

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

5.1 Umum

Pada bab ini ditampilkan hasil-hasil dari pengujian yang telah dilakukan. Hasil pengujian yang telah dianalisis ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik yang memberikan kemudahan dalam mencapai tujuan dari penelitian ini. Hasil penelitian ini dimulai dari menampilkan hasil dari pengujian karakteristik material beton bertulang hingga hasil pengujian kinerja struktural balok SCC dan balok HSC.

Pada bab ini juga dijelaskan mengenai prosedur analisis pengujian 4 buah sampel balok beton bertulang dengan pembebanan terpusat 2 titik dan tiap-tiap benda uji dibebani dengan beban maksimum yang berbeda-beda berdasarkan kapasitas pembebanan masing-masing. Data yang dibutuhkan dalam menganalisis antara lain sebagai berikut ini.

1. Data kuat tekan beton riil (kuat tekan yang didapat dari hasil pengujian silinder, bukan kuat tekan rencana).
2. Data *hammer test* pada balok beton terpasang.
3. Data kuat tarik baja tulangan riil.
4. Data lendutan yang terjadi pada balok saat dibebani.
5. Gambar pola retak yang terjadi pada balok.

Diharapkan dengan adanya data diatas maka diperoleh berbagai grafik kinerja balok lentur dan geser yang diinginkan.

5.2 Pengujian Kuat Tekan Beton

5.2.1 Kuat Tekan Silinder (Destruktif)

Tujuan umum dilakukannya pengujian kuat tekan beton ini adalah untuk mendapatkan kuat tekan beton (f'_c) sebagai kontrol dari penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini digunakan f'_c rencana sebesar 43 MPa, uji kuat tekan silinder beton ini dilakukan dengan menguji 10 buah silinder beton dengan masing-masing silinder terdiri dari 5 buah silinder beton SCC dan 5 buah silinder beton HSC.

Umur beton yang digunakan pada penelitian ini adalah 28 hari karena beton mutu tinggi tidak ada konversi kekuatan berdasarkan harinya. Pengujian kuat tekan beton bisa dilihat pada Gambar 5.1 berikut ini.



Gambar 5.1 Uji Kuat Tekan Beton

Pada beton SCC1 didapatkan nilai beban maksimum sebesar 780 kN dengan luas penampang sebesar 17821 mm², maka didapatkan nilai kuat tekan

$$f'_c = \frac{780000 \text{ N}}{17821 \text{ mm}^2} = 43,77 \text{ MPa}$$

Hasil pengujian silinder beton lainnya ditampilkan pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5.1 Hasil Uji Kuat Tekan Silinder Beton Umur 28 Hari

Benda Uji (BU)	Nomor Silinder	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)
SCC	1	43.77	44.78
	2	41.41	
	3	52.14	
	4	45.76	
	5	40.84	
HSC	1	45.73	42.35
	2	43.86	
	3	43.99	
	4	42.07	
	5	36.10	

Dari hasil pengujian kuat tekan silinder beton didapatkan hasil kuat tekan rata-rata silinder beton yang melebihi kuat tekan minimal beton mutu tinggi sebesar 41,4 MPa. Dari hasil pengujian didapatkan kuat tekan rata-rata silinder beton SCC sebesar 44,78 MPa dan kuat tekan rata-rata silinder beton HSC sebesar 42,35 MPa. Pada penelitian Nugraha (2017) didapatkan nilai kuat tekan beton SCC sebesar 50,54 MPa, maka dalam penelitian ini terdapat penurunan kekuatan dari hasil penelitian sebelumnya yaitu sebesar 11,39%. Hal ini disebabkan pemakaian agregat pada campuran beton dengan karakteristik agregat yang berbeda, sehingga mempengaruhi terhadap perbedaan nilai kuat tekan beton.

Pada pengujian ini, silinder beton SCC dan HSC mengalami peningkatan kekuatan sebesar 8,17% dan 2.30% dari kuat tekan minimal beton mutu tinggi. Adanya perbedaan penambahan kekuatan antara beton SCC dan HSC dapat terjadi dikarenakan beberapa hal, antara lain sebagai berikut ini.

1. proses pemadatan beton saat dicetak,
2. proses perawatan beton yang sudah dicetak,
3. penambahan *additive* dan *admixture*.

Kualitas dari material yang digunakan berpengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan pada pengujian ini. Permukaan krikil yang kasar dan bukan krikil yang licin yang digunakan dalam pengujian ini, sehingga krikil dapat saling mengunci. Selain itu, kerikil yang digunakan untuk campuran beton ini sebelum digunakan dicuci terlebih dan dikeringkan sampai permukaannya kering dalam kondisi jenuh kering muka, sehingga bersih dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu mutu beton.

Pada penelitian ini, beton SCC hanya dipadatkan menggunakan penumbuk. Karena beton SCC mempunyai sifat memadat sendiri, maka pemadatan dilakukan untuk mendapatkan kepadatan beton yang optimum. Sementara pada beton HSC pemadatan beton menggunakan alat pengetar *vibrator*, sehingga pemadatan beton lebih baik dibandingkan dengan pemadatan yang dilakukan secara manual dengan cara ditumbuk. Proses pemadatan yang baik akan membuat rongga-rongga udara yang ada di dalam beton keluar dan akan membuat beton padat tanpa rongga udara di dalamnya karena bagian yang terisi udara tadi digantikan oleh air dan

semen sehingga beton relatif lebih padat dan mutu betonnya lebih baik dibandingkan dengan beton berongga.

Untuk perawatan silinder beton pada penelitian ini dilakukan dengan cara merendam beton ke dalam air. Perawatan pada beton dilakukan agar suhu pada saat beton mengalami hidrasi menjadi stabil, sehingga tidak terjadi keretakan-keretakan yang disebabkan perubahan suhu secara tiba-tiba. Untuk benda uji balok perawatan dilakukan dengan cara menyirami balok dan menyelimuti balok dengan karung goni basah sebanyak 2 kali sehari.

5.2.2 Hammer Test (Non Destruktif)

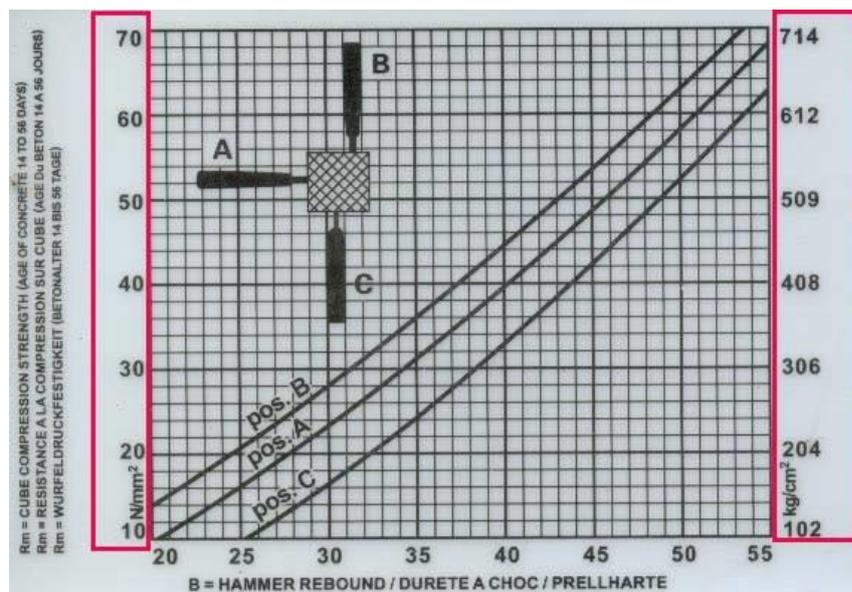
Concrete Hammer Test atau *Schmidt Hammer Test* merupakan suatu metode uji yang mudah dan praktis untuk memperkirakan mutu beton. Prinsip kerja Concrete Hammer adalah dengan memberikan beban impact (tumbukan) pada permukaan beton dengan menggunakan suatu massa yang diaktifkan dengan menggunakan *energy* yang besarnya tertentu. Karena timbul tumbukan antara massa tersebut dengan permukaan beton, massa tersebut akan dipantulkan kembali. Jarak pantulan massa yang terukur memberikan indikasi kekerasan permukaan beton. Kekerasan beton dapat memberikan indikasi kuat tekannya.

Karena prinsip kerja dan cara penggunaan alat sangat mudah, maka secara luas alat ini banyak digunakan untuk memperkirakan mutu beton, terutama pada struktur bangunan yang sudah jadi. Dan dengan proses uji yang cepat maka alat inipun secara praktis dapat menguji secara keseluruhan struktur bangunan ataupun bagian struktur secara luas untuk mengindikasikan keseragaman mutu beton. Sebagai catatan karena alat ini hanya membaca kekerasan beton pada lapisan permukaan (+4 cm), sehingga untuk elemen struktur dengan dimensi yang besar, concrete hammer test hanya menjadi indikasi awal bagi mutu dan keragaman mutu. Selain itu pada saat pengujian permukaan beton yang akan diuji harus dibersihkan dan diratakan karena alat ini peka terhadap variasi yang ada di permukaan beton. Pengujian *hammer test* bisa dilihat pada Gambar 5.2 berikut ini.



Gambar 5.2 Pengujian *Hammer Test* pada Balok Benda Uji

Hubungan empirik dari nilai *hammer rebound* dengan kuat tekan ditunjukkan pada grafik seperti pada Gambar 5.3 berikut ini.



Gambar 5.3 Hubungan Empirik Nilai *Hammer Rebound* dengan Kuat Tekan

Pada kali ini dilakukan pengujian pada posisi pukulan B dimana *hammer* dilentingkan dari arah tegak lurus sumbu panjang benda uji, sehingga dihasilkan nilai lenting seperti pada Tabel 5.2 berikut ini.

Tabel 5.2 Hasil Uji *Hammer Test*

Elemen struktur	Balok	Balok	Balok	Balok
Posisi Pukulan	B	B	B	B
Kode bidang uji	Lentur SCC	Lentur HSC	Geser SCC	Geser HSC
Pukulan ke	Nilai Lenting	Nilai Lenting	Nilai Lenting	Nilai Lenting
1	43	42	43	40
2	44	42	43	40
3	44	43	44	43
4	45	41	46	42
5	42	43	45	39
6	43	42	42	41
7	43	44	41	41
8	44	43	43	42
9	44	41	44	43
10	43	42	42	41
jumlah data	435	423	433	412
R maksimum	45	44	46	43
R minimum	42	41	41	39
R rata-rata	43,5	42,3	43,3	41,2
Perkiraan kuat tekan beton terkoreksi (MPa)	45,5	43,3	45	42

Dari hasil pengujian *hammer test* didapatkan nilai perkiraan kuat tekan beton terkoreksi pada L-SCC sebesar 45,5 MPa, pada L-HSC sebesar 43,3 MPa, pada G-SCC sebesar 45 MPa, dan pada G-HSC sebesar 42 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa perkiraan kuat tekan beton memenuhi standar rencana beton mutu tinggi yaitu diatas 41,4 MPa.

5.3 Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian kuat tarik baja dilakukan dengan maksud untuk mengetahui kualitas dari baja tulangan yang akan digunakan untuk balok. Kualitas dari baja tulangan mempengaruhi hasil perhitungan setiap pembebanan benda uji balok. Hasil dari pengujian kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 5.3. Pada pengujian baja tulangan ini diuji baja untuk tulangan tarik dengan diameter 19

mm dan diameter 13 mm, tulangan tekan dengan diameter 12 mm, dan tulangan sengkang diameter 8 mm.

Pada tulangan D19 didapatkan nilai beban leleh sebesar 52238 N dan nilai beban maksimum sebesar 71858 N dengan luas penampang sebesar 136,85 mm², maka didapatkan nilai tegangan,

$$f_y = \frac{52238 \text{ N}}{136,85 \text{ mm}^2} = 381,73 \text{ MPa}$$

$$f_u = \frac{71858 \text{ N}}{136,85 \text{ mm}^2} = 525,10 \text{ MPa}$$

Hasil pengujian baja tulangan lainnya ditampilkan pada Tabel 5.1 berikut ini.

