

## **BAB 3**

### **METODE PENELITIAN**

#### **3.1 Pendahuluan**

Pada penelitian ini pemberian *confinement* difokuskan pada balok yang menerima momen maupun geser terbesar seperti halnya balok di daerah muka kolom dalam sistem rangka beton bertulang. Sistem pembebanan yang diberikan berbeda dengan penelitian-penelitian sebelumnya, yaitu menggunakan pembebanan terpusat ditengah bentang balok dengan tinjauan daerah sendi plastis baloknya. Selain itu parameter bentuk *confinement* di zona tekan penampang balok yang berupa *confinement* persegi (*hoops*) dan *confinement* kait (*cross-ties*) juga menjadi parameter tinjauan yang dikaji dalam penelitian ini.

Bab ini bertujuan memberikan gambaran mengenai keseluruhan proses atau prosedur penelitian yang ditempuh untuk memberikan jaminan bahwa hasil yang diperoleh bersifat obyektif dan dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah dalam rangka mencapai tujuan penelitian. Hal tersebut meliputi :

##### **3.1.1 Inventori Peralatan**

Sebelum dilakukan pengujian eksperimental terlebih dahulu dilakukan inventori kapasitas peralatan yang akan dipergunakan dalam pengujian topik disertasi, dengan maksud supaya dalam merancang model eksperimen dapat sesuai dan memadai dengan peralatan yang akan dipergunakan.

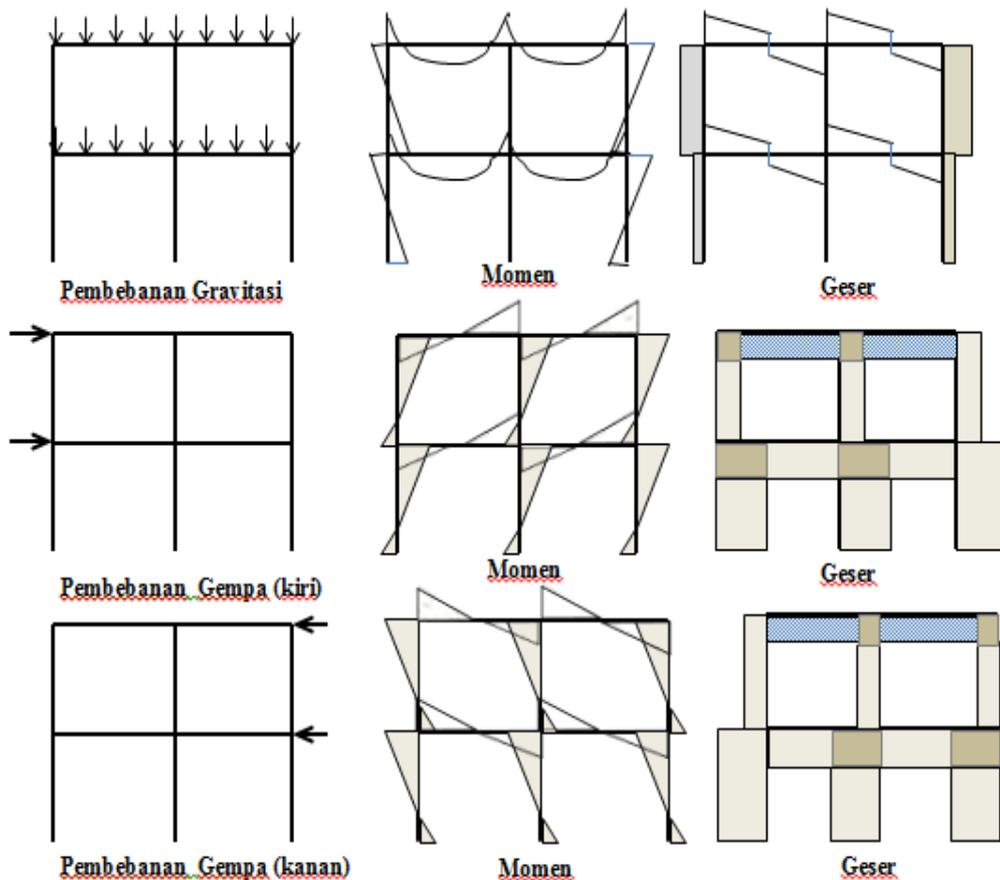
Inventori yang dilakukan terutama berkaitan dengan kapasitas *loading frame* serta kapasitas *loading test* yang meliputi : *load cell*, *data logger*, *LVDT*, *channel data logger*, *hydraulic jack*, maupun *hydraulic actuator*. Kesemua *instrument* tersebut mutlak ada dalam pengujian spesimen sehingga perlu dilakukan inventori terlebih dahulu. Selain kapasitas *instrument* diatas, jumlah *instrument* yang tersedia, serta kondisi *instrument* nanti saat akan dilakukan pengujian perlu untuk diinventori terlebih dahulu untuk memastikan bahwa alat dan peralatan yang dibutuhkan benar-benar siap dan tersedia.

Inventori dilakukan pada laboratorium-laboratorium struktur yang diperkirakan mampu untuk melakukan test pengujian spesimen yang akan dibuat sesuai dengan tujuan yang diharapkan dari penelitian. Berdasarkan hasil inventori diputuskan bahwa pengujian spesimen balok akan dilakukan di Laboratorium Struktur di Puskim Cileunyi Bandung.

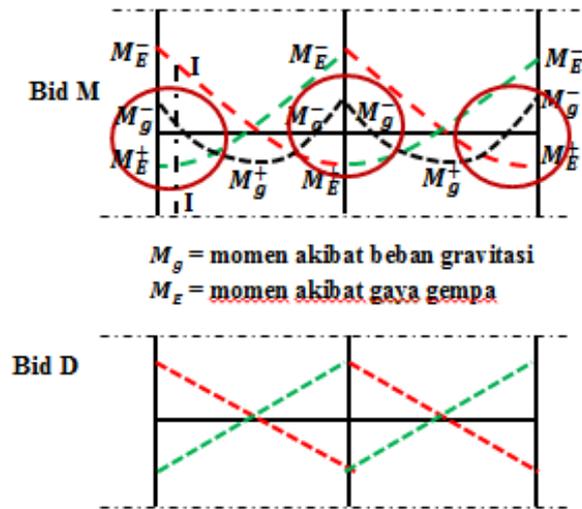
### 3.1.2 Perencanaan Model Eksperimental

Model merupakan representasi fisik dari struktur atau bagiannya yang dibuat dalam skala yang lebih kecil, namun demikian harus mampu menggambarkan suatu sistem yang besar. Pengambilan skala model eksperimental dalam penelitian disertasi ini didasarkan atas pertimbangan pada beberapa hal diantaranya tempat pengujian, fasilitas alat dan peralatan pengujian yang tersedia, serta biaya yang akan dikeluarkan.

Model eksperimental yang dibuat dalam penelitian ini difokuskan untuk mempelajari daktilitas balok terutama pada perilaku daerah sendi plastis balok di muka kolom yang menerima momen dan geser (seperti yang digambarkan pada struktur rangka pada Gambar 3-1 dan Gambar 3-2, bila zona tekan penampang baloknya diberi tambahan *confinement*). Dengan demikian fokus model eksperimental yang dibuat hanya pada daerah sendi plastis balok dan bukan pada daerah *beam column joint*.

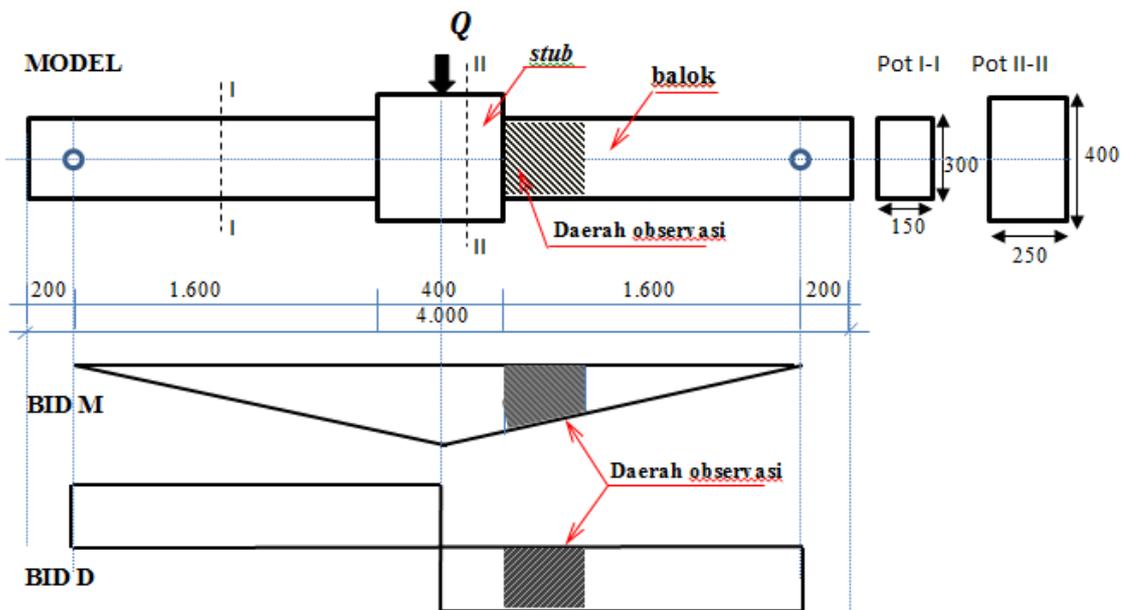


Gambar 3-1. Respons Struktur Rangka terhadap Pembebanan Gravitasi dan Gempa (Imran and Hendrik, 2010)



Gambar 3-2. Daerah Fokus Penelitian

Pengambilan model spesimen yang mampu menggambarkan daerah sendi plastis balok, seperti halnya daerah muka kolom pertemuan balok-kolom secara sederhana adalah dengan *prototype* balok berukuran 300x600 dan panjang 8,0 m dalam skala linier setengah (*half scale*), yang disertai dengan adanya modifikasi pada model kolom seperti terlihat pada Gambar 3-3. Balok dengan ukuran penampang 150x300 mm dan panjang 4,0 m serta pembesaran pada tengah bentang balok yang disebut *stub* berukuran 250x400 mm dibuat sebanyak 6 (enam) buah.



Gambar 3-3. Model balok

Model spesimen yang dibuat berbeda dengan model *beam-column joint* dikarenakan fokus penelitian bukan pada daerah tersebut melainkan di daerah sendi plastis balok.

Dengan demikian walaupun gaya-gaya dalam yang terjadi pada model spesimen tidak sama dengan gaya dalam pada sistem rangka terutama dalam arah momen, namun model spesimen mampu menggambarkan daerah observasi (sendi plastis balok di muka kolom) yang akan diteliti. Pemberian beban terpusat di tengah bentang balok diberikan untuk mendapat bidang momen dan bidang geser terbesar pada daerah observasi. Akibat pembebanan model spesimen akan menerima beban momen serta geser maksimum, namun demikian dalam penelitian disertasi ini kemungkinan terjadinya kegagalan akibat gaya geser akan diminimalisir dengan perkuatan pada bagian yang berpotensi mengalami kegagalan geser, seperti pemasangan sengkang dalam jarak aman untuk mencegah geser serta perkuatan pada daerah sekitar tumpuan sehingga kegagalan yang terjadi lebih dominan lentur.

Pengambilan skala setengah pada model spesimen selain didasarkan pada pertimbangan kapasitas alat dan peralatan yang tersedia untuk pengujian juga masih memenuhi persyaratan sebagai model pengujian. Model dalam skala setengah masih sangat memungkinkan penggunaan mutu material yang sebenarnya, penggunaan ukuran standart baja tulangan maupun agregat yang digunakan (*ACI 374.2R-13*). Dengan mengambil skala setengah diharapkan seluruh data yang akan dicari dari hasil eksperimental dapat terekam secara baik dan tepat oleh *instrument* pengukuran, serta perilaku struktural dari daerah sendi plastis balok tidak berubah karena perubahan geometri penampang tersebut.

Model spesimen yang dibuat dalam penelitian disertasi ini menggunakan skala material sama dengan *prototype* balok (skala 1), dengan menggunakan ukuran agregat maksimum 10 mm. Pengambilan ukuran agregat ini dimaksudkan agar campuran beton dapat masuk ke sela-sela tulangan dan menghindari terjadinya pengeroposan beton saat proses pemadatan. Dalam pengujian, *stub* digambarkan sebagai kolom dengan join yang kaku dengan harapan kegagalan pengujian tidak terjadi pada daerah ini melainkan pada area observasi.

