

PERILAKU MEKANIK BALOK-T BETON BERTULANG HIBRIDA DENGAN BUKAAN PADA BADAN AKIBAT BEBAN MONOTONIK

Jonie Tanijaya¹, M.Sahari Besari², Ridwan Suhud², B.W. Soemardi³

ABSTRACT

Test result on two hybrid T-beams, partially constructed of light weight concrete are presented and discussed in this paper. The specimens were of similar dimensions, subjected to monotonic loading. An opening was provided in the web of the beams, in the high shear region and the high flexural-shear region, respectively. The behavior of the beams are described in terms of their performance with respect to crack patterns, ultimate capacity, mode of failure, stiffness, and ductility. Test results indicate that the ultimate capacity of beams with web opening in the high shear region is lower, however the deflection and curvature ductilities are higher than those of beams with web opening in the high flexure-shear region.

Keywords : T-beam, hybrid reinforced concrete, web opening, monotonic loading, stiffness, and ductility

PENDAHULUAN

Dalam pembangunan gedung-gedung modern, upaya optimalitas dapat dilakukan melalui berbagai cara, antara lain rekayasa terhadap struktur dan/atau materialnya. Pada gedung-gedung modern, jaringan utilitas seperti perpipaan dan kabel biasanya ditempatkan dalam ruang di atas langit-langit di bawah balok lantai. Hal ini menyebabkan diperlukannya ruang kosong antara balok dan langit-langit. Dengan melewati jaringan utilitas tersebut melalui suatu bukaan melintang pada balok lantai, maka ruang tak terpakai tersebut dapat dikurangi dan menghasilkan perencanaan yang lebih rapih dan ekonomis. Namun demikian, adanya bukaan besar pada balok akan mengubah perilaku mekanis balok menjadi lebih kompleks. Hal ini disebabkan karena terjadinya perubahan tiba-tiba dalam dimensi penampang balok serta pemusatan tegangan tinggi pada sudut-sudut bukaan, yang mengakibatkan berkurangnya kekuatan dan kemampuan layan balok tersebut.

Material beton ringan kinerja tinggi dengan karakteristik kekuatan yang tinggi namun berat yang rendah, mempunyai potensi manfaat yang sangat besar dalam upaya untuk mengurangi berat struktur. Reduksi berat struktur dapat dilakukan dengan mengganti sebagian beton normal dengan beton ringan. Seperti diketahui bahwa agregat memiliki proporsi terbesar dalam campuran beton. Dengan mengganti agregat konvensional dengan agregat ringan, maka berat beton (struktur) akan menjadi lebih ringan, yang secara teoritis dapat memperkecil dimensi struktur dan secara keseluruhan penghematan

biaya konstruksi dapat tercapai.

Dari penyelidikan penelitian terdahulu (Lorentsen 1962, Naser et al. 1967, Ragan and Warwaruk 1967, Prentzas 1968, Hanson 1969, Sommes and Corley 1974, Ramey and Tattershall 1973, Barney et al. 1977, Mansur et al. 1984, 1985, 1988, Tan and Mansur 1996), studi perilaku mekanis balok beton bertulang dengan bukaan umumnya dilakukan dengan menggunakan beton normal dengan agregat konvensional. Terkait dengan masalah di atas, dalam penelitian ini studi eksperimental dilakukan untuk mempelajari perilaku mekanis serta pengaruh lokasi bukaan pada badan balok-T beton bertulang hibrida. Kajian eksperimental dilakukan terhadap 2 (dua) balok-T beton bertulang hibrida dengan badan terbuat dari beton normal (BN) dan sayap dari beton ringan kinerja tinggi (BR). Untuk BN, agregat kasar berupa batu pecah/split, sedangkan untuk BR digunakan agregat ringan buatan lempung bekah (*expanded clay*), produksi Puslitbang Permukiman Cilacap.

Pada pengujian balok BM-1, pengamatan difokuskan pada daerah geser tinggi dan pada balok BM-2, bukaan ditempatkan pada daerah lentur-geser tinggi. Sistem pembebanan monotonic dilakukan secara *stroke control* dengan beban terpusat tunggal, sampai balok runtuh.

LANDASAN TEORI

Dalam perencanaan suatu struktur bangunan, kekuatan dan servisibilitas merupakan dua syarat dasar yang harus dipenuhi untuk menjamin bahwa struktur berfungsi secara memuaskan selama masa

¹) Ir. Jonie Tanijaya, M.Sc., Staf pengajar, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar

²) Prof. Ir. M.Sahari Besari, M.Sc., Ph.D., Prof. Dr. Ir. Ridwan Suhud, DEA., Guru besar, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Bandung

³) Ir. B.W. Soemardi, M.Sc., Ph.D., Staf pengajar, Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung, Bandung

layan yang diharapkan. Penaksiran kekuatan yang tepat diperlukan untuk memberikan jaminan keamanan yang cukup terhadap kemungkinan runtuh. Untuk kebutuhan kemampuan layan, defleksi harus cukup kecil dan keretakan harus memenuhi batas toleransi.