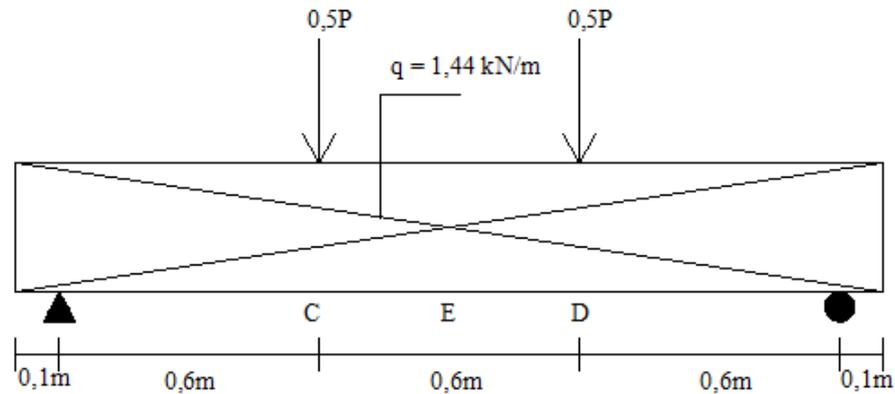
Tabel 5.3 Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan

No.	Diameter Pengenal (mm)	Diameter Penampang (mm)	Luasan (mm ²)	Tegangan (MPa)	
				Leleh Awal	Tegangan Maksimal
1	D19	18,5	136,85	381,73	525,10
2	D13	12,4	120,76	326,97	550,36
3	P12	11,5	103,87	344,73	504,34
4	P8	7,2	40,72	334,91	515,62

Dari hasil pengujian tarik baja tulangan didapatkan hasil kuat tarik leleh baja (f_y) dan kuat tarik maksimum baja (f_u) setiap tipe tulangan tidak jauh berbeda. Pada pasal 21.1.5.2 (b) SNI 03-2847-2013 dikatakan bahwa rasio kekuatan tarik aktual terhadap kekuatan leleh aktual tidak kurang dari 1,25. Hal ini menunjukkan bahwa baja yang dipakai pada penelitian ini telah memenuhi syarat.

5.4 Pembebanan Teoritis

Pada penelitian ini digunakan beton bertulang dengan dimensi seperti pada Gambar 5.4 dan Gambar 5.5. Berikut ini adalah hasil perhitungan pembebanan dan perhitungan beban P yang dapat dipikul oleh balok pada salah satu contoh sampel yaitu L-SCC.



Gambar 5.4 Dimensi Benda Uji Memanjang

$$q = 0,20 \times 0,3 \times 24 = 1,44 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$R_A = \frac{0,6 P + 0,3 P + 1,44 \cdot 2 \cdot 0,9}{1,8}$$

$$= \frac{1}{2} P + 1,44 \text{ kN}$$

$$R_A = R_B$$

Momen :

$$M_C = M_D$$

$$M_C = R_A \cdot 0,6 - q \cdot 0,7 \cdot 0,35$$

$$= \left(\frac{1}{2} P + 1,44 \right) 0,6 - 1,44 \cdot 0,7 \cdot 0,35$$

$$= 0,3 P + 0,864 - 0,3528$$

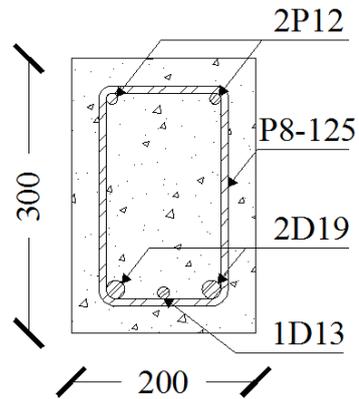
$$= 0,3 P + 0,5112 \text{ kNm}$$

$$M_E = R_A \cdot 0,9 - q \cdot 1 \cdot 0,5 - \frac{1}{2} P \cdot 0,3$$

$$M_E = \left(\frac{1}{2} P + 1,44 \right) 0,9 - q \cdot 1 \cdot 0,5 - \frac{1}{2} P \cdot 0,3$$

$$M_E = 0,45 P + 1,296 - 0,72 - 0,15 P$$

$$M_E = 0,3 P + 0,576 \text{ kNm}$$



Gambar 5.5 Dimensi Benda Uji Melintang

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$h = 300 \text{ mm}$$

$$f_y = 381,73 \text{ MPa}$$

$$f'_c = 44,78 \text{ MPa}$$

$$E_c = 4700\sqrt{f'_c}$$

$$= 31451,394$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,003$$

$$\varepsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = 0,00191$$

$$A_s = 699,789 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 226,195 \text{ mm}^2$$

$$sb = 30 \text{ mm}$$

$$d_s = sb + \varnothing_{sengkang} + \varnothing_{tul\ pokok}/2$$

$$= 47,5 \text{ mm}$$

$$d_s' = sb + \varnothing_{sengkang} + \varnothing_{tul\ pokok}/2$$

$$= 44 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s$$

$$= 252,5 \text{ mm}$$

$$d_t = d$$

$$\varepsilon_{ccl} = \varepsilon_y = 0,00191$$

1. Perhitungan Tulangan Sebelah

Gaya-gaya dalam $C = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a$ dan $T = A_s \cdot f_y$

$$C = T$$

$$0,85 f'_c \cdot b \cdot a = A_s \cdot f_y$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 f'_c \cdot b} = \frac{699,79 \cdot 381,73}{0,85 \cdot 44,78 \cdot 200} = 35,09 \text{ mm}$$

$$\text{jika } f'_c < 28 \text{ MPa maka } \beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7}$$

$$f'_c > 28 \text{ MPa maka } \beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 28)}{7} = 0,73$$

$$c = a/\beta_1 = 48,06 \text{ mm}$$

Periksa regangan baja tulangan tarik :

$$\varepsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{252,5 - 48,06}{48,06} \cdot 0,003 = 0,0128 > \varepsilon_y = 0,00191$$

Baja tulangan tarik sudah leleh

Tentukan faktor reduksi :

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t = 0,0128 > 0,005$$

$$\phi = 0,9$$

Momen nominal :

$$M_n = T (d - a/2)$$

$$M_n = 699,789 \cdot 381,73 \left(252,5 - \frac{35,09}{2} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$= 62,764 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,9 M_n$$

$$= 56,487 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,3 P + 0,576$$

$$56,487 = 0,3 P + 0,576$$

$$0,3 P = 56,487 - 0,576$$

$$P = 186,371 \text{ kN}$$

2. Perhitungan Tulangan Rangkap

Asumsi tulangan tekan sudah leleh.

$$T_s = C_c + C_s$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y$$

$$A_s \cdot f_y = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a + A_s' \cdot f_y$$

$$a = \frac{(A_s \cdot f_y) - (A_s' \cdot f_y)}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$= \frac{(699,789.381,73) - (226,195.381,73)}{0,85.44,78.200}$$

$$a = 23,748 \text{ mm}$$

$$c = a/\beta_1 = 23,748 / 0,73 = 32,525 \text{ mm}$$

Cek regangan baja tulangan tarik :

$$\varepsilon_s = \frac{d-c}{d} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{252,5-32,525}{252,5} \cdot 0,003 = 0,0203 > \varepsilon_y$$

Baja tulangan tarik sudah leleh

Tentukan faktor reduksi :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s = 0,0203 > 0,005$$

$$\phi = 0,9$$

Cek regangan baja tulangan tekan :

$$\varepsilon_s' = \frac{c-d_s'}{c} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{32,525-44}{32,525} \cdot 0,003 = -0,00106 < \varepsilon_y'$$

Baja tulangan tekan belum leleh

Dihitung ulang :

$$C_c = 0,85 f'_c \cdot b \cdot c \cdot \beta_1$$

$$= 0,85 \times 44,78 \times 200 \times c \times 0,73$$

$$C_s = A_s' \cdot f_s'$$

$$= 226,195 \times 200000 \times \frac{c-44}{c} \times 0,003$$

$$T_s = A_s \cdot f_y$$

$$= 699,789 \times 381,73$$

Dari rumus tersebut dicari nilai c menggunakan rumus persamaan kuadrat, sehingga didapatkan nilai $c = 46,665$ mm

$$a = c \cdot \beta_1$$

$$a = 34,072 \text{ mm}$$

Cek regangan baja tulangan tarik :

$$\varepsilon_t = \frac{d_t - c}{c} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{252,5 - 46,665}{252,5} \cdot 0,003 = 0,0132 > \varepsilon_y$$

Baja tulangan tarik sudah leleh

Tentukan faktor reduksi :

$$\varepsilon_t = \varepsilon_s = 0,0132 > 0,005$$

$$\phi = 0,9$$

Cek regangan baja tulangan tekan :

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d_s'}{c} \cdot \varepsilon_{cu} = \frac{46,665 - 44}{46,4665} \cdot 0,003 = 0,00017 < \varepsilon_y$$

Baja tulangan tekan belum leleh. Ok.

Momen nominal :

$$M_1 = T_s (d - a/2)$$

$$= 699,789 \times 381,73 \times (252,5 - 34,072/2)$$

$$= 73,023 \text{ kNm}$$

$$M_2 = C_s \cdot (d - d_s')$$

$$= 226,195 \times 0,00017 \times 200000 \times (252,5 - 44)$$

$$= 0,00775 \text{ kNm}$$

$$M_n = M_1 + M_2$$

$$= 62,907 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,9 M_n$$

$$= 56,616 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,3 P + 0,576 \text{ kNm}$$

$$56,736 = 0,3 P + 0,576$$

$$0,3 P = 56,736 - 0,576$$

$$P = 186,802 \text{ kN}$$

Dari hasil perhitungan desain tulangan tunggal dan rangkap dapat dilihat bahwa nilai P yang didapat antara tulangan tunggal dan tulangan rangkap tidak berbeda jauh, hal ini membuktikan bahwa penambahan tulangan tekan pada balok tidak memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap balok dalam kemampuannya menahan beban.

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai beban yang dapat dipikul oleh semua balok adalah kurang dari 200 kN. Hal ini menunjukkan bahwa alat yang dipakai dalam penelitian ini (*load cell*) masih dalam batas aman karena memiliki kapasitas 50 ton atau sekitar 500 kN.

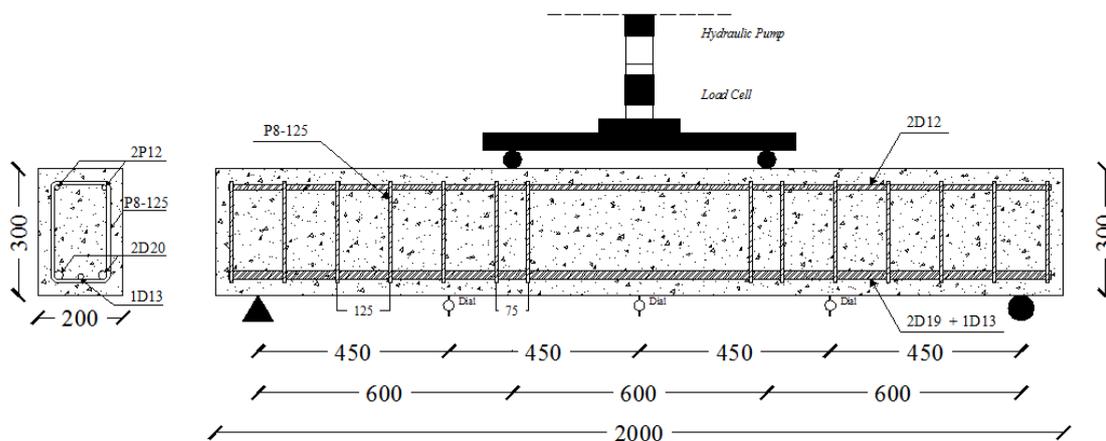
5.5 Pengujian Balok Beton

5.5.1 Mekanisme Pembebanan Eksperimental

Pembebanan yang diberikan pada balok adalah beban titik yang didistribusi menjadi 2 beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang seperti yang terlihat pada Gambar 5.6 dan Gambar 5.7. Beban diberikan secara bertahap hingga mencapai beban maksimum, yang menyebabkan keruntuhan pada suatu penampang balok. Pada Tabel 5.4 berikut ini adalah hasil pengujian keempat balok dengan jenis pembebanan yang sama dengan besar beban yang berbeda.