Penampang balok yang diambil pada model memenuhi kriteria balok tipe I menurut Kani's Valley (1966) yaitu balok dapat mencapai kapasitas lentur secara penuh dan gagal dalam lentur, karena balok memiliki perbandingan  $a/d = \frac{1800}{259} = 6,95 > 6,0$  sesuai klasifikasi dalam Gambar 2-49 dalam bab II. Daerah *stub* didesain dengan dimensi yang lebih besar dari baloknya yaitu 250 x 400 mm dengan lebar 400 mm dan dibuat lebih kaku dari balok, supaya tidak terjadi kegagalan pada *stub* dan daerah sendi plastis dapat terjadi di muka *stub* yang merupakan daerah observasi yang akan ditinjau.

### 3.1.3 Analisis Penampang

Setelah model balok ditentukan penampang geometriknya, hal selanjutnya yang diperlukan adalah melakukan analisis terhadap penampang yang akan dibuat. Analisis penampang balok menggunakan prinsip analisis balok bertulangan rangkap biasa tanpa *confinement* pada zona tekannya. Penampang balok dengan variasi parameter rasio tulangan tarik ( $\rho$ ) serta rasio tulangan tekan ( $\rho'$ ) coba dibandingkan. Parameter pengujian yang lain, seperti mutu beton ( $f'_c$ ), mutu tulangan ( $f_y$ ), *cover*/selimut beton dibuat sama untuk keseluruhan penampang balok. Berdasarkan analisis terhadap penampang balok biasa dengan *properties* yang telah ditentukan akan dapat diperoleh data diantaranya : jarak garis netral penampang balok ( $c$ ), kapasitas momen ( $M$ ), kurvatur ( $\phi$ ), beban maksimum ( $Q$ ), serta lendutan/*displacement* ( $\Delta$ ) saat kondisi leleh ( $\Delta_y$ ) maupun kondisi ultimit ( $\Delta_{ult}$ ) untuk bentang balok yang telah ditentukan.

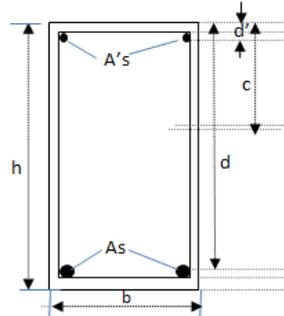
Dalam melakukan analisis penampang, dicari penampang balok dengan rasio tulangan tarik dan tulangan tekan yang mampu menghasilkan jarak ( $c$ ) yang cukup signifikan, dengan maksud supaya lebih efektif dalam menentukan tinggi *confinement* untuk zona tekannya. Perhitungan terhadap gaya geser juga dilakukan dengan didasarkan pada *ACI 318-11*, dimana gaya geser rencana pada lokasi sendi plastis dihitung berdasarkan nilai kuat momen ujung terbesar yang mungkin terjadi di lokasi tersebut dan mengambil jarak antar sengkang sesuai dengan persyaratan yang ditentukan untuk daerah sendi plastis agar tidak terjadi kegagalan geser pada balok. Selain penampang balok juga dilakukan analisis terhadap *stub* yang dibuat lebih kaku dibanding penampang baloknya untuk menghindari terjadinya sendi plastis pada daerah ini. Mutu beton untuk balok yang merupakan elemen lentur diambil beton mutu normal karena dianggap lebih efektif bagi *confinement* (Shin, S. et al., 1990), yaitu  $f'_c = 25$  MPa dan mutu baja tulangan  $f_y = 480$  MPa. Dicoba pula penampang dengan ukuran 175x300 sebagai pembanding.

Analisis penampang balok menggunakan asumsi bahwa bidang penampang balok sebelum dan sesudah terjadi lenturan adalah tetap rata (Prinsip Bernoulli). Oleh karena itu nilai regangan dalam penampang akan terdistribusi linier atau sebanding lurus terhadap jarak ke garis netral (Prinsip Navier). Regangan beton tekan maksimum pada serat tepi terluar (regangan ultimit) ditetapkan sebesar 0,003 (SNI 1726-2012). Proses analisis dibantu dengan program Excel.exe dan juga Beton.exe (Nuroji et al., 2009). Berikut ini ditampilkan contoh perhitungan penampang balok bertulangan rangkap dengan *properties* penampang balok pada Tabel 3-1 serta hasil perhitungan pada Tabel 3-2.

## CONTOH PERHITUNGAN ANALISIS PENAMPANG :

Data diambil berdasarkan pada balok no 10 (Tabel 3-1) sebagai berikut :

- Tinggi balok :  $h = 300$  mm
- Lebar balok :  $b = 150$  mm
- Selimut beton : 20 mm
- Tinggi efektif :  $d = 259$  mm
- $d' = 35$  mm



- $A_s = 2D22$  ( $759,9$  mm<sup>2</sup>)
- $A'_s = 2D10$  ( $157$  mm<sup>2</sup>)
- $\rho = \frac{A_s}{b \cdot d} = 0,0196 = 0,837 \rho_{maks}$  (dimana  $\rho_{maks} = 0,75 \rho_{bal} = 0,021$ )
- $\rho' = \frac{A'_s}{b \cdot d} = 0,0040$
- Kuat tekan beton  $f'_c = 25$  MPa
- Regangan runtuh  $\epsilon_{cm} = 0,003$
- Tegangan leleh baja:  $f_y = 480$  MPa
- Modulus elastisitas baja  $E_s = 200.000$  MPa
- Modulus elastisitas beton  $E_c = 4700 \sqrt{f'_c} = 23500$  Mpa

Langkah perhitungan :

1. Terlebih dahulu semua tulangan dianggap telah meleleh, maka  $f_s = f'_s = f_y$ , dan  $A_{s2} = A'_s$
2. Tinggi blok tegangan dihitung dengan  $a = \frac{(A_s - A'_s) f_y}{(0,85 f'_c) b}$
3. Letak garis netral ditentukan dengan  $c = \frac{a}{\beta_1}$
4. Regangan tulangan baja tekan maupun tarik diperiksa apakah anggapan pada langkah awal sudah benar dengan menggunakan diagram regangan:  

$$\epsilon'_s = \frac{c - d'}{c} (0,003) \quad \text{dan} \quad \epsilon_s = \frac{d - c}{c} (0,003)$$
5. Bila ternyata  $\epsilon'_s$  ataupun  $\epsilon_s$  ada yang tidak sesuai dengan anggapan awal, maka perlu dicari keseimbangan baru untuk mendapatkan nilai  $a$  dan  $c$
6. Gaya-gaya tekan  $C_c = (0,85 f'_c) a \cdot b$  serta  $C_s = A'_s \cdot f'_s$  disetimbangkan dengan gaya tarik  $T_s = A_s \cdot f_y$
7. Kapasitas momen dihitung dengan mengalikan gaya terhadap lengan kopel sehingga  

$$M_n = C_c (d - 1/2 a) + C_s (d - d')$$

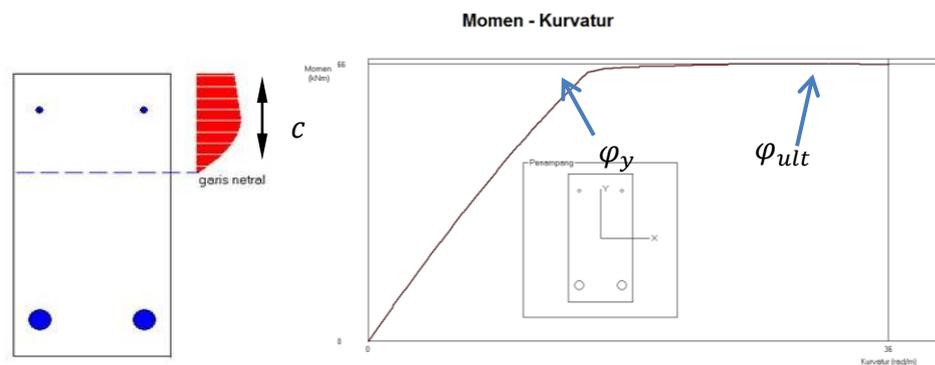
8. Gaya geser rencana  $V_n$  dihitung berdasarkan momen lentur yang diperoleh serta beban gravitasi terfaktor sepanjang bentangnya.

$V_n = \frac{4M}{L} + w_u L/4$ , dimana  $L$  adalah panjang bentang balok keseluruhan dan  $w_u$  adalah beban gravitasi terfaktor dimana  $w_u = 1,2D + 1,0L$ .

Dalam menghitung tulangan geser diasumsikan bahwa  $V_c = 0$

9. Menghitung jarak dan diameter minimum untuk tulangan sengkang geser.

Proses mencari momen-kurvatur penampang menggunakan program Beton.exe (Nuroji et al., 2009) dengan memasukkan properti penampang akan dapat diketahui kurvatur saat leleh ( $\phi_y$ ) dan kurvatur saat ultimit ( $\phi_{ult}$ ), seperti terlihat pada Gambar 3-4. Setelah itu dilanjutkan dengan menghitung defleksi yang terjadi pada balok akibat pembebanan baik saat terjadi retak ( $\Delta_{crack}$ ), saat leleh ( $\Delta_{yield}$ ), dan saat ultimit ( $\Delta_{ult}$ ).



Gambar 3-4. Hasil Analisis Penampang Balok berupa  $c$ , Momen dan Kurvatur

10.  $\Delta_{crack} = 1/6PL^3/E_cI$ , dimana  $I = 1/12 bh^3$

$$\Delta_{yield} = 1/6PL^3/(M/\phi_y)$$

$$\Delta_{ult} = \Delta_{yield} + (\phi_{maks} + \phi_y)L/2 \cdot SF \cdot 2,$$

dengan angka keamanan,  $SF = 2$  dan angka 2 menunjukkan arah bolak-balik.

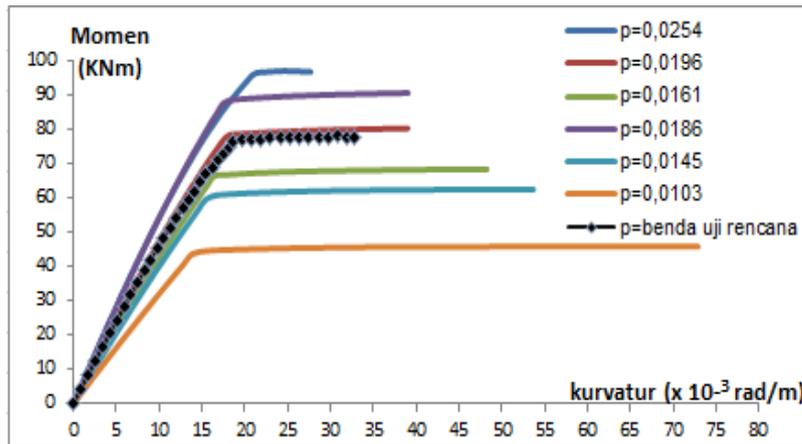
Hasil analisis ke-30 penampang balok bertulangan rangkap disajikan dalam Tabel 3-2. Hasil analisis tersebut kemudian digambarkan dalam kurva hubungan antara variasi rasio tulangan tarik ( $\rho$ ) terhadap momen-kurvturnya, seperti terlihat pada Gambar 3-5 dan dalam kurva hubungan variasi  $\rho'/\rho$  terhadap  $M - \phi$  pada  $\rho=0,0196$  seperti ditampilkan pada Gambar 3-6.

