

## BALOK BETON KOMPOSIT *LIPS CHANNEL*

Andang Widjaja<sup>1</sup> dan Nuroji<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Pascasarjana DTS UNDIP, Tel/Fax: 024 8411946, e-mail: [andwidj@yahoo.com](mailto:andwidj@yahoo.com)

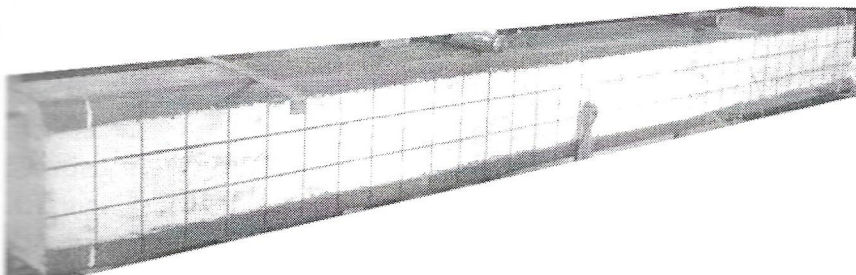
<sup>2</sup> Dosen Program Pascasarjana DTS UNDIP, Tel/Fax: 024 8411946, e-mail: [ojiksam2000@yahoo.com](mailto:ojiksam2000@yahoo.com)

Karya tulis ini memberikan informasi tentang pemakaian baja *lips channel* sebagai perkuatan di perimeter balok beton. Balok beton dengan perkuatan baja *lips channel* di sisi terluar (eksternal) bagian atas dan bawah dibebani lentur. Jarak titik berat *lips channel* ke serat tertekan terluar (balok beton bertulang eksternal) lebih besar daripada jarak titik berat baja tulangan ke serat tertekan (balok beton bertulang internal). Komposisi berat bahan beton terdiri atas 1 *portland* semen: 2,3 pasir: 2,5 kerikil dan 0,42 air. Dimensi balok 175 cm x 18 cm x 12 cm, ukuran *lips channel* 125 50 20 tebal 2 mm. Pengujian tekan pada silinder beton menunjukkan mutu beton  $f'_c$  37,7 MPa. Hasil pembebanan lentur pada balok beton menunjukkan bahwa kapasitas beban yang dapat didukung oleh balok beton dengan perkuatan baja *lips channel* ternyata lebih kecil daripada beton bertulang ulir tanpa sengkang yang berada di dalam beton. Hal lain yang dijumpai adalah retak lentur terkonsentrasi pada satu lokasi di bawah beban 1/2P, slip antara baja *lips channel* dan beton.

Kata kunci: balok, beton, *lips channel*, komposit

### 1. PENDAHULUAN

Artikel ini bertujuan untuk memberikan informasi kepada masyarakat tentang balok beton dengan perkuatan baja *lips channel* rangkap eksternal yang mendukung beban lentur terpusat di tengah bentang. *Lips channel* dipasang di tepi luar balok beton sisi atas dan bawah. Pemasangan *lips channel* dilakukan untuk mendapatkan nilai jarak antara garis kerja gaya tarik di sisi bawah dan gaya tekan di sisi atas relatif lebih besar daripada balok beton bertulang. Saran perbaikan demi kesempurnaan penelitian ini sangat diharapkan agar pemanfaatan *lips channel* pada balok beton optimal.

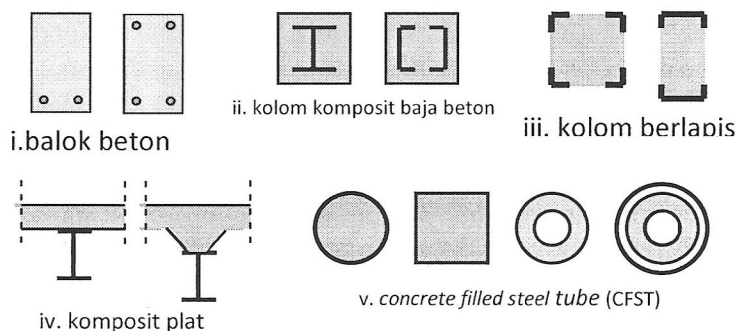


Gambar 1. Balok komposit beton dan *lips channel*

Struktur beton bertulang sebagai struktur utama bangunan telah dikembangkan melalui berbagai penelitian, agar memperoleh jenis struktur yang kuat, efisien, dan ramah lingkungan; sehingga kehidupan manusia dan kesejahteraannya dipertahankan [1], [2]. Beton dipilih sebagai bahan struktur pada bangunan sipil, seperti bangunan gedung

bertingkat, jembatan Suramadu dan bangunan lainnya, karena bahan penyusunnya mudah didapatkan, dibentuk sesuai dengan rencana [3], awet, murah, masif, kekuatan tekan dan kekakuan relatif tinggi [4].

Beton memiliki sifat tidak mampu menahan tarik (kuat tarik beton hanya 10% dari kuat tekannya) dan getas [5]; [6]; [7]. Sedangkan baja bersifat elastoplastik, kuat tarik baja 100 kali kuat tarik beton [8], daktilitas relatif lebih tinggi, memiliki tegangan residu [4], tahan terhadap retak, dan tidak getas [9]. Penggabungan baja dan beton dilakukan untuk mendapatkan bahan yang lebih baik [4]. Bahan gabungan atau komposit beton yaitu: beton berserat, baja profil dengan plat lantai beton beralas plat baja, pelat balok atau kolom beton bertulang, baja profil dalam beton, dan beton berselimut pipa baja atau *concrete filled steel tubes*-CFST [10]; [11]; [12].