Kekuatan balok di atas perletakan sederhana dengan bukaan yang ditempatkan pada daerah yang dikenakan gabungan momen lentur dan gaya geser telah menjadi pertimbangan penelitian diwaktu lampau. Namun sejauh ini, semua penelitian yang ada hanya memperhitungkan beban terpusat, dan *chord* bukaan bebas dari beban luar. Untuk kondisi pembebanan yang demikian, beberapa peneliti telah menyelidiki bahwa balok tersebut berperilaku sama dengan balok dari suatu panel *Vierendeel* dan titik balik lentur terjadi pada tengah bentang. Momen lentur yang diaplikasikan ditahan oleh *resultante* antara tegangan tarik dan tekan dalam *chord*, yang dapat dengan mudah ditentukan dari keseimbangan gaya. Dengan menganggap bahwa gaya geser dipikul oleh salah satu *chord*, balok menjadi statis tertentu. Penampang kritis pada setiap sudut bukaan kemudian direncanakan dengan peraturan gedung yang ada [ACI, 1999]. Namun masalahnya terletak pada pembagian gaya geser total diantara kedua *chord*. Lorentsen (1962), menganggap *chord* tarik seakan-akan sebagai *tie link*, dan gaya geser total dipikul oleh *chord* tekan. Anggapan ini menghasilkan estimasi kekuatan balok yang sangat konservatif. Nasser (1967) dan Ragan dan Warwaruk (1967), menganjurkan bahwa jumlah gaya geser melintang harus didistribusi di antara kedua *chord* sesuai dengan perbandingan luas penampangnya. Walaupun asumsi demikian memberikan keamanan dalam perencanaan, hasil percobaannya menunjukkan bahwa *chord* tekan memikul hampir semua gaya geser pada saat terjadi keretakan. Selanjutnya Prentzas (1968), mengusulkan bahwa jumlah gaya geser didistribusi diantara *chord-chord* dalam proporsi yang sesuai dengan modulus penampangnya. Hanson (1969), menegaskan bahwa *chord* berperilaku sebagai panel *Vierendeel*. Dalam penelitiannya, Ia membandingkan keabsahan dari asumsi Lorentzen dan Nasser tentang distribusi gaya geser antara *chord* tarik dan tekan. Ditunjukkan bahwa untuk bukaan dengan tulangan, asumsi Nasser hanya berlaku di atas titik retak. Kemudian, *chord* tekan cenderung memikul semua penambahan gaya geser. Sommes dan Corley (1974) melakukan sejumlah percobaan dengan bukaan lingkaran. Temuannya sama dengan Hanson, kecuali bahwa *chord* tarik memikul sejumlah gaya geser sampai beban batas. Ramey dan Tattershall (1973), menggunakan teknik elemen hingga untuk

studinya tentang bukaan balok beton bertulang. Melalui perbandingan solusi elemen hingga, mereka menemukan bahwa metode klasik *Vierendeel* yang mengasumsikan distribusi gaya geser antara *chord-chord* sesuai dengan luas penampang, dapat dipakai untuk perencanaan *chord-chord* bukaan. Suatu usulan alternatif dikemukakan oleh Barney et al. (1977). Mereka menggunakan kekakuan lentur sebagai pengganti luas penampang untuk memperoleh gaya geser yang dipikul oleh setiap *chord*. Sebelum retak, gaya geser diasumsikan dipikul dalam perbandingan momen inersia tanpa retak. Sesudah retak, rekomendasi perencanaan gaya-gaya geser untuk *chord* atas dan bawah adalah :

$$V_t = V \frac{I_{gt}}{I_{gt} + (I_b)_{cr}} \quad (1)$$

$$V_b = V \frac{I_{gb}}{I_{gt} + I_{gb}} \quad (2)$$

dimana I_{gt} dan I_{gb} adalah momen inersia dari *chord* atas dan bawah tanpa retak dan $(I_b)_{cr}$ adalah momen inersia balok tarik dengan retak penuh. Ketika retak merambat sampai seluruh tinggi *chord* tarik, direkomendasikan bahwa *strut* direncanakan untuk :

$$V_t = V \quad (3)$$

$$V_b = 0 \quad (4)$$

Berbeda dengan usulan diatas, Mansur et al. (1984), menunjukkan secara analitis bahwa jumlah gaya geser yang dipikul oleh setiap *chord* tidak hanya tergantung pada sifat-sifat penampangnya, tetapi juga pada ukuran dan lokasi bukaan, dan bahwa titik balik lentur terjadi pada titik tengah hanya jika *chord* ditulangi simetris. Untuk susunan tulangan yang tidak simetris, titik balik lentur menyimpang dari tengah bentang. Momen sekunder yang terjadi kemudian digenerate pada tengah bentang *chord* atas dan bawah sebagai tambahan gaya-gaya aksial dan geser. Kemudian Mansur et al. (1985 & 1988), menyusun kembali solusi perencanaan dengan pendekatan yang sama dalam bentuk grafik tipikal untuk mempercepat proses perencanaan. Suatu prosedur perencanaan sederhana diusulkan Tan dan Mansur (1996). Untuk analisis momen lentur dan gaya geser digunakan kekakuan geser ekuivalen bersama panjang efektif bukaan, dengan asumsi aplikasi gaya geser didistribusi sesuai dengan proporsi kekakuan lentur *chord*. Perencanaan kekuatan *chord* mengikuti provisi ACI code. Retak pada bukaan dikontrol dengan *detail* tulangan yang tepat. Pada setiap sisi

