

ANALISIS TEORITIS LAYER METHOD DAN EKSPERIMENTAL PERKUATAN BALOK BETON BERTULANG MENGGUNAKAN TULANGAN LONGITUDINAL DENGAN SELIMUT MORTAR

Nursiah Chairunnisa

Abstrak - Strengthening and Retrofitting methods already had applicated in buildings. Beam is One of structure elements can be strengthened in order to maintain efficient serviceability structure that can be caused change of function from structures likes overloading or lack of quality control at construction so it can fulfill the code of structures to day and future. This research had to know about effectiveness strengthening methods of reinforced concrete beams using longitudinal compression and tension reinforcement with jacketing mortar as flexural strengthening and had to know effectiveness of theoretical methods for interpreting result. In this research specimen models consist of four specimens: one was control beam (BK), one was monolith beam (BM) and one was strengthened beam (BP) without bonding agent and BP2 was strengthened beam with bonding agent. All beams were tested under 2-point loading midspan as flexural load and also instrumented for the measurement of mid-span deflection and crack pattern. Test result were compared to analytical method and program computer based layer method (software Response-2000). The result shows performed of Response-2000 as layer method an theoretical methods provided equal performances if compared with experimenta method. It can be shown that the percentags of Ultimate Load between Response 2000 with experimental method was 107 % - 109% for BK, 110,42-111,40% for BM, 83,77% - 83,81% for BP1 dan 87,66-87,70 for BP2. Failure patterns of the control beam (BK) and monolithical beam (BM) were flexural while the strengthened beams had debonding. At this researched, an analytical method (Response-2000) also presented equal performance at failure patterns. It can be shown two specimens (BK and BM) were flexural failed and others (BP1 and BP2) were debonding failed too.

Keywords: Reinforced concrete beam, strengthening, Response 2000, Layer Method

PENDAHULUAN

Dewasa ini Perkuatan (*strengthening*) dan Perbaikan (*Retrofitting*) pada struktur yang telah dibangun semakin banyak dilakukan. Perkuatan (*strengthening*) dilakukan karena ada perubahan fungsi bangunan yang sudah berdiri dan yang tentu saja akan menyebabkan perubahan kemampuan menahan beban yang lebih besar dari struktur yang telah ada. Perbaikan (*Retrofitting*) pada struktur dilakukan karena Bangunan yang sudah berdiri mengalami kerusakan baik akibat gempa ataupun akibat kelebihan Beban sehingga perlu adanya perbaikan di elemen struktur tersebut. Banyak sekali penelitian mengenai cara Perkuatan (*strengthening*) dan Perbaikan

(*Retrofitting*) yang dilakukan pada Balok Beton Bertulang. Perkuatan (*strengthening*) adalah suatu tindakan modifikasi struktur, mungkin belum terjadi kerusakan dengan tujuan untuk meningkatkan kekuatan atau stabilitas (Triwiyono, 2006). Chairunnisa (2009) meneliti tentang penambahan tulangan longitudinal tarik dan tekan dengan selimut mortar mutu tinggi hasil penelitian Wancik (2008). Benda Uji terdiri dari 3 tipe yaitu Balok Kontrol, Balok monolit dan Balok Perkuatan. Balok Kontrol dengan ukuran 150 x 250 mm, balok monolit dengan ukuran 190 x 330 mm sedangkan balok perkuatan adalah balok kontrol yang diperkuat dengan satu buah tulangan tekan dengan diameter 13 dan dua buah tulangan tarik dengan diameter yang sama dengan

menggunakan selimut mortar mutu tinggi. Panjang bentang semua benda uji adalah 2500mm. Hasil penelitian menyebutkan bahwa kekuatan lentur untuk balok perkuatan meningkat, tetapi peningkatan ini tidak linier karena terjadi pelepasan selimut mortar (*debonding*). Sejalan dengan hasil penelitian tersebut dipandang perlu untuk melakukan penelitian lebih lanjut tentang Perkuatan Balok beton bertulang ini dengan membandingkan Hasil eksperimen dengan Analisis *Software Response-2000*. *Software Response 2000* adalah suatu program yang menganalisis balok dan kolom dengan kombinasi beban aksial, momen dan geser berdasarkan *layer method*. Tujuan analisis dengan *Software Response 2000* dalam penelitian ini adalah untuk memperluas interpretasi hasil dari eksperimen yang telah dilakukan dan memvalidasi keakuratan *Software Response 2000* dalam menganalisis suatu struktur.

