

PERBANDINGAN PERILAKU BALOK-T BETON RINGAN DAN BETON HIBRIDA PRATEGANG PARSIAL AKIBAT BEBAN SIKLIK

Titik Penta Artiningsih

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pakuan
Jl. Pakuan no. 1, Bogor, telp. 0251 8311007

ABSTRAK

Pengurangan massa bangunan akan mengurangi gaya inersia yang timbul akibat percepatan tanah karena gempa. Pengurangan massa bangunan dapat dicapai melalui penggunaan beton agregat ringan. Tetapi beton ringan memiliki kelemahan yaitu modulus elastisitas yang rendah sehingga bersifat getas, karena itu perlu dikombinasikan dengan beton normal. Penggunaan beton ringan sebagai pelat dan beton normal sebagai balok akan menghasilkan komponen struktur balok-T hibrida. Selain itu, penggunaan tulangan prategang akan mengurangi dimensi penampang, menjadi penampang yang lebih langsing, sehingga penggunaan kombinasi beton ringan dan penulangan prategang, secara keseluruhan akan mereduksi massa bangunan yang cukup signifikan.

Penelitian mempelajari perilaku lentur dua spesimen yaitu balok-T beton ringan (BLTR) dan balok-T beton hibrida (BLTH) dengan dimensi penampang dan penulangan prategang parsial yang sama. Sistem pembebanan adalah beban siklik kuasi statik sebagai simulasi dari beban gempa.

Hasil studi menunjukkan bahwa kuat lentur balok-T beton ringan dan balok-T beton hibrida pada saat leleh dan kondisi ultimit hampir sama, demikian juga dengan besar lendutan di tengah bentang. Tetapi daktilitas balok-T beton ringan lebih kecil dari beton hibrida, karena setelah siklus terakhir, yaitu siklus keempat, beton hibrida masih mampu menerima beban sedangkan beton ringan tidak. Demikian juga dengan disipasi energi, pada siklus-siklus awal balok-T beton ringan lebih baik dari beton hibrida, tetapi pada siklus-siklus ulang kemampuan penyerapan energi menurun lebih cepat.

Kata kunci: balok-T; beton hibrida; beton ringan;prategang parsial; reduksi massa

PENDAHULUAN

Gaya gempa yang diterima oleh suatu struktur sangat dipengaruhi oleh beberapa aspek, diantaranya adalah distribusi massa, bentuk bangunan, kekakuan dan daktilitas bangunan. Aspek yang dipengaruhi langsung oleh material adalah massa bangunan. Pengurangan massa bangunan akan mengurangi gaya inersia yang akan timbul akibat percepatan tanah karena gempa. Kekakuan struktur juga ikut mempengaruhi disipasi energi gempa, sehingga struktur yang langsing dan daktil lebih dapat meredam gaya lateral akibat gempa.

Salah satu tantangan saat ini adalah bagaimana mengurangi massa bangunan tetapi masih bisa mempertahankan kekuatan dan daktilitasnya. Pengurangan massa bangunan dapat dicapai melalui penggunaan beton agregat ringan. Beton ringan yang dibuat dari agregat ringan buatan (*artificiallightweightaggregate*) merupakan material yang tepat untuk daerah dengan resiko gempa yang tinggi karena mempunyai kuat tekan yang tinggi dengan berat yang relatif rendah. Tetapi beton ringan memiliki kelemahan yaitu modulus elastisitasnya rendah, sehingga bersifat getas yang akan menghasilkan daktilitas yang rendah dibandingkan beton normal. Karena itu, penggunaan beton ringan perlu dikombinasi dengan beton normal. Penggunaan beton ringan sebagai pelat dan beton normal sebagai balok akan menghasilkan komponen struktur balok-T hibrida. Pelat lantai merupakan elemen struktur yang secara keseluruhan mempunyai massa yang cukup besar, tetapi pada sistem struktur bukan merupakan elemen utama, sehingga reduksi massa dengan menggunakan beton ringan pada pelat tidak mempengaruhi kekuatan struktur.