Tabel 3-1. *Properties* Penampang Balok

No benda uji	h (mm)	b (mm)	cover (mm)	d (mm)	$f'_c$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	As (mm <sup>2</sup> )		As' (mm <sup>2</sup> )		$\rho$	$\rho'$	$\rho'/\rho$
1	300	150	20	257.5	25	480	2D25	981.3	2D19	566.8	0.0254	0.0147	0.5776
2	300	150	20	257.5	25	480	2D25	981.3	2D13	265.3	0.0254	0.0069	0.2704
3	300	150	20	257.5	25	480	2D25	981.3	2D12	226.1	0.0254	0.0059	0.2304
4	300	150	20	257.5	25	480	2D25	981.3	2D10	157.0	0.0254	0.0041	0.1600
5	300	150	20	257.5	25	480	2D25	981.3	2D8	100.5	0.0254	0.0026	0.1024
6	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D19	566.8	0.0196	0.0146	0.7459
7	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D16	401.9	0.0196	0.0103	0.5289
8	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D13	265.3	0.0196	0.0068	0.3492
9	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D12	226.1	0.0196	0.0058	0.2975
10	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D10	157.0	0.0196	0.0040	0.2066
11	300	150	20	259.0	25	480	2D22	759.9	2D8	100.5	0.0196	0.0026	0.1322
12	300	150	20	260.0	25	480	2D20	628.0	2D16	401.9	0.0161	0.0103	0.6400
13	300	150	20	260.0	25	480	2D20	628.0	2D13	265.3	0.0161	0.0068	0.4225
14	300	150	20	260.0	25	480	2D20	628.0	2D12	226.1	0.0161	0.0058	0.3600
15	300	150	20	260.0	25	480	2D20	628.0	2D10	157.0	0.0161	0.0040	0.2500
16	300	150	20	260.0	25	480	2D20	628.0	2D8	100.5	0.0161	0.0026	0.1600
17	300	175	20	260.5	25	480	3D19	850.2	2D16	401.9	0.0186	0.0088	0.4728
18	300	175	20	260.5	25	480	3D19	850.2	2D13	265.3	0.0186	0.0058	0.3121
19	300	175	20	260.5	25	480	3D19	850.2	2D12	226.1	0.0186	0.0050	0.2659
20	300	175	20	260.5	25	480	3D19	850.2	2D10	157.0	0.0186	0.0034	0.1847
21	300	175	20	260.5	25	480	3D19	850.2	2D8	100.5	0.0186	0.0022	0.1182
22	300	150	20	260.5	25	480	2D19	566.8	2D16	401.9	0.0145	0.0103	0.7091
23	300	150	20	260.5	25	480	2D19	566.8	2D13	265.3	0.0145	0.0068	0.4681
24	300	150	20	260.5	25	480	2D19	566.8	2D12	226.1	0.0145	0.0058	0.3989
25	300	150	20	260.5	25	480	2D19	566.8	2D10	157.0	0.0145	0.0040	0.2770
26	300	150	20	260.5	25	480	2D19	566.8	2D8	100.5	0.0145	0.0026	0.1773
27	300	150	20	260.5	25	480	2D16	401.9	2D13	265.3	0.0103	0.0068	0.6602
28	300	150	20	260.5	25	480	2D16	401.9	2D12	226.1	0.0103	0.0058	0.5625
29	300	150	20	260.5	25	480	2D16	401.9	2D10	157.0	0.0103	0.0040	0.3906
30	300	150	20	260.5	25	480	2D16	401.9	2D8	100.5	0.0103	0.0026	0.2500

Tabel 3-2. Hasil Analisis Penampang Balok

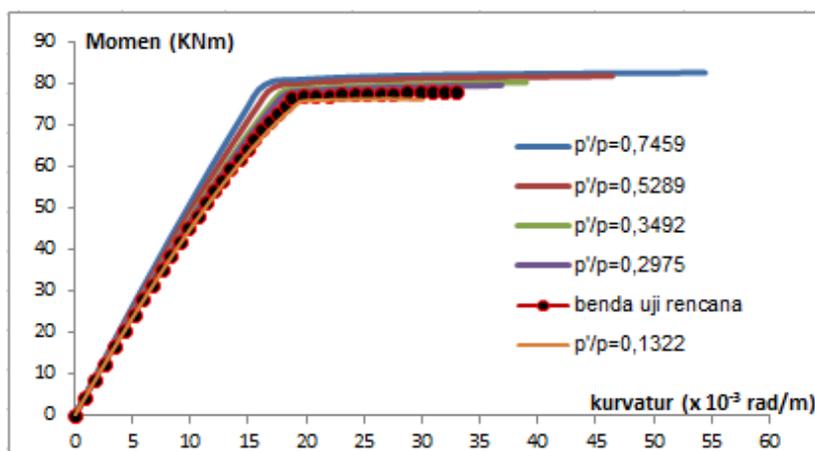
No benda uji	M (KNm)	$\Phi_{teleh}$ (rad/m)	$\Phi_{maks}$ (rad/m)	jarak c (mm)	Q (KN)	$Vu=1/2Q$ (KN)	$Vu_{(ren)}$ (KN)	$\Delta_{crack}$ (mm)	$\Delta_{teleh}$ (mm)	$\Delta_{ult}$ (mm)	Sengkang geser	Sengkang confinement
1	103.049	17.96	41.33	96.197	128.811	64.406	97	11.0	15.3	224.9		
2	97.670	20.69	27.67	131.479	122.088	61.044	92	10.4	17.7	119.5		
3	96.535	20.99	26.23	137.166	120.669	60.335	91	10.3	17.9	108.3		
4	94.618	24.03	24.03	146.026	118.273	59.137	89	10.1	20.5	82.0		
5	92.234	23.53	23.53	156.039	115.293	57.647	86	9.9	20.1	80.3		
6	82.653	15.87	54.44	71.300	103.316	51.658	77	8.8	13.5	324.2		
7	81.781	17.79	46.42	83.345	102.226	51.113	77	8.7	14.3	257.5		
8	80.362	17.41	39.00	97.217	100.453	50.227	75	8.6	14.9	210.6		
9	79.782	17.86	36.86	101.912	99.727	49.864	75	8.5	15.2	194.0		
10	78.525	18.71	32.85	110.927	98.156	49.078	74	8.4	16.0	162.8	D10 - 70	D10 - 70
11	77.244	19.52	30.04	118.978	96.555	48.278	72	8.3	16.7	140.3		
12	69.221	15.05	56.45	67.585	86.526	43.263	65	7.4	12.8	341.2		
13	68.522	15.66	48.24	78.575	85.653	42.827	64	7.3	13.4	281.5		
14	68.208	16.21	45.68	82.167	85.260	42.630	64	7.3	13.8	261.6		
15	67.480	16.57	41.12	89.815	84.351	42.176	63	7.2	14.1	228.4		
16	66.685	16.94	37.47	96.910	83.357	41.679	63	7.1	14.5	201.5		
17	92.321	16.63	45.98	83.752	115.401	57.701	87	8.5	14.2	262.2		
18	90.749	16.74	47.40	96.470	113.437	56.719	85	8.3	14.3	271.8		
19	90.136	17.23	37.03	100.667	112.669	56.335	85	8.3	14.7	197.4		
20	88.842	18.16	33.34	108.618	111.053	55.527	83	8.1	15.5	168.2		
21	87.561	24.03	24.03	115.629	109.452	54.726	82	8.0	20.5	82.0		
22	63.125	15.34	61.97	60.984	78.906	39.453	59	6.7	13.1	378.8		
23	62.674	15.46	53.66	70.119	78.342	39.171	59	6.7	13.2	320.2		
24	62.459	16.16	50.95	73.488	78.074	39.037	59	6.7	13.4	297.0		
25	61.941	16.56	45.96	80.343	77.427	38.714	58	6.6	14.1	262.3		
26	61.349	17.00	41.84	86.861	76.685	38.343	58	6.6	14.5	231.9		
27	45.976	13.87	72.87	50.438	57.470	28.735	43	4.9	11.8	460.3		
28	45.937	13.98	70.22	52.336	57.421	28.711	43	4.9	11.9	441.4		
29	45.821	14.28	64.76	56.504	57.276	28.638	43	4.9	12.2	402.1		
30	45.656	15.03	59.55	60.874	57.070	28.535	43	4.9	12.8	362.9		



Gambar 3-5. Kurva Hubungan Variasi Rasio Penulangan Tarik,  $\rho$  terhadap  $M - \phi$

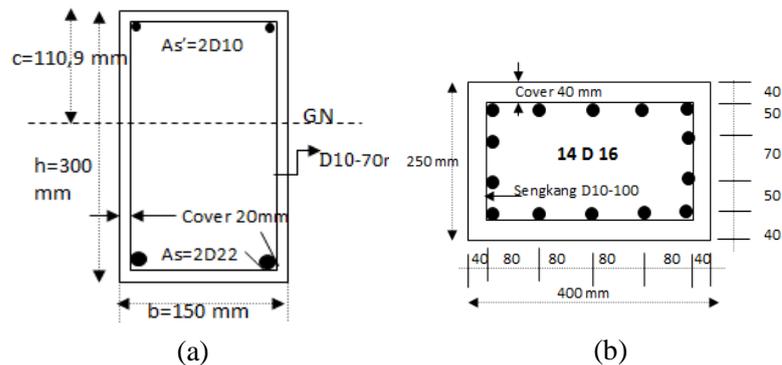
Dari gambar tersebut diperlihatkan bahwa semakin tinggi nilai  $\rho$ , akan menyebabkan semakin tinggi nilai momen yang diperoleh. Kurva pada Gambar 3-5 juga memperlihatkan bahwa meningkatnya  $\rho$  membuat kurvturnya semakin pendek, yang berarti daktilitasnya semakin berkurang. Nilai perbandingan rasio tulangan tekan dan rasio tulangan tarik ( $\rho'/\rho$ ) dalam nilai  $\rho$  yang sama terhadap momen-kurvatur bila digambarkan dalam bentuk kurva seperti terlihat pada Gambar 3-6. Kurva yang tergambar menunjukkan bahwa meningkatnya rasio tulangan tekan  $\rho'$  terhadap rasio tulangan tarik  $\rho$  akan meningkatkan nilai kurvatur, tetapi tidak meningkatkan momen secara signifikan.

Berdasarkan hasil ke-30 spesimen yang dianalisis, penampang balok nomor urutan 10 yang kemudian dipilih menjadi balok referensi karena dianggap memenuhi kriteria persyaratan yang diharapkan yaitu balok dengan jumlah tulangan tarik 2D22 ( $\rho = 0,0196$ ) dan tulangan tekan 2D10 ( $\rho' = 0,004$ ), dengan pertimbangan nilai  $c$  yang didapat cukup signifikan dan sesuai dengan kapasitas dari peralatan yang tersedia



Gambar 3-6. Kurva Hubungan Variasi  $\rho'/\rho$  terhadap  $M - \phi$  pada  $\rho=0,0196$

Berdasarkan perhitungan gaya geser terbesar dan ketentuan-ketentuan yang berlaku untuk tulangan geser dipasang tulangan sengkang D10 -70 mm sama di sepanjang balok, mengikuti kebutuhan akan jarak sengkang maksimum dari desain balok. Namun demikian pada daerah sekitar tumpuan dipasang lebih rapat dengan jarak 50 mm dengan maksud menghindari terjadinya kegagalan akibat geser pada daerah ini. Potongan penampang balok terlihat pada Gambar 3-7a. Pada perbesaran balok tengah, *stub* diambil dimensi 250 mm x 400 mm dengan jumlah tulangan 14D16 dan mutu beton diambil sama dengan balok. Tulangan sengkang diambil D10-100 dan selimut beton diambil 40 mm. Potongan melintang penampang *stub* terlihat pada Gambar 3-7b.



Gambar 3-7. (a) Penampang Balok Referensi (b) Penampang *Stub*

### 3.1.4. Uji Sifat Mekanik Material

Tahap ini dimaksudkan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik material yang akan dipergunakan dalam penelitian disertasi ini, yang meliputi material beton dan baja tulangan. Baja tulangan, baik tulangan utama, sengkang maupun tulangan *confinement* akan diuji tarik menggunakan alat *Universal Testing Machine (UTM)* dengan pengujian menggunakan standar *ASTM E8-04*. Hasil pengujian sifat mekanik baja akan diperoleh data kuat leleh ( $f_y$ ), regangan leleh ( $\epsilon_y$ ), kuat *ultimate* ( $f_u$ ) serta regangan *ultimate* ( $\epsilon_u$ ) baja tulangan. Mutu baja tulangan yang akan dipakai harus memenuhi persyaratan standar baja untuk keperluan beton bertulang (*ASTM A 615M*).

Pada campuran beton, guna mendapatkan mutu beton yang akan dipergunakan dalam penelitian disertasi ini terlebih dahulu dilakukan *job mix* desain. Tujuannya untuk menentukan komposisi campuran penyusun beton yang terdiri dari pasir, *split*, semen, maupun bahan *admixture fly ash* agar dapat memenuhi mutu beton normal yang direncanakan yaitu  $f_c' = 25 \text{ MPa}$ . Semua material penyusun beton yang dipergunakan pada

penelitian disertasi ini merupakan material lokal yang memenuhi persyaratan sebagai material penyusun beton.

### 3.2 Desain Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perilaku daerah sendi plastis balok baik yang diberi tambahan *confinement* pada zona tekan penampang baloknya maupun yang tidak diberikan tambahan *confinement*, saat menerima momen negatif yang cukup besar yang merupakan representasi dari beban gravitasi ditambah beban gempa yang terjadi pada struktur *frame* beton bertulang. Parameter desain berupa bentuk *confinement* serta jenis pembebanan yang diberikan pada balok akan dikaji pengaruhnya baik terhadap daktilitas, disipasi energi, maupun terhadap pola retaknya pada balok.

