

PERILAKU STATIS STRUKTUR BETON PRACETAK DENGAN SISTEM SAMBUNGAN BASAH

Hery Riyanto

Dosen tetap jurusan Teknik Sipil Universitas Bandar Lampung

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku statis elemen struktur balok beton bertulang pracetak yang disambung dengan sambungan basah. Benda uji yang digunakan adalah balok beton bertulang 30 MPa dengan 6 buah tulangan utama diameter 8 mm yang diletakkan di atas dua tumpuan sendi rol pada masing-masing ujungnya mempunyai penampang prismatis segi empat 10x18 cm². Sambungan basah adalah sambungan yang menggunakan bahan beton polimer 40 MPa dengan metoda penyambungan menggunakan metoda prepacked. Kajian perilaku statis pada model benda uji untuk mengetahui kekuatan lentur struktur, kekakuan dan pola retak struktur balok akibat beban statis yang diletakkan di tengah bentang. Beban statis adalah beban mempunyai arah dan besar tetap. Hasil kajian struktur beton yang disambung kemudian dibandingkan dengan struktur yang tanpa sambungan (monolit). Kekuatan balok dengan sambungan basah lebih kecil daripada kekuatan balok monolit.

Seiring dengan perkembangan pemakaian beton pracetak sebagai elemen struktur bangunan di Indonesia dewasa ini yang cukup pesat, maka perlu dukungan penelitian yang lebih banyak mengenai beton pracetak. Salah satu bagian terpenting dari sistem struktur beton pracetak yang perlu penelitian perilakunya adalah sambungan (*joint*). Sambungan berfungsi untuk menghubungkan elemen-elemen struktur yang sama atau berbeda. Pada dasarnya ada dua jenis sambungan pada sistem struktur beton pracetak, yaitu sambungan basah (*wet joint*) dan sambungan kering (*dry joint*). Pada sambungan basah penyambungan dilakukan dengan cara grouting atau pengecoran di tempat dengan material yang sama atau berbeda, sedang sambungan kering adalah sambungan yang menggunakan baut, paku keling atau las.

Perubahan kekuatan yang diakibatkan oleh adanya sambungan akan mempengaruhi perilaku sistem struktur pracetak dalam merespon gaya statis. Jika sambungan diletakkan pada daerah momen maksimum dan bahan penyambung lebih kuat dari bahan yang disambung, maka akan menyebabkan daya dukung struktur terhadap beban statis lebih besar. Selain faktor mutu bahan penyambung yang lebih baik dari bahan material yang akan disambung, faktor lain yang akan meningkatkan kekuatan sambungan adalah penambahan luas tulangan utama. Pada jenis sambungan basah dapat digunakan bahan beton polimer yang mempunyai kekuatan yang lebih baik dibanding beton biasa dan bahan ini dapat mengering lebih cepat. Jumlah sambungan pada suatu sistem struktur juga akan mempengaruhi perilaku struktur.

Perilaku statis suatu struktur adalah respon struktur akibat beban statis. Beban statis adalah beban yang mempunyai arah yang tetap. Respon struktur akibat gaya statis ini ditunjukkan dengan deformasi yang terjadi pada struktur. Jika deformasi yang terjadi sudah mencapai regangan retak, maka respon struktur akan menunjukkan fenomena retak. Dari pengamatan respon struktur akibat gaya statis dapat diketahui kekuatan struktur. Yang dimaksud dengan kekuatan struktur adalah kemampuan struktur menerima beban luar yang besarnya makin meningkat hingga struktur mencapai keruntuhan. Kemampuan struktur ditunjukkan dengan kekakuan struktur yang diperoleh dari hubungan antara gaya dan lendutan. Selain itu dapat diketahui perilaku statis lainnya yaitu pola retak struktur hingga mencapai keruntuhan.

Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku statis dan dinamis elemen struktur beton bertulang pracetak yang disambung dan diletakkan di atas dua tumpuan pada masing-masing ujungnya. Beban statis dan dinamis diaplikasikan di tengah bentang. Perilaku statis yang dikaji adalah: Kekuatan struktur, kekakuan dan pola retak serta pengaruh jenis, letak dan jumlah sambungan terhadap perilaku statis.