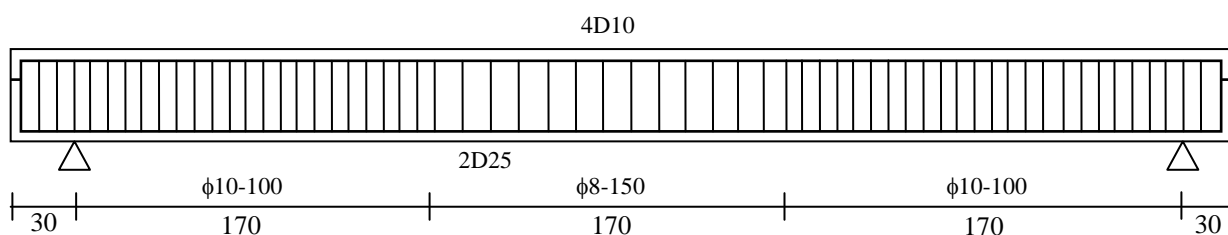
BAHAN DAN METODE PENELITIAN

Dua buah spesimen berupa balok-T memiliki dimensi yang sama, yaitu lebar 150 mm, tinggi 250 mm, lebar sayap 375 mm, dan tinggi sayap 60 mm. Panjang total spesimen adalah 570 cm, terdiri atas bentang bersih antar tumpuan 510 cm dan panjang *end-block* masing-masing 30 cm di tiap-tiap ujung balok. Balok diletakkan di atas tumpuan sederhana, yaitu tumpuan sendi dan rol. Balok dirancang dengan sistem penulangan *under-reinforced* dikombinasi dengan strand prategang. Tulangan utama di sisi bawah 2D25 dan di sayap 4D10, dengan tulangan geser $\phi 8$. Strand prategang yang digunakan adalah K-range Freyssinet jenis strand 7 untai diameter 12.70 mm. Gaya prategang sebesar 140 kN diberikan dengan sistem penegangan pratarik, dan lintasan strand lurus. Besar PPR (*partialprestressed ratio*, rasio prategang parsial) rencana adalah 60%.

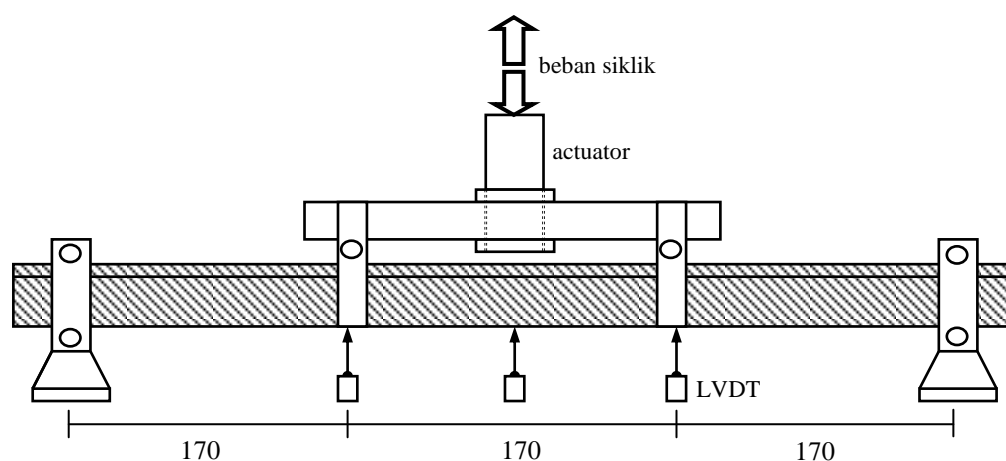
Spesimen pertama adalah balok-T yang terbuat dari beton ringan (BLMR), sedangkan spesimen kedua adalah balok-T yang terbuat dari beton ringan pada sayap dan beton normal pada badan balok membentuk balok-T hibrida (BLMH). Adapun hasil uji karakteristik betondan tulangan dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan detail penulangan serta set-up pengujian dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Hasil pengujian kuat tarik tulangan dan strand

1	Bagian balok-T:		BLMR	BLMH	
	▪ sayap balok		beton ringan	beton ringan	
	▪ badan balok		beton ringan	beton normal	
2	Beton ringan	f_c'	43.09	43.09	MPa
		E_c	17.63	17.63	GPa
		γ	1835.1	1835.1	kg/m ³
3	Beton normal	f_c'	-	57.52	MPa
		E_c	-	29.18	GPa
		γ	-	2339.3	kg/m ³
4	Tulangan $\phi 8$	f_y	252.66	252.66	MPa
		f_u	354.48	354.48	MPa
	Tulangan D10	f_y	394.19	394.19	MPa
		f_u	556.92	556.92	MPa
	Tulangan D16	f_y	401.21	401.21	MPa
		f_u	647.08	647.08	MPa
5	Strand prategang D12.7	f_y	776.2	776.2	MPa
		f_u	1508.9	1508.9	MPa