KAJIAN TEORITIS

Analisis kekuatan lentur balok yang dipakai pada penelitian ini untuk mengetahui Mu dari balok mengacu kepada asumsi dalam Peraturan SNI 03-2847-2002 Pasal 12.2 dan Pasal 12.3 yang mengasumsikan batasan $\rho < 0,75\rho_b$ yang merupakan rasio tulangan yang menghasilkan kondisi regangan seimbang akan memberikan perilaku yang liat (*ductile*). Untuk menghindari penulangan yang getas, maka beberapa peraturan mensyaratkan kemampuan balok hanya dibatasi sampai dengan 75% ρ_b . Dalam penelitian ini, untuk analisis perhitungan juga dilakukan dengan menggunakan *Software Response 2000* (Bentz, E.,2001). *Software Response 2000* adalah suatu program yang menganalisis balok dan kolom dengan kombinasi beban aksial, momen dan geser. Tujuan analisis dengan *Software Response 2000* dalam penelitian ini adalah untuk memperluas interpretasi hasil dari eksperimen yang telah dilakukan.

METODOLOGI PENELITIAN

Benda uji Balok

Kode	Panjang (mm)	Lebar (mm)	Tinggi (mm)	Perlakuan	Tul.Utama		Tul. Sengkang	Tul. Perkuatan	
					Atas	Bawah		Atas	Bawah
BK	2500	150	250	-	2D6	3D13	P8-40	-	-
BM	2500	190	330	-	2D6	3D13	P8-40	1D13	2D13
BP-1	2500	190	330	Tanpa perlakuan	2D6	3D13	P8-40	1D13	2D13
BP-2	2500	190	330	<i>Bonding agent</i>	2D6	3D13	P8-40	1D13	2D13

Keterangan :

BK : Balok kontrol

BM : Balok kontrol yang diperkuat 1 tulangan tekan dan 2 tulangan tarik dicor monolit.

BP-1 : Balok kontrol yang diperkuat 1 tulangan tekan dan 2 tulangan tarik dicor terpisah tanpa perlakuan

BP-2 : Balok kontrol yang diperkuat 1 tulangan tekan dan 2 tulangan tarik dicor terpisah dengan perlakuan berupa *bonding agent*.

Benda Uji BP-2 spesifikasinya sama dengan BP-1, perbedaannya terletak pada perlakuan dengan menggunakan *bonding agent* Sikadur 732 sebagai lem perekat antara beton lama dan mortar baru

Perkuatan Benda Uji

Perkuatan benda uji dilakukan dengan melekatkan tulangan longitudinal pada sisi bawah dan atas balok untuk perkuatan lentur, kemudian dilakukan pengecoran dengan mortar. Adapun tahap-tahap perkuatan adalah sebagai berikut:

- 1) Pembuatan bekisting untuk perkuatan tarik. Bekisting ini dilengkapi dengan tahu beton pada bagian ujung dan tengah penampang, hal ini dimaksudkan untuk meletakkan tulangan perkuatan longitudinal. Setelah itu meletakkan beton lama ke bekisting perkuatan dan pembuatan bekisting perkuatan daerah tekan langsung dibuat di atas benda uji seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1



Gambar 1. Bekisting dan tulangan longitudinal untuk perkuatan daerah tarik dan tekan