Pembatasan Masalah

Pada penelitian ini pengujian dilakukan terhadap benda uji berupa balok beton bertulang yang merupakan salah satu elemen struktur pracetak. Balok beton bertulang pracetak yang diuji adalah balok beton bertulang yang mempunyai sambungan. Sambungan yang digunakan

adalah sistem sambungan basah (sambungan kuat). Bentuk penampang balok adalah persegi panjang prismatis dan sistem struktur diletakkan di atas tumpuan sendi dan rol pada masing-masing ujungnya. . Beban statis yang berasal dari alat *servo hydraulic* diaplikasikan melalui kontrol lendutan dan penambahan gaya tertentu secara perlahan. Lendutan yang terjadi dibatasi hingga balok beton mencapai keadaan ultimit atau gaya dihentikan saat lendutan mencapai 20 hingga 25 mm.

Sifat Lentur Beton Bertulang

Semua material mempunyai sifat lentur saat menerima beban. Begitu juga untuk elemen struktur beton bertulang saat menerima beban. Jika struktur diberi beban pada titik tertentu dengan arah dan penambahan gaya yang tetap atau berubah maka struktur akan melentur membentuk deformasi. Saat elemen struktur melentur maka ada bagian penampang yang mengalami gaya tekan dan bagian lain mengalami gaya tarik. Hubungan antara deformasi dan gaya dapat dilihat dengan menggunakan data logger dan pembacaan pada alat tekannya sendiri. Pada struktur yang masih dalam daerah elastis, jika beban dihilangkan maka struktur akan kembali pada posisi semula. Namun jika struktur sudah mengalami retak, jika beban dihilangkan akan terjadi sisa deformasi.

Sebelum tulangan mencapai leleh, struktur beton bertulang masih dapat menahan beban luar. Daktilitas struktur terlihat dari panjangnya deformasi mulai dari keadaan tulangan leleh hingga struktur runtuh (Gambar III.1). Beberapa asumsi dasar dari teori lentur adalah penampang akibat lentur tetap datar baik sebelum maupun sesudah melentur dan regangan pada beton dan tulangan sama

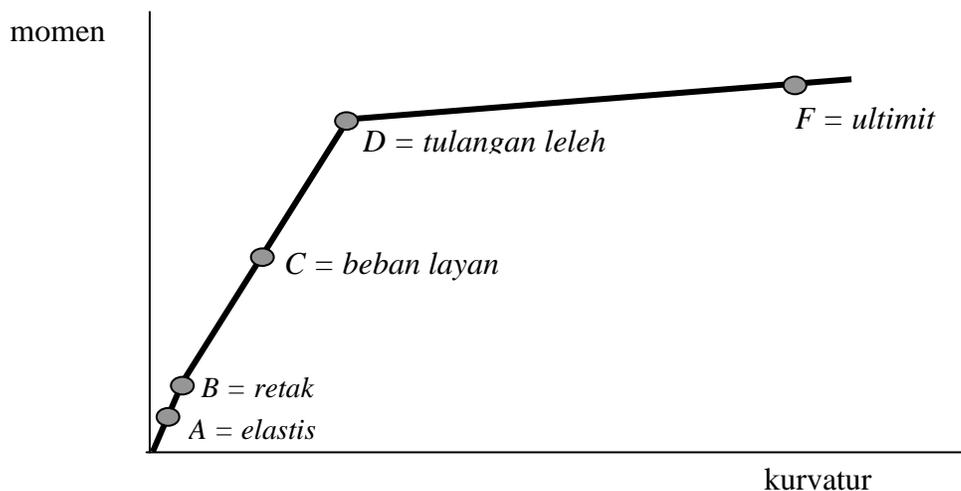
pada suatu titik yang ditinjau. Asumsi lain adalah tegangan pada beton dan tulangan dapat dihitung dari kurva diagram tegangan-regangan untuk beton dan baja. Asumsi terakhir adalah mengabaikan kekuatan tarik beton pada perhitungan lentur dan beton hancur pada saat regangan tekan mencapai batas yaitu 0.0035. Fenomena retak pada struktur beton bertulang pasti terjadi saat menerima beban lentur karena sifat beton yang tidak dapat menahan gaya tarik. Dari pola retak yang terjadi dapat diketahui apakah retak yang terjadi diakibatkan oleh gaya geser atau retak akibat lentur murni.