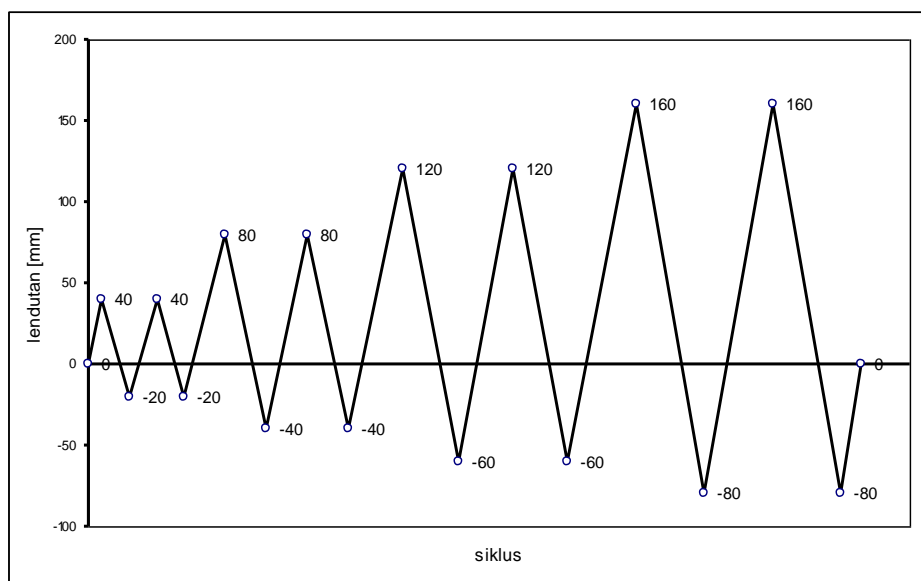


Gambar 1. Detail penulangan spesimen



Gambar 2. Set-up pembebanan

Sistem pembebanan adalah pembebanan lentur murni, dengan cara *three point loading*. Pembebanan bersifat siklik kuasi statik, dan diberikan secara *displacementcontrol* sampai balok runtuh. Riwayat pembebanan seperti terlihat pada Gambar 3. Pada siklus pertama, pedoman *displacement* arah tekan sebesar 40 mm diambil dari hasil pembebanan monotonik sebelum saat *yield*, agar masih dalam kondisi elastis, dan arah tarik sebesar 50% dari arah tekan, yaitu sebesar 20 mm. Pengambilan *displacement* arah tarik sebesar 50% arah tekan karena balok uji merupakan balok-T yang mempunyai kemampuan berbeda pada arah tekan dan arah tarik. Siklus kedua diberikan *displacement* sebesar dua kali siklus pertama untuk menghasilkan daktilitas sebesar 2, yaitu pada arah tekan sebesar 80 mm dan arah tarik 40 mm. Siklus ketiga diberikan *displacement* sebesar tiga kali siklus pertama, yaitu pada arah tekan sebesar 120 mm dan arah tarik 60 mm. Siklus keempat diberikan *displacement* sebesar empat kali siklus pertama untuk mendapatkan daktilitas sebesar 4, yaitu pada arah tekan sebesar 160 mm dan arah tarik 80 mm. Setiap tingkat siklus dilakukan dua kali putaran. Pembacaan *datalogger* diambil setiap kenaikan lendutan 5 mm pada kondisi normal, sedangkan untuk kondisi tertentu, seperti pada *first cracking*, *yield*, dan *ultimate load*, data diambil lebih rapat.