Enam buah spesimen balok setengah *full scale* dalam skala linier geometri yang menggambarkan penyederhanaan daerah sendi plastis ujung balok diuji. Keenam spesimen dibuat dengan panjang dan dimensi penampang balok yang sama yaitu panjang balok 4,00 m dengan jarak antar tumpuan 3,60 m. Balok memiliki dimensi 150x300x4000 mm dan pada tengah bentang balok diberi *stub* dengan ukuran 250 mm x 400 mm dengan panjang 400 mm. Balok dan *stub* dicor monolit dan menyatu satu sama lain. Model spesimen yang dibuat merupakan bentuk penyederhanaan daerah ujung balok pertemuan balok-kolom yang menerima momen dan geser, dengan tinjauan daerah sendi plastis ujung baloknya.

Pembebanan terpusat ditengah bentang diberikan dengan maksud untuk mendapatkan bidang momen dan bidang geser terbesar dari model yang dibuat. Tumpuan berupa sendi-rol dengan as pada tengah tinggi balok dengan jarak masing-masing 200 mm dari tepi balok tiap ujungnya. Tiga buah spesimen dibuat untuk pengujian pembebanan monotonik dan tiga buah lainnya untuk pengujian pembebanan siklik.

Baik untuk pengujian pembebanan monotonik maupun pengujian pembebanan siklik, spesimen dibuat dalam tiga tipe yaitu : (1) balok biasa tanpa *confinement* pada zona tekannya, (2) balok dengan *confinement* persegi (*hoops*) di zona tekannya dan (3) balok dengan *confinement* kait (*cross-ties*) pada zona tekannya yang menumpang pada sengkang penahan geser. Keenam spesimen ini kemudian diuji dan dievaluasi apakah tambahan *confinement* pada zona tekan penampang balok dapat meningkatkan daktilitas balok khususnya daerah sendi plastis ujung balok baik terhadap pembebanan monotonik maupun pembebanan siklik.

### 3.2.1 Benda Uji (Spesimen) :

Setiap spesimen balok dibuat dengan ukuran penampang 150x300 mm dengan panjang 4,00 meter dan diberikan penebalan pada tengah bentang balok dinamakan *stub* berukuran 250x400 mm dengan panjang 400 mm. Balok dan *stub* tersebut pembuatannya dibuat menerus dan monolit. Dengan selimut beton selebar 20 mm untuk balok, ukuran inti/*core* balok diukur dari pusat diameter perimeter sengkang diambil tetap pada 110x260 mm untuk semua spesimen sehingga memberikan luasan inti/*core* balok sekitar 64% dari luas *bruto* penampang balok.

Pada *stub* selimut beton diambil sebesar 40 mm sehingga memberikan luasan inti/*core* sebesar 170x320 mm atau memberikan luasan inti/*core* sebesar 54,4% dari luas *bruto* penampang *stub*. Secara keseluruhan dibuat enam buah spesimen yang terbagi dalam tiga buah spesimen untuk pengujian monotonik dan tiga buah spesimen untuk pengujian siklik. Dari tiga buah spesimen untuk pengujian monotonik, satu buah spesimen dibuat sebagai balok bertulang biasa tanpa *confinement* pada zona tekannya, yang nantinya akan digunakan sebagai balok pembanding dan dua spesimen lainnya dibuat sebagai balok dengan tambahan *confinement* di zona tekan penampang balok yaitu spesimen balok dengan *confinement hoops* dan spesimen balok dengan *cross-ties confinement* di zona tekan penampang balok. Demikian juga untuk ketiga spesimen dengan pengujian siklik dilakukan hal yang sama.

Pemakaian tulangan pada spesimen dalam penelitian ini hampir semua mempergunakan tulangan ulir (*deform*) untuk tulangan strukturalnya, baik untuk tulangan longitudinal, tulangan lateral, maupun tulangan *confinement*. Hanya tulangan longitudinal pengikat *confinement* yang bukan merupakan tulangan utama mempergunakan tulangan polos berdiameter 6 mm. Tiga buah spesimen dari 6 (enam) spesimen yang dibuat digunakan untuk pengujian monotonik. Penulangan dibuat dengan menggunakan tulangan utama tarik dan tekan masing-masing adalah 2D22 ( $\rho = 1,96\%$ ) dan 2D10 ( $\rho' = 0,4\%$ ) dengan sengkang persegi D10 berjarak spasi 70mm. Desain tulangan dilakukan sedemikian rupa guna mendapatkan area tekan penampang balok yang relatif cukup besar sehingga efektif untuk meninjau pengaruh *confinement*nya. Tiga buah spesimen lainnya digunakan untuk pengujian siklik dan dipasang tulangan utama tarik dan tekan sama besar yaitu 2D22 ( $\rho = \rho' = 1,96\%$ ) dengan sengkang D10 berjarak spasi 70 mm. Masing-masing spesimen diberi nama/kode yang terdiri dari tiga huruf yang menunjukkan tipe spesimen

Huruf pertama B merupakan notasi spesimen balok, huruf kedua adalah N/C/K menunjukkan N-untuk balok normal tanpa *confinement*, C- untuk balok dengan *confinement hoops*, dan K- untuk menunjukkan balok dengan *confinement cross-ties*. Huruf ketiga adalah M/S yang menunjukkan M- untuk balok dengan pembebanan monotonik, dan S- untuk balok dengan pembebanan siklik. Dengan demikian untuk keenam nama spesimen yang dibuat adalah BNM: Balok tanpa *confinement* dengan pembebanan monotonik, BCM: Balok dengan *confinement hoops* dengan pembebanan monotonik, BKM: Balok dengan *confinement cross-ties* dengan pembebanan monotonik, BNS: Balok tanpa *confinement* dengan pembebanan siklik, BCS: Balok dengan *confinement hoops* dengan pembebanan siklik, serta BKS: Balok dengan *confinement cross-ties* dengan pembebanan siklik. Detail keenam spesimen ditampilkan dalam Tabel 3-3.

Tabel 3-3. Spesimen Pengujian

Spesimen	Tulangan longitudinal				Tulangan sengkang	Tulangan <i>confinement</i>	Bentuk <i>confinement</i>	Pembebanan
	Tarik	( $\rho$ )	Tekan	( $\rho'$ )				
BNM	2D22	1,72	2D10	0,40	D10-70	-	-	Monotonik
BCM	2D22	1,72	2D10	0,40	D10-70	D10-70	<i>Hoops</i>	Monotonik
BKM	2D22	1,72	2D10	0,40	D10-70	D10-70	<i>Cross-ties</i>	Monotonik
BNS	2D22	1,72	2D22	1,72	D10-70	-	-	Siklik
BCS	2D22	1,72	2D22	1,72	D10-70	D10-70	<i>Hoops</i>	Siklik
BKS	2D22	1,72	2D22	1,72	D10-70	D10-70	<i>Cross-ties</i>	Siklik

### 3.2.2 Detail Tulangan

Hampir seluruh tulangan yang dipergunakan dalam penelitian disertasi ini merupakan tulangan ulir (*deform*) kecuali untuk tulangan longitudinal pengikat *confinement* yang bukan merupakan tulangan utama menggunakan tulangan polos. Detail tulangan pada spesimen BNM, BCM, dan BKM ditunjukkan pada Gambar 3-8, sedangkan untuk spesimen BNS, BCS, dan BKS ditunjukkan pada Gambar 3-9.

Pada spesimen balok dengan pengujian monotonik dipasang tulangan longitudinal utama 2D22 untuk tulangan tarik dan 2D10 untuk tulangan tekan, sedangkan spesimen balok dengan pengujian siklik dipasang tulangan utama longitudinal yang sama untuk daerah tekan maupun daerah tariknya yaitu 2D22. Tulangan longitudinal dibuat menerus hingga ujung balok dan dibengkokkan  $90^\circ$  dan ditambah perpanjangan  $12d_b$  pada ujung bebas batang tulangan. Pada *stub* dipasang tulangan utama D16 berjumlah 14 buah yang menyediakan rasio penulangan sebesar 2,81% dari luas penampang bruto *stub*.

Sengkang untuk semua spesimen balok maupun *stub* dipasang sebagai sengkang

tertutup dengan diameter tulangan D10. Jarak sengkang balok diambil dengan mempertimbangkan kebutuhan akan elemen SRPMK (Sistem Rangka Pemikul Momen Khusus) dimana sengkang pertama dipasang pada jarak 50 mm dari muka tumpuan dan dalam jarak  $2h$  dari muka kolom jarak sengkang harus memenuhi syarat antara lain (a) tidak boleh melebihi  $d/4$ ; (b)  $8d_b$  tulangan longitudinal lentur terkecil; (c)  $24d_b$  tulangan sengkang, dan (d) 300 mm.

Dengan pertimbangan dan perhitungan kebutuhan terhadap gaya geser maka pada keenam spesimen dipasang tulangan sengkang dengan spasi 70 mm sama hingga jarak 450 mm dari ujung bebas balok, dengan jarak pertama sengkang 50 mm dari muka *stub*. Hal tersebut dimaksudkan agar kegagalan hanya terjadi di daerah sendi plastis balok, bukan pada area lainnya. Pada *stub* dipasang sengkang dengan spasi 50 mm agar keruntuhan tidak terjadi pada daerah ini melainkan dapat terlokalisir pada balok di muka *stub*.

Pada daerah sepanjang 450 mm dari ujung bebas balok dekat tumpuan sendi maupun rol dipasang sengkang dengan jarak 50 mm, dan diberikan tambahan rusuk-rusuk perkuatan dari baja tulangan di area sekitar lubang tumpuan. Hal tersebut dimaksudkan untuk menghindari terjadinya kegagalan geser pada daerah tersebut.

Daerah lubang/as tumpuan baik pada sendi maupun rol diberikan lapisan pipa baja setebal  $\pm 3$  mm dengan diameter lubang sebesar 2 in (50,8 mm) sesuai dengan lubang yang dibuat pada betonnya (lihat Gambar 3-8 dan Gambar 3-9). Hal ini dimaksudkan guna menghindari terjadinya kontak langsung antara baja pejal dan beton yang dapat mengakibatkan kerusakan pada daerah tersebut.

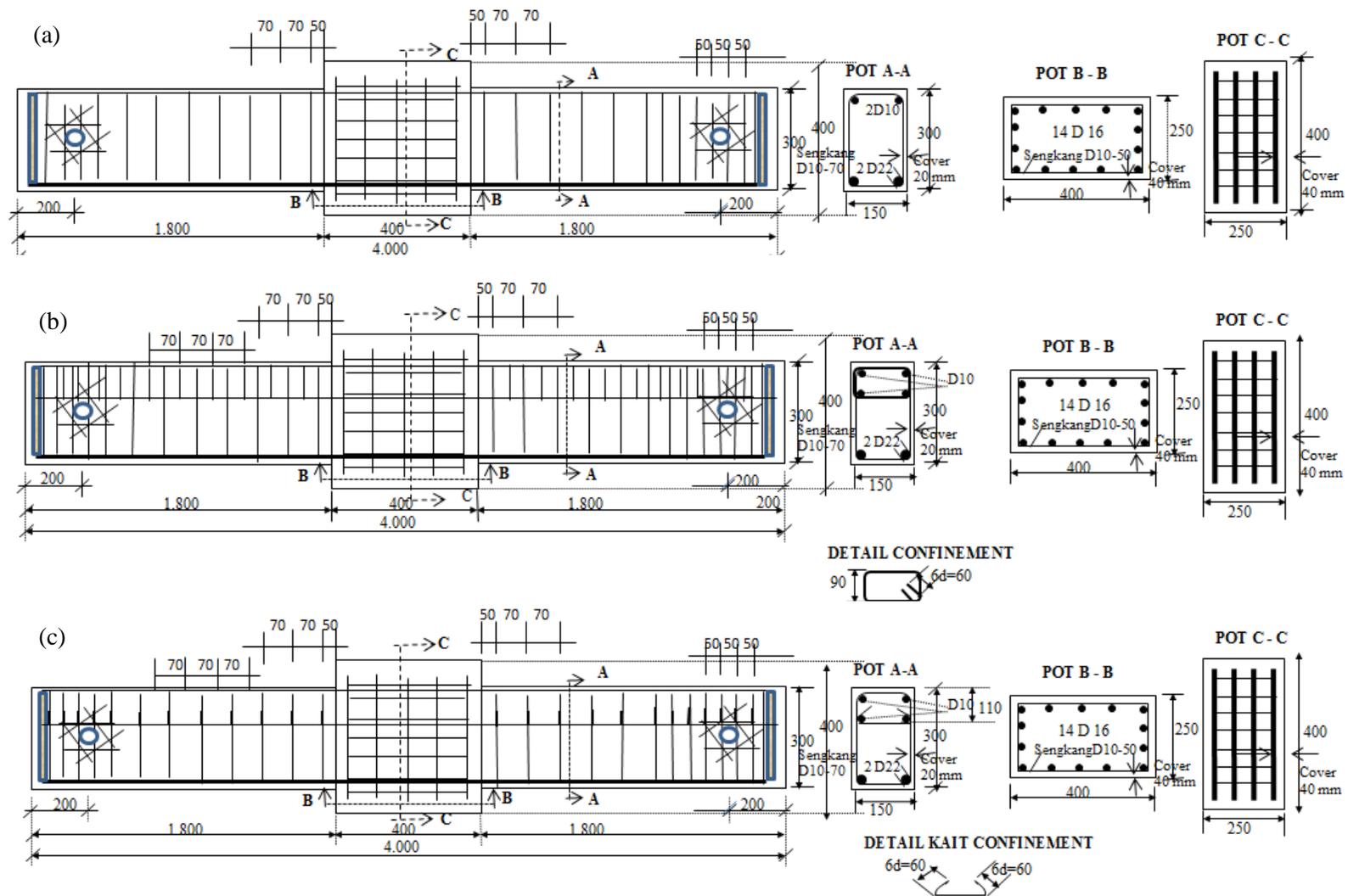
### 3.2.1 Detail Confinement

Penelitian ini menggunakan dua buah tipe *confinement* tambahan pada zona tekan penampang baloknya yaitu *confinement* persegi (*hoops*) dan *confinement* kait (*cross-ties*) yang dipasang menumpang pada sengkang penahan geser. *Confinement* baik *hoops* maupun *cross-ties* dipasang pada zona tekan penampang baloknya.