Gambar 5.6 Model Pembebanan Benda Uji Eksperimental



Gambar 5.7 Detail Pemodelan Benda Uji

Pada penelitian ini *dial gauge* 1 dan 3 tidak dipasang di bawah beban melainkan pada jarak $\frac{1}{4}$ bentang dari titik tumpuan terdekat. Hal ini bertujuan untuk mengukur lendutan pada daerah tersebut dan memastikan bahwa lendutannya tidak melebihi nilai lendutan pada *dial gauge* 2 karena diluar momen maksimum, sehingga dapat disimpulkan bahwa hasil penelitian ini sesuai dengan teori.

Tabel 5.4 Pembebanan Maksimum Pada Benda Uji

No	Jenis Uji	Tipe Beton	P teoritis (kN)	P Eksperimental (kN)
1	Lentur	SCC	186,802	205,029
2		HSC	186,179	203,067
3	Geser	SCC	124,115	208,953
4		HSC	121,788	179,523

Berdasarkan Tabel 5.4 dapat dilihat terjadi perbedaan antara nilai pembebanan secara teoritis dengan pembebanan eksperimental dimana pada L-SCC, L-HSC, G-SCC dan G-HSC nilai pembebanan eksperimentalnya lebih besar daripada nilai pembebanan teoritis. Hal ini membuktikan bahwa kualitas balok memenuhi standar karena dapat memikul beban diatas rencananya. Berikut adalah perhitungan momen dan kuat geser pada benda uji.

Tabel 5.5 Momen Maksimum dan Kuat Geser Maksimum Pada Benda Uji

No	Jenis Uji	Tipe Beton	$M_u = 0,3P + 0,576$ (kNm)	$V_u = 0,5P + 1,44$ (kN)
1	Lentur	SCC	62,379	-
2		HSC	61,791	-
3	Geser	SCC	-	106,407
4		HSC	-	91,202

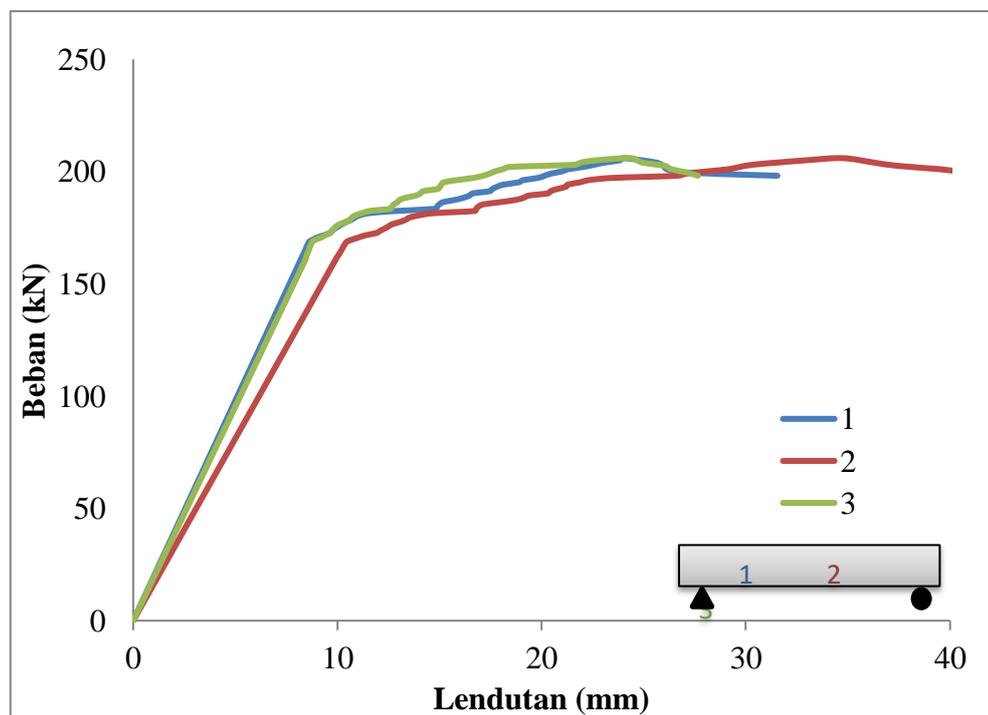
Berdasarkan Tabel 5.5 dapat dilihat bahwa pada uji lentur, balok L-SCC nilai momennya lebih besar dibandingkan balok L-HSC yaitu nilai 62,379 kNm berbanding dengan 61,791 kNm. Sementara pada uji geser, balok G-SCC nilai kuat gesernya lebih besar dibandingkan balok G-HSC yaitu 106,407 kN berbanding 91,202 kN. Hal ini dapat disimpulkan bahwa balok dengan memakai SCC lebih baik dibandingkan balok dengan memakai HSC. Hal ini dapat disebabkan kualitas beton pada balok SCC yang lebih homogen dan padat sehingga distribusi beban pada balok lebih merata dibandingkan beton pada balok HSC yang sifatnya kurang encer sehingga dapat terjadi adanya volume udara yang terjebak di dalam beton yang menyebabkan kualitas beton kurang baik.

5.5.2 Hubungan Beban dan Lendutan Hasil Eksperimental

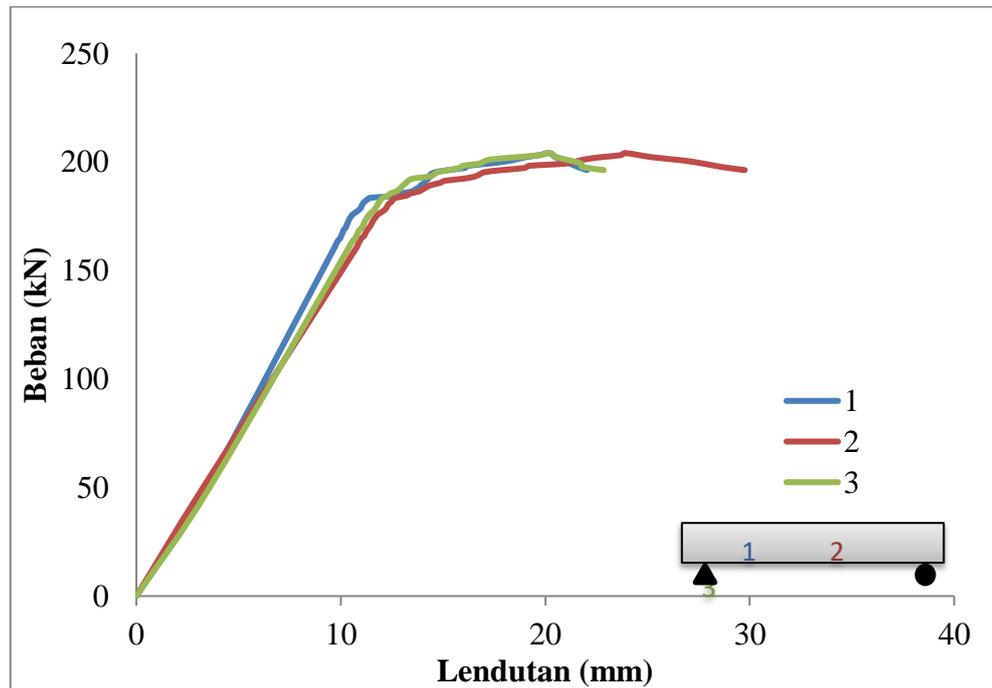
Load displacement relationship dapat menggambarkan fleksibilitas dan defleksi yang terjadi pada setiap penambahan beban dari suatu benda uji. Nilai

lendutan ini dibaca dari alat yang *dial* yang dipasang pada balok, nilai lendutan yang terbaca oleh *dial* dapat dilihat pada Lampiran 3. Lendutan L-SCC, L-HSC, G-SCC, dan G-HSC dapat dilihat pada Gambar 5.8 sampai dengan Gambar 5.11 berikut ini.

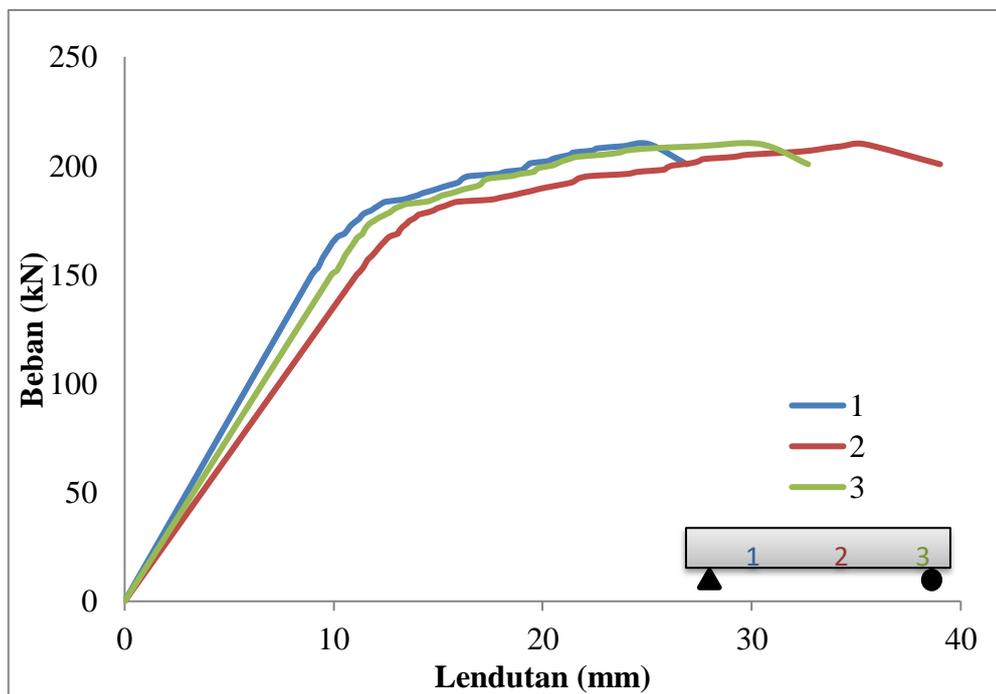
Pada pengujian ini data lendutan dari balok diambil pada tengah bentang dan seperempat bentang. Besarnya defleksi ini diukur dengan menempatkan *dial* pada tempat-tempat tersebut.