bukaan diberikan kombinasi sengkang vertikal dan tulangan diagonal untuk mencegah retakan yang besar dan keruntuhan prematur akibat terjadinya konsentrasi tegangan pada sudut-sudut bukaan. Sementara itu lendutan dihitung dengan menggunakan prosedur analisis yang sama tetapi dengan memperhitungkan momen inersia retak dan dikontrol terhadap batas yang diizinkan untuk memenuhi kinerja balok dibawah beban layan.

PROGRAM EKSPERIMENTAL

Spesimen

Dua balok uji masing-masing dengan panjang bentang bersih 520 cm diletakkan di atas tumpuan sendi dan rol, dibebani dengan sistem pembebanan lentur-geser. Bukaan dengan lebar 30 cm dan tinggi 10 cm ditempatkan pada jarak 25 cm dari tumpuan (daerah lentur rendah-geser tinggi) untuk BM-1 (Gbr. 1), sedang untuk BM-2 (Gbr. 1) bukaan ditempatkan pada jarak 25 cm dari tengah bentang (daerah lentur-geser tinggi). Balok dirancang dengan tulangan *under-reinforced*. Rasio tulangan tekan terhadap tulangan tarik adalah 0,5. Pada daerah sisi bukaan diberikan tulangan vertikal dan diagonal untuk mencegah agar tidak terjadi retakan yang besar dan keruntuhan prematur akibat terjadi pemusatan tegangan pada sudut-sudut bukaan [Tan and Mansur 1996].

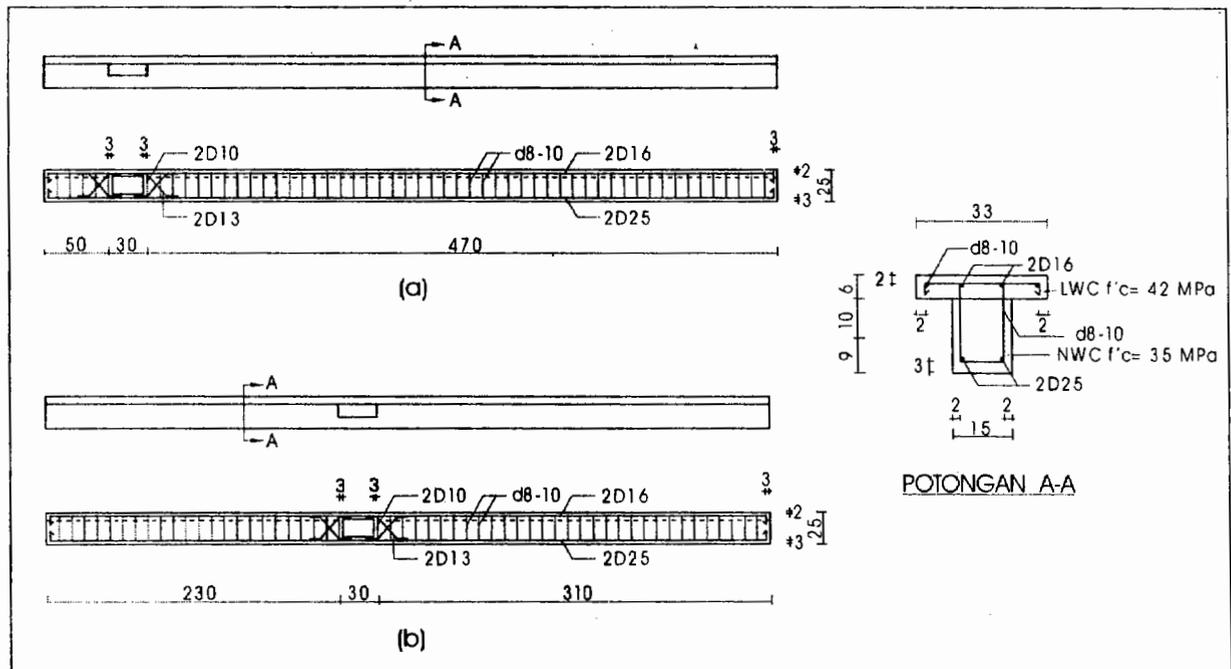
Material

Dua jenis material beton digunakan dalam pembuatan spesimen balok-T hibrida. Badan balok dari BN sedang pelat sayap dari BR.

