

PENGARUH PENAMBAHAN FIBER LOKAL PADA PERILAKU TORSI KOLOM BETON BERTULANG PENAMPANG LINGKARAN DENGAN TULANGAN SPIRAL

THE EFFECT OF LOCAL FIBER ON THE TORSIONAL OF SPIRALLY CIRCULAR REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Bambang Santosa¹, Andreas Triwiyono², dan Bambang Suhendro²

**Program Studi Teknik Sipil
Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada**

ABSTRACT

Columns are structural element, which are dominantly axially loaded. However sometimes columns are laterally loaded by shear, bending, and torsion. In order to make column have high ductility, can be added by fiber material. The aim of the research is to find the effect of local fiber on the behavior of circular torsion concrete column with spirally reinforcement.

This research is held on 6 (six) columns, three of them are normal concrete columns and the others are fiber concrete columns. The circular columns have 200 mm diameter and 950 mm length. The columns are fixed on rigid floor. The ratio of longitudinal reinforcement each column is 2,08 % and ratio of spiral reinforcement 1,45 %. The local fiber is one percent, with aspect ratio (l/d) 60. Every column is loaded under constant effectiv axial load 210,186 kN and cyclic torsion until failure.

The result of the research shows that with 1 % local fiber the tension strength (splitting) of the fiber concrete increase up to 40,83 %, and the compression strength is almost the same as normal concrete. The strnght of spirally reinforcement are 201,62 Mpa and 163,19 respectively on normal and fiber concrete. The local fiber does not influence on first crack torsion, but increas on ultimit strength of the concrete columns, and ductility of the columns by first crack is increased 125 %, more than normal concrete columns. The first crack of normal concrete columns experiment are higher then Skew Bending and Space Truss method, 49,81 % and 15,17 % repectively. The first crack of fiber

¹ Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret, Surakarta

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

concrete columns experiment equal Skew Bending method, but lower than Space Truss 25,85 %. The ultimate torsion experiment of normal concrete columns are higher than Skew Bending and Space Truss method, 20,57 % and 28,25 % respectively. The ultimate torsion fiber concrete column experiment are higher than Skew Bending 12,02 %, but lower than Space Truss 13,56 %. Before the first crack, the increased angle torsion linear to torsion, and so to be large and collapse. The normal concrete columns spall suddenly, but the fiber concrete columns are not. The spalling area of normal concrete column is larger than fiber concrete column. The stiffness of fiber concrete column is higher than normal concrete column 7,3 %.

Keywords : *circular column, spirally reinforcement, torsion, cyclic, fiber concrete, spalling*

PENGANTAR

Kolom adalah elemen struktur yang ada hampir pada setiap bangunan, baik itu terbuat dari bahan/material kayu, baja, beton atau material lain. Dari berbagai material tersebut, beton mempunyai beberapa keunggulan antara lain, mudah dikerjakan, bahan yang terdiri dari pasir, krikak, semen, besi beton, mudah didapat, dibentuk dan sebagainya. Disamping itu beton mempunyai kuat desak yang vukup tinggi, serta tahan panas (api). Namun demikian beton mempunyai kelemahan yaitu sifat getas dan tidak cukup kuat menahan gaya tarik. Untuk itu, salah satu cara mengatasinya adalah dengan menambah tulangan dan fiber.

Beberapa peneliti di negara maju telah berusaha memperbaiki sifat-sifat beton dengan menambahkan fiber ke dalam adukan beton. Ide dasarnya adalah menulangi beton dengan fiber yang disebarkan secara merata kedalam adukan beton secara random. Dengan demikian diharapkan dapat mencegah terjadinya retak-retak yang terlalu dini, baik akibat panas hidrasi maupun akibat pembebanan (Soroushian dan Bayasi, 1987).

Bahan fiber yang dapat dipakai dalam adukan beton tersebut antara lain, baja (*steel*), plastik (*polypropelene*), kaca (*glass*), dan karbon (*carbon*). Untuk keperluan non struktural, dapat dipakai fiber dari bahan alamiah seperti, ijuk atau serat tumbuhan yang lain. Jenis fiber yang banyak dipakai di negara maju untuk keperluan struktur adalah

fiber baja yang mempunyai diameter sekitar 0,8 mm, dengan panjang sekitar 60 mm, serta bentuk geometri yang beraneka ragam.

Di Indonesia, pemakaian fiber pada adukan beton belum luas dikenal dan belum dipakai dalam praktek. Salah satunya adalah belum banyak tersedianya bahan fiber sehingga harganya masih cukup mahal. Disamping itu memang beton fiber di Indonesia belum banyak dikenal oleh masyarakat umum.