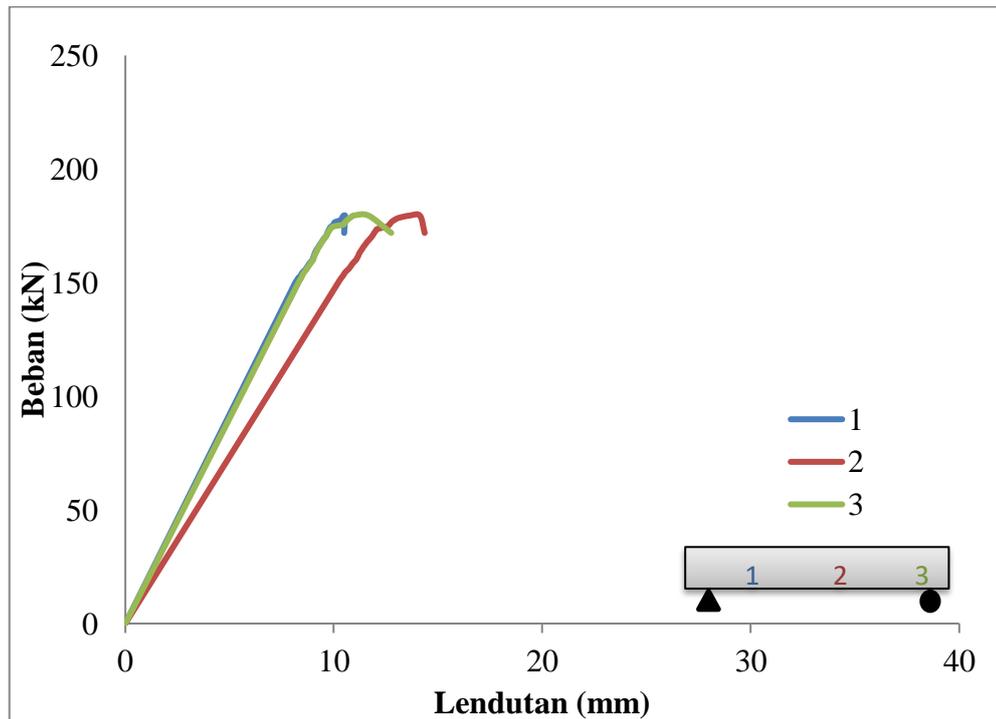
Gambar 5.8 Hubungan Beban-Lendutan L-SCC Eksperimental



Gambar 5.9 Hubungan Beban-Lendutan L-HSC Eksperimental



Gambar 5.10 Hubungan Beban-Lendutan G-SCC Eksperimental



Gambar 5.11 Hubungan Beban-Lendutan G-HSC Eksperimental

Dari grafik pada Gambar 5.8 sampai dengan Gambar 5.11 terdapat perbedaan baik pada pembebanan dan lendutan maksimal yang dapat ditahan oleh balok lentur tersebut. Balok-balok yang diuji pada pengujian ini mempunyai dimensi yaitu panjang dan luasan yang sama akan tetapi komposisi beton dan tulangan sengkangnya berbeda sehingga kemampuan menahan bebanpun berbeda-beda. *Dial 2* digunakan untuk mengetahui besarnya lendutan pada daerah tengah bentang yang mana pada daerah tengah bentang merupakan daerah momen maksimum dan lendutan maksimum. *Dial 1* dan *dial 3* digunakan untuk kontrol lendutan pada sisi kanan dan kiri beton di luar daerah pembebanan, hal ini dilakukan untuk mengecek apakah terdapat kesamaan besarnya lendutan pada daerah *dial 1* dan *dial 3* akibat beban yang diberikan. Apabila terdapat sedikit perbedaan antara *dial 1* dan *dial 3* seperti yang terjadi pada BU Geser kemungkinan disebabkan oleh sifat non-homogen material beton sebelah kiri dan kanan pada balok lentur tersebut atau penulangan geser yang kurang pas penempatannya, sehingga menyebabkan perbedaan nilai lendutan.

Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai lendutan pada *dial 2* pada semua benda uji balok mempunyai nilai lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan nilai *dial 1* dan *dial 3*. Sebagai contoh nilai *dial* pada L-SCC didapatkan nilai *dial 1* sebesar 31,6 mm, *dial 2* sebesar 42,2 mm dan *dial 3* sebesar 27,5 mm. Pada L-SCC ini terbukti bahwa *dial 2* yang terletak pada tengah bentang mempunyai nilai lendutan yang lebih besar, sedangkan pada *dial 1* dan *dial 3* mempunyai nilai lendutan yang tidak jauh berbeda, hal ini dikarenakan balok mengalami kerusakan yang tidak merata disepanjang bentang balok tersebut. Kerusakan yang tidak merata dapat disebabkan oleh tidak meratanya kuat tekan yang dimiliki oleh balok. Selain itu bisa disebabkan adanya sedikit perbedaan dimensi tinggi pada balok sehingga penyaliran beban tidak merata. Pada pengujian balok-balok tersebut semua benda uji memiliki perbedaan nilai lendutan antara *dial 1* dan *dial 3*. Selain itu pada semua pengujian balok nilai lendutan pada *dial 2* merupakan lendutan terbesar.

Pada Tabel 5.6 berikut ini adalah hasil dari pembacaan lendutan maksimum pada setiap benda uji.

Tabel 5.6 Lendutan Maksimum pada Semua Benda Uji

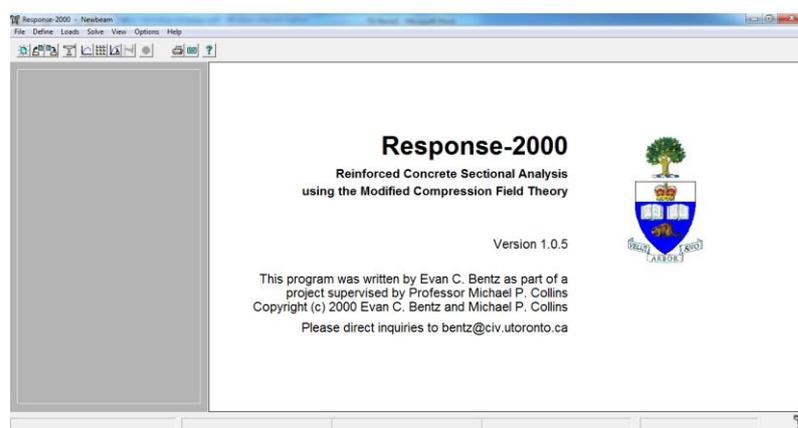
No.	Jenis Uji	Tipe Beton	Nomor <i>Dial</i>	Lendutan Maksimum (mm)
1	Lentur	SCC	1	31,6
			2	42,2
			3	27,6
2		HSC	1	22
			2	29,8
			3	22,9
3	Geser	SCC	1	26,9
			2	39
			3	32,7
4		HSC	1	10,5
			2	14,4
			3	12,8

Secara mekanik besarnya lendutan tergantung dari besarnya beban yang diberikan pada balok itu sendiri. Berdasarkan hasil pengujian balok dengan beton

SCC mempunyai kekuatan lebih tinggi dibandingkan balok dengan menggunakan beton HSC. Hal ini terbukti pada BU Lentur dengan beban maksimum yang mampu ditahan L-SCC sebesar 206,01 kN dan lendutan maksimum sebesar 42,2 mm dibandingkan dengan L-HSC yang mampu menahan beban maksimum sebesar 204,048 kN dan lendutan maksimum sebesar 29,8 mm. Sementara pada BU Geser, beban maksimum yang mampu ditahan G-SCC sebesar 209,934 kN dan lendutan maksimum sebesar 39 mm dibandingkan dengan G-HSC yang mampu menahan beban maksimum sebesar 179,523 kN dan lendutan maksimum sebesar 14,4 mm. Dari hasil pengujian BU lentur maupun BU geser dapat disimpulkan bahwa balok beton SCC lebih daktail dibandingkan dengan balok beton HSC.

5.5.3 Analisis Teoritis (Response-2000)

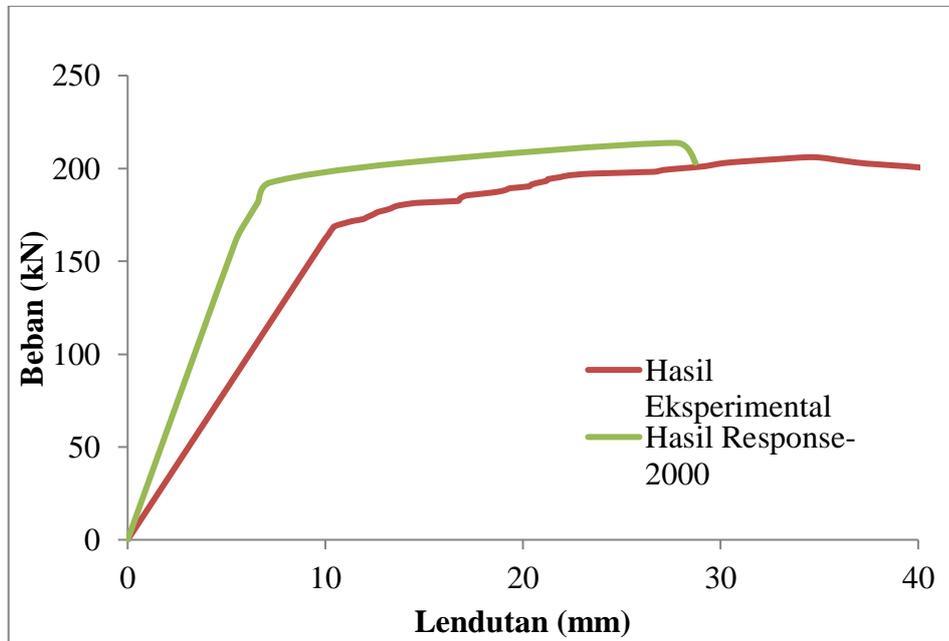
Response-2000 (Bentz, 2000) adalah suatu program yang dibuat berdasarkan *Modified Compression Field Theory* (MCFT) untuk elemen beton bertulang prismatik. Program ini dapat digunakan untuk melakukan analisis terhadap elemen beton bertulang akibat pembebanan aksial, momen, geser, maupun kombinasi ketiganya sehingga respon beban-lendutan dapat diprediksi dan kekuatan dari elemen beton bertulang yang dianalisis dapat diketahui. Tampilan awal program Response-2000 dapat dilihat pada Gambar 5.12.



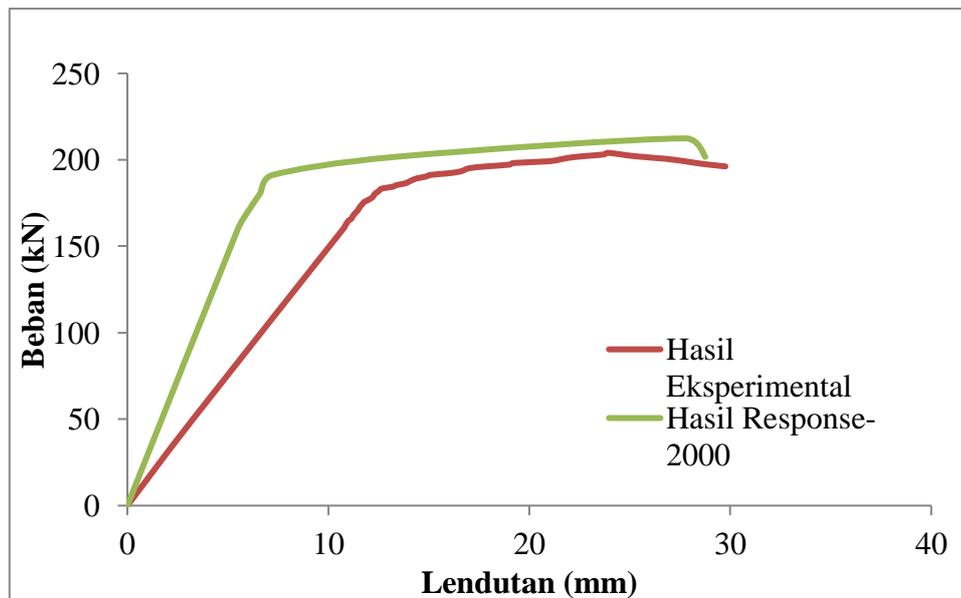
Gambar 5.12 Tampilan Awal Response-2000

Hasil analisis menggunakan program Response-2000 yang digunakan adalah hasil analisis model yang menggunakan nilai-nilai karakteristik bahan yang

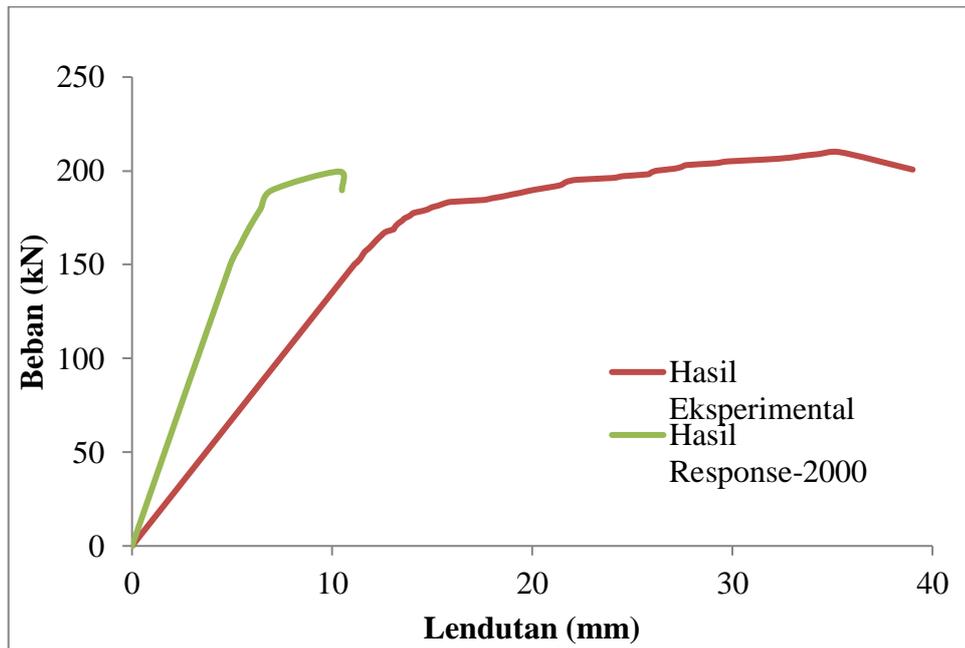
sama sesuai hasil pengujian pendahuluan. Perbandingan perilaku benda uji dari hasil analisis dan eksperimental dapat dilihat pada Gambar 5.13 sampai Gambar 5.16.