Pembersihan benda uji dari debu dan kotoran dengan *Air Compressor*, dilanjutkan dengan pengolesan

bonding agent Sikadur 732 yang berfungsi untuk melekatkan beton lama dengan mortar baru. Perlu diperhatikan masa tunggu dari *bonding agent* sekitar ± 30 menit. Proses pembersihan benda uji dan pengolesan *bonding agent* Sikadur 732 dapat dilihat pada Gambar 2



Gambar 2. Pembersihan benda uji dan pengolesan *Bonding Agent*

- 2) Pengecoran perkuatan dengan mortar. Untuk pengecoran perkuatan tarik dilakukan dengan menggunakan seng tipis yang dimasukkan pada salah satu sisi badan benda uji. Proses pengecoran dilakukan melalui salah satu sisi benda uji dan dibiarkan mengalir sampai ke sisi lain dari benda uji, yang berarti pengecoran perkuatan sudah memenuhi keseluruhan rongga pada bekisting perkuatan. Pengecoran perkuatan tekan lebih mudah dilakukan seperti pengecoran balok biasa dan dilakukan ± 3 hari setelah pengecoran perkuatan tarik. Proses pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Pengecoran perkuatan dengan mortar

Tujuan perkuatan dengan penambahan tulangan longitudinal pada daerah tarik dan tekan dengan diselubungi mortar dimaksudkan agar balok tetap dalam keadaan *underreinforced*. Selain itu juga untuk mencegah tulangan baja perkuatan terkena korosi tulangan. Perbedaan Benda uji BM dan BP terletak pada sistem pengecoran, yaitu BM cor monolit dengan kuat tekan beton sebesar $f_c' = 28,514$ MPa dan BP cor terpisah dengan menggunakan mortar mutu $f_c' = 56,125$ MPa sebagai selimut perkuatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis teoritis berdasarkan SNI 03-2847-2002

Besarnya nilai kapasitas lentur balok benda uji teoritis dihitung berdasarkan metode SNI 03-2847-2002 yang dapat dilihat pada Tabel 1

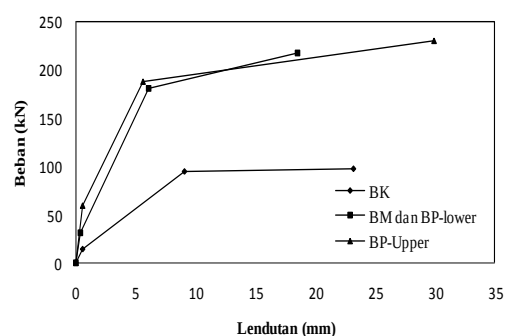
Tabel 1. Hasil pengujian lentur balok uji (metode SNI)

No	Benda Uji	Beban (kN)			Lendutan (mm)			Peningkatan P_{maks} (%)
		retak1	Leleh	Maks	retak1	Leleh	Maks	
1	BK	14,302	94,249	97,50	0,515	9,08	23,20	0
2	BM	31,377	180,56	217,63	0,384	6,09	18,50	123,21
3	BP _{lower}	31,377	180,56	217,63	0,384	6,09	18,50	123,21
4	BP _{upper}	58,85	188,83	230,24	0,534	5,61	29,93	136,14

Perhitungan analisis teoritis untuk balok perkuatan diasumsikan dengan *lower analyze* dan *upper analyze*. Hal ini dilakukan karena ada perbedaan mutu beton balok kontrol sebesar $f_c' = 28,514$ MPa dan mutu mortar sebagai selimut Perkuatan sebesar $f_m' = 56,125$ MPa. Dalam analisis untuk *lower analyze* digunakan mutu beton sebesar 28,514 MPa dan pada analisis *upper analyze* digunakan mutu mortar 56,125 MPa