**Gambar. 2.** Potongan melintang elemen struktur beton

Elemen struktur balok beton bertulang memiliki rangka tulangan yang terdiri atas empat atau lebih tulangan longitudinal dan sengkang pada arah transversal. Nilai regangan dan gaya yang timbul pada penampang balok dapat dihitung dari nilai momen batas akibat beban luar pada saat balok hancur. Mekanisme regangan dan tegangan dalam balok dapat diwakili oleh gaya dalam seperti resultan gaya tekan  $C$  (*Compression*), di atas garis netral, dan resultan gaya tarik  $T$  (*Tension*) di bawah garis netral. Pada keadaan setimbang gaya horizontal tersebut sama,  $C=T$ , tetapi berlawanan arah; jarak antara  $C$  dan  $T$  adalah  $jd$ . Kedua gaya membentuk momen tahanan dalam, dengan nilai maksimum sebesar gaya  $C$  atau  $T$  dikalikan jaraknya ( $jd$ ) sama dengan nilai kuat lentur atau momen tahanan penampang komponen struktur terlentur.

$$0,85f'_c a_b b = A_s f_y = \rho_b b d f_y \quad (1)$$

$$\rho_b = \frac{A_s}{b d} \quad (2)$$

$$\rho_b = \frac{0,85f'_c a_b}{f_y d} \quad (3)$$

$\rho_b$  adalah rasio maksimum antara luasan tulangan dengan luasan balok beton. Sedangkan luas minimum baja tulangan pada beton  $f'_c < 5000$  psi; ACI 10-3 [13] yaitu:

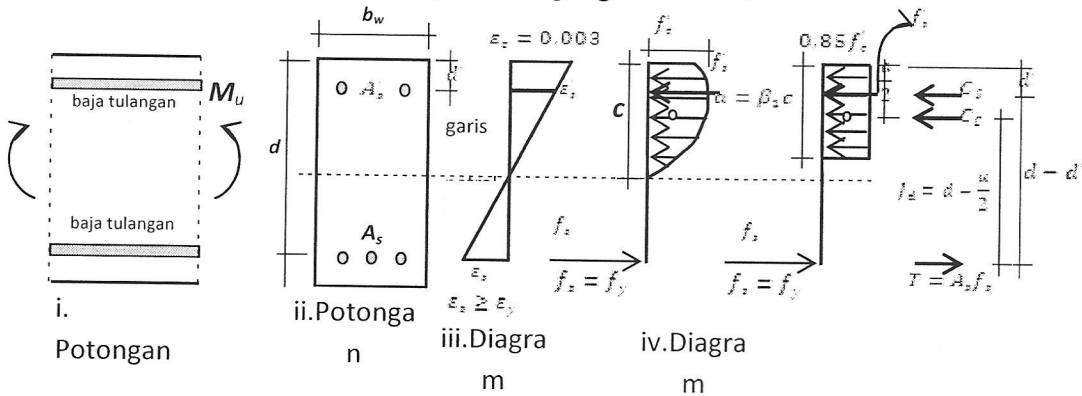
$$A_{s,min} = \frac{3\sqrt{f'_c}}{f_y} b_w d, \quad (4)$$

atau

$$A_{s,min} = \frac{200b_w d}{f_y} \quad (5)$$

Kekuatan maksimum pada serat beton tercapai, bila regangan mencapai regangan hancur beton yaitu 0,003, pada saat yang sama regangan baja tulangan yang berada di sisi bawah lebih besar daripada regangan beton. Kapasitas momen ultimit diperhitungkan dengan mengabaikan kuat tarik beton, seluruh gaya tarik dianggap

diterima oleh tulangan pokok balok beton. Titik tangkap resultan gaya tarik segaris dengan tulangan baja, dengan menganggap baja terregang serempak dengan nilai regangan diukur terhadap titik beratnya. Jika regangan baja tulangan,  $\epsilon_s$ , belum mencapai nilai regangan luluh,  $\epsilon_y$ , nilai tegangan baja tulangan adalah  $E_s f_s$ . Nilai regangan baja tulangan bernilai sama atau lebih besar dari  $\epsilon_y$ , menyebabkan perbandingan antara tegangan baja dan regangan tidak linier.



**Gambar 2.** Diagram balok beton tulang rangkap [14]

Tampak pada Gambar 3.iv. jarak titik tangkap garis kerja gaya tarik di sisi bawah dan garis kerja gaya tekan di sisi atas adalah  $j_d$ . Jika baja tulangan digantikan dengan baja *lips channel*, maka jarak  $j_d$  relatif lebih besar daripada beton dengan rangkaian baja tulangan di sisi dalam. Nilai  $j_d$  yang lebih besar menghasilkan momen nominal yang lebih besar, sesuai rumus  $M_n = 0,85 f_c' a b j_d$  atau  $M_n = A_s f_y j_d = A_s f_y (d - a/2)$  [14].

Faktor lain yang mendukung aplikasi *lips channel* dalam balok beton adalah nilai regangan baja lebih besar daripada beton, sehingga retak awal di perimeter balok beton dapat dihindarkan. Jika retak dapat dicegah atau dikurangi, maka daya dukung meningkat [14].

Kemampuan beton dalam mendukung beban diketahui melalui kuat tekan benda uji silinder pada umur 28 hari, setelah masa perawatan dalam air. Kuat tekan,  $f_c'$  didefinisikan beban tekan ( $P$ ) tepat searah sumbu vertikal silinder beton dibagi dengan luas permukaan tampang silinder ( $A$ ) berdimensi tinggi 12 in dan diameter 6 in [16]

$$f_c' = \frac{P}{A} \quad (6)$$

Hubungan tegangan dan regangan beton didapatkan dari pembebanan *uniaksial* pada silinder beton. Kurva hampir linier pada beban satu setengah kali beban tekan. Beton mutu tinggi memiliki puncak kurva yang tajam, sedangkan mutu rendah memiliki puncak yang mendatar. Regangan maksimum beton bernilai kira-kira 0,002 [14]. Regangan,  $\epsilon$ , adalah perbandingan antara perpindahan ( $\Delta$ ) tinggi silinder akibat beban dan tinggi awal ( $l$ ),  $\epsilon = \Delta/l$

$$(7)$$

Modulus elastisitas beton, dapat dihitung sesuai [14],  $E_c = w^{1,5} 33 \sqrt{f_c'}$  psi, Pauw

$$(8)$$

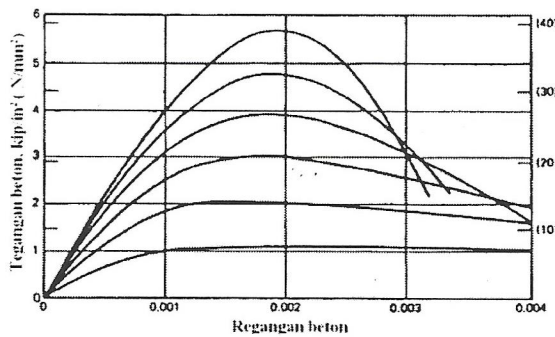
$$E_c = 57000 \sqrt{f_c'} \text{ psi atau } E_c = 4730 \sqrt{f_c'} \text{ N/mm}^2 \quad (9)$$