Kemampuan elemen struktur menahan lentur dapat ditunjukkan dalam kapasitas momen dengan analisa gaya-gaya yang bekerja pada penampang. Pada penampang yang mendapat gaya lentur terdapat penampang beton tekan dan penampang tulangan tarik dan tekan. Kapasitas momen penampang menunjukkan kemampuan struktur menahan gaya lentur dan tergantung dari mutu beton, luas penampang beton, mutu tulangan, letak tulangan, luas tulangan tarik dan tekan. Kapasitas

momen pada saat beton retak akan berkurang karena penampang tekan beton berkurang. Kapasitas momen penampang benda uji dengan asumsi tulangan tekan sudah leleh dapat ditunjukkan sebagai berikut (Gambar III.2).

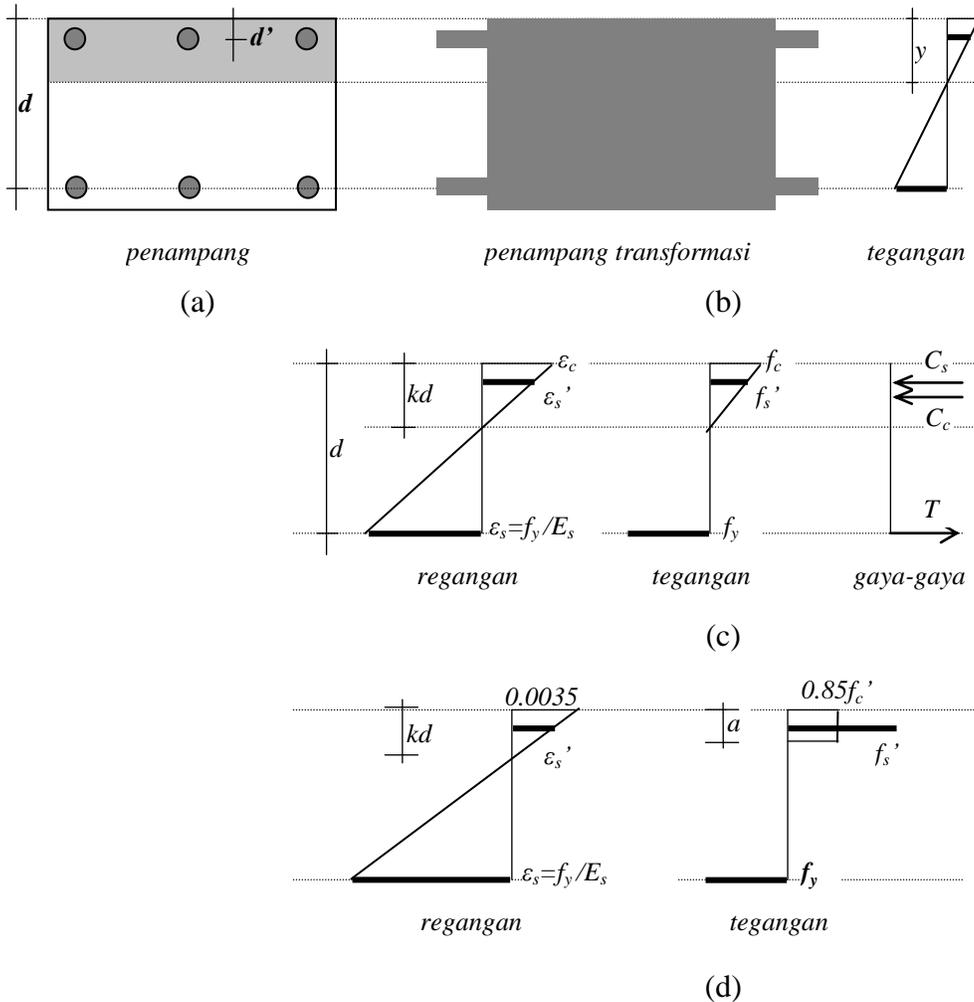
Kapasitas sambungan basah

Pada sambungan basah digunakan beton polimer 40 MPa dan diameter tulangan utama yang disambung 8 mm. Panjang bagian tulangan yang disambung adalah 100 mm (metoda penyambungan dibahas pada Bab IV). Pada daerah sambungan terjadi penulangan ganda karena tulangan dari masing-masing elemen balok yang akan disambung dilebihkan untuk penyambungan dengan mengikatnya menggunakan kawat beton. Efektif luas tulangan pada daerah sambungan lebih besar daripada luas tulangan balok yang akan disambung. Dengan demikian kapasitas penampang pada daerah sambungan lebih besar daripada kapasitas penampang balok yang akan disambung, dan hal ini sesuai dengan maksud pembuatan sambungan yang kuat.