Dari Tabel 1 terlihat bahwa balok monolit (BM) dan balok perkuatan *lower estimate* (BP_{lower}) menunjukkan peningkatan beban maksimum sebesar 123,21 % terhadap balok kontrol (BK) dan balok perkuatan *upper estimate* (BP_{upper})

mengalami peningkatan beban maksimum sebesar 136,14 % terhadap balok kontrol (BK). Hubungan beban lendutan hasil perhitungan berdasarkan SNI dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Hubungan beban lendutan rata-rata benda uji (SNI)

Analisis dengan menggunakan Program Response-2000

Analisis *software* yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan program *Response-2000*. Hasil *running* dengan Program *Response-2000* kemudian diplot dalam grafik hubungan beban lendutan dan momen kurvatur yang terjadi pada masing-masing benda uji. Pada analisis balok perkuatan dengan program *Response-2000* dilakukan dengan dua pendekatan yaitu balok perkuatan analisis *lower estimate* dan *upper estimate*. Hal ini dikarenakan untuk melakukan permodelan yang presisi seperti yang

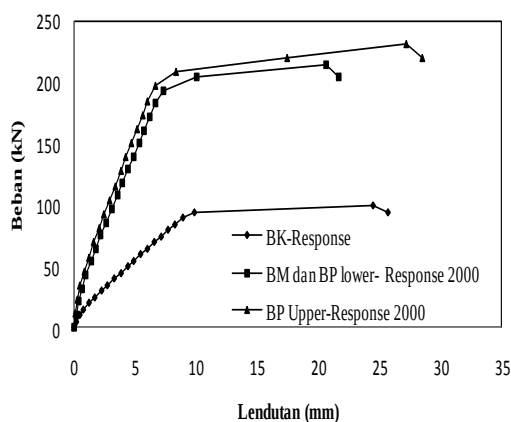
dilakukan di Laboratorium tidak dapat dilakukan pada program *Response-2000*, sehingga untuk memperoleh hasil untuk balok perkuatan dilakukan analisis secara *lower estimate* dan *upper estimate*. Hasil *output* program *Response-2000* menganggap bahwa tanda titik (.) sebagai desimal. Hasil pengujian lentur dengan program *Response-2000* dari benda uji balok kontrol, balok monolit, balok perkuatan analisis *lower estimate* (BP_{lower}) dan balok perkuatan analisis *upper estimate* (BP_{upper}) ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil pengujian lentur balok uji (program *Response-2000*)

No	Benda Uji	Beban (kN)			Lendutan (mm)			Lebar retak (mm)			Peningkatan P_{maks} (%)
		retak1	Leleh	Maks	retak1	Leleh	Maks	retak1	leleh	maks	
1	BK	11,65	95,76	99,90	0,529	12,33	24,47	0,02	0,45	1,07	0
2	BM	24,34	192,69	215,53	0,399	7,26	20,65	0,03	0,63	1,21	115,72
3	BP_{lower}	24,34	192,69	215,53	0,399	7,26	20,65	0,03	0,63	1,21	115,72
4	BP_{upper}	34,95	199,86	232,15	0,490	7,00	27,15	0,04	0,63	1,75	132,38

Dari hasil analisis program *Response-2000* pada Tabel 2 diperoleh besarnya kenaikan beban dari balok monolit (BM) dan balok perkuatan *lower estimate* sebesar 115,72% terhadap balok kontrol (BK) dan perkuatan *upper estimate* meningkat sebesar 132,38% terhadap balok kontrol (BK). Hubungan beban lendutan hasil perhitungan program *Response-2000* dilihat pada Gambar 5