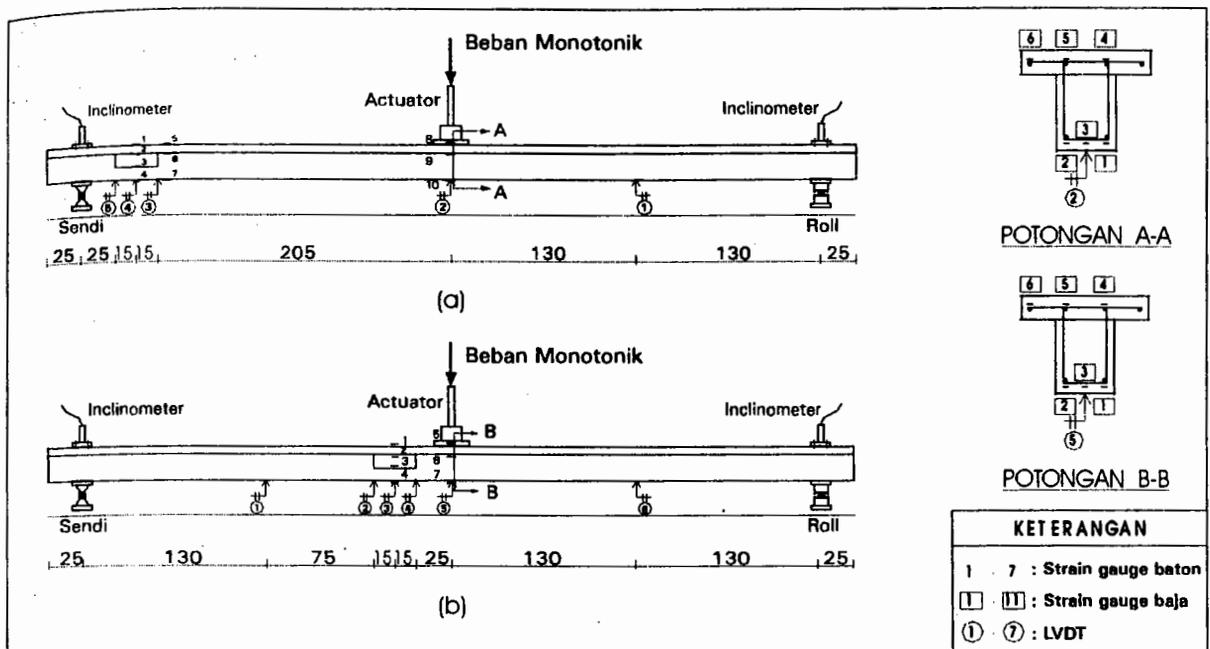
BN digunakan untuk menghasilkan kekuatan silinder umur 28 hari $f'_c = 35$ MPa dan Modulus elastisitas $E_c = 24,00 \times 10^3$ MPa. BR dipersiapkan dengan menggunakan agregat ringan lempung bekah untuk menghasilkan kekuatan beton $f'_c = 42$ MPa dan $E_c = 16,00 \times 10^3$ MPa. Dua jenis baja tulangan sesuai standar SII 0136-80, masing-masing adalah tulangan polos dia. 8 mm dengan kekuatan leleh $f_y = 240$ MPa digunakan sebagai sengkang dan tulangan sayap. Tulangan ulir dia. 16 dan 25 mm dengan kekuatan leleh masing-masing $f_y = 300$ dan 400 MPa digunakan sebagai tulangan longitudinal. Pada sudut bukaan digunakan tulangan diagonal dia. 13 mm dengan $f_y = 300$ MPa dan sengkang vertikal dia. 10 mm dengan $f_y = 300$ MPa.

Set-up Pengujian dan Instrumentasi

Set-up pengujian diilustrasikan secara skematis dalam Gbr. 2 yang menunjukkan beberapa LVDT dipasang untuk merekam lendutan vertikal pada beberapa lokasi sepanjang spesimen, dan *inclinometer* pada kedua perletakan balok untuk memonitor putaran sudut dan sudut puntir balok. Untuk memonitor regangan pada sengkang dan tulangan longitudinal, juga regangan beton, dipasang beberapa *strain gauge* pada posisi-posisi tertentu seperti terlihat dalam Gbr. 2.



Gambar 1. Spesimen dan detail penulangan (a) BM-1 dan (b) BM-2



Gambar 2. Set-up pengujian dan instrumentasi (a) BM-1 dan (b) BM-2

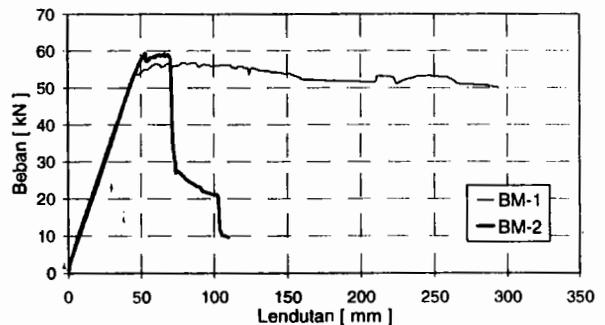
Prosedur Pengujian

Pengujian kekuatan tekan silinder beton dengan *Universal Testing Machine* mengikuti standar ASTM C39-94 dan pengujian nilai modulus elastisitas dilakukan dengan menggunakan *Combined Compressometer Extensometer* mengikuti standar ASTM C469-94. Pengujian ke-2 balok uji dilakukan dengan *single point loading* bersifat monotonik. Beban aktuator diberikan secara 'stroke control' agar respons inelastis balok dapat terus ditelusuri sampai terjadinya keruntuhan. Kecepatan ramp diberikan secara konstan 0,05 mm/sec.