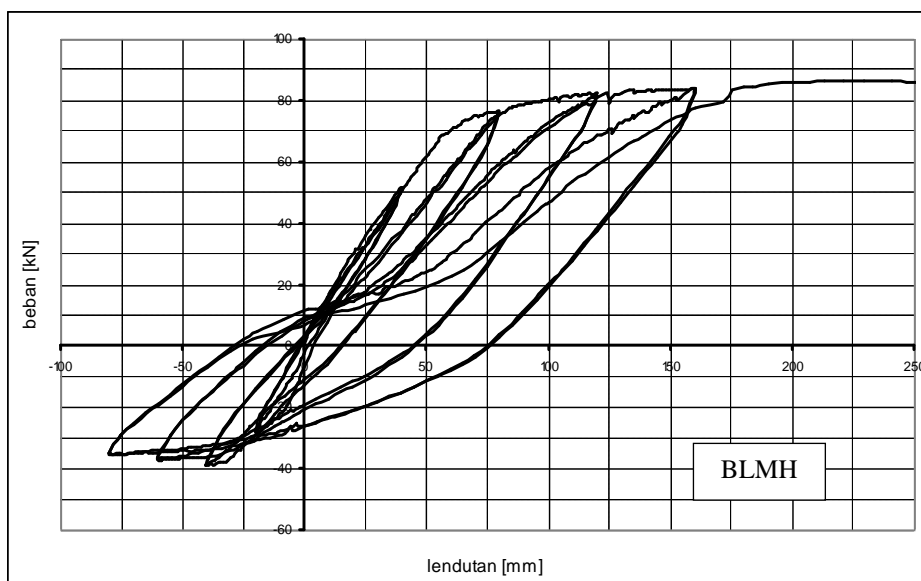


Gambar 3. Riwayat pembebanan

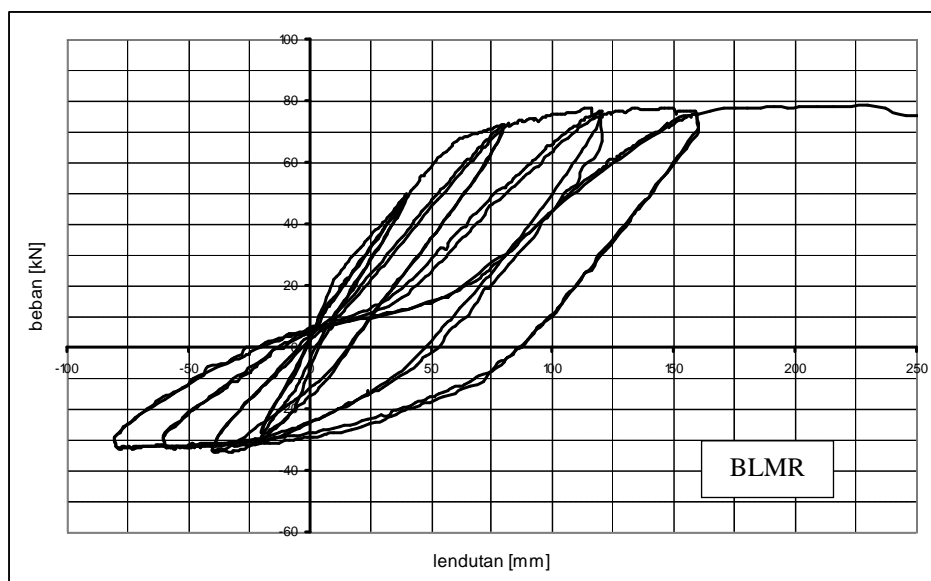
HASIL DAN PEMBAHASAN

Kurva histeresis beban-lendutan balok BLMH terlihat pada Gambar 4 dan Tabel 2. Pada pembebanan tekan, beton retak pada beban 15.81 kN, tulangan baja leleh pertama pada beban 70.98 kN, dan mencapai ultimit pada beban 83.97 kN. Saat beton mengalami retak, yaitu pada lendutan 9.20 mm, sudut kurva berkurang tetapi penambahan lendutan tetap seiring dengan penambahan beban. Saat tulangan tarik mencapai kondisi leleh pertama, yaitu pada lendutan 61.10 mm, peningkatan lendutan yang besar terjadi tetapi beban juga masih mengalami peningkatan. Setelah tahap siklus ke-4 awal (siklus ke 4.1) kenaikan beban relatif konstan. Beban ultimit dicapai pada lendutan sebesar 160.48 mm. Pencatatan hanya sampai tahap siklus ke 4, yaitu siklus 4.1 (siklus awal) dan siklus 4.2 (siklus ulangan). Sebetulnya balok uji masih mampu menerima beban, tetapi pengujian dihentikan. Saat pembebanan tarik, seperti terlihat pada Tabel 3, kekuatan berbeda dengan arah tekan, karena lebar blok tegangan tekan hanya sebesar lebar badan balok dan tulangan tarik tidak dibantu oleh strand prategang. Hal tersebut disebabkan pula karena adanya efek *Bauschinger*. Pada perubahan tahap siklus dari tahap satu ke tahap dua, terjadi kenaikan kekuatannya sebesar 34%, tetapi pada perubahan tahap siklus berikutnya tidak terjadi kenaikan kekuatan.