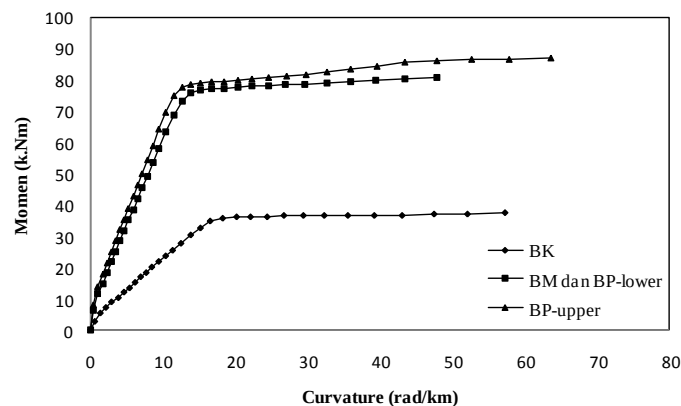
Perhitungan nilai *momen-curvature* dari analisis hasil program *Response-2000* dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 6.



Gambar 5. Hubungan beban lendutan rata-rata benda uji (*Response-2000*)

Tabel 3. *Momen-curvature* benda uji berdasarkan program *Response-2000*

No	Benda uji	Momen (kNm)			Curvature (rad/km)		
		Retak 1	Leleh	Maks	Retak 1	Leleh	Maks
1	BK	4,37	35,91	37,46	0,905	17,710	57,388
2	BM	9,13	72,26	80,82	0,672	12,125	47,824
3	BP _{lower}	9,13	72,26	80,82	0,672	12,125	47,824
4	BP _{upper}	13,11	74,95	87,01	0,886	11,445	63,718

Gambar 6. Hubungan momen-curvature balok benda uji (*Response-2000*)**Perbandingan beban hasil teoritis dan hasil pengujian**

Besarnya beban maksimum yang mampu ditahan oleh balok berdasarkan

eksperimen dan teoritis dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan beban hasil teoritis dengan hasil eksperimen

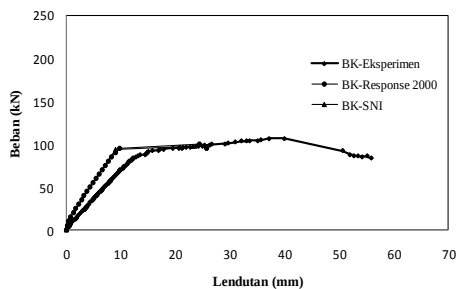
No	Benda uji	P _{SNI} (kN)	P _{Response-2000} (kN)	P _{eksperimen} (kN)	P _{eksp} / P _{SNI} (%)	P _{eksp} /P _{Response-2000} (%)
1	BK	97,5	99,9	106,9	109,64	107,01
2	BM	217,63	215,53	240,3	110,42	111,49
3	BP-1	223,94*	223,84*	187,6	83,77	83,81
4	BP-2	223,94*	223,84*	196,3	87,66	87,70

Keterangan: * = Nilai diperoleh dari rata-rata antara BP_{lower} dan BP_{upper}

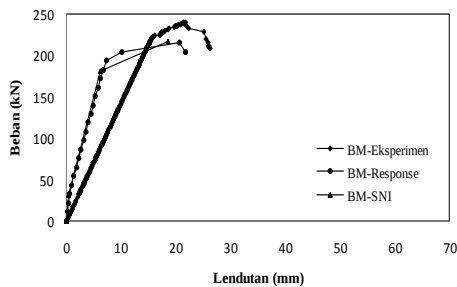
Dari Tabel 4 terlihat bahwa hasil eksperimen memiliki nilai kapasitas lentur yang paling besar untuk balok kontrol (BK) dan balok monolit (BM) jika dibandingkan dengan perhitungan teoritis secara manual maupun program *Response-2000*. Nilai kapasitas lentur untuk balok perkuatan tanpa

bonding agent (BP-1) dan balok perkuatan dengan *bonding agent* (BP-2) memiliki nilai yang cenderung lebih rendah dibanding dengan perhitungan teoritis berdasarkan manual dan program *Response-2000* yaitu secara berturut turut sebesar 187,6 kN dan 196,3 kN, hal ini terjadi karena pada kedua