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Kurva Beban-Lendutan

Kurva beban-lendutan (maksimum) pada tengah bentang dari ke-2 balok uji ditunjukkan dalam Gbr. 3. Dari kurva beban-lendutan terlihat bahwa beban retak BM-1 lebih kecil dari BM-2 (sekitar 1%), dan beban batas BM-1 juga lebih kecil dibandingkan dengan BM-2 (sekitar 4%). Namun lendutan maksimum yang dapat dicapai BM-1 2,4 kali lebih besar dari BM-2. Sehingga dapat disimpulkan bahwa kapasitas dari balok dengan bukaan pada daerah lentur-geser tinggi lebih tinggi dari balok dengan bukaan pada daerah geser tinggi, namun sebaliknya mempunyai lendutan yang lebih kecil.



Gambar 3. Beban vs lendutan BM-1 & BM-2

Putaran Sudut dan Sudut Puntir

Hasil pencatatan putaran sudut dan sudut puntir tumpuan sendi dan rol terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1 Putaran sudut dan sudut puntir BM-1 dan BM-2

Balok	Keterangan	Momen [kN-m]	Putaran Sudut [derajat]		Sudut Puntir [derajat]	
			T. Sendi	T. Rol	T. Sendi	T. Rol
BM-1	Yield	74.91	0.989	1.058		
	Ultimate	77.36	4.408	4.226	0.1	0.032
BM-2	Yield	80.65	1.215	1.132		
	Ultimate	80.65	1.476	1.373	0.482	0.159

Untuk BM-1, pada saat tulangan bawah meleleh putaran sudut tumpuan rol 4% lebih besar dari tumpuan sendi, sedang pada saat beton hancur putaran sudut tumpuan rol 7% lebih kecil dari

tumpuan sendi. Untuk BM-2, pada saat tulangan bawah meleleh, putaran sudut tumpuan rol 7% lebih kecil dari tumpuan sendi, dan pada saat beton hancur, putaran sudut tumpuan rol juga 7% lebih kecil dari tumpuan sendi. Perbedaan ini menunjukkan bahwa bukaan yang ditempatkan dekat ke tumpuan sendi menyebabkan putaran sudut sedikit lebih besar, sehingga dapat disimpulkan bahwa bukaan dapat mengurangi kekakuan balok. Pengaruh sudut puntir dapat diabaikan, karena sudut puntir maksimum yang terjadi sangat kecil.

Regangan Beton dan Regangan Baja Tulangan

Respons regangan beton dan regangan baja tulangan hasil rekaman *strain gauge* dari ke-2 balok uji dapat dilihat pada Tabel 2. Dari ke-2 balok uji tersebut, fenomenanya menunjukkan bahwa penampang balok-T sesuai dengan desain penampang *underreinforced* di mana tulangan lebih dahulu meleleh baru beton hancur. Juga balok tersebut berperilaku daktail di mana regangan tulangan terus bertambah sampai akhirnya terjadi kehancuran tekan pada beton.

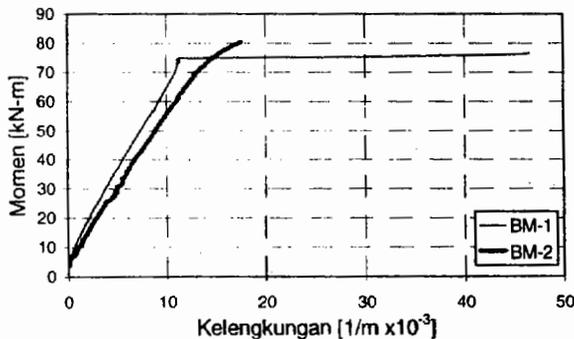
Tabel 2 Regangan beton dan baja tulangan BM-1 dan BM-2

Balok	Keterangan	Momen [kN-m]	Regangan
BM-1	Yield	74.91	0.00145
	Ultimate	77.36	0.0046
BM-2	Yield	80.65	0.00248
	Ultimate	80.65	*

**strain gauge* terputus

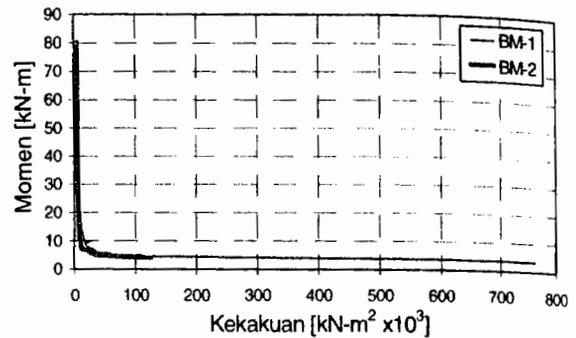
Kurva Momen-Kelengkungan

Kurva momen-kelengkungan dari masing-masing balok uji ditunjukkan pada Gbr.4. Kurva momen - kelengkungan ini dihitung berdasarkan data regangan beton dan regangan baja tulangan dan cukup akurat hanya sampai beban leleh tercapai.