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\epsilon_2 - 0,0005}, \text{ N/mm}^2 \text{ ASTM 469} \quad (10)$$

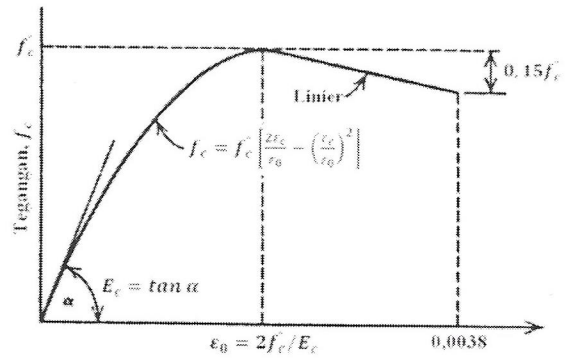
$$\text{atau } E_c = 4700 \sqrt{f_c'} \text{ N/mm}^2, \text{ SNI 2847-02 pasal 10.5} \quad (11)$$

$w$  = kerapatan beton berkisar 90 - 155 lb/ft<sup>3</sup>,

- $f'_c$  = kuat tekan beton silinder,
- $S_1$  = tegangan pada saat nilai regangan 0,0005
- $S_2$  = 40% dari tegangan maksimum
- $\epsilon_2$  = regangan saat tegangan 40% dari maksimum



Gambar 3. Tegangan dan regangan pada pembebanan uniaksial silinder beton [14]



Gambar 4. Idealisasi tegangan dan regangan beton silinder beban *uniaxial*-

## 2. METODA

Kualitas beton direncanakan sesuai dengan penelitian Nuroji (2008) dan Widjaja(2009), mutu beton  $f'_c$  35 MPa, perbandingan berat 1 semen portland : 2,3 pasir: 2,5 kerikil pecah mesin dan 0,4 air.

Agregat halus dan agregat kasar diperiksa sesuai standar Indonesia. Pemeriksaan yang dilakukan adalah gradasi butiran, kotoran organik, berat jenis, dan berat volume. Jumlah bahan yang disediakan adalah 39,402 kg semen *portland* merek Semen Gresik; 108,6 kg agregat halus dari sungai Krasak di Muntilan Kabupaten Magelang; 116, 5 kg agregat kasar pecah mesin; dan 18,48 kg air yang berasal dari saluran air bersih di Laboratorium.

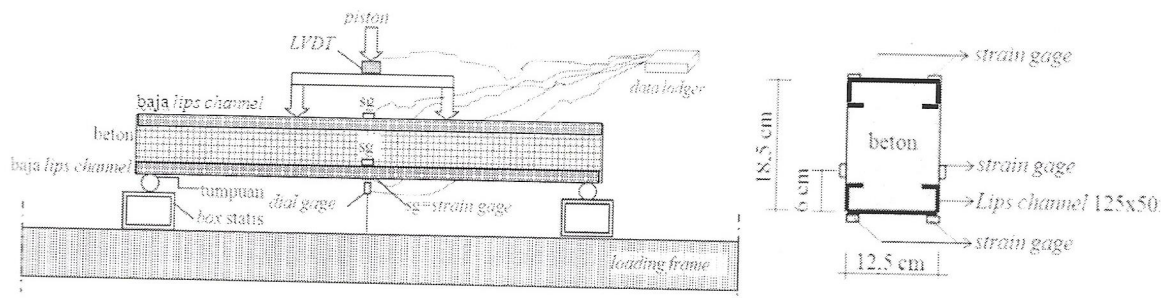
Bahan beton dicampur pada tabung (ruang) pencampur yang digerakkan oleh mesin. Penuangan bahan kerikil, pasir, dan semen dilakukan secara berturut-turut dengan volume  $\frac{1}{3}$  bagian sampai bahan tertuang semua dalam tabung pencampur yang telah berputar, selanjutnya diikuti dengan memasukkan sejumlah air secara bertahap. Tujuan penambahan air secara bertahap adalah untuk mendapatkan nilai *slump* yang kecil. Pengujian *slump* dilakukan beberapa kali untuk mengetahui tingkat kelecakan yang dihasilkan. Setelah sesuai dengan nilai *slump*, beton segar diaduk lagi beberapa saat agar homogen. Selanjutnya dituang ke talam baja, lalu dimasukkan dalam cetakan. Pematatan beton segar dalam masing-masing cetakan dilaksanakan dengan *hand vibrator* yang digerakkan oleh mesin.

Cetakan balok beton ukuran dalam 175 cm x 18,5 cm x 12,5 cm sebanyak dua buah, dimensi cetakan ini menyesuaikan penelitian Nuroji (2008). Cetakan lain berbentuk silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak lima buah.

Spesimen bentuk silinder dilepas dari cetakan setelah 24 jam, kemudian direndam dalam air pada kolam perendaman tanpa mengukur pH air. Masa perawatan dalam air dilakukan selama 27 hari. Balok beton uji dirawat juga dengan memberikan penutup dari sejenis kain tebal (karung) yang selalu dalam keadaan basah. Penyiraman air yang cukup dilakukan pagi, siang, dan sore hari selama 27 hari.

Benda uji silinder dan balok diuji destruktif pada umur 29 hari. Spesimen silinder beton diukur berat, diameter, dan tingginya pada keadaan kering permukaan. Kemudian permukaan silinder atas diratakan dengan belerang (*capping* sesuai *ASTM C 617-94*),

selanjutnya diuji tekan dengan memberikan beban tepat searah sumbu vertikal silinder uji (*ASTM C 39-93a*). Lima silinder beton dipersiapkan untuk diuji tekan. Nilai kuat tekan diperoleh dari rata-rata tiga kali pengujian tekan pada silinder beton. Sedangkan dua silinder beton lainnya dipersiapkan bila hasil nilai uji tekan diragukan.