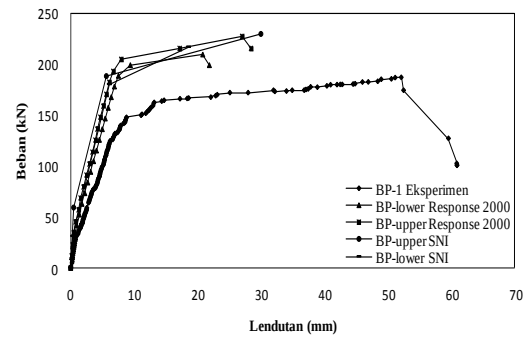
balok ini mengalami *debonding* pada beban tertentu sebelum balok mencapai beban maksimum. Hasil perhitungan teoritis dengan program *Response-2000* dari balok kontrol (BK) maupun balok monolit (BM) secara berturut-turut sebesar 99,9 kN dan 215,53 kN menunjukkan nilai yang relatif sama jika dibandingkan dengan hasil eksperimen yaitu secara berturut-turut sebesar 106,9 kN dan 240,3 kN, sehingga dapat dikatakan bahwa program *Response-2000* cukup akurat dipergunakan untuk menganalisis kapasitas lentur dari balok benda uji. Secara keseluruhan perbandingan antara perhitungan teoritis dan eksperimen untuk masing-masing benda uji dapat dilihat pada Gambar 7 sampai 10.



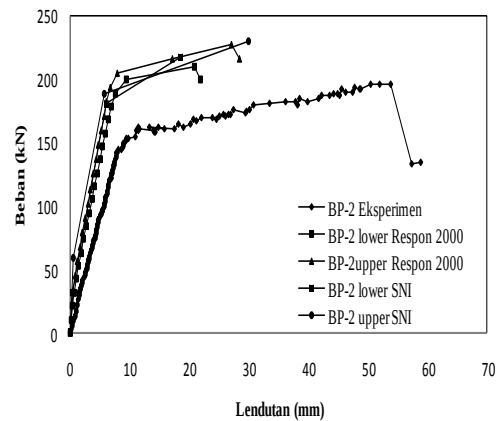
Gambar 7. Perbandingan kapasitas beban balok kontrol (BK)



Gambar 8. Perbandingan kapasitas beban balok monolit (BM)



Gambar 9. Perbandingan kapasitas beban balok perkuatan (BP-1)



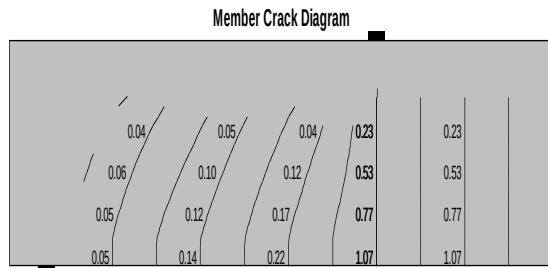
Gambar 10. Perbandingan kapasitas beban balok perkuatan (BP-2)

Pola Retak dan Keruntuhan Balok Kontrol (BK)

Pola keruntuhan balok kontrol (BK) berdasarkan hasil pengujian dan program *Response-2000* terlihat pada Gambar 11 sampai Gambar 12.