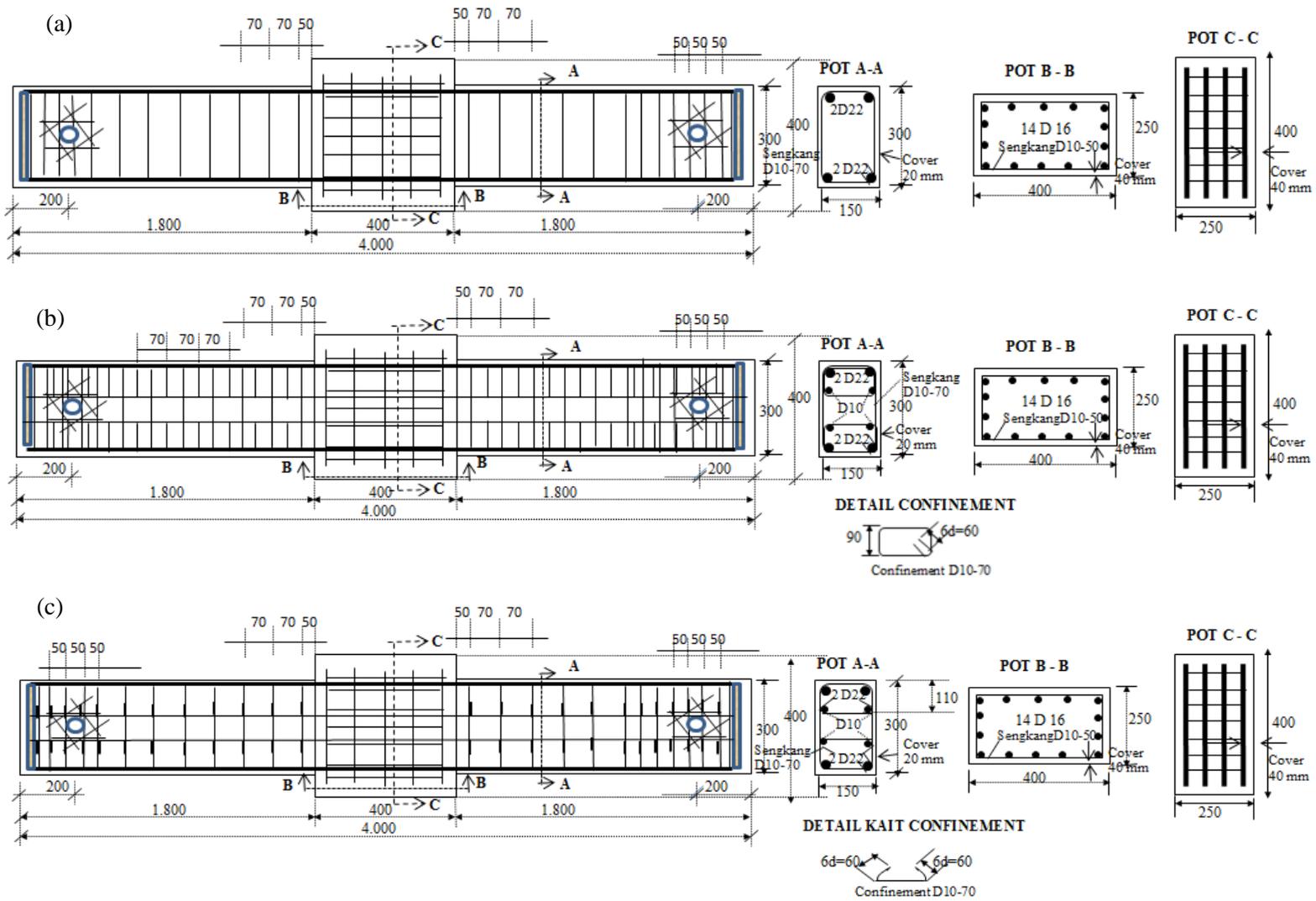
Dalam penelitian disertasi ini *confinement indeks* dihitung dengan memodifikasi persamaan Duan et al.,2010 (Persamaan 2-65 dan Persamaan 2-66) menjadi Persamaan 3-1 berikut ini:

$$\lambda = \rho_s \frac{f_{yh}}{f_c} \quad (3-1)$$

dengan  $f_{yh}$  adalah tegangan leleh pada tulangan pengekang,  $f_c$  merupakan tegangan prisma



Gambar 3-8. Detail Tulangan Spesimen (a) BNM (b) BCM dan (c) BKM



Gambar 3-9. Detail Tulangan Spesimen (a) BNS, (b) BCS dan (c) BKS

prismatis beton biasa (*plain concrete*) dan  $\rho_s$  merupakan *volumetric ratio* dari tulangan dengan  $f_{yh}$  adalah tegangan leleh pada tulangan pengekang,  $f_c$  merupakan tegangan prismatis beton biasa (*plain concrete*) dan  $\rho_s$  merupakan *volumetric ratio* dari pengekang yang merupakan penjumlahan dari kekangan yang berasal dari tulangan *confinement* (Gambar 3-10) dan kekangan dari sengkang geser sesuai Persamaan 3-2 yang besarnya adalah :

$$\rho_s = \frac{\text{Vol pengekang}}{\text{Vol beton}} = \frac{\rho_{sc} + \rho_{ss}}{s.h.b} = \frac{\text{keliling conf.} \cdot A_{sh}}{s.h.b} \quad (3-2)$$

dengan  $A_{sh}$  = luas penampang tulangan *confinement*

$s$  = jarak antar *confinement*

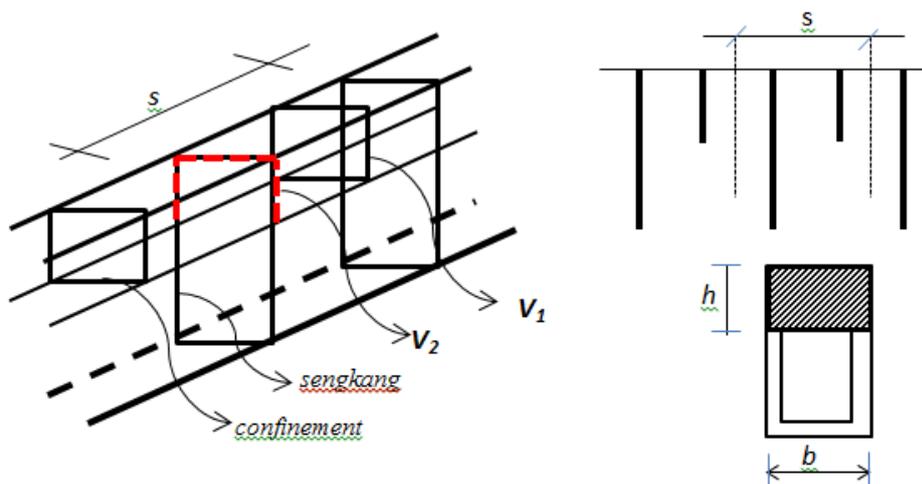
$h$  = jarak horizontal as ke as lateral *confinement*

$b$  = lebar penampang balok

$\rho_{sc}$  = rasio tulangan lateral dari *confinement*

$\rho_{ss}$  = rasio tulangan lateral dari sengkang

*Confinement hoops* berukuran 110x90 mm terbuat dari tulangan *deform* D10 dengan jarak antar *confinement* 70 mm. Rasio tulangan *confinement* ( $\rho_{sc}$ ) bentuk *hoops* yang dihasilkan adalah sebesar 2,69% dan rasio tulangan dari sengkang ( $\rho_{ss}$ ) sebesar 1,95%, sehingga untuk *confinement* type ini menghasilkan *confining index* sebesar 63,68 %. *Confinement hoops* dipasang berselang-seling dengan sengkang penahan geser yang juga berjarak tiap 70 mm.



Gambar 3-10. Skema *Confining Indeks*

*Confinement cross-ties* mempunyai lebar 110 mm dan pada kedua ujungnya diberi kait gempa, yaitu kait dengan bengkokan tidak kurang dari  $135^\circ$  dengan perpanjangan  $6d$ , dimana  $d$  adalah diameter tulangan *confinement*. Rasio tulangan *confinement* ( $\rho_{sc}$ ) bentuk *cross-ties* yang dihasilkan adalah sebesar 1,54% dan rasio dari sengkang ( $\rho_{ss}$ ) sebesar 1,95%. *Confinement cross-ties* dipasang sejarak 110 mm dari tepi serat teratas penampang balok atau 90 mm dari tepi tulangan sengkang atas dengan jarak antar *cross-ties* adalah 70 mm, sehingga menghasilkan *confining index* sebesar 47,94%. Pemasangan *confinement cross-ties* dipasang tepat menumpang pada sengkang penahan geser yang juga berjarak 70 mm satu dengan lainnya.

Sengkang geser juga diberi kait gempa pada ujungnya dengan perpanjangan  $6d$ . Keseluruhan ikatan antara tulangan utama dengan sengkang dan tulangan *confinement* dilakukan dengan menggunakan kawat bendrat berdiameter 1 mm. Pemasangan *confinement* pada spesimen dengan pengujian pembebanan monotonik baik berupa *confinement hoops* maupun *confinement cross-ties* dipasang hanya pada sisi tekan penampang balok, sedangkan pada spesimen yang dikenai beban siklik, tulangan *confinement* dipasang pada kedua sisi penampang balok, dikarenakan pada kedua sisi penampang balok akan menjadi sisi tekan yang saling bergantian saat diberikan beban tarik dan tekan. Posisi *confinement hoops* paling ujung dekat muka *stub* dipasang pada jarak 85 mm dari muka *stub* dan jarak berikutnya adalah 70 mm dari *confinement* yang pertama, sedangkan *confinement cross-ties* paling ujung dipasang pada jarak 50 mm dari muka *stub* dengan jarak berikutnya adalah 70 mm dari *confinement cross-ties* yang pertama. Sengkang pada *stub* dipasang sengkang persegi D10 dengan spasi 50 mm.

### 3.2.2 Material Propertis

Tulangan *deform* (BJTD) yang dipergunakan pada balok dan *stub* sebagai tulangan longitudinal dalam penelitian ini memiliki karakteristik tegangan leleh ( $f_y$ ) masing-masing adalah 476 MPa untuk baja tulangan D22, 402 MPa untuk D16 dan 444 MPa untuk D10, sedangkan untuk tulangan polos (BJTP) pengikat *confinement* memiliki tegangan leleh ( $f_y$ ) = 430 MPa.

Tulangan sengkang menggunakan tulangan *deform* berdiameter 10 mm dengan tegangan leleh  $f_{yt}$  adalah 444 MPa. Data tegangan leleh tersebut diperoleh dari nilai rata-rata hasil pengujian tarik baja dari dua buah spesimen untuk masing-masing diameter tulangan. Propertis penting baja tulangan diantaranya nilai luas tulangan tarik maupun

tekan ( $A_s$  dan  $A'_s$ ), ratio tulangan tarik dan tekan ( $\rho$  dan  $\rho'$ ), serta volumetrik rasio untuk tulangan sengkang dan *confinement* ( $\rho_s$  dan  $\rho_{cf}$ )  $f_y$ ,  $f_u$  ditampilkan dalam Tabel 3-4 dan Tabel 3-5, sedangkan campuran beton yang digunakan dalam penelitian disertasi ini adalah campuran beton mutu normal dengan nilai slump 100 mm dan  $w/c = 0,60$  untuk membuat keenam spesimen dalam satu kali adukan. Desain campuran beton menggunakan metode *DOE (Development of Environment)*. Semen yang digunakan dalam penelitian Disertasi ini adalah *Ordinary Portland Cement Type I* yang merupakan semen untuk penggunaan umum, merk Gresik dengan berat jenis 3,15.