Gambar III.1. Kurva momen–kurvatur

Elastis, sebelum retak



Gambar III.2 (a) penampang balok (b) sebelum retak: perilaku elastis (c) setelah retak: retak awal (d) setelah retak: pada ultimit

Retak terjadi ketika modulus keruntuhan f_r dicapai pada serat dasar balok. Besarnya momen retak adalah

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I}{y} \quad (III.1)$$

dan curvature saat retak adalah

$$\phi_{cr} = \frac{f_r \cdot E_c}{y} \quad (III.2)$$

Setelah retak, awal leleh

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n \quad (III.3)$$

dimana $\rho = \frac{A_s}{b \cdot h}$, $\rho' = \frac{A_s'}{b \cdot h}$ dan $n = \frac{E_s}{E_c}$

$$C_c = \frac{1}{2} f_c b k d \quad (III.4)$$

$$C_s = A_s ' f_s ' \quad (\text{III.5})$$

Dari gaya tekan pada beton dan tulangan tekan maka dapat dihitung momen leleh, M_y dan kurvatur saat leleh ϕ_y (Gambar III.2c).

Setelah retak, pada beban ultimit

Dengan asumsi pada tulangan tekan juga terjadi leleh maka besarnya momen ultimit adalah (Gambar III.2.d)

$$M_u = 0.85 f_c ' ab \left(d - \frac{a}{2} \right) + A_s ' f_s ' (d - d') \quad (\text{III.6})$$

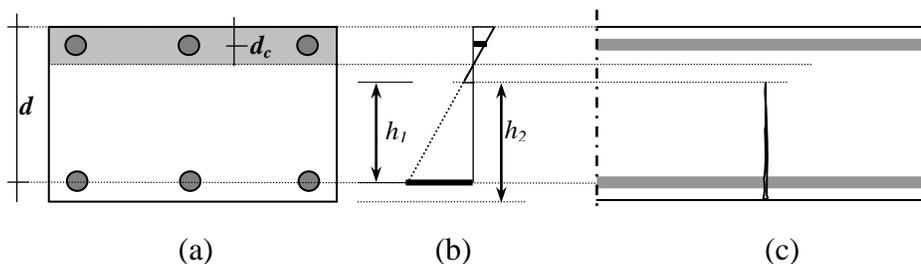
$$\phi_u = \frac{0.0035}{c} \quad (\text{III.7})$$

Dari hasil perhitungan saat elastis, retak dan ultimit dapat dibuat grafik momen-

kurvatur seperti pada Gambar III.1. Kemudian dari pembebanan tahap pertama dimana beban dihentikan setelah balok mengalami retak awal dapat dihitung tinggi retak balok (h_2) pada saat beban dihentikan. Selain tinggi retak juga dapat dihitung lebar retak (ω) balok saat beban dihentikan (Gambar III.3).

$$\omega = 11 \cdot 10^{-6} \beta \cdot f_s \cdot \sqrt[3]{d_c \cdot A} \quad (\text{III.8})$$