Gambar 11. Pola Retak benda Uji balok kontrol (BK) hasil pengujian

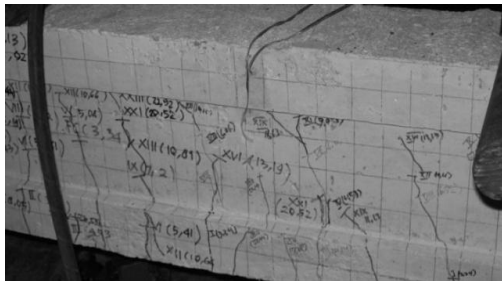


Gambar 12. Pola Retak benda Uji balok kontrol (BK) hasil program *Response-2000*

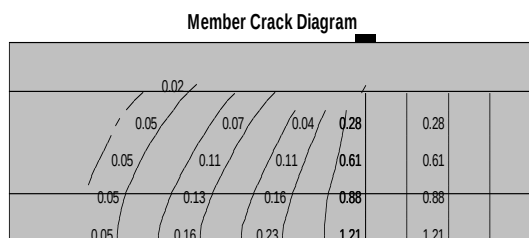
Dari Gambar 11 dan Gambar 12 terlihat bahwa pola retak hasil pengujian mendekati hasil pola retak dengan program *Response-2000*. Hasil pengujian menunjukkan nilai lebar retak maksimum untuk balok kontrol adalah 1,20 mm, sedangkan program *Response-2000* dihasilkan bahwa lebar retak maksimum adalah sebesar 1,07 mm.

Balok Monolit (BM)

Pola keruntuhan balok monolit (BM) berdasarkan hasil pengujian dan program *Response-2000* terlihat pada Gambar 13 sampai dengan Gambar 14.



Gambar 13. Pola Retak benda Uji Balok Monolit (BM) hasil pengujian



Gambar 14. Pola Retak benda Uji Balok Monolit (BM) hasil program *Response-2000*

Dari Gambar 13 dan Gambar 14 terlihat bahwa hasil pembacaan lebar retak maksimum balok monolit (BM) mendekati dengan hasil lebar retak maksimum dari program *Response-2000*, yaitu lebar retak

maksimum hasil pengujian sebesar 0,8 mm dan untuk hasil program *Response-2000* dihasilkan sebesar 1,21 mm. Dari pengujian balok monolit diketahui bahwa pada balok monolit (BM) tulangan baja tarik bawah sudah mengalami leleh yang ditandai dengan pembacaan *strain gauge* menunjukkan pembacaan sebesar 0,002733 pada beban 155,80 kN. Pada pengujian kuat tarik tulangan baja diameter 13 yang dipergunakan sebagai tulangan baja tarik mencapai leleh pada regangan sebesar 0,002407, sehingga dapat disimpulkan bahwa tulangan baja tarik bawah pada balok monolit ini sudah mencapai leleh. Pada balok monolit ini *strain gauge* dipasang pada setiap lapis (*layer*) tulangan baja tarik maupun tulangan baja tekan.

Balok perkuatan dengan bonding agent (BP-2)

Pola keruntuhan balok BP-2 berdasarkan hasil pengujian terlihat pada Gambar 15

(a) Pola retak benda uji BP-2



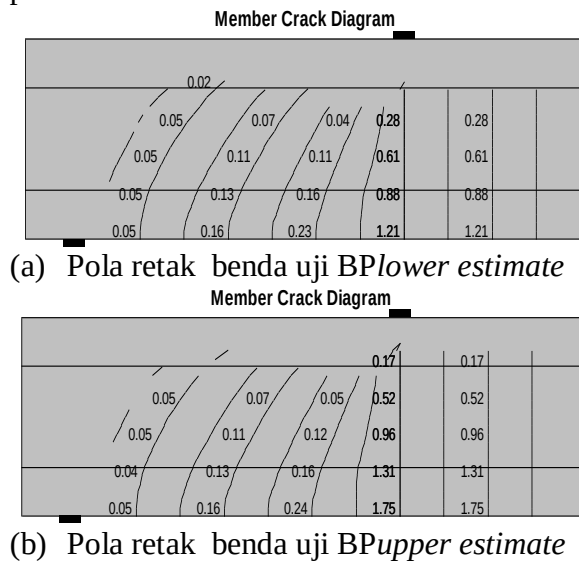
(b) *Debonding* selimut perkuatan BP-2



Gambar 15. Pola Retak dan terjadinya *debonding* benda uji BP-2

Untuk hasil program *Response-2000* pola keruntuhan balok perkuatan diasumsikan untuk BP *lower estimate* dan BP *upper estimate*, sehingga pola keruntuhan balok ini dianggap sama untuk balok BP-1

dan BP-2 hasil pengujian seperti terlihat pada Gambar 16



Gambar 16. Pola Retak benda uji BP lower estimate dan BP upper estimate pada program Response-2000