Kurva histeresis beban-lendutan balok BLMR terlihat pada Gambar 5 dan Tabel 2. Pada pembebanan tekan, beton retak pada beban 20.50 kN, tulangan baja leleh pada beban 67.18 kN, dan mencapai ultimit pada beban 71.10 kN. Saat beton mengalami retak, yaitu pada lendutan 9.09 mm, sudut kurva berkurang tetapi penambahan lendutan tetap seiring dengan penambahan beban. Saat tulangan tarik mencapai kondisi leleh pertama, yaitu pada lendutan 61.19 mm, peningkatan lendutan yang besar terjadi tetapi beban juga masih mengalami peningkatan. Setelah tahap siklus ke 4 awal kenaikan beban relatif konstan. Beban ultimit dicapai pada lendutan sebesar 160.18 mm. Terjadi penurunan kekuatan dibandingkan dengan balok uji BLMH, yaitu sebesar 5% pada beban *yield* dan 15% pada siklus terbesar. Saat pembebanan tarik, seperti terlihat pada Tabel 3, kekuatan berbeda dengan arah tekan. Pada perubahan tahap siklus dari tahap satu ke tahap dua, terjadi kenaikan kekuatan sebesar 16%, tetapi pada perubahan tahap siklus berikutnya tidak terjadi kenaikan kekuatan. Hal tersebut terjadi karena pada pembebanan tarik tidak terjadi efek *pinching*.



Gambar 4. Respon histeresis beban-lendutan di tengah bentang, kiri balok BLMH



Gambar 5. Respon histeresis beban-lendutan di tengah bentang, kiri balok BLMH

Tabel 2. Tahapan pembebanan tiap siklus positif (arah beban tekan)

Balok	Lendutan	Beban dan lendutan pada siklus ke							
		1.1+	1.2+	2.1+	2.2+	3.1+	3.2+	4.1+	4.2+
BLMH	P [kN]	51.73	51.00	76.74	75.88	82.38	81.64	83.97	83.24
	δ [mm]	40.10	40.10	80.00	80.10	120.09	120.28	160.48	160.18
BLMR	P [kN]	49.62	48.94	72.08	71.49	76.69	66.88	71.10	69.53
	δ [mm]	40.09	40.09	80.19	79.99	120.28	120.28	160.18	160.18

Tabel 3 menunjukkan riwayat beban tarik puncak yang mampu dipikul sesuai besar lendutan yang ditentukan pada riwayat pembebanan siklik, baik siklus awal maupun siklus ulangan. Secara umum dapat dikatakan tidak terjadi kenaikan kekuatan pada setiap perubahan tahap siklus, atau setiap penambahan besar lendutan, sehingga terjadi degradasi kekakuan. Demikian juga tidak terjadi degradasi kekuatan pada setiap siklus ulangan,.

Tabel 3. Tahapan pembebanan tiap siklus negatif (arah beban tarik)

Balok	Lendutan	Beban dan lendutan pada siklus ke							
		1.1-	1.2-	2.1-	2.2-	3.1-	3.2-	4.1-	4.2-
BLMH	P [kN]	-28.93	-28.07	-38.74	-38.74	-36.65	-37.14	-35.06	-35.06
	δ [mm]	-20.18	-20.28	-40.28	-40.18	-60.18	-60.39	-80.19	-79.89
BLMR	P [kN]	-29.03	-28.05	-33.54	-33.54	-28.73	-29.03	-29.03	-29.03
	δ [mm]	-20.09	-19.99	-40.39	-40.39	-60.19	-60.29	-80.49	-80.39

Tabel 2, Tabel 3, Gambar 4, dan Gambar 5 menunjukkan balok mengalami penurunan kekuatan pada saat siklus ulangan, yaitu siklus kedua dari setiap siklus pada besar lendutan yang sama. Hal ini terjadi karena adanya *pinching effect*, yaitu slip yang terjadi pada beban rendah akibat retak yang terjadi tidak bisa menutup kembali. *Pinching effect* juga terjadi akibat perbedaan bentuk balok-T arah beban tekan dan tarik, yang menyebabkan kemampuan menerima beban tekan berbeda. Tetapi pada siklus beban berikutnya kekuatan tekan akan naik karena lendutan diperbesar dan retak menutup kembali pada beban besar. Pada siklus ketiga dan keempat, penambahan lendutan tidak banyak menambah kekuatan.