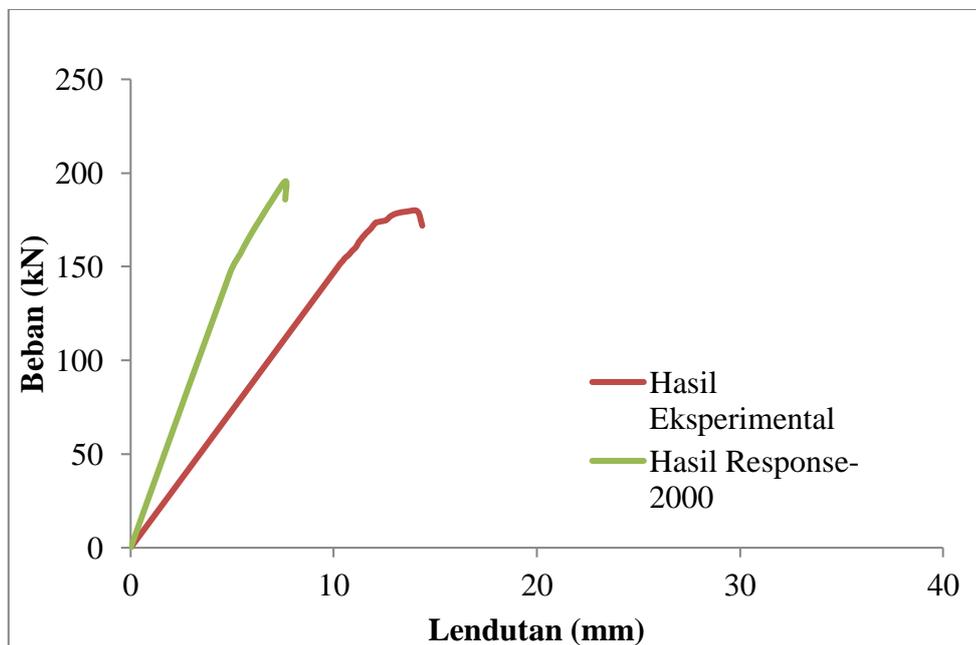
Gambar 5.13 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan L-SCC Eksperimental dan Response-2000



Gambar 5.14 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan L-HSC Eksperimental dan Response-2000



Gambar 5.15 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan G-SCC Eksperimental dan Response-2000



Gambar 5.16 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan G-HSC Eksperimental dan Response-2000

Dari hubungan beban dan lendutan benda uji baik lentur maupun geser, perbedaan kuat tekan maksimum antara hasil uji eksperimental dengan hasil analisis Response-2000 tidak jauh beda. Namun, pada nilai lendutan terlihat

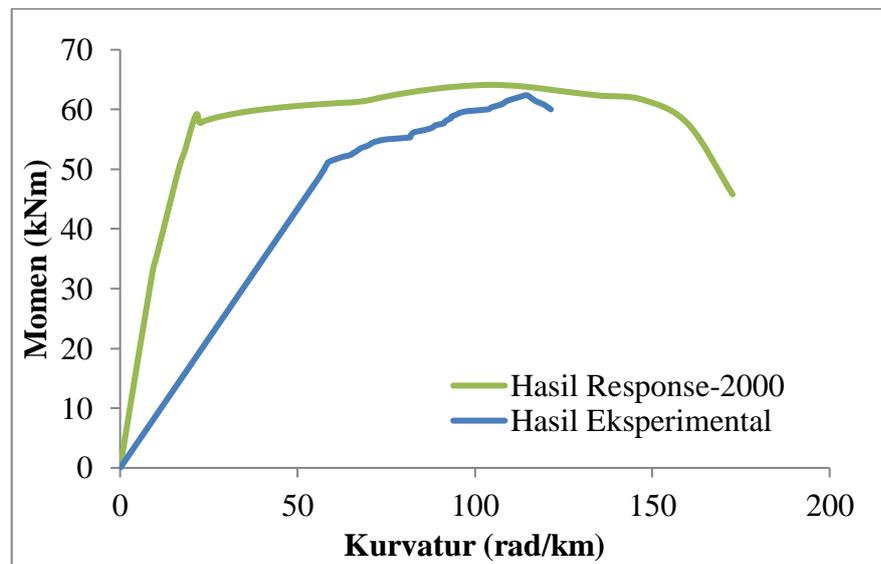
hasilnya jauh berbeda antara hasil uji eksperimental dengan hasil analisis Response-2000. Hal ini disebabkan karena ada beberapa faktor dalam penginputan pada Response-2000 tidak menggunakan data riil melainkan menggunakan hasil perhitungan otomatis seperti nilai kuat tarik belah beton, nilai regangan pada saat beton mencapai kuat tekan maksimum, nilai perkuatan regangan baja, dan nilai panjang kontraksi penampang. Nilai-nilai perbandingan beban dan lendutan antara hasil uji eksperimental dan hasil analisis Response-2000 direkapitulasi pada Tabel 5.7 berikut ini.

Tabel 5.7 Perbandingan Beban dan Lendutan Hasil Uji Eksperimental dan Hasil Response-2000

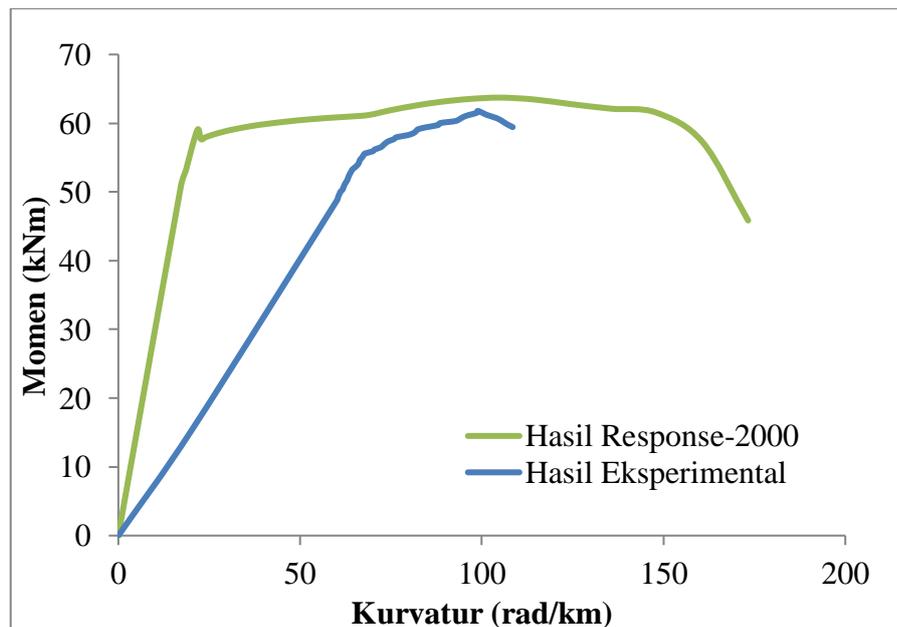
No.	Jenis Uji	Tipe Beton	Beban maksimum (kN)		Lendutan maksimum (mm)	
			Eksperimental	Response-2000	Eksperimental	Response-2000
1	Lentur	SCC	206,01	213,734	42,2	28,7
2		HSC	204,048	212,392	29,8	28,8
3	Geser	SCC	209,934	199,612	39	10,5
4		HSC	179,523	195,648	14,4	7,6

5.5.4 Hubungan Momen dan Kurvatur

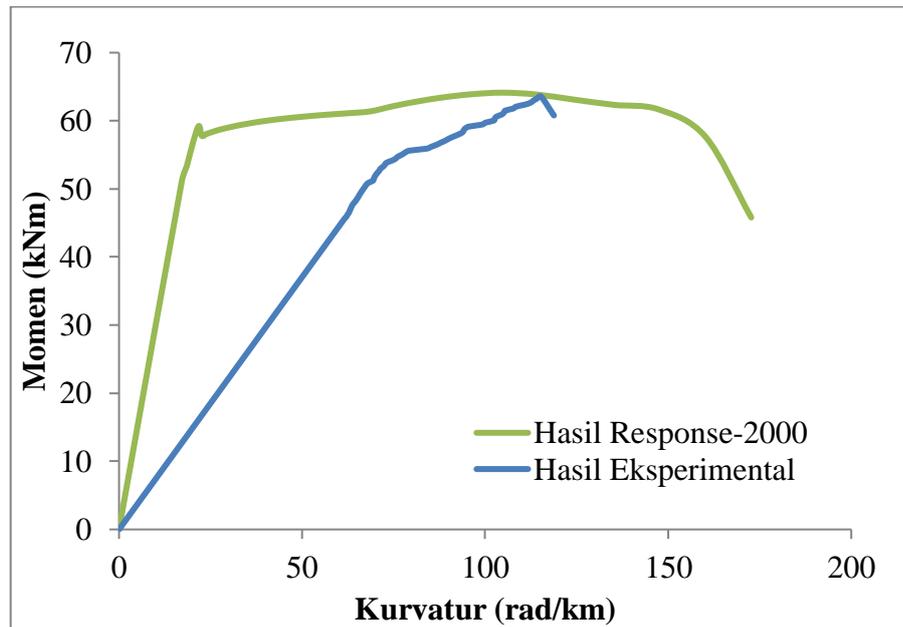
Momen dan kurvatur merupakan dua parameter yang dapat digunakan untuk menentukan nilai daktilitas balok. Nilai daktilitas suatu balok dapat ditentukan dengan membagi nilai kurvatur saat leleh dengan momen. Untuk melihat besarnya beban kurvatur dan daktilitas melibatkan beberapa variabel yaitu diameter tulangan lentur (tulangan tekan dan tulangan tarik), mutu beton. Analisa perhitungan momen dan kurvatur juga akan menentukan besarnya nilai tegangan regangan mengingat eratnya kaitan antara momen-kurvatur terhadap tegangan-regangan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui hubungan momen dan kurvatur pada balok beton tanpa kekangan. Hasil penelitian hubungan antara momen dan kurvatur dapat dilihat pada Gambar 5.17 sampai dengan Gambar 5.20 berikut ini.