Dari Gambar 15 dan Gambar 16 terlihat pembacaan lebar retak maksimum yang terjadi untuk hasil pengujian dan hasil program Response-2000 tidak sama yaitu untuk hasil pengujian BP-1 sebesar 0,2 mm dan BP-2 sebesar 0,3 mm, sedangkan dengan program Response-2000 diperoleh lebar retak antara 1,21 mm – 1,75 mm. Hal ini dapat terjadi kemungkinan karena pembacaan lebar retak dari hasil pengujian dilakukan saat *debonding* terjadi, sedangkan pada program Response-2000 tidak memperhitungkan terjadinya *debonding*. Pola retak yang terjadi pada balok uji dapat menunjukkan jenis keruntuhan yang terjadi pada balok uji tersebut. Secara umum retak lentur terjadi pada balok berupa retak halus dimulai dari sisi bawah di tengah bentang, kemudian menyebar ke arah tumpuan dan merambat menuju ke arah beban hingga benda uji runtuh. Pola keruntuhan yang terjadi pada benda uji adalah untuk balok kontrol (BK) dan balok monolit (BM) mengalami keruntuhan lentur. Kerusakan balok perkuatan untuk BP-1 dan BP-2 adalah kerusakan *debonding* (lepasnya lekatan antara beton lama dengan mortar baru).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis SNI, *Software Response 2000* dan hasil eksperimen yang telah dilakukan dalam penelitian ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan penting antara lain adalah sebagai berikut:

1. Perbandingan kekuatan lentur berdasarkan hasil eksperimen dengan SNI untuk BK, BM, BP-1 dan BP-2 berturut-turut adalah 109,64%, 110,42%, 83,77% dan 87,66%, sedangkan perbandingan kekuatan lentur berdasarkan hasil eksperimen dengan program Response-2000 secara berturut-turut adalah 107,01%, 114,36%, 83,81% dan 87,70%.
2. Retak awal *debonding* antara beton lama dengan mortar perkuatan untuk benda uji BP-1 terjadi pada beban 34,8 kN dan untuk benda uji BP-2 terjadi pada beban 120,9 kN, sehingga besarnya kemonolitan benda uji BP-2 lebih tinggi 247,4% dari BP-1.
3. Kegagalan benda uji sebelum diperkuat adalah kegagalan lentur dan setelah diperkuat adalah kegagalan *debonding*.
4. Penggunaan mortar dengan komposisi campuran sebagai selimut perkuatan pada penelitian ini memiliki kemudahan dalam segi pelaksanaan pengecoran.
5. Program Response-2000 cukup baik dan cukup akurat untuk dapat digunakan dengan catatan *debonding* tidak terjadi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung*, Bandung. (SNI 03-2847-2002)
- Bentz, E., 2001, *User Manual Program Response-2000 version 1*, Toronto, Canada.

- Chairunnisa, N., 2009 *Penambahan Tulangan Longitudinal dengan Komposit Mortar Sebagai alternatif Perkuatan Lentur pada Balok Beton Bertulang*, Jurnal Info Teknik Vol.10 no 1, 2009 :34-42
- Dipohusodo, L, 1994, *Struktur Beton Bertulang*, Gramedia Pustaka Utama, Jakarta
- Saytarno, I., 1995, *Hand out Mekanika Plastik*, Program Pascasarjana UGM,Jogjakarta.
- Triwiyono, A., 2004, *Evaluasi dan Rehabilitasi Bangunan Gedung*, Program Pascasarjana UGM, Jogjakarta.
- Wancik, A., 2008, *Batako Styrofoam Komposit Mortar Semen*, Tesis Pasca Sarjana UGM, Jogjakarta
- .