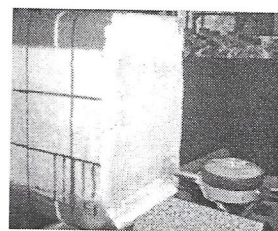
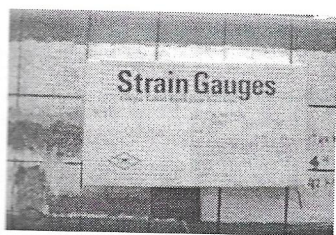
i. Tata letak pengujian lentur balok komposit

ii. Sketsa potongan balok

Gambar 5. Pengujian lentur balok komposit dan perlengkapan

Tata letak pengujian lentur dilaksanakan sebagaimana gambar di atas. Spesimen didukung oleh dua tumpuan yang berjarak  $l$  pada *loading frame*. Kemudian sejauh  $1/3l$  dan  $2/3l$  dari tumpuan diberikan beban masing-masing  $1/2P$  dari *piston* di tengah bentang yang digerakkan oleh manual *hydraulic jacking*.

Sensor *Linear Variabel Displacement Transducer* (LVDT) yang berguna untuk membaca nilai beban dipasang diantara *piston hydraulic jacking* dan baja pembagi beban  $1/2P$ . Nilai beban direkam dan tercetak pada *print out* oleh *data lodger*. Pemasangan *dial gage* di tengah bentang, diperlukan untuk mengetahui nilai penurunan badan balok beton yang diakibatkan beban. Pemasangan *dial gage* di kedua ujung balok digunakan untuk mengetahui *slip* antara *lips channel* dan beton. *Strain gage* dipasang pada bagian tengah dari panjang balok. Pemasangan *strain gage* diperlukan untuk mendapatkan nilai regangan pada beton dan baja.



i. *straingage* beton

ii. *straingage* baja

iii. *dial gage*

Gambar 6. Sensor pengukur regangan terpasang pada balok uji

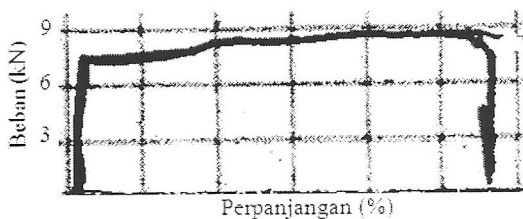
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Pemeriksaan Bahan

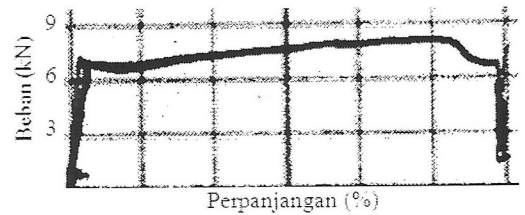
Hasil pemeriksaan agregat halus menunjukkan bahwa butiran agregat bergradasi agak kasar atau berada pada daerah 2. Berat jenis pasir sebesar  $2,1 \text{ gram/cm}^3$ . Nilai kandungan kotoran organik sebesar 3,15%, kurang dari 5% sebagaimana disebutkan PUBI (1982); agregat halus dalam campuran beton boleh dilaksanakan tanpa dicuci. Selanjutnya hasil pemeriksaan agregat kasar menunjukkan bahwa butiran agregat berada pada daerah 2, dan berat jenis kerikil sebesar  $2,2 \text{ gram/cm}^3$ .

### Pengujian Tarik *Lips Channel*

Hasil rata-rata pada pengujian tarik baja *lips channel* 436,14 MPa, pada sisi sayap sebesar 434,78 MPa dan badan 437,5 MPa. Pengujian tarik baja *lips channel* sayap dan badan menghasilkan kurva yang belum sempurna. Nilai modulus baja *lips channel* ditentukan oleh nilai tangen sudut kurva dengan sumbu X, sudut yang dibentuk antara kurva tegangan-regangan dan garis horisontal hampir  $90^\circ$  atau tegak lurus sepertinya berimpit pada sumbu Y. Jadi nilai modulus elastisitas baja *lips channel* yang diperoleh dari gambar di atas ditentukan dari perhitungan pada titik tertentu pada kurva, yaitu membagi nilai tegangan dengan regangannya; atau disesuaikan dengan baja pada umumnya yaitu 210000 MPa. Hal tersebut disebabkan oleh skala beban pada mesin terlalu besar, pada hal nilai beban sudah terkecil. Selain itu berkas garis yang terlalu tebal, karena permukaan kertas yang dipergunakan terlalu menyerap tinta. Nilai berat jenis sebesar  $6830 \text{ kg/m}^3$ .



i. Bagian sayap



ii. Bagian badan

Gambar 7. Hubungan antara beban dan perpanjangan *lips channel* [15]

### Komposisi bahan dan *Slump*

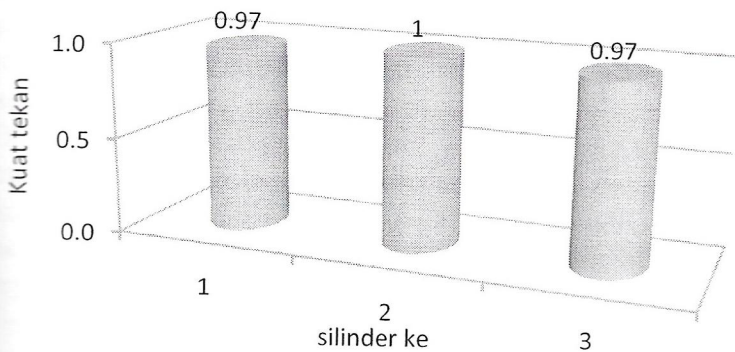
Pencampuran bahan beton disesuaikan *mix design* mutu  $f'_c$  35 MPa. Perbandingan berat bahan penyusun 1 semen *portland* : 2,3 pasir: 2,5 kerikil dan 0,473 air. Pencetakan 5 spesimen silinder dan 2 balok direncanakan mengikuti penelitian terdahulu [15], yaitu 39,402 kg semen *portland* merek Semen Gresik, 108,6 kg agregat halus dari penambangan pasir di kaki gunung Merapi Muntilan Kabupaten Magelang, 116,5 kg agregat kasar pecah mesin dari penambangan Leyangan Ungaran Kabupaten Semarang, dan 16,42 l air. Volume air yang dicampurkan lebih kecil 10,5% daripada jumlah yang direncanakan. Pengurangan air 10,5% atau sejumlah 2,02l (18,48l-16,42l), disebabkan oleh permukaan butiran sebagian pasir dan kerikil basah. Nilai faktor air semen adalah 0,42. Nilai rata-rata dari pengujian *slump* tiga kali pada beton segar sebesar 4,5 cm.