Seperti terlihat pada Gambar 4 dan Gambar 5, *hysteresis loop* untuk siklus ulangan bentuknya sangat runcing pada saat pembebanan tekan. Hal ini menunjukkan terjadi degradasi kekuatan dan kekakuan akibat adanya *pinching effect*. Pada balok-T yang memiliki kekuatan berbeda pada arah lentur yang berlawanan, memperbesar penurunan kekuatan dan kekakuan. Pembebanan tekan balok uji BLMH pada tahap siklus 4 awal, atau siklus ke 4.1, beban batas yang mampu dipikul adalah 83.97 kN dan kekakuannya 0.5233 kN/mm. Pada siklus ulangan, yaitu siklus 4.2, beban yang mampu dipikul adalah 83.24 kN dengan kekakuan sebesar 0.5196. Terjadi penurunan kekuatan sebesar 0.87% dan penurunan kekakuan sebesar 1.39%. Balok BLMR pada tahap siklus 4 awal, atau siklus ke 4.1, beban batas yang mampu dipikul adalah 71.10 kN dan kekakuannya 0.4439 kN/mm. Pada siklus ulangan, yaitu siklus 4.2, beban yang mampu dipikul adalah 69.53 kN dengan kekakuan sebesar 0.4341. Terjadi penurunan kekuatan sebesar 2.21% dan penurunan kekakuan sebesar 2.21%. Tabel 4 menyajikan degradasi kekuatan, kekakuan, dan disipasi energi dari balok uji BLMH dan BLMR. Pada pembebanan tarik, setiap siklus ulangan tidak terjadi degradasi kekuatan, tetapi terjadi degradasi kekakuan karena lendutan meningkat tanpa adanya peningkatan kekuatan.

Tabel 4. Perbandingan degradasi kekuatan, kekakuan dan disipasi energi tiap siklus tekan

Siklus	Beban Puncak [kN]		Kekakuan [kN/mm]		Disipasi Energi [kNmm]	
	BLMH	BLMR	BLMH	BLMR	BLMH	BLMR
1.1+	51.73	49.62	1.2901	1.2378	452.764	515.732
1.1-	-28.93	-29.03	1.4336	1.4449		
1.2+	51.00	48.94	1.2717	1.2207	252.275	279.219
1.2-	-28.07	-28.05	1.3842	1.4031		
2.1+	76.74	72.08	0.9592	0.8989	2213.552	2195.691
2.1-	-38.74	-33.54	0.9617	0.8304		
2.2+	75.88	71.49	0.9473	0.8938	1411.716	1413.755
2.2-	-38.74	-33.54	0.9641	0.8304		
3.1+	82.38	76.69	0.6860	0.6376	5274.060	5312.577
3.1-	-36.65	-28.73	0.6091	0.4774		
3.2+	81.64	66.88	0.6788	0.5561	4179.476	4297.443
3.2-	-37.14	-29.03	0.6151	0.4815		
4.1+	83.97	71.10	0.5233	0.4439	8229.759	8292.805
4.1-	-35.06	-29.03	0.4372	0.3607		
4.2+	83.24	69.53	0.5196	0.4341	7122.295	6413.911
4.2-	-35.06	-29.03	0.4389	0.3611		

Hysteresis loop balok BLMH dan BLMR pada Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan perilaku duktil, karena tidak terjadi degradasi kekuatan setiap siklus ganjil seiring dengan penambahan lendutan. Luas bidang di dalam setiap *loop* menyatakan energi yang didisipasi pada setiap siklus. Pada setiap siklus ulangan, penambahan lendutan diiringi dengan pengurangan beban akibat adanya *pinching effect*. Hal ini menyebabkan *loop* pada siklus ulangan menjadi lebih kecil dan terjadi degradasi energi yang didisipasi. Kurva disipasi energi tiap siklus pada pembebanan tekan dapat dilihat pada Tabel 4.

