tidak dapat dihitung karena keterbatasan data. Hal ini disebabkan pada saat pengujian beban statik tidak tercapai beban runtuh. Padahal untuk menghitung

daktilitas dibutuhkan data beban pada saat 85%  $P_{maks}$  setelah melewati beban maksimum. Untuk jelasnya dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 6. Grafik beban-lendutan benda uji balok

**b. Kekakuan.** Hasil dari penelitian memperlihatkan bahwa hingga sebelum taraf retak, kekakuan balok berlubang relatif sama. Kemudian memasuki daerah retak awal kekakuan balok berlubang meningkat untuk lubang yang lebih besar. Meningkatnya kekakuan juga untuk lubang yang sama besar tetapi posisi lubang semakin jauh dari tumpuan. Untuk lebih jelasnya Kenaikan kekakuan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3a. Kekakuan benda uji balok

| No | Benda Uji | Pra retak  |               |                  |
|----|-----------|------------|---------------|------------------|
|    |           | Beban (kN) | Defleksi (mm) | Kekakuan (kN/mm) |
| 1  | BTL       | 24,52      | 0,798         | 30,73            |
| 2  | BL-01     | 19,50      | 0,648         | 30,09            |
| 3  | BL-02     | 19,89      | 0,660         | 30,14            |
| 4  | BL-03     | 19,43      | 0,540         | 35,98            |
| 5  | BL-04     | 13,57      | 0,345         | 39,33            |

Tabel 3b Kekakuan benda uji balok

| No | Benda Uji | Maksimum   |               |                  |
|----|-----------|------------|---------------|------------------|
|    |           | Beban (kN) | Defleksi (mm) | Kekakuan (kN/mm) |
| 1  | BTL       | 70,81      | 4,335         | 16,33            |
| 2  | BL-01     | 88,01      | 8,980         | 9,80             |
| 3  | BL-02     | 80,52      | 7,660         | 10,51            |
| 4  | BL-03     | 84,00      | 8,330         | 10,08            |
| 5  | BL-04     | 72,50      | 4,380         | 16,55            |

Pada beban praretak kenaikan kekakuan benda uji BL-02 terhadap benda uji BL-01 adalah sebesar 0,16 %, sedangkan kenaikan kekakuan benda uji BL-04 terhadap benda uji BL-03 adalah sebesar 8,52 %.

Sedangkan pada beban maksimum kenaikan kekakuan benda uji BL-02 terhadap benda uji BL-01 adalah sebesar 6,76 %, sedangkan kenaikan kekakuan benda uji BL-04 terhadap benda uji BL-03 adalah sebesar 39,08 %.

**KESIMPULAN**

1. Lendutan terbesar beban pra retak pada balok berlubang terjadi pada benda uji BL-01(lubang 100x100) sebesar 0,648 mm
2. Lendutan terbesar beban maksimum pada balok berlubang terjadi pada benda uji BL-01 (lubang 100x100) sebesar 8,98 mm
3. Terdapat kecenderungan kenaikan kekakuan antara balok dengan lubang ukuran 100 x 100 mm dibandingkan balok dengan lubang ukuran 200 x 100 mm. Demikian juga antara lubang dengan dimensi sama tetapi letaknya jauh dari tumpuan.
4. Kenaikan kekakuan pada beban praretak benda uji BL-02 terhadap benda uji BL-01 adalah sebesar 0,16% sedangkan kenaikan kekakuan benda uji BL-04 terhadap benda uji BL-03 adalah sebesar 8,52%. Kenaikan kekakuan pada beban maksimum benda uji BL-02 terhadap benda uji BL-01 adalah sebesar 6,7648 %, sedangkan kenaikan kekakuan benda uji BL-04 terhadap benda uji BL-03 adalah sebesar 39,0789 %.
5. Dari data yang dibaca strain gauge pada benda uji BL-01 dan BL-04 penambahan regangan mengalami kenaikan sebesar 31,1131%.

**DAFTAR PUSTAKA**

Abdalla, Hany, Kennedy, and John B., Dynamic Analysis of Prestressed Concrete Beams with Openings, Journal of Structural Engineering, V. 121, No. 7, July 1985, pp. 1058-1068.  
 ACI Committee 318, 1995, Building Code Requirements for Structural Concrete, 5420 Old Orchard Road, Skokie, Illinois, Portland Cement Association.  
 Departemen pekerjaan Umum, 1991, SK SNI T-15-1991-03, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung, Bandung

- Dipohusodo, I., 1996, Struktur Beton Bertulang : Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Mansur, M. A., Tan, K. H., and Lee, S. L., Design Method for Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings, *ACI Structural Journal*, V. 82, No. 4, July-August 1985, pp. 517-524.
- Mansur, M. A., Huang, L. M., Tan, K. H., and Lee, S. L., Deflection of Reinforced Concrete Beams with Web Openings, *ACI Structural Journal*, V. 89, No. 4, July-August 1992, pp. 391-397.
- Nawy, E. G., 1995, Reinforced Concrete – A Fundamental Approach, 3<sup>rd</sup> edition, Prentice Hall, New Jersey.
- Park, R., and Paulay, T., 1975, Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons. Inc., New Jersey.
- Suhendro, B., 2000, Analisis Dinamik Struktur, Bahan Kuliah, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Suhendro, B., 2000, Teori Model Struktur dan Teknik eksperimental, Beta Offset, Yogyakarta.
- Pool, Richard B., Lopes, and Rogerio, Cyclically Loaded Concrete Beams with Openings, *ACI Journal*, V. 83, September – October 1986, pp. 757-763.