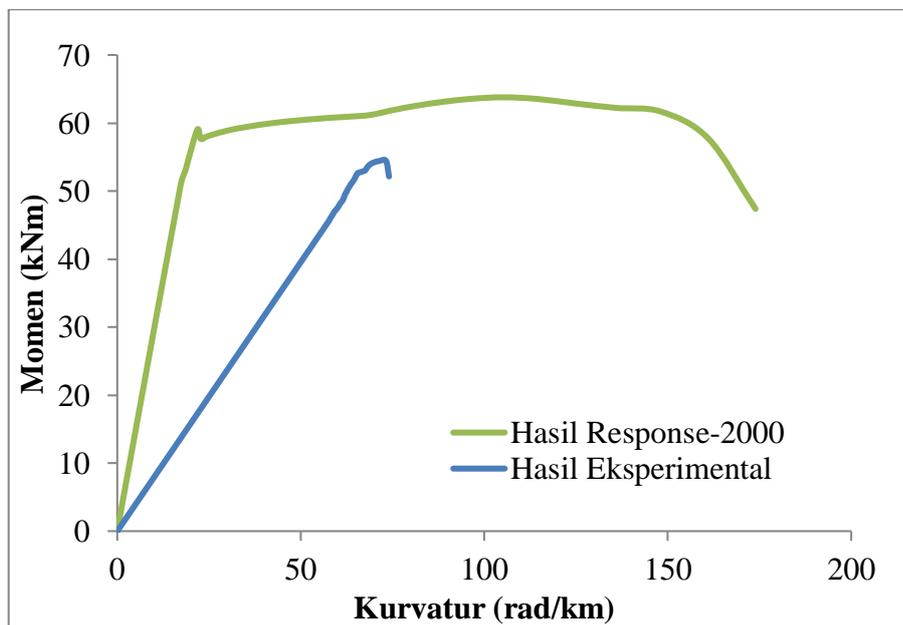
Gambar 5.17 Perbandingan Hubungan Momen-Kurvatur L-SCC Eksperimental dan Response-2000



Gambar 5.18 Perbandingan Hubungan Momen-Kurvatur L-HSC Eksperimental dan Response-2000



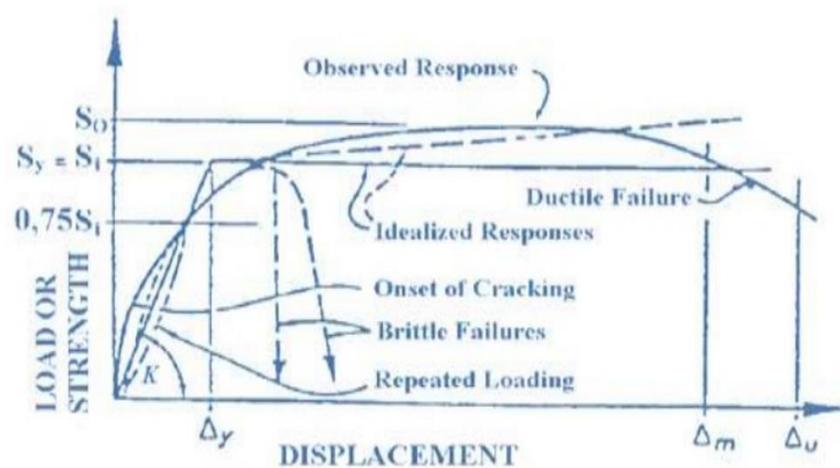
Gambar 5.19 Perbandingan Hubungan Momen-Kurvatur G-SCC Eksperimental dan Response-2000



Gambar 5.20 Perbandingan Hubungan Momen-Kurvatur G-HSC Eksperimental dan Response-2000

5.5.5 Daktilitas Simpangan dan Kelengkungan

Secara matematis, nilai daktilitas struktur didefinisikan sebagai perbandingan antara suatu parameter deformasi rencana maksimum struktur dengan deformasi pada saat terjadi leleh pertama pada struktur yang ditinjau.



Gambar 5.21 Load-Displacement Response

Pada penelitian ini akan dicari nilai daktilitas simpangan yang mana nilai daktilitas simpangan dapat diambil dari hasil pengujian lendutan dan nilai daktilitas kelengkungan yang mana nilai daktilitas kelengkungan dapat diambil dari sudut hasil yang telah dilakukan sebelumnya.

Pada beton L-SCC Eksperimental didapatkan nilai simpangan leleh sebesar 10,24 mm dan nilai simpangan maksimum sebesar 42,16 mm, maka didapatkan nilai daktilitas simpangan,

$$\mu_{\delta} = \frac{42,16 \text{ mm}}{10,24 \text{ mm}} = 4,12$$

Hasil perhitungan daktilitas lainnya ditampilkan pada Tabel 5.8 dan Tabel 5.9 berikut ini dimana nilai daktilitas berdasarkan hasil pengujian lendutan pada *dial* 2 (tengan bentang) dan dari hasil Response-2000.

Tabel 5.8 Nilai Daktilitas Hasil Eksperimental

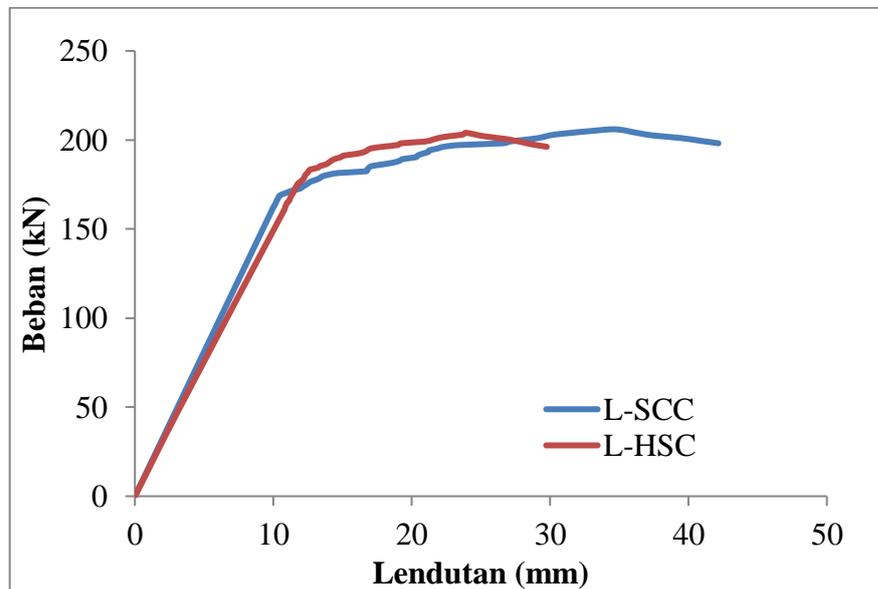
No.	Jenis Uji	Tipe Beton	Daktilitas Simpangan			Daktilitas Kelengkungan			Kategori Daktilitas
			δ_y	δ_u	μ_δ	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ	
1	Lentur	SCC	10.24	42.16	4.12	0.65	2.68	4.14	Daktilitas Terbatas
2		HSC	12.33	29.76	2.41	0.78	1.89	2.43	Daktilitas Terbatas
3	Geser	SCC	13.39	39.01	2.91	0.85	2.48	2.94	Daktilitas Terbatas
4		HSC	11.68	14.36	1.23	0.74	0.91	1.24	Daktilitas Terbatas

Tabel 5.9 Nilai Daktilitas Hasil Response-2000

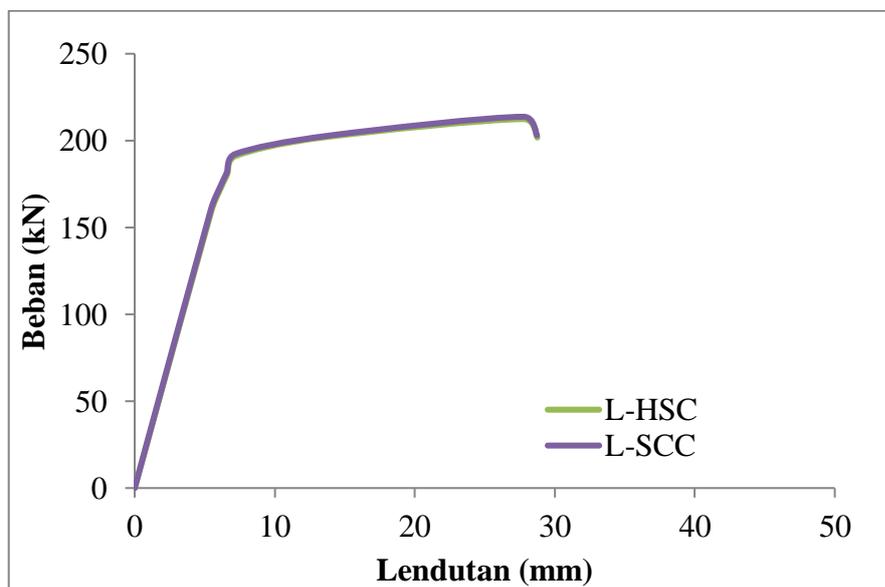
No	Jenis Uji	Tipe Beton	Daktilitas Simpangan			Daktilitas Kelengkungan			Kategori Daktilitas
			δ_y	δ_u	μ_δ	ϕ_y	ϕ_u	μ_ϕ	
1	Lentur	SCC	6.59	28.73	4.36	0.42	1.83	4.36	Daktilitas Terbatas
2		HSC	6.60	28.75	4.35	0.42	1.83	4.35	Daktilitas Terbatas
3	Geser	SCC	6.42	10.49	1.63	0.41	0.67	1.63	Daktilitas Terbatas
4		HSC	6.99	7.61	1.09	0.45	0.49	1.09	Daktilitas Terbatas

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk menahan respon inelastik yang dominan dalam memikul beban agar tidak runtuh. Secara teoritik semakin tinggi tingkat daktilitas, maka akan semakin baik dalam keberlanjutannya menahan beban. Dari Tabel 5.8 dan Tabel 5.9 dapat dilihat bahwa nilai daktilitas semua benda uji lebih dari 1. Untuk balok BU SCC memiliki nilai daktilitas tertinggi dibanding BU HSC. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 5.22 dan Gambar 5.23.

1. Daktilitas Balok Lentur



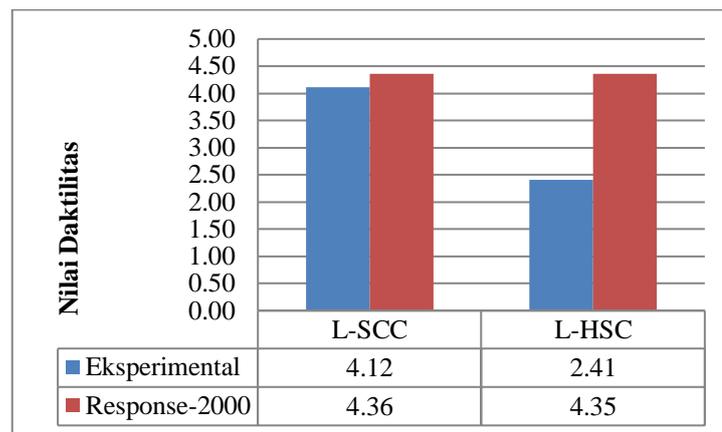
Gambar 5.22 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan L-SCC dengan L-HSC Versi Eksperimental



Gambar 5.23 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan L-SCC dengan L-HSC Versi Response-2000

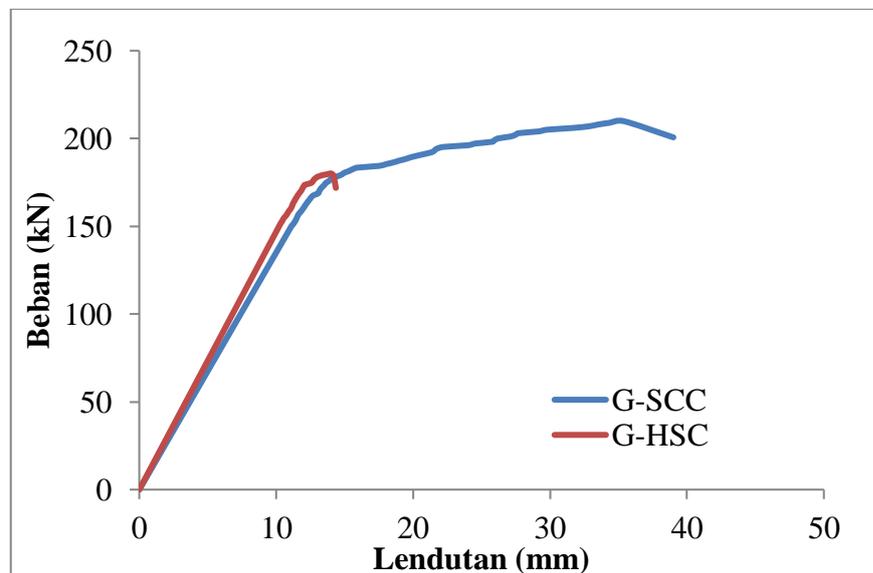
Pada hasil eksperimental didapatkan nilai daktilitas L-SCC lebih besar dibandingkan L-HSC. Artinya jarak antara Δ_y dan Δ_u pada L-SCC lebih jauh dibandingkan L-HSC sehingga balok dapat menahan beban berkelanjutan

seperti pada Gambar 5.22. Sementara itu, pada hasil Response-2000 tidak jauh beda antara L-SCC dengan L-HSC. Hal ini karena hampir semua data-data yang dipakai dalam Response-2000 sama kecuali data kuat tekan beton seperti pada Gambar 5.23. Untuk memudahkan perbandingan daktilitas balok lentur antara L-SCC dengan L-HSC baik itu hasil eksperimental maupun hasil Response-2000 dapat dilihat pada Gambar 5.24 berikut ini.