Tabel 3-4. Properties Tulangan Terpasang

spesimen	Bagian spesimen	Tulangan Longitudinal			Sengkang			confinement		
		dia (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	dia (mm)	$f_{yt}$ (MPa)	$f_{ut}$ (MPa)	dia (mm)	$f_{yt}$ (MPa)	$f_{ut}$ (MPa)
BNM	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	-	-	-
	Balok Sisi tekan	D10	444	728						
	Confinement	-	-	-						
	Kolom	D16	402	577						
BCM	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	10	444	728
	Balok Sisi tekan	D10	444	728						
	Confinement	φ6	430	556						
	Kolom	D16	402	577						
BKM	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	10	444	728
	Balok Sisi tekan	D10	444	728						
	Confinement	φ6	430	556						
	Kolom	D16	402	577						
BNS	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	-	-	-
	Balok Sisi tekan	D22	476	661						
	Confinement	φ6	430	556						
	Kolom	D16	402	577						
BCS	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	10	444	728
	Balok Sisi tekan	D22	476	661						
	Confinement	φ6	430	556						
	Kolom	D16	402	577						
BKS	Balok Sisi tarik	D22	476	661	10	444	728	10	444	728
	Balok Sisi tekan	D22	476	661						
	Confinement	φ6	430	556						
	Kolom	D16	402	577						

Tabel 3-5. Data Tulangan Spesimen

Spesimen	$A_s$ (mm)	$A'_s$ (mm)	$\rho = A_s/bd$ (%)	$\rho' = A'_s/bd$ (%)	$\rho_{ss}$ (%)	$\rho_{sc}$ (%)
BNM	334,09	77,72	1,72	0,40	1,95	0,00
BCM	334,09	77,72	1,72	0,40	1,95	2,69
BKM	334,09	77,72	1,72	0,40	1,95	1,54
BNS	334,09	334,09	1,72	1,72	3,90	0,00
BCS	334,09	334,09	1,72	1,72	3,90	5,38
BKS	334,09	334,09	1,72	1,72	3,90	3,09

$\rho_{ss}$  = rasio tulangan lateral sengkang

$\rho_{sc}$  = rasio tulangan lateral *confinement*

Campuran beton ini juga menggunakan bahan tambahan Abu Terbang (*Fly Ash*) type F yang merupakan limbah dari pembakaran bitumen batu bara dengan kandungan CaO lebih kecil dari 10% dari Tanjung Jati Jepara. *Fly ash* type F yang digunakan pada penelitian ini bertujuan untuk mengurangi jumlah semen dan menggantikan dengan *fly ash* sebesar 25% dari berat semen karena *fly ash* mampu meningkatkan kekuatan beton (Thomas and Wilson, 2007). Untuk meningkatkan *workability* pada waktu pengecoran, digunakan *Superplasticizer* jenis *Plastiment V50 ex SIKA* dengan dosis 0,25% dari berat semen.

Agregat halus yang digunakan adalah pasir biasa dari Muntilan, sedangkan agregat kasar menggunakan *split* dari *quarry* Ungaran dengan ukuran butir maksimum 9,5 mm. Ukuran *split* diambil diameter kecil dengan maksud agar butiran agregat kasar dapat melewati sela-sela tulangan yang terpasang guna menghindari keroposnya beton. Komposisi campuran penyusun beton untuk tiap m<sup>3</sup> beton ditampilkan dalam Tabel 3-6. Hubungan kekuatan dan umur beton didasarkan pada pengujian tekan silinder beton sesuai dengan umur beton 28 hari adalah 28,65 MPa. Kuat tekan  $f'_c$  ini diperoleh dari nilai rata-rata pengujian kuat tekan 15 (lima belas) buah silinder beton berdiameter 15 mm dan tinggi 30 mm dengan menggunakan alat *Compression Test Machine*.

Tabel 3-6. Komposisi Campuran Beton

<b>Material</b>	<b>Berat (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>
Semen type I ex. Semen Gresik	331	13,76
Fly Ash Type F ex. Jepara	83	3,45
Agregat kasar ex. Ungaran	982	40,83
Agregat halus ex. Muntilan	787	32,73
Superplasticizer Plastiment V50 ex. SIKA	0,84	0,03
Air	221	9,19
<b>Total berat/m<sup>3</sup></b>	<b>2405</b>	<b>100,00</b>

### 3.2.3 Instrumentasi

Instrumentasi lengkap digunakan untuk mengumpulkan data di tiap pengujian, termasuk regangan beton dan regangan baja tulangan di lokasi yang berbeda, defleksi sepanjang panjang spesimen maupun besarnya gaya yang diberikan. *Strain gauge* sebagai pengukur regangan tulangan utama maupun tulangan *confinement* dalam daerah sendi plastis balok dipasang sebelum dilakukan pengecoran beton. Tujuan pemasangan tersebut adalah untuk mengukur adanya pertumbuhan regangan dan seefektif apa tulangan itu bekerja saat

diberikan pembebanan.

*Strain gauge* pada beton dipasang pada permukaan beton didaerah dekat *stub* sesaat sebelum pengujian dilaksanakan. Pada beton dipasang *strain gauge* khusus beton type PL-60-11 dengan *gauge factor* 2,07 dan panjang 60 mm. Pemasangan dilakukan pada sisi tekan balok muka *stub* dengan menggunakan lem *adhesive* khusus *strain gauge* dan dilakukan setelah beton mengeras. *Strain gauge* pada baja tulangan dipasangkan 2(dua) jenis *strain gauge* berbeda yaitu type YEFLA-5 dengan *gauge factor* 2,14 dan panjang 50 mm untuk tulangan utama, dan type FLA-6-11 dengan *gauge factor* 2,10 dan panjang 60 mm untuk tulangan *confinement*. Pemasangan *straingauge* pada tulangan juga menggunakan lem *adhesive* khusus *strain gauge* setelah penampang tulangan dibersihkan terlebih dahulu.

Selain *strain gauge* beton, dalam arah longitudinal balok juga dipasangkan *Linier Variables Displacement Transducers (LVDT)* di sisi bawah dan di sisi atas balok beton. Pemasangan *LVDT* disini dimaksudkan untuk mengukur *displacement* balok dalam arah horisontal, yang nantinya akan digunakan untuk mencari kurvatur dari balok. *LVDT* yang dipasang pada daerah ini memiliki panjang *gauge* maksimal 100 mm.

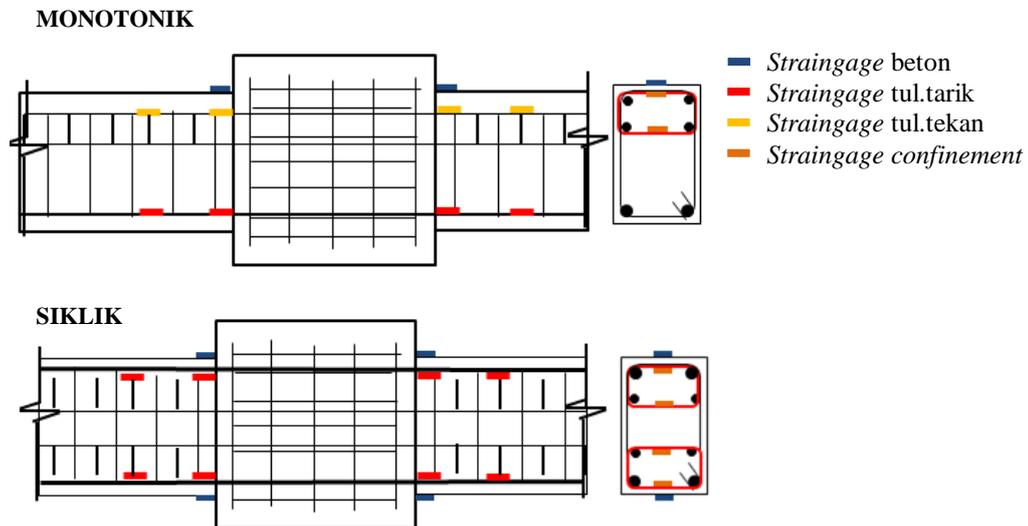
Pengukuran *displacement* vertikal di tengah bentang balok digunakan *LVDT* dengan panjang *gauge* yang lebih panjang dari *LVDT* yang dipasang horisontal yaitu 300 mm. Hal ini dilakukan karena sangat dimungkinkan *displacement* dalam arah vertikal lebih besar dibandingkan *displacement* dalam arah horisontal. Dipasang pula *LVDT* pada daerah dekat tumpuan untuk mengetahui putaran sudut relative balok akibat pembebanan yang diberikan. Semua *LVDT* dipasang pada spesimen dengan bantuan *magnetic base* yang diletakkan pada *loading frame*. *LVDT* yang dipasang pada tiap pengujian sebanyak 9 (sembilan) buah untuk masing-masing spesimen dan sekitar 12 hingga 24 *strain gauge* tiap spesimen tergantung dari spesimen yang akan diuji. Semua data *strain gauge*, *load cell*, maupun *LVDT* akan terekam dalam *instrument data logger*.

Pada penelitian ini digunakan *data logger* type TDS-303 yang dilengkapi dengan 50 *channel* data serta layar monitor. Gambar 3-11 menunjukkan lokasi pemasangan *strain gauge* baik pada tulangan longitudinal, tulangan *confinement*, maupun pada permukaan beton untuk pengujian monotonik maupun pengujian siklik, dan Tabel 3-7 menunjukkan jumlah *strain gauge*, *LVDT*, serta *load cell* yang digunakan dalam penelitian disertasi ini .

#### **3.2.4 Set up Pengujian**

*Set-up* pengujian dibedakan menjadi dua yaitu monotonik dan siklik. Pembebanan diberikan pada tengah bentang balok (*three point loading*) guna mendapatkan bidang momen dan

geser terbesar pada area observasi. Seluruh spesimen akan diuji pada *loading frame* yang terangkur kuat pada *strong floor*. Spesimen BNM, BCM, dan BKM diuji dengan pembebanan monotonik, sedangkan spesimen BNS, BCS, dan BKS diuji dengan pembebanan siklik sebagai simulasi beban gempa terpusat yang diberikan pada tengah bentang balok.



Gambar 3-11. Penempatan *Straingauge* Tipikal pada Spesimen

Tabel 3-7. Jumlah *Straingauge*, *LVDT* serta *Load cell* di Tiap Spesimen

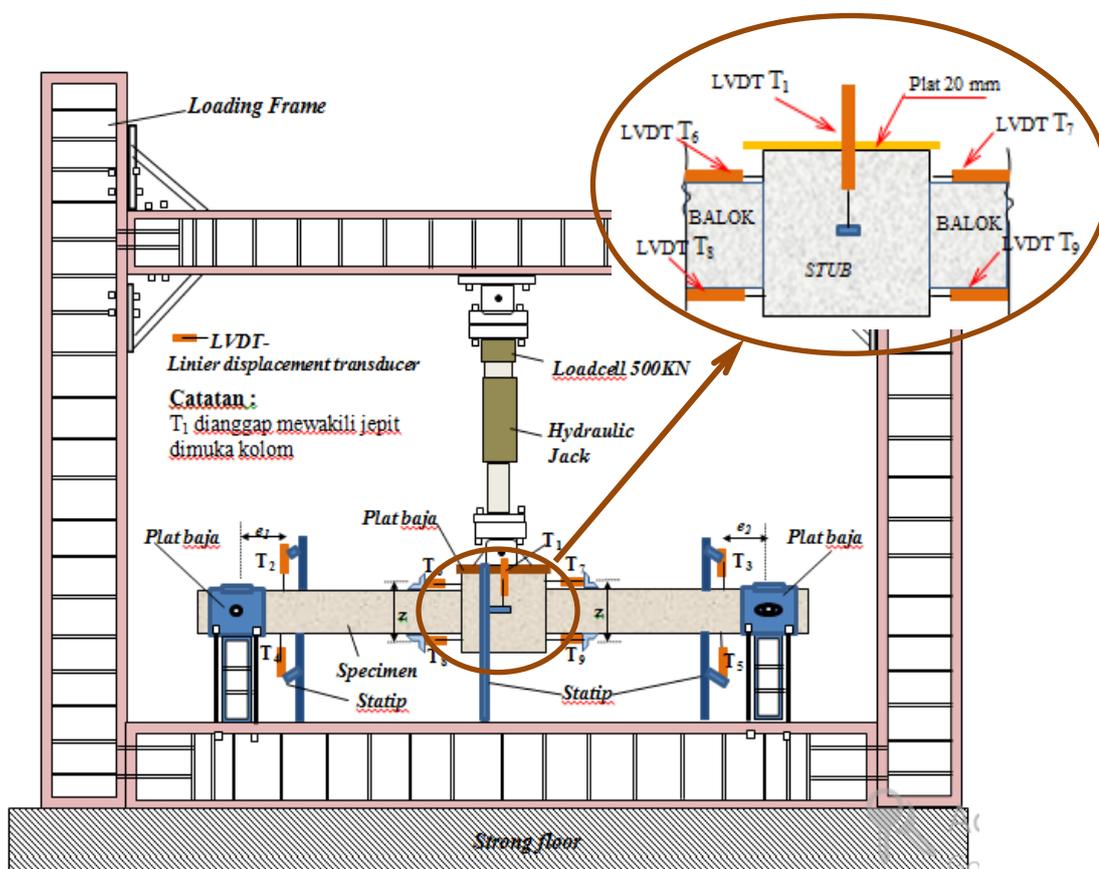
spesimen	Jumlah <i>Straingauge</i>			LVDT	<i>Load cell</i>	Total
	Baja (YEF)	<i>Confinement (FLA)</i>	Beton (PL)			
BNM	8	-	4	9	1	22
BCM	8	4	4	9	1	26
BKM	8	4	4	9	1	26
BNS	8	-	8	9	1	26
BCS	8	8	8	9	1	34
BKS	8	8	8	9	1	34
Total	48	24	36			