### Kuat tekan silinder beton

Hasil pengujian tekan rata-rata dari tiga silinder beton bernilai 38,171 MPa. Kuat tekan tersebut menunjukkan bahwa mutu beton termasuk mutu  $f'_c$  35 MPa. Kuat tekan silinder masing-masing adalah 39 MPa, 37,7 MPa, dan 37,8 MPa. Nilai rata-rata kuat tekan sebesar 38,17 MPa lebih kecil 3,71 MPa dari kuat tekan silinder beton yang telah dilakukan Nuroji (2008), lebih besar 0,46 MPa dari Widjaja dan Nuroji (2009). Nilai kuat tekan tersebut telah sesuai dengan mutu beton yang direncanakan.

Air yang dituangkan ke dalam ruang campur dilaksanakan dalam 4 tahap, sehingga nilai faktor air semen lebih kecil, dan nilai *slump* lebih kecil; Nilai *slump* yang relatif kecil menghasilkan kuat tekan yang lebih besar (Tjokrodimuljo, 1996; Brook, 1997). Pencucian agregat kasar dan halus dilakukan untuk meniadakan debu di permukaannya, agar lekatan matriks yang terjadi mencapai nilai optimal. Lapisan

kotoran yang berasal dari debu atau lainnya dapat mengurangi kesempurnaan ikatan permukaan agregat dan pasta semen.

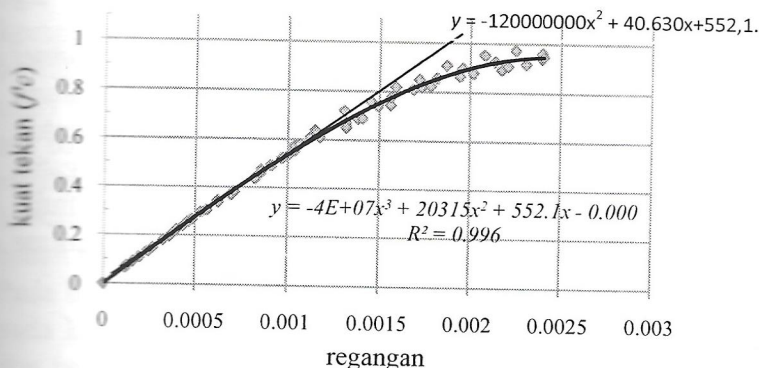


Gambar 8. Kuat tekan beton silinder

#### Modulus Elastisitas silinder beton

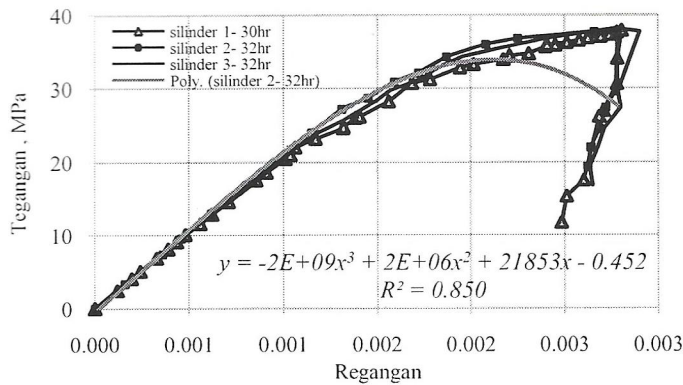
Nilai regangan diperoleh berdasarkan *print out data lodger* yang diperoleh dari *straingage* dan dihubungkan dengan beban tekannya. Kurva pada Gambar 9. memperlihatkan hubungan regangan dan tegangan dari 3 silinder beton dengan berbagai nilai beban tekan dan regangan lebih kecil dari 0,0025. Setiap silinder diambil 30 data regangan-tegangan (x,y).

Kurva yang tergambar didekati melalui bantuan program dengan berbagai persamaan. Hasil pemilihan menyatakan bahwa persamaan garis lengkung yang sesuai yaitu persamaan *polynomial* berderajat 3,  $y = 0,0007x^3 + 20315x^2 + 552,1$ ; dengan nilai derajat kepercayaan  $R^2 = 0,99$ . Persamaan garis singgung atau  $y = -120000000x^2 + 40.630x + 552,1$ . Nilai modulus elastisitas silinder beton dengan kuat tekan rata-rata 38,171 MPa adalah 20,727 MPa.



Gambar 9. Regangan dan Tegangan pada 3 silinder beton

Hubungan regangan dan tegangan pada masing-masing silinder beton, menunjukkan tiga buah garis yang berimpit sebelum mencapai tegangan 25 MPa. Pada Gambar 10 menampilkan kurva masing-masing nilai regangan dan tegangan. Salah satu persamaan yang diperoleh dari program menunjukkan  $y = -2E+09x^3 + 2E+6x^2 + 21853x - 0,452$ , dengan nilai  $R^2 = 0,850$ . Nilai modulus elastisitas,  $E$ , berdasarkan hasil uji regangan-tegangan silinder beton yang dihitung sesuai dengan ASTM masing-masing adalah 28,252 MPa, 28,116 MPa, dan 28,476 MPa. Nilai  $E$  rata-rata sebesar 28,281 N/mm<sup>2</sup>.