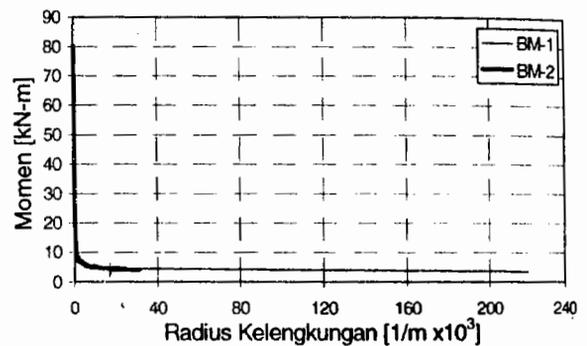


Gambar 4. Momen vs kelengkungan BM-1 & BM-2

Selanjutnya kurva momen-kekakuan dan kurva momen-radius kelengkungan diturunkan dari kurva momen-kelengkungan (Gbr.5 & 6). Tampak bahwa kekakuan balok langsung mengecil setelah timbulnya retak pertama, tetapi nilai kekakuan ini relatif konstan sampai beban leleh tercapai. Setelah itu, dalam kondisi respons inelastis nilai kekakuan mengecil dengan cepat sampai terjadinya keruntuhan.



Gambar 5. Momen vs kekakuan BM-1 & BM-2



Gambar 6. Momen vs radius kelengkungan BM-1 & BM-2

Daktalitas

Daktalitas merupakan kemampuan struktur atau komponen struktur tertentu untuk berdeformasi di luar batas elastis tanpa mengalami degradasi kekuatan atau kekakuan yang berlebihan. Faktor daktalitas didefinisikan sebagai perbandingan antara deformasi inelastis total terhadap deformasi pada leleh pertama.

Nilai daktalitas untuk masing-masing balok uji dapat dihitung dari kurva beban-lendutan dan kurva momen-kelengkungan.

Kurva momen-kelengkungan pasca elastis dapat didekati dengan persamaan lendutan cara Macauley [Smith 1980] dengan persamaan :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{(EI)_{eff}} = \frac{dy^2/dx^2}{[1 + (dy/dx)^2]^{3/2}} \quad (5)$$

dimana $1/\rho$ adalah kelengkungan dan y adalah persamaan kurva lendutan yang didekati dengan persamaan polinomial dengan konstanta-konstanta yang didefinisikan berdasarkan kondisi beberapa titik sepanjang balok.

BM-1 mempunyai daktilitas lendutan dan daktilitas kelengkungan yang lebih besar, yaitu masing-masing 3,3 kali dan 2,6 kali dari BM-2, seperti terlihat dalam Tabel 3.

Tabel 3 Hasil perhitungan daktilitas

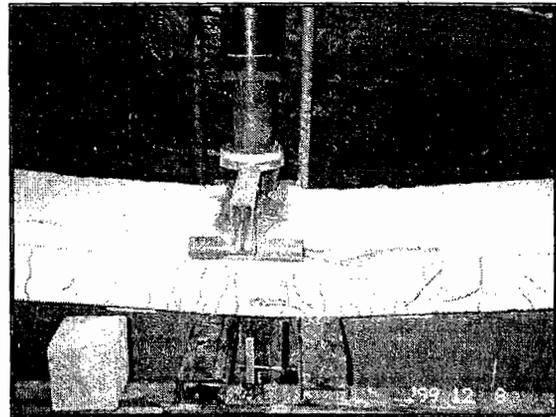
Balok	BM-1	BM-2
Bukaan pada Daerah	Momen rendah-Geser Tinggi	Momen Tinggi-Geser Tinggi
Sistem Pembebanan	B.Monotonik	B.Monotonik
D. Lendutan	6.32	1.92
D. Kelengkungan	8.72	3.37

Sehingga dapat disimpulkan bahwa balok dengan bukaan pada daerah geser tinggi memiliki baik daktilitas lendutan maupun daktilitas kelengkungan jauh lebih besar dari balok dengan bukaan pada daerah lentur-geser tinggi.