$$\text{dimana } \beta = \frac{h_2}{h_1}$$

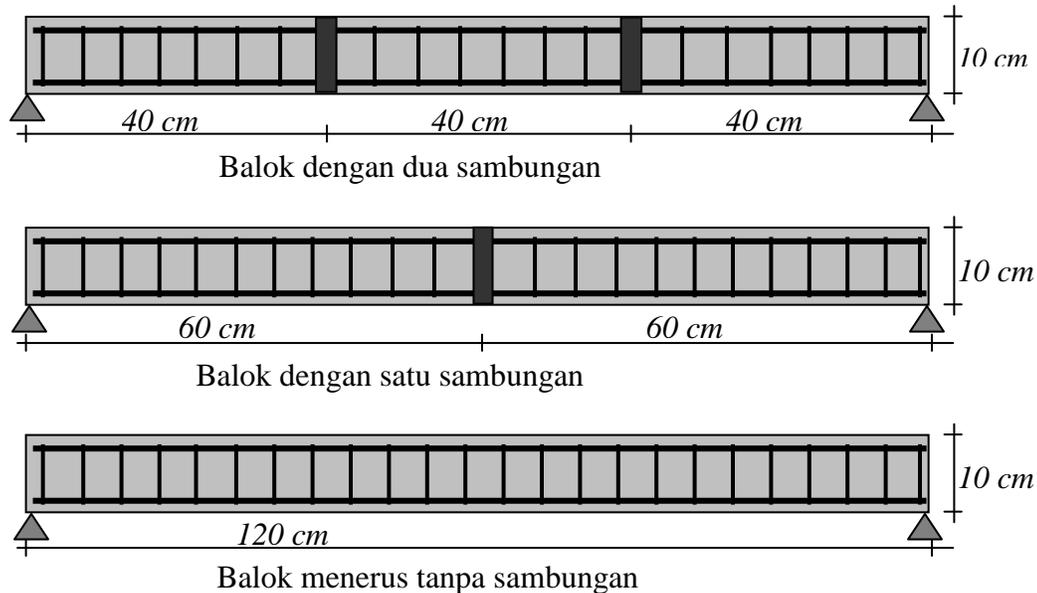


Gambar III.3 (a) penampang balok (b) diagram tegangan setelah terjadi retak (c) retak pada balok

Sambungan

Pada benda uji ini digunakan jenis sambungan basah dan kering. Sambungan basah adalah sambungan dengan melakukan pengecoran di tempat pada lokasi sambungan menggunakan bahan yang lebih baik dari bahan yang disambung. Sedangkan sambungan

kering adalah sambungan menggunakan baut atau las. Letak sambungan untuk benda uji dengan satu buah sambungan terletak di tengah bentang berjarak 60 cm dari tumpuan, sedangkan benda uji dengan dua sambungan terletak pada sepertiga bentang berjarak 40 cm dari tumpuan (Gbr. IV.3).



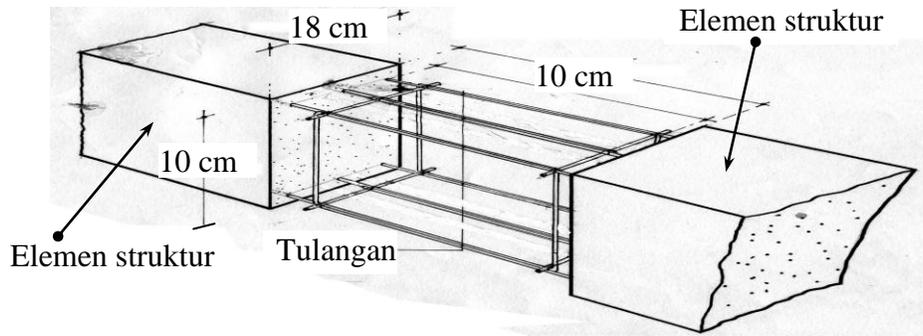
Gbr. IV.3. Letak sambungan pada benda uji

Ada beberapa macam jenis sambungan basah dan sambungan kering, namun berdasarkan studi literatur sebelumnya akan dipergunakan sambungan basah menggunakan beton polimer dengan cara prepacked dan sambungan kering menggunakan pelat baja dan penyambungan dengan menggunakan las listrik.

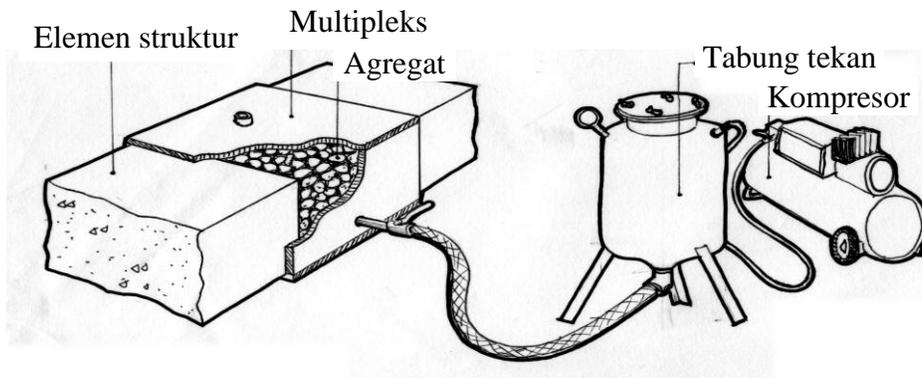
Sambungan basah

Sistem penyambungan elemen beton bertulang pracetak ini adalah menggunakan sambungan basah dengan metoda prepacked. Elemen struktur beton bertulang yang akan disambung terlebih dahulu dicetak dan pada bagian

yang akan disambung tulangan utamanya diletakkan untuk disambung dengan tulangan utama dari elemen balok lainnya (Gbr. IV.4). Sambungan tulangan utama diikat dengan kawat beton kemudian bagian sambungan ini dicor dengan bahan beton polimer. Pada sistem prepacked agregat terlebih dahulu dimasukkan pada sambungan, kemudian menggunakan tabung tekan kompresor seperti tampak pada Gbr. IV.5, pasta polimer dimasukkan ke sela-sela agregat. Sebelum agregat dimasukkan dalam sambungan, sambungan terlebih dahulu ditutupi oleh multiplek di bagian bawah dan samping kanan dan kiri.