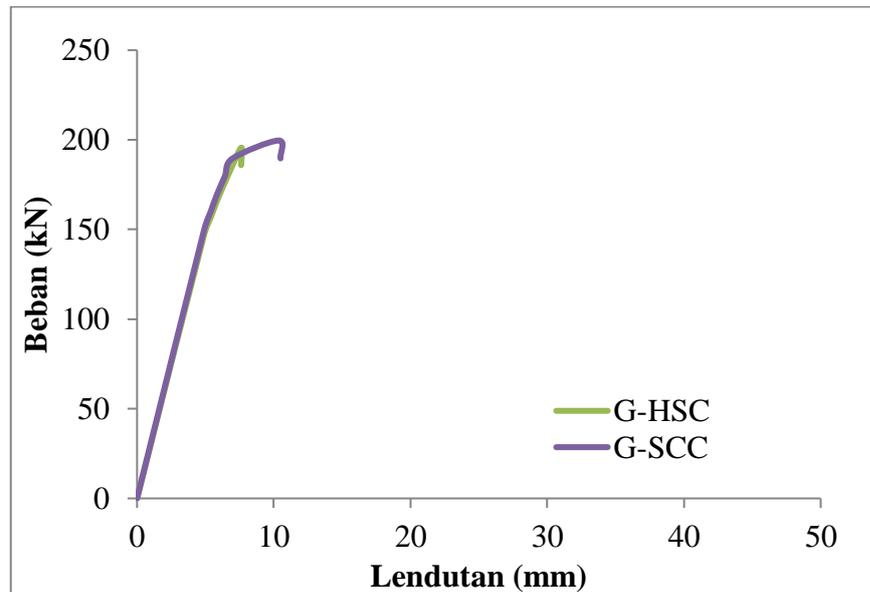


Gambar 5.24 Nilai Daktilitas Balok Lentur

2. Daktilitas Balok Geser

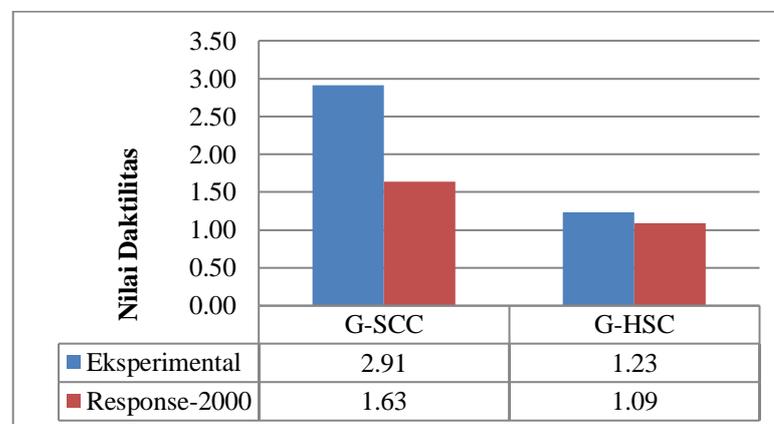


Gambar 5.25 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan G-SCC dengan G-HSC Versi Eksperimental



Gambar 5.26 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan G-SCC dengan G-HSC Versi Response-2000

Pada hasil eksperimental didapatkan nilai daktilitas G-SCC lebih besar dibandingkan G-HSC. Artinya jarak antara Δ_y dan Δ_u pada G-SCC lebih jauh dibandingkan G-HSC sehingga balok dapat menahan beban berkelanjutan seperti pada Gambar 5.25. Sementara itu, pada hasil Response-2000 pun sama seperti hasil eksperimental dimana jarak antara Δ_y dan Δ_u pada G-SCC lebih jauh dibandingkan G-HSC sehingga balok dapat menahan beban berkelanjutan seperti pada Gambar 26. Untuk memudahkan perbandingan daktilitas balok geser antara G-SCC dengan G-HSC baik itu hasil eksperimental maupun hasil Response-2000 dapat dilihat pada Gambar 5.27 berikut ini.



Gambar 5.27 Nilai Daktilitas Balok Geser

5.6 Pola Retak Balok

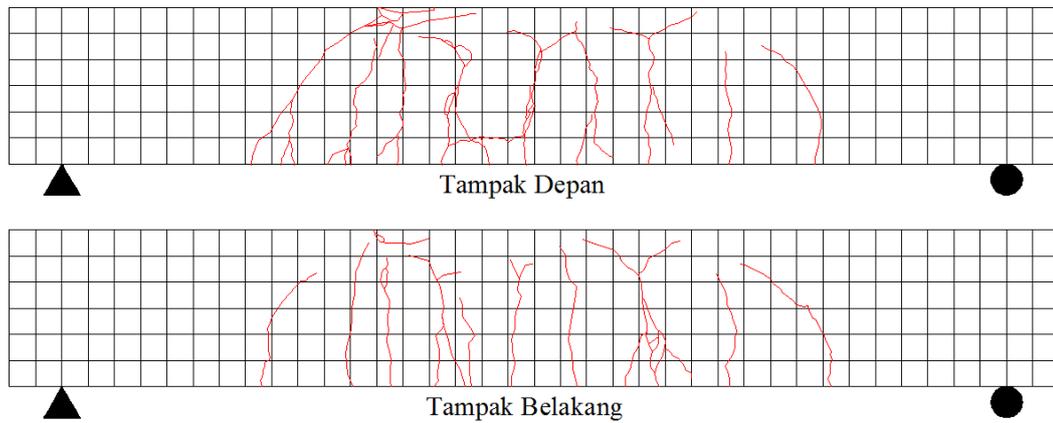
5.6.1 Retak pada Balok Lentur

Pola retak yang umumnya terjadi pada balok adalah berupa retak lentur dan retak geser. Pada pengujian yang telah dilakukan ini, retak-retak yang terjadi pada benda uji umumnya diawali dengan retak halus pada sisi bawah benda uji yaitu sisi tarik dari penampang lalu diikuti dengan retak lentur pada sisi yang telah terjadi retak halus sebelumnya. Retak lentur dominan terjadi pada daerah momen terbesar, yaitu pada daerah sekitar tengah bentang tepatnya berada pada daerah dua beban titik diberikan.

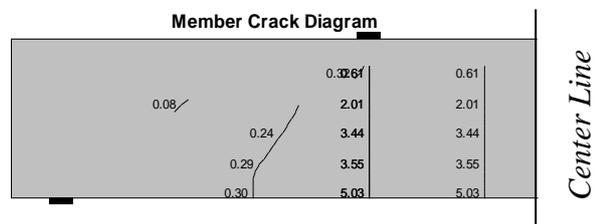
Berdasarkan Gambar 5.28 sampai Gambar 5.33 menunjukkan bahwa keretakan yang terjadi pada L-SCC dan L-HSC adalah keretakan lentur dengan panjang retakan ± 30 cm dan lebar retakan sebesar ± 1 cm. Pada BU ini cukup banyak terdapat retak geser, namun lebih dominan terdapat retak lentur yang terjadi pada daerah pembebanan.



Gambar 5.28 Benda Uji L-SCC Tampak Depan



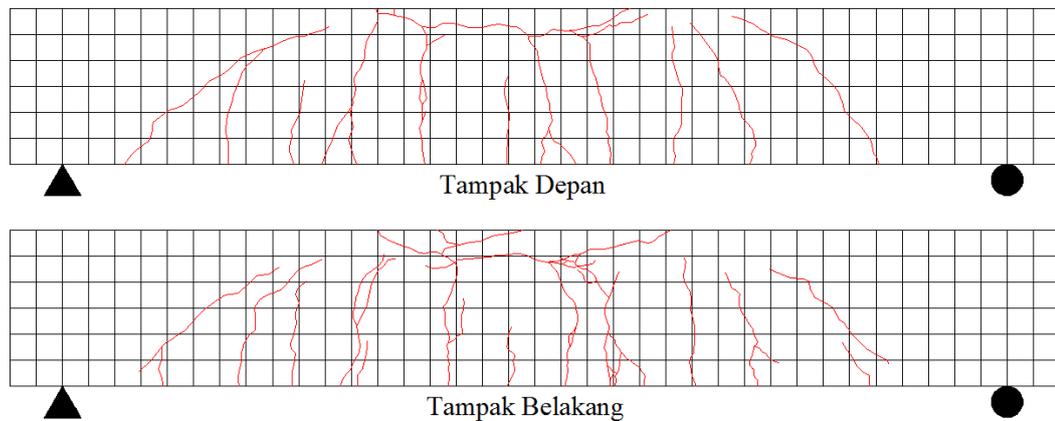
Gambar 5.29 Pola Retak L-SCC Versi Eksperimental



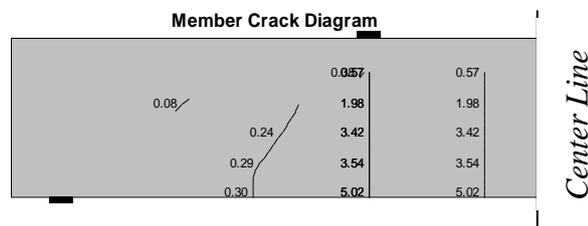
Gambar 5.30 Pola Retak L-SCC Versi Response-2000