Sistem pembebanan siklik diberikan secara *displacementcontrol*, sehingga daktilitas dapat diukur melalui lendutan pada beban tahap siklus awal terhadap lendutan pada beban terbesar tahap siklus akhir, seperti terlihat pada Tabel 5. Berdasarkan pembebanan monotonik, lendutan saat *yield* adalah sebesar 47.92 mm sehingga sebagai referensi pembebanan siklik, digunakan lendutan siklus pertama adalah 40 mm, dengan harapan terjadi leleh pada lendutan yang hampir sama, sehingga daktilitas akhir yang terjadi adalah sebesar ± 4 . Tetapi ternyata rata-rata balok uji mencapai *yield* pada lendutan lebih besar, sehingga daktilitas yang terjadi kurang dari perkiraan.

Tabel 5. Harga daktilitas berdasarkan siklus terakhir

Balok	Lendutan [mm]		Daktilitas Lendutan
	Saat Leleh Pertama	Siklus Terakhir	
BLMH	57.10	160	2.80
BLMR	60.59	160	2.64

KESIMPULAN

1. Penelitian menunjukkan bahwa BLMH (balok-T hibrida) dan BLMR (balok-T beton ringan) pada saat kondisi elastis mempunyai kemampuan menerima beban yang hampir sama, tetapi setelah melalui kondisi *yield* BLMH mempunyai kemampuan yang lebih besar dari BLMR
2. Pada pembebanan siklik arah positif, yaitu pada pembebanan tekan, terjadi degradasi kekuatan dan kekakuan setiap siklus ulangan dari setiap tahap siklus, yang menyebabkan terjadinya degradasi disipasi energi. Hal ini terjadi karena adanya efek *pinching*. Tetapi pada tahap siklus berikutnya, yaitu pada saat penambahan lendutan, kekuatan akan naik kembali karena retak menutup kembali saat beban besar. Sebaliknya, pada siklus negatif, yaitu pada saat pembebanan tarik, tidak terjadi degradasi ataupun peningkatan kekuatan pada siklus ulangan maupun peningkatan tahap siklus. Hal tersebut terjadi karena adanya efek *Bauschinger*.
3. Degradasi kekuatan dari setiap balok pada siklus ulangan kurang dari 20% dari siklus awalnya, sehingga degradasi masih memenuhi syarat New Zealand Standard Code.
4. Seluruh spesimen memiliki *interface* yang kuat dan bebas retak antara beton normal pada badan balok dan beton ringan pada sayap, walaupun pengecoran dilakukan pada waktu yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, S. H. dan Roy, B., (1991), "*Flexural behavior of reinforced high-strength lightweight concrete beams*," ACI Structural Journal, vol. 88, no. 1
- Al-Ziad, R. Z. dan Naaman, A. E. (1986), "*Analysis of partially prestressed composite Beams*," ASCE Journal of Structural Engineering, vol. 112, no. 4
- Artiningsih, T. P. (1998), *Studi Eksperimental Perilaku Balok Prategang Parsial Pratarik terhadap Beban Siklik*," Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung
- Besari, M. S. dan Lauw, C. G. S. (1999), "*Kekuatan dan daktilitas balok-T komposit beton ringan – normal*," Proceedings The 1999 FTUI Seminar – Quality in Research, Depok
- Besari, M. S. dan Lauw, C. G. S. (1999), "*Behaviour of hybrid concrete T-beams under monotonic and cyclic loading*," 24th Conference on Our World in Concrete and Structures, Singapore
- Blakely, Roger, W. G., dan Park, R. (1973), "*Prestressed concrete sections with cyclic flexure*," Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, vol. 99, no. ST8
- Budiono, B., Gilbert, R. I., dan Foster, S. J. (1994), "*Hysteretic behaviour of partially prestressed concrete beam column connections*," Australian Structural Engineering Conference, Sydney
- Budiono, B., Munaf, D. R., dan Artiningsih, T. P. (1998), "*Perilaku perbaikan balok beton prategang parsial pratarik terhadap beban siklik*," HAKI Conference : Dunia Konstruksi Pasca 1998, Jakarta
- Budiono, B., Munaf, D. R., dan Artiningsih, T. P. (2000), "*Behaviour of repaired pretensioned concrete beams under cyclic loading*," 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland
- New Zealand Standard 3101 (1982), "*Code of practice for the design of concrete structures*," Standard Association of New Zealand part 1
- Park, R., Kent, D. C., dan Sampson, R. A. (1972), "*Reinforced concrete members with cyclic loading*," Journal of the Structural Division, Proceeding of the ASCE, vol. 98, no. ST7
- Wakabayashi, M. (1986), "*Design earthquake resistant buildings*," McGraw-Hill Book Co., USA