### 3.2.6.1 *Set-up* Pengujian Monotonik

Sebuah plat baja berukuran 350x400 mm dengan tebal 20 mm diletakkan melekat dengan sisi atas *stub*. Lapisan tipis plester dari gipsum digunakan antara beton dengan plat untuk memberikan permukaan yang rata. Petak-petak kontur sejarak 50 mm di arah vertikal maupun horisontal digambarkan pada spesimen dengan tujuan untuk memudahkan penggambaran pola retak akibat pengujian. Spesimen kemudian diletakkan pada *loading frame* dengan menumpu pada tumpuan sendi dan rol. Baja pejal dengan diameter 50 mm digunakan sebagai poros tumpuan yang dapat dibongkar pasang.

Plat berukuran 300 x 300 mm dengan tebal 12 mm dipasang pada sisi depan dan belakang tumpuan sendi maupun rol balok, dimaksudkan untuk melindungi sekitar tumpuan agar tidak terjadi kegagalan sewaktu dilaksanakan pengujian. Tumpuan diletakan pada titik as tinggi balok dengan jarak 200 mm dari masing-masing tepi ujung bebas balok. Plat tambahan pada tumpuan juga dilubangi dengan ukuran yang sesuai dengan lubang pada balok maupun diameter baja pejal yang akan digunakan sebagai poros tumpuan. Selain plat baja dengan tebal 12 mm, ditambahkan pula penebalan plat baja disekitar poros tumpuan.

Sebuah *hydraulic jack* berkapasitas 500 KN dan *load cell* dengan kapasitas serupa digunakan untuk memberikan pembebanan terpusat pada tengah bentang balok. *Set-up* pengujian untuk pembebanan monotonik terlihat pada Gambar 3-12.



Gambar 3-12. *Set-up* Pengujian Monotonik

Pengujian spesimen BNM, BCM, serta BKM dilakukan dengan pembebanan monotonik yang diberikan dalam dua tahapan pembebanan yaitu sistem *load control* dan yang dilanjutkan dengan sistem *displacement control*. Sistem *load control* diberikan dengan interval 0,2 ton hingga pembebanan sekitar 75% dari beban maksimum perhitungan teoritis dan dilanjutkan dengan sistem *displacement control* hingga tercapai kondisi ultimit balok.

### 3.2.6.2 Set-up Pengujian Siklik

*Set-up* pengujian siklik hampir menyerupai *set-up* pada pengujian monotonik, hanya dilakukan beberapa penambahan kekuatan terutama untuk mengantisipasi kegagalan saat diterapkan beban tarik. Plat baja berukuran 350 x 400 mm dengan tebal 20 mm diletakkan melekat tidak hanya dengan sisi atas *stub* tetapi juga pada sisi bawahnya. Kedua plat tersebut disatukan dengan spesimen dan dihubungkan dengan delapan buah batang-batang baja berulir berdiameter 25 mm sebagai pengikat. Sebuah *hydraulic actuator* berkapasitas 500 KN dan *load cell* dengan kapasitas serupa digunakan untuk memberikan pembebanan terpusat bolak balik pada tengah bentang balok, seperti terlihat pada Gambar 3-13. Pembebanan siklik pada spesimen BNS, BCS, maupun BKS diberikan dengan sistem *displacement control* dengan model *quasi static cyclic loading*, yang merupakan teknik pemberian beban yang diaplikasikan secara bertahap dan cukup pelan sehingga pengaruh inerti dinamik dan pengaruh laju regangan (*strain rate*) pada material diabaikan (*ACI 374.2R-13*).

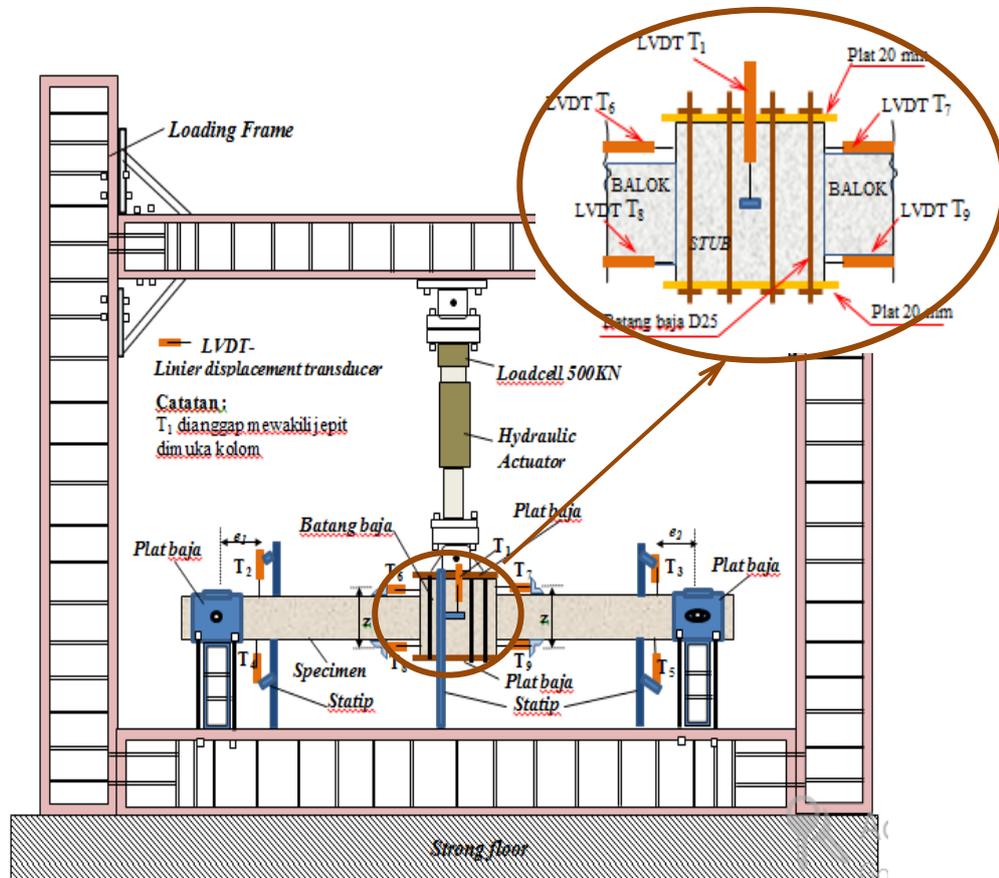
Urutan beban terdiri dari tiga *cycles* untuk setiap tingkat *drift ratio (DR)*, dimulai dari *DR* 0,2% hingga tercapai kondisi ultimit dari masing-masing spesimen. Urutan kenaikan *cycles* yang diterapkan mengikuti standar pengujian berdasarkan *ACI 374.1-05 (Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary)* yang dimulai dari *DR* 0,2%; 0,25%; 0,35%; 0,5%; 0,75%; 1,0%; 1,4%; 1,75%; 2,20%; 2,75%; 3,5%; dan seterusnya hingga tercapai kondisi ultimit. Riwayat *displacement* yang diterapkan mengacu pada Gambar 2-50 di Bab 2.

Dalam pengujian pembebanan siklik hal penting yang harus diperhatikan adalah penyetelan panjang struk *LVDT*. Panjang total *gauge LVDT* harus dapat mengukur deformasi tarik maupun tekan yang diakibatkan pembebanan bolak-balik. Untuk itu penyetelan panjang *gauge* dibuat titik nolnya dari setengah panjang total struk *LVDT*, sehingga masing-masing setengah panjang struk *LVDT* digunakan untuk pembebanan tekan dan pembebanan tarik.

### 3.3 Operasional Variabel : Data, Sumber Data, dan Metode Pengumpulan Data

Data yang diperoleh dalam penelitian disertasi ini merupakan data hasil pengukuran *instrument* yang terpasang pada spesimen, yang meliputi data pembacaan *LVDT*, *load cell*, maupun data pembacaan *strain gauge*. Hasil rekaman data penelitian berupa deretan angka data beban yang dihasilkan oleh *load cell* dan *actuator*, data deformasi yang dihasilkan oleh

LVDT, maupun data regangan yang diperoleh dari *strain gauge* yang terpasang pada baja tulangan dan beton. Selama proses pengujian berlangsung, data akan terekam dalam *data logger*. Pembacaan ini akan memberikan informasi penting untuk menghitung persamaan deformasi yang lain seperti *drift ratio*, kurvatur, momen, maupun rotasi dari spesimen.



Gambar 3-13. *Set-up* Pengujian Siklik

Berdasarkan data ini akan bisa diolah dan digambarkan kurva hubungan antar variabel seperti hubungan *hysteresis gaya-displacement* (pada pembebanan siklik) atau kurva *gaya-displacement* pada pembebanan monotonik, kurva hubungan momen-kurvatur dan sebagainya. Selain data *instrument*, sumber data juga diperoleh dari hasil pengamatan spesimen selama dilakukan pengujian berupa pola retakan yang terjadi pada spesimen. Puncak beban pada awal *crack* ditandai. Ini dimungkinkan merupakan awal retak lentur, retak diagonal tarik karena geser atau torsi, retak *splitting* memanjang terkait dengan lekatan (*bond*) tulangan ataupun *cover spalling*, atau kombinasinya. Penandaan retak dan pola retak dapat memberikan wawasan kedalam mode dominan dari deformasi dan tingkat kerusakan beton. Secara keseluruhan perilaku dan pengamatan kerusakan harus dicatat dengan menandai perubahan yang signifikan performa dari spesimen.

### **3.4 Metode Pengolahan dan Analisis Data**

Pengolahan data meliputi kegiatan pengeditan, transformasi data, serta penyajian data sehingga diperoleh data yang lengkap dari masing-masing variabel yang diteliti (Nur Aedi, 2010).

Pada penelitian disertasi ini pengeditan data dilakukan untuk melengkapi kekurangan atau menghilangkan kesalahan yang terdapat pada data hasil pengujian. Kekurangan data dilengkapi dengan cara penyisipan/interpolasi data. Transformasi data dilakukan dengan sistem tabulasi, yaitu membuat data dalam bentuk tabel-tabel yang dibutuhkan dalam analisis, sedangkan penyajian data dan analisis data kuantitatif dilakukan menggunakan teknik statistik yang penyajiannya dalam bentuk grafik, tabel, maupun diagram yang mudah untuk dipahami.

### **3.5 Tempat Penelitian**

Penelitian disertasi ini memerlukan peralatan tertentu yang tidak semua laboratorium struktur di Indonesia memilikinya, yaitu alat *hydraulic actuator*. Alat tersebut berfungsi memberikan pembebanan bolak-balik secara bergantian pada spesimen yang berupa gaya tarik dan gaya tekan. Laboratorium struktur di Indonesia yang memiliki peralatan tersebut diantaranya adalah Balai Struktur Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman (PUSKIM) di Cileunyi Bandung. Penelitian disertasi ini dilakukan di Laboratorium PUSKIM Bandung dengan pertimbangan kesesuaian antara kapasitas beban dengan spesimen yang akan diuji dalam penelitian disertasi ini.