Gambar 10. Hubungan Regangan dan Tegangan pada silinder beton [15]

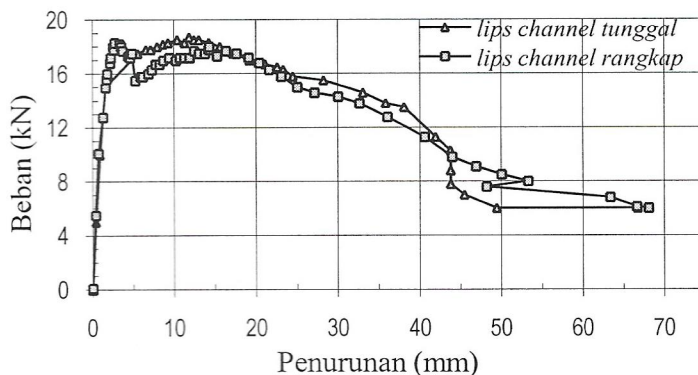
Nilai modulus elastisitas  $E$  masing-masing silinder beton sesuai dengan rumus SNI yaitu 28,935 MPa, 28,870 MPa, 29,041 MPa; dan  $E$  silinder beton rata-rata 28,948 MPa. Nilai  $E$  dari formula ASTM lebih kecil 2,5% daripada SNI. Perbedaan tersebut boleh jadi dapat diterima atau tidak signifikan atau dapat dianggap sama. Nilai  $E$  sebesar 20,427 MPa yang lebih kecil daripada  $E_{ASTM}$  rata-rata 28,281 MPa dan lebih kecil juga dari  $E_{SNI}$  rata-rata 28,948 MPa; namun demikian nilai  $E$  dari Gambar 9 lebih mendekati nilai sebenarnya [15].

Regangan silinder beton

Nilai regangan maksimum masing-masing silinder beton yaitu 0,002806, 0,002784, dan 0,002773; dan nilai rata-rata dari ketiganya adalah 0,002788. Nilai nilai regangan tersebut 39% lebih besar daripada nilai regangan beton pada kurva Gambar 3 yaitu 0,002. Nilai regangan yang lebih besar disebabkan oleh material yang tidak sama dengan material penyusun beton acuan, selain itu nilai yang diambil adalah nilai pada saat beban maksimum.

Penurunan dan besar beban

Nilai hubungan antara penurunan balok komposit beton dengan baja *lips channel* tunggal dengan beban yang didukung disajikan pada Gambar 11. Kurva mengalami perubahan sudut pada saat beban lebih besar daripada 15 kN. Sudut yang dibentuk kurva dengan sumbu horizontal Y semakin mengecil, bahkan bernilai negatif. Fenomena ini menunjukkan bahwa ikatan antara baja *lips channel* dan beton mulai berkurang pada beban di atas 5 kN sampai 15 kN. Pada beban 15 kN terjadi *slip* antara balok komposit beton-*lips channel* tunggal dan baja.



Gambar 11. Hubungan penurunan dan beban

Hasil pembebanan lentur pada balok komposit beton dengan perkuatan baja *lips channel* rangkap di sisi bawah dan atas menunjukkan bahwa beban terpusat  $P$  terbesar adalah 18,8 kN, dengan nilai *displacement* rata-rata 2,87 mm, nilai regangan rata-rata pada *lips channel* sisi tarik (bawah) 0,001008, nilai regangan beton di tengah 0,000008, dan nilai regangan baja di atas 0,000381. Nilai rata-rata regangan baja sisi tarik 0,001008 lebih kecil dari regangan maksimum baja 0,02.

Balok beton dengan perkuatan baja *lips channel* tunggal di sisi bawah, ternyata mampu mendukung beban lentur  $P$  terbesar 18,7 kN, dengan nilai *displacement* rata-rata 11,87 mm, nilai regangan rata-rata pada *lips channel* sisi bawah 0,000997, nilai regangan beton di tengah 0,000261, dan nilai regangan beton di atas 0,000732. Nilai rata-rata regangan baja sisi bawah 0,000997 lebih kecil dari regangan maksimumnya.

Nampaknya kedua nilai beban terpusat hampir sama 18,8 kN dan 18,7 kN, beban lentur tersebut lebih kecil dari beban lentur penelitian Nuroji [17], yaitu balok beton bertulangan tunggal dengan baja tulangan 2D13 seluas  $A_s = 2,653 \text{ cm}^2$  dengan beban terbesar 47,5 kN. Nilai deformasi balok komposit dengan perkuatan *lips channel* rangkap lebih kecil daripada tunggal. Tampaknya balok komposit dengan perkuatan ganda

Perilaku balok komposit yang menerima beban lentur menunjukkan bahwa baja *lips channel* sisi di bawah dan atas balok beton tidak pernah mengalami putus, melainkan berdeformasi lentur. Pengamatan saat pengujian menunjukkan bahwa lekatan permukaan baja *lips channel* dan beton yang tidak sempurna, regangan beton terlampaui, dan deformasi beton ke arah vertikal bawah memisahkan baja sampai dengan mengubah bentuk *lips* baja dari beton.