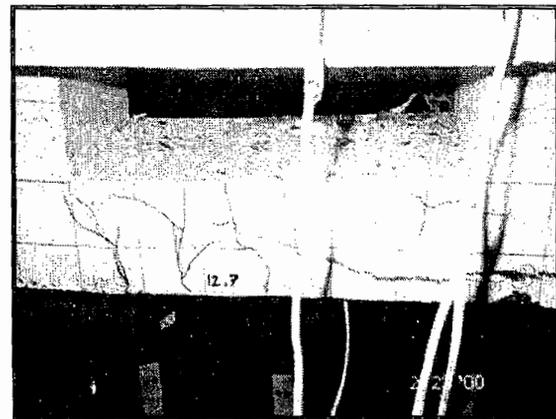
Pola Retak

Pola retak diamati berdasarkan penampakan retak yang terdeteksi pada grid-grid balok. Pada balok BM-1 (Gbr. 7), retak pertama terjadi pada posisi di bawah beban, tepatnya pada serat bawah penampang tengah balok pada saat $P_{crack} = 6.96$ kN. Sedang pada balok BM-2 (Gbr.8), retak pertama mulai terjadi pada sebelah bawah penampang balok di bawah posisi beban, kemudian disusul dengan retak pada serat bawah *chord* bawah dengan posisi $P_{crack} = 7.02$ kN. Dari hasil pengamatan retakan pada ke-2 balok tersebut terlihat bahwa panjang retak pertama berkisar antara 3 - 5 cm dengan lebar retak $\pm 0,06$ mm. Dilihat dari posisi awalnya, retak ini tergolong jenis retak lentur (*flexural crack*) di mana pola retaknya membentuk garis vertikal tegak lurus terhadap sumbu panjang balok. Dengan bertambahnya beban, banyaknya retakan yang terjadi juga bertambah. Pola retak yang terbentuk mengalami perubahan kemiringan membentuk sudut dengan sumbu horisontal balok, pola retak ini mengarah pada terjadinya retak geser lentur. Setelah retak lentur terjadi, kemudian retak dikendalikan oleh adanya tulangan tarik. Setelah tegangan tarik diagonal pada daerah di atas retak ini melampaui kekuatan tarik beton, retak tersebut menjalar membelok ke arah

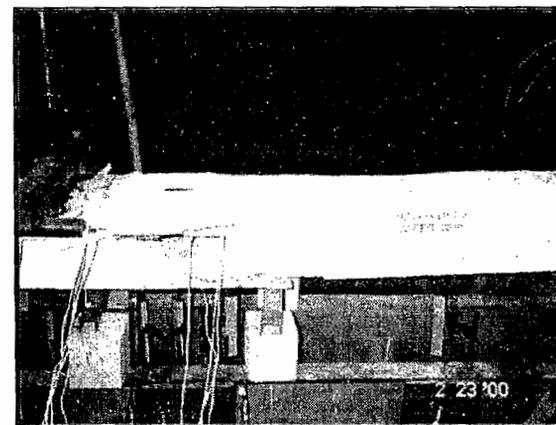
diagonal. Sementara itu penambahan lebar retak secara berkesinambungan berkembang seiring dengan bertambahnya beban. Setelah terjadi pelelehan baja tulangan, perkembangan lebar retak bertambah dengan cepat. Namun, retak-retak ini tidak mempercepat keruntuhan dari balok-balok ini. Kondisi ini bertahan agak lama sampai akhirnya balok runtuh. Dapat disimpulkan bahwa tulangan-tulangan sudut (tulangan diagonal dan sengkang vertikal) yang terpasang mampu mencegah keretakan yang berlebihan pada sisi-sisi bukaan.



Gbr. 7 Pola retak dan model keruntuhan BM-1



Gbr. 8 Pola retak BM-2 pada sekitar bukaan



Gbr. 9 Model keruntuhan BM-2

Model Keruntuhan dan Beban Batas

Model keruntuhan dari ke-2 balok uji dapat diidentifikasi berdasarkan pada pengukuran regangan beton dan baja tulangan serta pemeriksaan secara *visual* pola retak sesudah keruntuhan. Keruntuhan dari ke-2 balok uji ini dapat dikategorikan sebagai keruntuhan tarik (*tension failure*) di mana tulangan tarik terlebih dahulu mencapai kekuatan leleh yang disusul dengan terjadinya penambahan kelengkungan yang besar pada momen lentur yang hampir konstan sampai akhirnya beton hancur. Pada BM-1 (Gbr.7), keruntuhan yang terjadi merupakan jenis keruntuhan geser-lentur (*flexural shear failure*), di mana keruntuhan didominasi oleh terjadinya momen lentur dan geser. Beban batas yang dapat dicapai adalah 56.85 kN dan hancurnya beton terjadi pada sayap atas tengah bentang. Pada BM-2 (Gbr.8), sebelum beton hancur, pada jarak horisontal kurang lebih 30 cm dari *chord* bawah terjadi retak miring membentuk sudut 45° dengan sumbu horisontal balok. Retak ini menjalar sampai bagian atas *chord* bawah. Pada sudut bukaan *chord* bawah juga terjadi retak-retak diagonal. Akhirnya beton hancur pada sayap atas tengah bentang (Gbr.9), yang didahului dengan retak pada *chord* atas bukaan bagian tengah. Beban batas yang dapat dicapai adalah 59.38 kN. Keruntuhan balok terjadi dengan suara ledakan yang cukup keras dan terjadi *local buckling* pada *chord* atas bukaan (tulangan tekan tertekuk ke atas). Keruntuhan ini termasuk jenis keruntuhan geser-lentur pada *chord* bukaan.