Gambar 5.31 Benda Uji L-HSC Tampak Depan

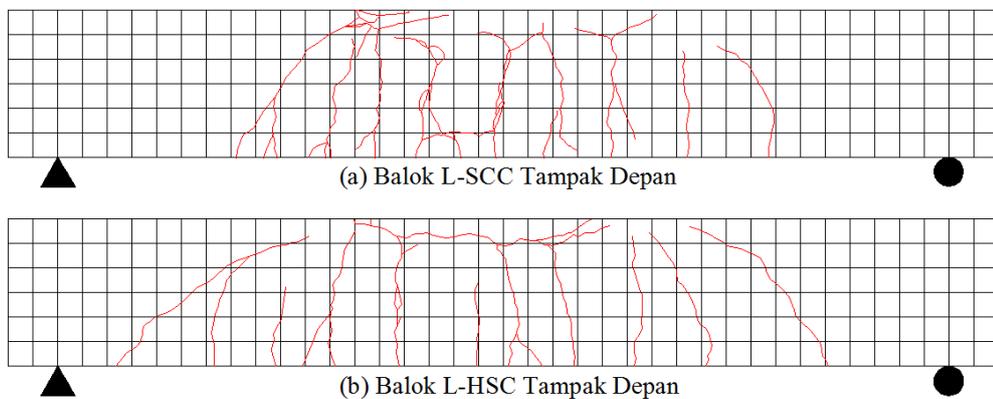


Gambar 5.32 Pola Retak L-HSC Versi Eksperimental



Gambar 5.33 Pola Retak L-HSC Versi Response-2000

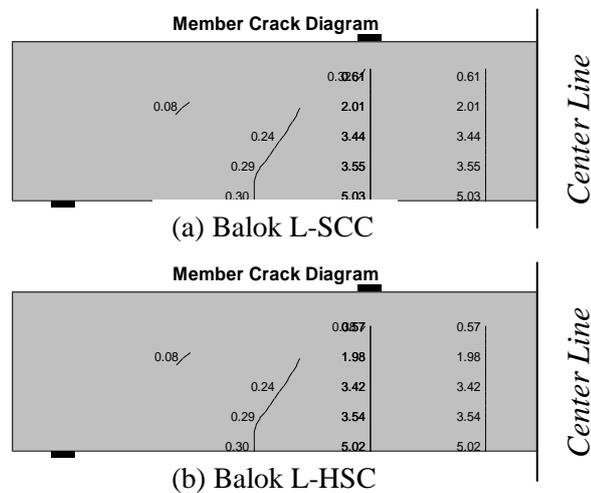
1. Perbandingan Pola Retak Balok Lentur Versi Eksperimental



Gambar 5.34 Perbandingan Pola Retak pada Balok Lentur Versi Eksperimental

Pada Gambar 5.34 Dapat dilihat bahwa pada balok L-SCC (a) pola retak dominan yang terjadi yaitu lentur. Retak terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil. Arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok. Namun pada balok L-HSC (b) terjadi retak geser lentur, yaitu perambatan retak miring dari retak lentur yang sudah terjadi sebelumnya.

2. Perbandingan Pola Retak Balok Lentur Versi Response-2000



Gambar 5.35 Perbandingan Pola Retak pada Balok Lentur Versi Response-2000

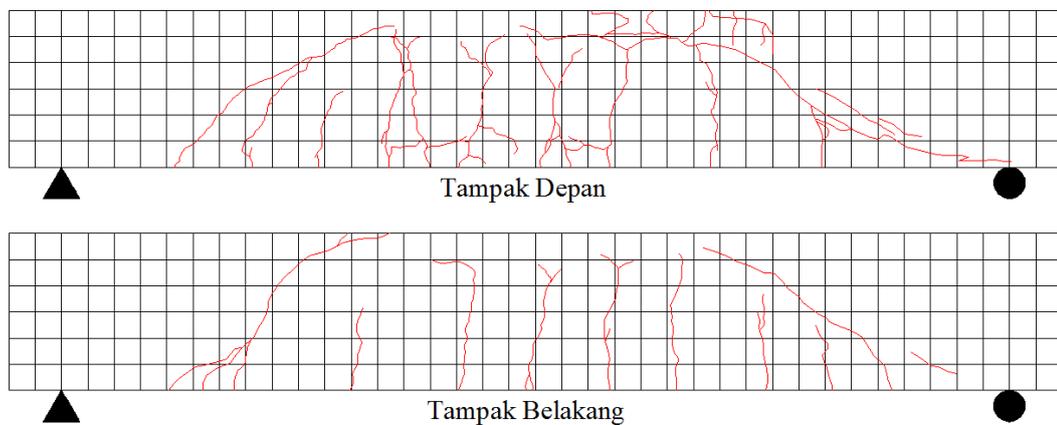
Pada Gambar 5.35 tidak ada perbedaan yang signifikan antara balok L-SCC (a) dan balok L-HSC (b) pada pola retak yang dihasilkan dari analisis pada Response-2000, dimana retak pada kedua balok hampir sama yaitu retak lentur dengan arah tegak lurus dengan arah memanjang balok, retak geser lentur dengan arah diagonal yang diawali dengan retak lentur, dan retak geser dengan arah diagonal balok yang terletak di garis netral balok. Perbedaan diantara balok L-SCC dan balok L-HSC yaitu pada lebar retaknya dimana perbedaan nilai itu dihasilkan karena perbedaan data beton yang diinput. Pada balok L-SCC nilai lebar retak lebih besar dibandingkan balok L-HSC.

5.6.2 Retak pada Balok Geser

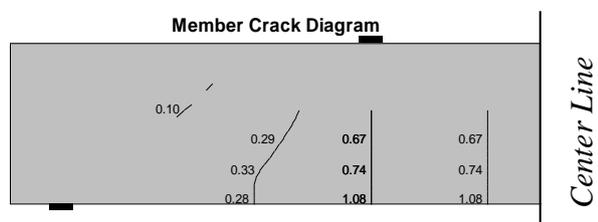
Untuk pola retak yang terjadi pada G-SCC dan G-HSC dapat dilihat pada Gambar 5.36 sampai Gambar 5.41. Kerusakan yang terjadi pada kedua benda uji ini adalah kerusakan geser dengan panjang retakan sebesar ± 73 cm dan ± 63 cm arah diagonal di daerah luar pembebanan. Retak diagonal ini muncul dari awal benda uji mengalami keretakan sampai benda uji mencapai beban maksimum.



Gambar 5.36 Benda Uji G-SCC Tampak Depan



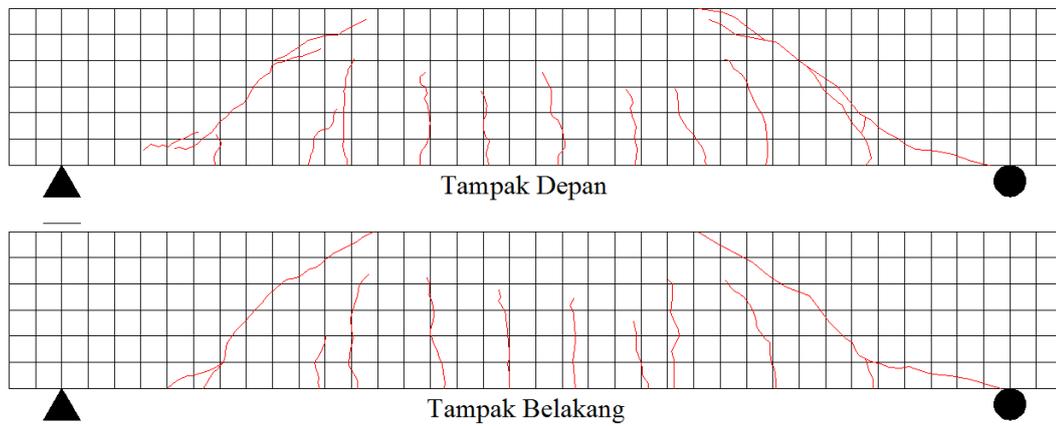
Gambar 5.37 Pola Retak G-SCC Hasil Eksperimental



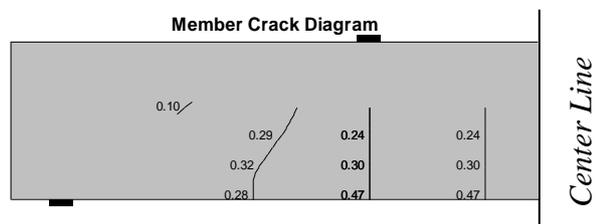
Gambar 5.38 Pola Retak G-SCC Hasil Response-2000



Gambar 5.39 Benda Uji G-HSC Tampak Depan

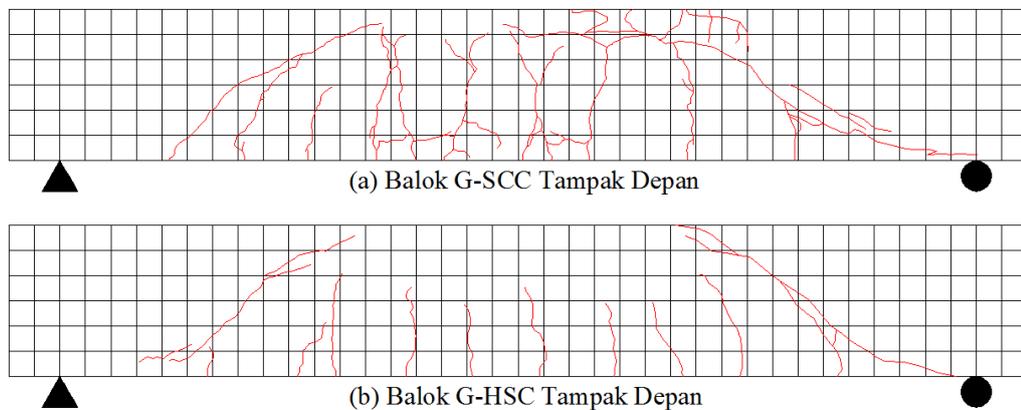


Gambar 5.40 Pola Retak G-HSC Hasil Eksperimental



Gambar 5.41 Pola Retak G-HSC Hasil Response-2000

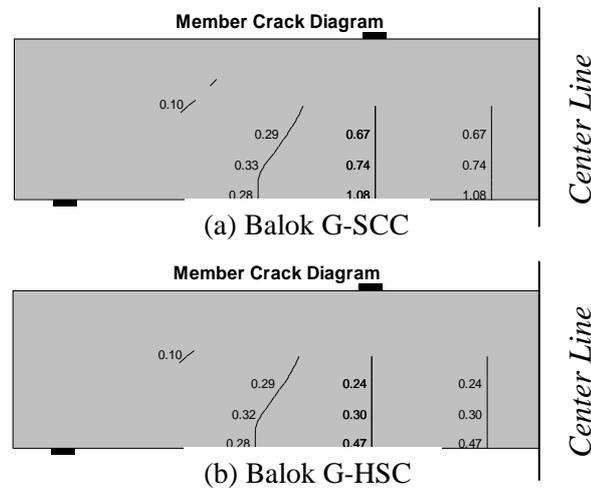
1. Perbandingan Pola Retak Balok Geser Versi Eksperimental



Gambar 5.42 Perbandingan Pola Retak pada Balok Geser Versi Eksperimental

Pada Gambar 5.42 Dapat dilihat bahwa pada balok G-SCC (a) maupun balok G-HSC (b) pola retak yang terjadi hampir sama yaitu lentur dan retak geser. Retak lentur terjadi di daerah yang mempunyai nilai momen lentur lebih besar dan gaya geser kecil serta arah retak terjadi hampir tegak lurus pada sumbu balok. Dalam hal ini pada balok G-SCC lebih banyak retak lenturnya dibandingkan balok G-HSC. Sementara retak geser yang terjadi pada kedua benda uji sama, dimana kedua balok memiliki pola retak terjadi dari mulai titik tumpuan sampai ke titik beban. Hal ini sangat jelas membedakan pola retak BU Geser dengan BU Lentur karena jarak antar tulangan sengkang yang berbeda dimana pada BU Geser mempunyai jarak antar tulangan sengkang yang lebih panjang dibandingkan BU Lentur.

2. Perbandingan Pola Retak Balok Geser Versi Response-2000



Gambar 5.43 Perbandingan Pola Retak pada Balok Geser Versi Response-2000

Seperti halnya pada balok lentur, pada Gambar 5.43 tidak ada perbedaan yang signifikan antara balok G-SCC (a) dan balok G-HSC (b) pada pola retak yang dihasilkan dari analisis pada Response-2000, dimana retak pada kedua balok hampir sama yaitu retak lentur dengan arah tegak lurus dengan arah memanjang balok, retak geser lentur dengan arah diagonal yang diawali dengan retak lentur, dan retak geser dengan arah diagonal balok yang terletak di garis netral balok. Perbedaan diantara balok L-SCC dan balok L-HSC yaitu pada lebar retaknya dimana perbedaan nilai itu dihasilkan karena perbedaan data beton yang diinput. Pada balok L-SCC nilai lebar retak lebih besar dibandingkan balok L-HSC.