#### Regangan balok

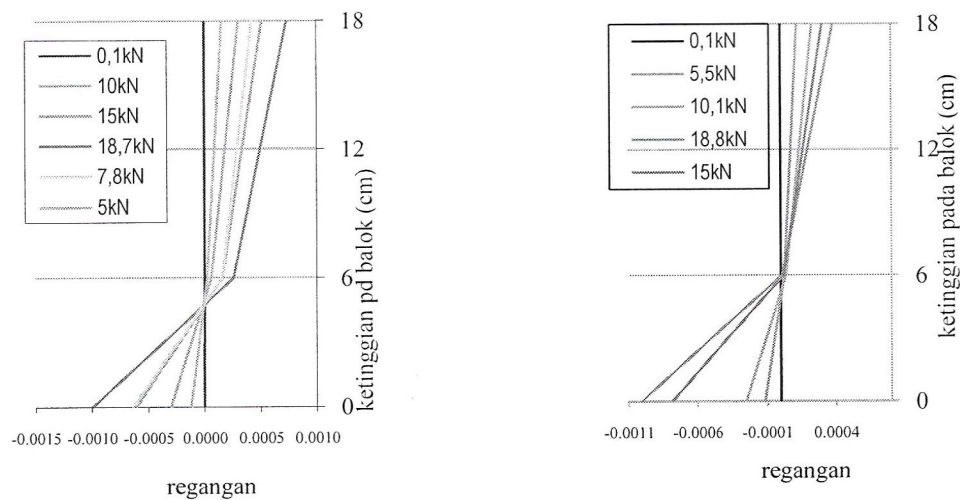
Kurva hubungan nilai pembebanan ( $P$ ) dan regangan ( $\epsilon$ ) yang terrekam dalam *data lodger* diperlihatkan pada lampiran di bagian belakang. Penggambaran hubungan  $P$  dan  $\epsilon$  dalam bentuk grafik tidak digambarkan semuanya, tetapi hanya ditunjukkan sebagian, agar garis dalam gambar dapat terlihat lebih jelas. Pembebanan terpusat pada balok komposit beton *lips channel* tunggal sebesar 0,1 kN menyebabkan regangan baja sisi bawah 0,000002, regangan beton pada jarak 6 cm dari bawah dan 18 cm (perimeter atas) balok sebesar 0. Beban ditingkatkan menjadi 5 kN mengakibatkan regangan baja sisi bawah 0,000122, regangan beton pada jarak 6 cm dari bawah sebesar 0,000024 dan, regangan beton di perimeter atas balok sebesar 0,000158. Kedua garis menampilkan hubungan persamaan linear. Komposit baja *lips channel* dan beton yang mendukung beban masih menunjukkan ikatan yang kuat, atau tidak ada *slip* diantara beton dan baja. Pada beban 10 kN mengakibatkan regangan baja sisi bawah 0,000303, regangan beton pada ketinggian 6 cm dari bawah sebesar 0,000064 dan, regangan beton di perimeter atas balok sebesar 0,000308; Garis yang menghubungkan ketiga titik tersebut nampak mulai berbelok (tidak linier) pada koordinat (0,000064,6). Garis yang patah menunjukkan bahwa ada indikasi retak pada balok beton. Selanjutnya beban maksimum yang mampu didukung 18,7 kN dan regangan baja sisi bawah 0,000997, regangan beton pada jarak 6 cm dari bawah 0,000261, dan regangan pada 18 cm sebesar 0,000732 [15].

Pembebanan terpusat pada balok komposit beton *lips channel* rangkap sebesar 0,1 kN menyebabkan regangan baja sisi bawah 0,000002, regangan beton pada jarak 6 cm dari bawah dan 18 cm (perimeter atas) balok sebesar 0. Beban ditingkatkan menjadi 5,5 kN mengakibatkan regangan baja sisi bawah 0,000177, regangan beton pada jarak 6 cm dari

bawah sebesar 0,000025 dan, regangan baja di perimeter atas balok sebesar 0,000229. Garis yang menghubungkan titik-titik nilai regangan dan posisinya akibat pembebanan 0,1 kN dan 5,5 kN memiliki persamaan linear. Pada beban 10,1 kN mengakibatkan regangan baja sisi bawah 0,000250, regangan beton pada ketinggian 6 cm dari bawah sebesar 0,000036 dan, regangan baja di perimeter atas balok sebesar 0,000229. Garis yang menghubungkan titik-titik nilai regangan dan posisinya akibat pembebanan 10,1 kN memiliki persamaan yang tidak linier.

Hasil pengamatan pada spesimen balok yang dibebani 0,1 kN dan 5,5 kN menunjukkan tidak ada slip antara beton dan lips channel. Hal ini dapat diartikan bahwa persamaan garis yang linier (lurus) mencerminkan bahwa tidak ada slip pada spesimen balok. Komposit baja *lips channel* dan beton yang mendukung beban masih menunjukkan ikatan yang kuat. Sedangkan pada garis yang menghubungkan ketiga titik (nilai regangan, ketinggian) pada pembebanan 10,1 nampak mulai berbelok (tidak linier) pada koordinat (0,000036,6). Garis yang patah menunjukkan bahwa ada indikasi retak pada balok beton atau *slip*.

Beban maksimum yang mampu didukung balok komposit beton *lips channel* rangkap 18,8 kN dan regangan baja sisi bawah 0,001008, regangan beton pada jarak 6 cm dari bawah 0,000008, dan regangan baja di serat tekan (ketinggian 18 cm) sebesar 0,000381.



i. balok specimen *lips channel* tunggal rangkap

ii. balok specimen *lips channel*

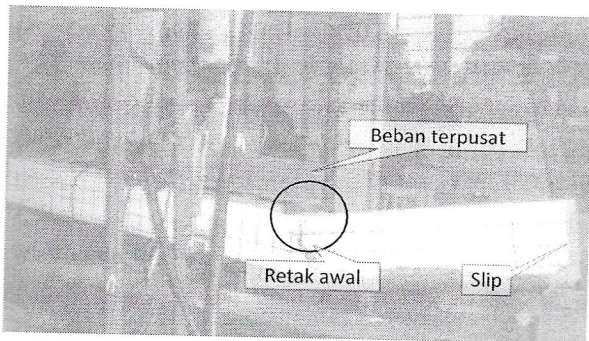
Gambar 12. Diagram regangan balok beton komposit beton *lips channel*

Baja *lips channel* sisi bawah balok beton tidak mengalami putus, melainkan berdeformasi lentur. Pengamatan saat pengujian menunjukkan bahwa lekatan permukaan baja *lips channel* dan beton yang tidak sempurna, regangan beton terlampaui, dan deformasi beton ke arah vertikal bawah memisahkan baja sampai dengan mengubah bentuk *lips* baja dari beton.