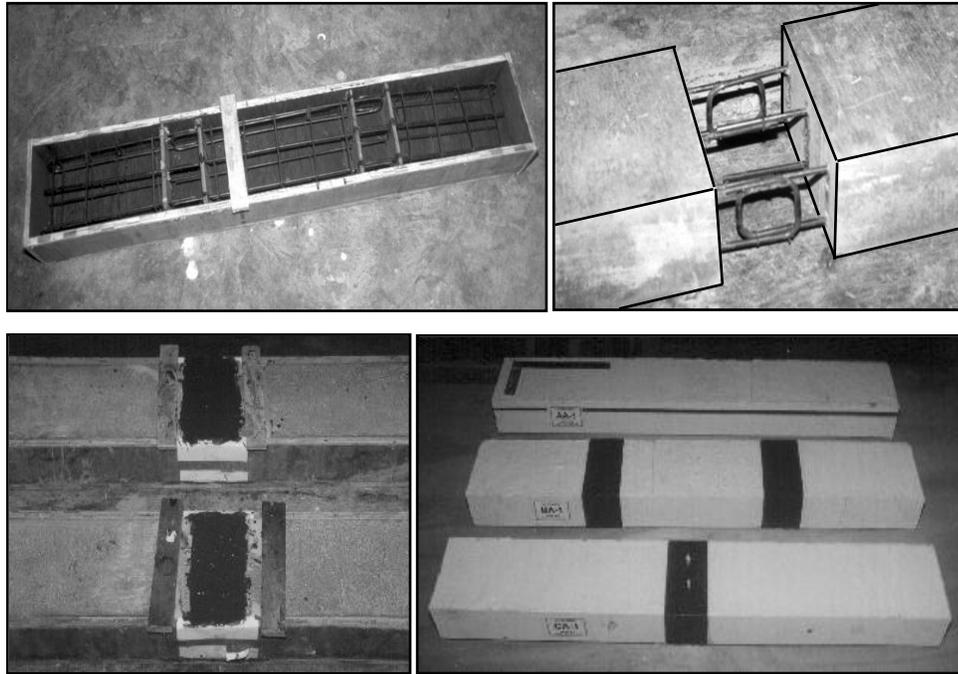
Gbr. IV.4. Sambungan tulangan pada sambungan basah



Gbr. IV.5. Metoda penyambungan cara prepacked

Untuk mencegah bocornya pasta polimer, bagian kayu lapis yang berhubungan dengan beton ditutup dengan sealent polimer. Setelah sealent sudah kering, semua tulangan pada sambungan diolesi dengan methyl ethyl ketone peroxide, kemudian ke dalam cetakan dimasukkan agregat kasar kering oven dengan ukuran merata antara 10 sampai dengan 20 mm. Dari bagian samping yang telah dibor lalu dimasukan selang dengan kendali keran untuk memasukan pasta polimer dengan filler fly-ash. Pasta polimer sebelum dimasukan ke dalam tabung tekan harus diaduk hingga merata untuk mencegah adanya butiran padat dari

filler fly ash. Pengaliran pasta polimer dari dalam tangki ke dalam cetakan prepacked dilakukan dengan bantuan kompresor bertekanan kurang lebih 2 bar. Dengan menggunakan beton polimer penyambungan elemen beton pracetak dapat dilakukan secara cepat. Tergantung dari jumlah methyl ethyl ketone peroxide pengerasan dapat dipercepat hingga 15 menit. Pada pembuatan benda uji ini pengerasan terjadi setelah waktu tiga jam. Gbr. IV.6 menunjukkan cetakan benda uji balok dan tulangan pada daerah sambungan sebelum dilakukan menyambungan dengan metoda prepacked.



Gbr. IV.6. Sambungan basah (searah jarum jam): cetakan benda uji, tulangan pada sambungan, benda uji yang siap diuji dan sambungan setelah proses penyambungan cara prepacked.