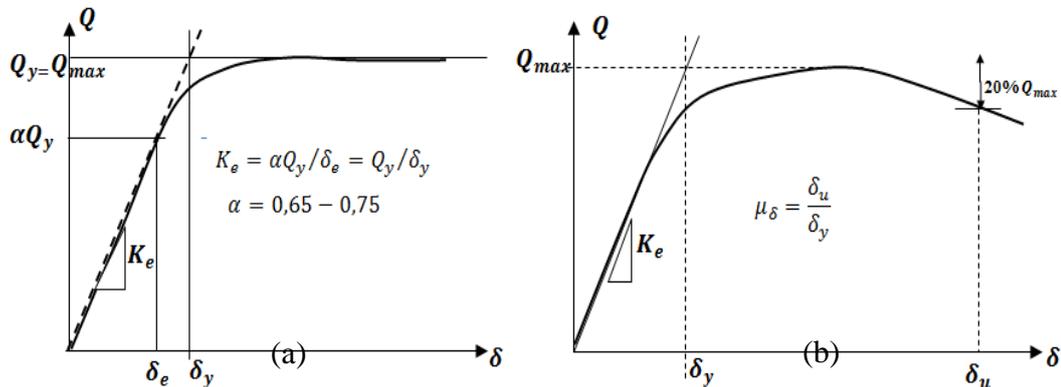
### **3.6 Definisi Operasional Variabel dan Pengukurannya**

Variabel daktilitas dari daerah sendi plastis balok merupakan hal utama yang akan dikaji dalam penelitian disertasi ini. Variabel daktilitas tersebut meliputi daktilitas *displacement* ( $\mu_{\Delta}$ ) maupun daktilitas kurvatur ( $\mu_{\phi}$ ). Selain daktilitas, untuk spesimen dengan pengujian siklik akan dihitung juga rasio kumulatif perpindahan ( $N_{\Delta}$ ) yang bertujuan untuk melihat nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada benda uji, demikian juga nilai indeks kumulatif disipasi energi ( $W$ ) untuk menunjukkan karakteristik disipasi energi spesimen.

#### **3.6.1 Penentuan Nilai Leleh dan Nilai Ultimit**

Dalam pengukuran daktilitas ada dua parameter penting yang harus diperhatikan, yaitu nilai saat kondisi leleh dan nilai saat kondisi ultimit baik pada *displacement* maupun pada kurvatur. Penilaian harus dilakukan dalam memilih nilai leleh (*yield*) terkait dengan *yield*

yang signifikan. Pada sistem pembebanan monotonik, penentuan nilai saat leleh berdasarkan pada ACI 374.2R-13 (Bab 2 hal 48-49) dan diperjelas pada Gambar 3-14a :



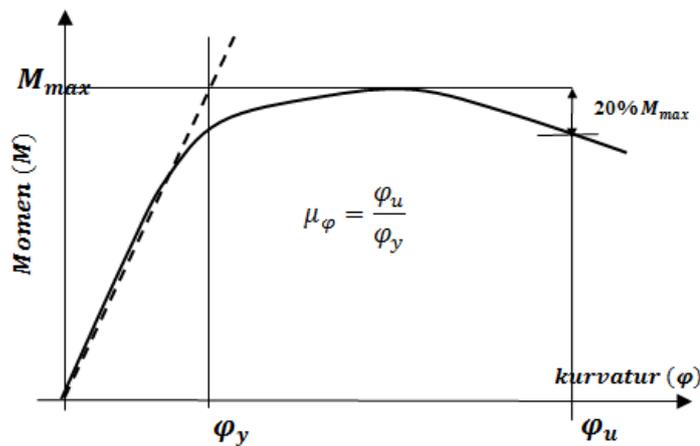
Gambar 3-14. Penentuan (a) nilai leleh  $Q_y$  dan  $\delta_y$  (ACI 374.2R-13) (b)  $\delta_u$

Nilai *displacement* leleh ( $\delta_y$ ) ditentukan dari perpotongan garis horizontal yang digambar pada  $Q_y = Q_{max}$  dan garis dari kemiringan asli ( $K_e$ ) yang merupakan kemiringan garis antara titik  $\alpha Q_y$  dan titik asal.  $K_e$  memberikan perkiraan kekakuan elastis yang efektif untuk hasil pengujian. Nilai variasi  $\alpha$  berkisar 0,65-0,75, tergantung dari tingkat penyertaan beban aksial, pola penulangan, maupun tegangan utama. Untuk elemen lentur seperti balok  $\alpha$  bernilai 0,75, sedangkan untuk kolom  $\alpha$  bernilai 0,65. Adapun penentuan nilai ultimit ditentukan berdasarkan nilai *displacement* saat terjadi penurunan beban maksimal 20% dari beban puncak/ beban maksimal, seperti terlihat pada Gambar 3-14b. Perbandingan antara *displacement* saat kondisi ultimit dengan *displacement* saat kondisi leleh inilah yang disebut dengan daktilitas *displacement*.

Hasil perhitungan daktilitas *displacement* digambarkan dalam bentuk grafik hubungan gaya-*displacement* ( $Q - \delta$ ). Demikian juga hal ini berlaku pula untuk daktilitas kurvatur, hanya dalam penggambaran hubungan parameter dibuat dalam kurva hubungan momen-kurvatur ( $M - \phi$ ). Pada penelitian disertasi ini, nilai kurvatur diperoleh dari pembacaan data *Transducer* (LVDT) yang terpasang horisontal pada ujung balok muka *stub* (T<sub>6</sub>-T<sub>9</sub>) pada Gambar 3-12 dan Gambar 3-13. LVDT horisontal diletakkan pada bagian atas dan bagian bawah balok dengan jarak satu sama lain sejauh  $z$ . Besarnya momen untuk daerah sendi plastis dicari berdasarkan keseimbangan gaya,  $M = (Q / 2 * L_a)$ , dimana  $L_a$  merupakan jarak antara tumpuan dengan muka *stub*. Besarnya nilai kurvatur dicari dengan menggunakan data perpindahan horisontal LVDT atas ( $\Delta_c$ ) dan bawah ( $\Delta_s$ ) yang dibagi dengan panjang mula-mula untuk mendapatkan nilai regangan  $\epsilon_c$  dan  $\epsilon_s$ . Kemudian dari distribusi regangan diatas dan dibawah tersebut, perputaran kurvatur dapat dicari yaitu

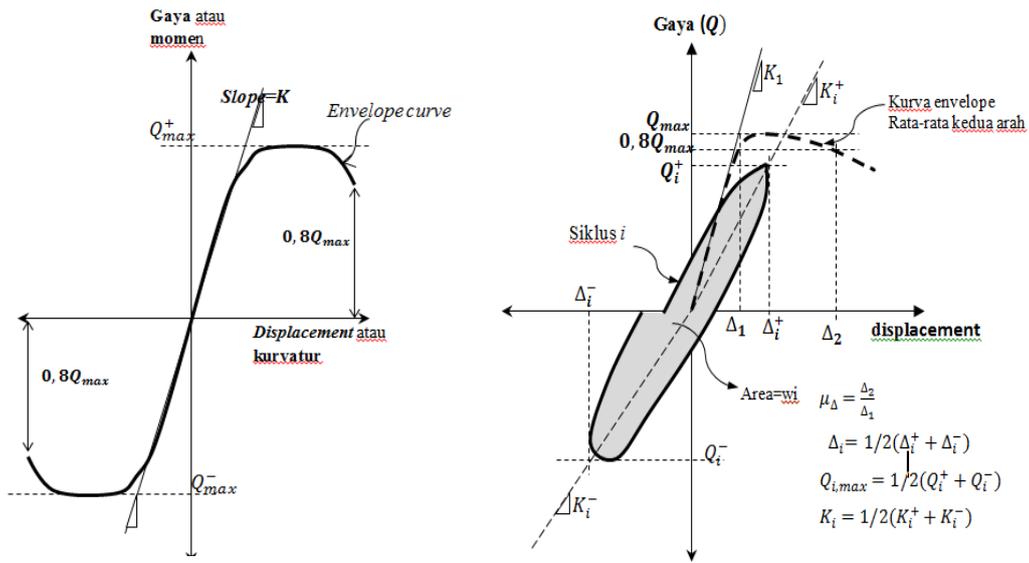
$$\varphi = (\varepsilon_c + \varepsilon_s)/z.$$

Penentuan nilai kurvatur leleh ( $\varphi_y$ ) sama seperti pada *displacement* yaitu dengan menggunakan perpotongan antara garis horizontal dari  $M_{max}$  dengan kemiringan kurva pada kondisi elastis, dan setelah besarnya momen mengalami penurunan maksimal 20% dari  $M_{max}$  dapat ditentukan nilai kurvatur ultimitnya ( $\varphi_u$ ). Untuk memperoleh daktilitas kurvatur ( $\mu_\varphi$ ) maka nilai kurvatur yang terjadi ( $\varphi_u$ ) dibagi dengan nilai kurvatur saat leleh ( $\varphi_y$ ). Hubungan momen dan kurvatur akan digambarkan dalam bentuk grafik  $M - \varphi$  seperti dalam Gambar 3-15. Pada kurva *hysteresis* yang dihasilkan pembebanan siklik, penentuan nilai daktilitas mengacu pada metode yang digunakan oleh Bayrak and Sheikh (1998) seperti terlihat dalam Gambar 2-42.



Gambar 3-15. Grafik Hubungan Momen-Kurvatur

Untuk dapat menentukan nilai dari  $\mu_\delta$ ,  $\mu_\varphi$ ,  $N$ , maupun  $W$  maka harus dibuat kurva *envelope* terlebih dahulu untuk *displacement* maupun kurvturnya pada setiap spesimen yang diuji dengan beban siklik (Gambar 3-16). Kurva *envelope* dalam dua arah pembebanan, positif dan negatif kemudian dijadikan menjadi kurva *envelope* rata-rata yang merupakan nilai rata-rata dari dua arah pembebanan. Nilai  $Q_{max}$  maupun  $M_{max}$  merupakan rata-rata nilai maksimal gaya maupun momen dalam dua arah pembebanan dan nilai 0,8  $Q_{max}$  merupakan titik terjadinya penurunan gaya sebesar 20% yang digunakan untuk menentukan kriteria ultimit dalam penelitian ini. Daktilitas *displacement* dihitung dari perbandingan *displacement ultimit* ( $\Delta_2$ ) dan *displacement* saat pertama leleh ( $\Delta_1$ ), sementara daktilitas kurvatur dihitung dari perbandingan antara kurvatur ultimit ( $\varphi_2$ ) dan kurvatur saat leleh ( $\varphi_1$ ). Nilai rasio kumulatif daktilitas  $N_\Delta$  dan  $N_\varphi$  yang bertujuan melihat nilai kumulatif perpindahan inelastik yang terjadi pada spesimen sesuai dengan Persamaan 2-61 dan Persamaan 2-62.

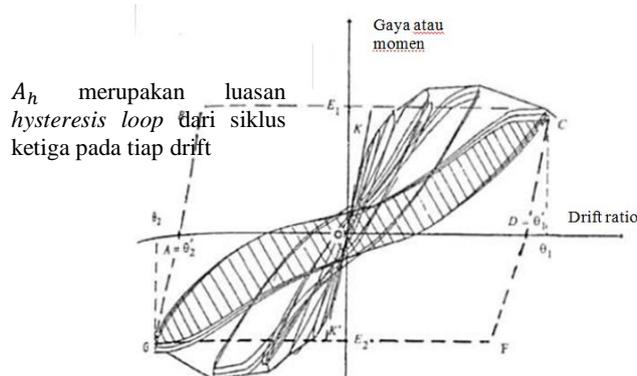


Gambar 3-16. Penentuan Nilai Leleh dan Ultimit Kurva *Hysteresis*

### 3.6.2 Disipasi Energi

Disipasi energi merupakan kemampuan struktur untuk memancarkan energi melalui proses leleh. Proses tersebut akan berlangsung dengan baik bila sendi plastis memiliki sifat daktail sehingga deformasi plastis yang cukup panjang dapat terbentuk sebelum keruntuhan. Disipasi energi diekspresikan sebagai perbandingan luas *hysteresis loop* untuk siklus yang terjadi dengan luas jajaran genjang *circumscribing* yang didefinisikan oleh kekakuan awal selama siklus yang pertama dan ketahanan puncak selama siklus. Perhitungan disipasi energi dalam penelitian ini menggunakan konsep *ACI 374.1-05* memberikan konsep untuk disipasi energi seperti terlihat pada Gambar 3-17. Pada siklus yang ditinjau, ratio disipasi energi relatif ( $\beta$ ) dinyatakan dalam Persamaan 3-3.

$$\beta = \frac{A_h}{(E_1 + E_2)(\theta'_1 + \theta'_2)} \quad (3-3)$$



Gambar 3-17. Rasio Disipasi Energi Relatif (*ACI 374.1-05*)