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan pembahasan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Selama pengujian (pembebanan) tidak terjadi *slip* dibidang kontak (*interface*) antara pelat dan badan, hal ini dapat dijelaskan bahwa sengkang vertikal yang dipasang sepanjang balok dapat mencegah tidak terjadi keruntuhan akibat geser. Dengan kata lain gaya geser horisontal yang timbul dibidang ini dapat ditahan, sehingga balok-T hibrida ini dapat dikategorikan sebagai balok-T komposit penuh yang menahan lentur.
2. Tulangan diagonal yang diberikan pada sudut-sudut bukaan dapat mencegah terjadinya retak yang berlebihan dan keruntuhan prematur akibat adanya pemusatan tegangan.
3. Pengaruh puntir pada balok-T hibrida dengan bukaan dapat diabaikan karena sudut puntir maksimum pada kedua tumpuan sangat kecil.
4. Bukaan yang ditempatkan dekat ke tumpuan sendi menyebabkan degradasi kekakuan di sekitar tumpuan, sehingga putaran sudut tumpuan sendi sedikit lebih besar dari tumpuan rol.
5. Pola perambatan retak balok-T hibrida adalah pola retak lentur yang merambat menjadi retak geser-lentur dan model keruntuhan yang terjadi adalah keruntuhan geser-lentur.
6. Kapasitas balok-T hibrida dengan bukaan pada daerah geser tinggi lebih kecil dibandingkan dengan kapasitas balok dengan bukaan pada daerah lentur-geser tinggi, namun sebaliknya lendutan maksimum yang dapat dicapai jauh lebih besar.
7. Balok-T hibrida dengan bukaan pada daerah geser tinggi mempunyai baik daktilitas lendutan maupun daktilitas kelengkungan yang lebih besar dari pada balok dengan bukaan pada daerah lentur-geser tinggi.
8. Kekakuan balok-T hibrida dengan bukaan langsung mengecil setelah timbulnya retak pertama pada baik daerah geser tinggi maupun daerah lentur-geser tinggi, tetapi nilai kekakuan ini relatif konstan sampai beban leleh tercapai. Setelah itu, dalam kondisi respons inelastis nilai kekakuan mengecil dengan cepat sampai terjadinya keruntuhan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terselenggara atas dana dari Universitas Kristen Indonesia Paulus, Makassar. Untuk itu Penulis mengucapkan terima kasih dan juga kepada Kepala LSB, Jurusan Teknik Sipil, ITB yang telah memberikan izin penggunaan laboratorium sebagai lokasi penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318, (1999), ACI 318M-99 and ACI 318RM-99 : Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Chapter 21, 285-311.
- Barney, G.B., Corley, W.G., Hanson, J.M., and Parmelee, R.A. (1977), "Behaviour and Design of Prestressed Concrete Beam with Large Web Openings", PCI Journal, Vol. 22, No.6. Nov.-Dec., pp.32-61.
- Besari, M.S., and Lauw, C.G.S. (1999), "Strength and Ductilities of Light-Normal Weight Concrete Composite T-Beams", Proceedings The 1999 FTUI Seminar - Quality in Research, 3-6 August, pp. 287-296.

- Besari, M.S., and Lauw, C.G.S. (1999), "Behaviour of Hybrid Concrete T-Beams under Monotonic and Cyclic Loading, 24th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, 25-26 August, pp. 135-142.
- Hanson, J.M. (1969), "Square Openings in Webs of Continuous Joists", *Research and Development Bulletin* No. RD001.01D, PCA, Skokie, IL 14 pp.
- Lorentsen, M.(1962), "Holes in Reinforced Concrete Girders", *BYGGMASTAREN*, Vol. 41, No.7, July, 141-152, Translated from Swedish by PCA, Chicago, Illinois, 60610.
- Mansur, M.A., Tan, K.H., and Lee, S.L. (1984), "Collapse Loads of R/C Beams with Large Openings", *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol.110, No.11, Nov., pp. 2602-2618.
- Mansur, M.A., Tan, K.H., and Lee, S.L. (1985), "Design Methods for Reinforced Concrete Beams with Large Openings", *ACI Journal*, Vol.82, July-August, pp. 517-524.
- Mansur, M.A. (1988), "Ultimate Strength Design of Beams with Large Openings", *International Journal of Structures*, Vol.8, No.2, December, pp.107-125.
- Nasser, K.W., Acavalos, A., and Danile, H.R. (1967), "Behaviour and Design of Large Openings in Reinforced Concrete Beams", *ACI Journal*, Vol.64, No.1, Jan., 25-33.
- Prentzas, E.G. (1968), "Behaviour and Reinforcement of Concrete Beams with Large Rectangular Apertures, Ph.D thesis, University of Sheffield, United Kingdom, 256 pp.
- Ragan, H.S., and Warwaruk, J. (1967), "Tee members with Large Web Openings", *Journal of Prestressed Concrete Institute*, Vol. 12, No. 4, Aug., 52-65.
- Ramey, M.R. and Tattershall, D.W. (1973), "Reinforcing Requirements for Concrete Beams with Large Web Openings", *Bridge Evaluation and Analysis*, Highway Research Record, No. 428, 5-18.
- Smith, M.J. (1980), "Material and Structures", George Godwin Ltd., 2nd Edition.
- Sommes, N.F., and Corley, W.G. (1974), "Circular Openings in Webs of Continuous Joists", *Shear in Reinforced Concrete*, SP-42, ACI, Detroit, pp. 359-398.
- Tan, K.H., and Mansur, M.A. (1996), "Design Procedure for Reinforced Concrete Beams with Large Web Openings", *ACI Journal*, Vol.93, No.4, July-August, pp. 404-410.