Kapasitas penampang pada daerah sambungan lebih besar dari pada kapasitas penampang pada balok yang akan disambung. Adanya tulangan ganda pada sambungan dan bahan penyambung menggunakan bahan beton polimer 40 MPa merupakan penyebab lebih besarnya kapasitas penampang pada daerah sambungan daripada daerah balok yang akan disambung.

Tulangan utama pada daerah sambungan bekerja secara penuh karena panjang loop pada ujung sambungan mencukupi untuk terjadinya leleh pada tulangan agar tulangan lepas dari bahan penyambung. Pada gambar di bawah terlihat mekanisme keruntuhan pada sambungan dengan loop tulangan penyambung (Gambar IV.7). Pada mekanisme keruntuhan pada sambungan basah akibat gaya tarik pada baja tulangan T_s terjadi keruntuhan pada

beton polimer sebagai bahan sambungan. Keruntuhan yang terjadi berupa bidang membentuk sudut 45° terhadap arah gaya tarik yang akan mengalami gaya tarik sebesar f_c , yaitu

$$f_c = \frac{1}{3} \sqrt{f'_c} \quad (\text{IV.1})$$

Besarnya gaya tarik yang diperlukan meruntuhkan atau melepaskan beton polimer dengan luas bidang A_r adalah

$$T_s = A_r \cdot f_c \quad (\text{IV.2})$$

Jika besarnya gaya T_s lebih besar daripada gaya T_s saat leleh, maka tulangan sambungan bekerja secara penuh dan pada analisis kapasitas penampang jumlah tulangannya adalah dua kali jumlah tulangan balok beton bertulang yang akan disambung.

Hasil Pengujian Statis

Pada pengujian statis didapat hubungan antara beban dan lendutan. Dari grafik antara beban dan lendutan dapat dihitung kekakuan balok dengan menghitung kemiringan grafik. Perubahan regangan

pada beton tekan dan tarik terhadap beban juga dapat diketahui dari pembacaan data logger. Secara keseluruhan hasil pengujian statis berupa kekakuan balok (Tabel V.6) adalah sebagai berikut :

Tabel V.6. Kekakuan balok pada kondisi elastis, retak dan runtuh.

No	Nama Balok	Kekakuan (kN/mm)				
		Elastis	Retak	Relative thd elastis	Ultimit	Relative thd elastis
<i>1. Balok dengan dua buah sambungan basah</i>						
1	BG1	2,80	1,45	51%	0,10	4%
2	BG2	2,50	1,90	76%	0,07	3%
3	BG3	2,70	1,75	65%	0,07	3%
4	BG4	2,90	2,40	82%	0,20	6%
<i>2. Balok dengan satu buah sambungan basah</i>						
5	BT1	2,90	1,84	63%	0,11	4%
6	BT2	2,80	2,04	73%	0,11	4%
7	BT3	2,20	1,68	76%	0,14	6%
8	BT4	2,20	2,00	91%	0,11	5%
<i>3. Balok dengan dua buah sambungan kering</i>						
9	KG1	2,20	1,82	77%	0,15	8%
10	KG2	1,90	1,70	84%	0,12	6%
11	KG3	2,40	1,80	83%	0,12	7%
12	KG4	2,50	1,95	93%	0,13	9%
<i>4. Balok dengan satu buah sambungan kering</i>						
13	KT1	2,70	2,20	93%	0,12	6%
14	KT2	2,80	2,00	92%	0,04	3%
15	KT3	2,30	1,75	80%	0,05	3%
16	KT4	2,60	2,40	95%	0,08	5%
<i>5. Balok tanpa sambungan (monolit)</i>						
17	MC1	2,70	2,00	58%	0,20	7%
18	MC2	2,80	2,40	75%	0,20	8%
19	MC3	2,80	2,40	95%	0,17	6%
20	MC4	2,90	2,70	96%	0,14	5%

Kesimpulan

Dari hasil kajian analitik dan uji eksperimental terhadap 20 buah benda uji yang terdiri dari balok dengan satu sambungan basah, balok dengan dua sambungan basah, balok dengan satu sambungan kering, balok dengan dua sambungan kering dan balok monolit masing-masing berjumlah 5 buah, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