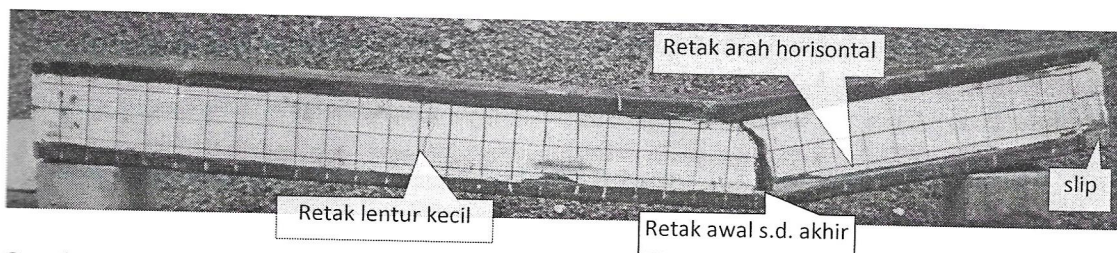
#### Retak

Retak permukaan pertama ditemukan pada pembebanan bergerak dari 17,5 kN. Letak retak di bawah beban terpusat “ $\frac{1}{2}P$  kanan”, sebagaimana yang terlihat pada gambar

berikut. Retak berkembang sampai dengan balok komposit beton *lips channel* tidak mampu menerima beban lagi. Retak bergerak ke arah atas balok (vertikal) dan ke samping kanan (horizontal) segaris dengan bagian *lips* dari baja. Pergeseran ditunjukkan oleh perubahan *dialgage* yang terpasang di kedua ujung balok spesimen. Pergeseran antara baja *lips channel* dan beton pada sisi bawah berkembang dari 1mm sampai 42 mm ke arah kanan sesuai dengan beban yang diberikan; sedangkan balok beton di sisi kiri " $\frac{1}{2}P$  kanan" tidak bergeser.



Gambar 13. Retak pada balok komposit beton dan *lips channel* tunggal



Gambar 14. Retak pada balok komposit beton dan *lips channel* rangkap

Kegagalan balok beton dengan perkuatan baja eksternal secara definitif tergolong kegagalan karena geser, karena arah retak tegak lurus tulangan longitudinal. Kegagalan balok beton dalam mendukung beban lentur adalah kegagalan karena tekan atau *overreinforced*, yaitu luasan baja *lips channel* yang besar belum mencapai leleh tetapi beton telah mencapai regangan maksimum. Namun demikian kegagalan ini dipengaruhi juga oleh *slip*, sehingga kegagalan yang terjadi bukan *overreinforced* melainkan *underreinforced*.

#### 4. DAFTAR PUSTAKA

1. Besari, Mohamad Sahari, 2007, Review of Some Physical and Mechanical, Parameters of Concrete, *Proceeding of International Conference on Material Development in the Construction Industri November 21, 2007*, Four Season Hotel Jakarta
2. Suhendro, Bambang, 2003, *Pidato Pengukuhan Guru Besar Fakultas Teknik UGM*, Yogyakarta: Fakultas Teknik UGM.
3. Abadjieva, T., 2005, *Introducing High Performance Concrete to Botswana Construction Industry*, Exploring Innovation in Education and Research © iCEER - 2005 Tainan, Taiwan, 1-5 March 2005, Tainan, Taiwan, <http://www.iaalab.ncku.edu.tw/iceer2005/Form/PaperFile/23-0015.pdf>

4. Spacone, Enrico, dan El-Tawil, Sherif, 2004, Nonlinear Analysis of Steel-Concrete Composite Structures: State of the Art, *Journal of Structural Engineering* Vol. 130, No. 2, February 1, 2004, pp. 159–168, <http://www-personal.umich.edu/~eltawil/CHS-State-of-the-art.pdf> ACI Committee 446, 2006, Manual Concrete Practice (MCP) 2006, American Concrete Institute (ACI)
5. Brooks, 1987, *Teknologi dan Praktik Beton*, Jakarta: Erlangga
6. Mahasneh Bassam Z. dan Gharaibeh Emhaidy S., 2005, Enhancing Filled-tube Properties by Using Fiber Polymers in Filling Matrix, *Journal of Applied Sciences* 5 ISSN 1812-5654, © 2005 Asian Network for Scientific Information, pp 232-235, <http://www.ansijournals.com/jas/2005/232-235.pdf>, 5 Juni 2008
7. ACI Committee 446, 2006 dalam Manual Concrete Practice, 2006
8. McCormac, Jack C., 2001, *Desain Beton Bertulang Jilid 1*, Jakarta: Erlangga
9. Zhang, Jun , Leung, Christopher K.Y., Cheung Yin Nee, 2006, Flexural performance of layered ECC-concrete composite beam, *Composites Science and Technology* 66 (2006) 1501–1512, [http://www.engineeredcomposites.com/publications/2005-2006/Zhang\(CompSciTech\).pdf](http://www.engineeredcomposites.com/publications/2005-2006/Zhang(CompSciTech).pdf)
10. Tong, 1994, Proceedings of the 4th Association for International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structure (ASCCS) International Conference, Slovakia: Expertcentrum, pp 1-3.
11. Gourley, Brett C. et al., 2001, A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behavior of Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns, *Structural Engineering Reports No. ST-01-4*, Minneapolis, Minnesota: Department of Civil Engineering Institute of Technology University of Minnesota, pp 1-2, 10.
12. Samhal, Erkan, 2005, Lecture 1.1: Composite Construction from SSEDTA (European Steel Computer Aided Learning, <http://atlas.cc.itu.edu.tr/~haluk/COMPOSITE%201.pdf>
13. McCormac, Jack C., 2001, *Desain Beton Bertulang Jilid 2*, Jakarta: Erlangga
14. Park, Robert dan Pauley, Thomas, 1975, *Reinforced Concrete Structure*, Toronto Canada: John Wiley & Sons, Inc.
15. Widjaja Andang dan Nuroji, 2009, Perkuatan Eksternal Tunggal Lips Channel Pada Balok Beton, *Prosiding Seminar Nasional* di ITS Prodi D3, Surabaya: Prodi D3 FTSP ITS, halaman 70-74.
16. ASTM Standard C 39-93a,
17. Nuroji, 2008, Pemodelan Retak dan Bond Slip pada Struktur Beton Bertulang dengan menggunakan Nonlinier FEM, *Laporan Penelitian*, Semarang: Lembaga Penelitian Undip