Kekuatan

Penggunaan beton polimer sebagai bahan penyambung sambungan basah dan adanya penulangan ganda pada sambungan tersebut menyebabkan kekuatan bahan sambungan lebih besar daripada kekuatan bahan elemen struktur yang disambung. Momen pada daerah tengah bentang (daerah pengujian) mempunyai besarnya tegangan yang sama. Namun karena harga modulus elastisitas bahan penyambung lebih besar daripada modulus elastisitas balok yang akan disambung, maka regangan yang terjadi pada balok lebih besar daripada regangan pada sambungan. Pada balok monolit homogenitas material yang baik menyebabkan tegangan sepanjang balok dipikul oleh kekuatan yang sama. Oleh karena itu balok monolit lebih kuat terhadap beban statis yang bekerja pada tengah bentang

daripada balok dengan sambungan. Balok dengan sambungan kering terdapat reduksi luas penampang sebesar 20 % dan hal ini mempengaruhi kekuatan balok. Namun pengurangan luas penampang tersebut pada kenyataannya hanya menyebabkan penurunan kekuatan sebesar 10 % dari kekuatan beton normal tanpa sambungan.

Kekakuan

Kekakuan yang didefinisikan sebagai tangensial dari kemiringan grafik antara beban dan lendutan menunjukkan perbedaan hasil pengamatan untuk berbagai jenis balok benda uji yang dikaji (Gambar VI.2). Pada daerah elastis kekakuan rata-rata yang terbesar adalah balok tanpa sambungan, 2.83 kN/mm, kemudian disusul balok dengan sambungan basah, 2.63 kN/mm, dan yang terendah kekakuannya adalah balok dengan sambungan kering, 2.37 kN/mm. Namun pada daerah retak kekakuan rata-rata balok dengan sambungan kering, 1.95 kN/mm, adalah lebih besar daripada kekakuan balok dengan sambungan basah, 1.65 kN/mm. Pada daerah retak kekakuan balok monolit masih mempunyai harga paling tinggi, 2.47 kN/mm.

DAFTAR PUSTAKA

1. Aitcin, P.C. (1998) *High-performance concrete*, E & FN Spon, London.
2. Beards, C.F. (1983) *Structural vibration analysis modelling analysis and damping of vibrating structures*, John Wiley & Sons, New York.
3. Beton Verlag (1987) *Precast concrete connection details - structural design manual*, Beton Verlag GmbH, Niederlande.
4. Elliot, Kim S. (1996) *Multi-storey precast concrete framed structures*, Black Well Science Ltd, Osney Mead, Oxford.

5. Mac Gregor, James G. (1997) *Reinforce concrete mechanics and design*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
6. Nashif, Ahid D. (1985) *Vibration damping*, John Wiley & Sons Inc., Canada.
7. Ohama, Yoshihiko (1995) *Handbook of polymer-modified concrete and mortars*, Noyer Publication, New Jersey, USA.
8. Park, R., and Paulay, T. (1975) *Reinforced concrete structures*, John Wiley & Sons, New York.
9. PT. JHS Pilling System (1996) *Precast concrete building system under seismic load*, PCI Journal.
10. Smith, Ronald C. (1998) *Principles and practices of heavy construction*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
11. Smith, William Fortune (1990) *Principle of materials science and engineering*, Mc Graw-Hill Publishing Company, New York.
12. Vertes Gyorgy, Dr. (1985) *Structural dynamics* Elsevier Science Publishing Company, Inc., New York, USA.
13. John Stanton, *Connections in Precast Concrete Structures*, Concrete International, November 1987, pp.49-53.
14. Antoine E. Naaman, James K. Wight, and Hossam Abdoe, *SIFCON Connection for Seismic Resistant Frames*, Concrete International, November 1987, pp.34-39.
15. V.I. Babitsky and A.M. Vepruk (1993), *Damping of Beam Forced Vibration By A Moving Washer*, Journal of Sound and Vibration 166(1), 77- 85.
16. Hery Riyanto (1993), *Kajian Analitik dan Eksperimental dari Faktor Redaman Beton Mutu Tinggi dengan Modal Testing*, Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung.
17. Suraatmadja D, Munaf DR, Hery Riyanto (1998), *Pengujian Lentur Balok Beton yang Disambung Dengan Polimer*, Prosiding Pertemuan Ilmiah Sains dan Materi III, Serpong-Tangerang, pp.255-264.
18. D. J. Ewins (1986), *Modal Testing : Theory and Practice*, Bruel & Kjaer, Research Studies Press Ltd., Letchworth, Hertfordshire, England.
19. S Jerath and MM.Shibani (1985), *Dynamic Stiffness and Vibration of Reinforced Concrete Beam*, ACI Journal March-April 1985/No.2 Proceedings V.82