Untuk mengatasi kelemahan-kelemahan tersebut, Suhendro (1991) telah melakukan penelitian tentang pemanfaatan bahan lokal di Indonesia yang mudah didapat dan murah harganya. Bahan lokal tersebut berupa kawat bendrat yang mempunyai diameter kurang lebih 1 mm, panjang kurang lebih 60 mm. Secara umum diperoleh bahwa dengan menambah fiber lokal, kualitas beton seperti kuat tarik, kuat lentur, kuat desak, dan ketahanan terhadap beban impact meningkat.

Pada kolom dengan tulangan spiral, keadaan leleh akan ditandai oleh deformasi yang besar sebelum keruntuhan total. Pada saat tercapai titik leleh, selimut beton mengelupas dan spiral mulai bekerja untuk membungkus beton dalam inti, sehingga tulangan spiral menyumbangkan kekuatan dan daktilitas kolom. Mengingat keunggulan yang dapat diperoleh dari sifat-sifat beton fiber lokal, maka selayaknya penelitian beton fiber lokal tersebut dilanjutkan dan dikembangkan sampai pada aplikasinya, pada elemen-elemen struktur. Dalam hal ini akan diaplikasikan pada elemen struktur berupa kolom beton penampang lingkaran bertulangan spiral yang dibebani dengan gaya aksial dan torsi siklik.

Dari uraian tersebut di atas timbul pemikiran antara lain :

- a. Seberapa besar pengaruh fiber lokal pada kolom beton penampang lingkaran bertulangan spiral akibat beban aksial dan torsi secara siklik.
- b. Bagaimana perilaku kolom beton fiber lokal penampang lingkaran bertulangan spiral dengan beban aksial dan beban torsi secara siklik.

Batasan masalahnya adalah kolom berupa kolom pendek dengan beban aksial sentris dan torsi keseimbangan pada salah satu ujungnya.

Pada penampang bulat yang mengalami torsi, akan timbul gaya geser permukaan batang terpuntir dan menyebabkan retak diagonal yang sama seperti akibat gaya geser, namun bekerja pada arah berlawanan pada sisi yang berhadapan. Retak yang terjadi pada beton akan membentuk sudut kurang lebih 45 derajat terhadap sumbu

batang. Dengan demikian diperlukan tulangan yang dipasang melintang terhadap arah retakan untuk menghindari keruntuhan lebih lanjut (Dipohusodo, 1994).

Teori torsi sejak diperkenalkan pertama kali oleh Coulomb, 1874 (dalam Hsu, 1984) telah dikembangkan dan dilanjutkan kemudian oleh peneliti lain. Dalam penelitian ini akan dibandingkan hasil eksperimen dengan teori terbaru yang sampai saat ini masih digunakan yaitu teori *Skew Bending* (lentur miring) dan teori *Space truss* (rangka ruang). Pada teori ini digunakan persamaan semi empiris berdasarkan tipe keruntuhan dengan membuat asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Tulangan longitudinal dan sengkang leleh pada saat beton runtuh.
- Kuat tarik beton diabaikan.
- Jarak sengkang (*stirrup*) konstan sepanjang daerah runtuh batang.
- Tidak ada beban eksternal (*external load*) pada daerah runtuh batang.
- Tegangan geser pada daerah tekan tidak berpengaruh terhadap kuat batang.
- Dowel forces* tulangan diabaikan.
- Twisting component torsi pada bidang runtuh tidak berpengaruh pada kuat ultimit.

Akibat gaya aksial, maka kontribusi beton terhadap torsi pada penampang lingkaran menjadi :

$$T_{np} = \frac{\pi d^3}{16} 2,4 \sqrt{f'_c} \left(\sqrt{1 + 10 \frac{\sigma}{f'_c}} - 1,5 \right) \quad (1)$$

Oleh Rahal dan Collins (1996) teori *Space Truss* dikembangkan dengan memperhitungkan pengaruh perlemahan dan *spalling* pada beton. Empat asumsi yang dipakai pada teori ini adalah :

- Space truss* terjadi akibat diagonal concrete struts 45°, tulangan memanjang dan sengkang yang digabungkan dengan sambung sendi.
- Batang beton diagonal hanya menerima gaya tekan, gaya geser diabaikan.
- Tulangan memanjang dan tulangan lateral hanya menerima gaya tarik, *dowel forces* diabaikan.
- Untuk penampang solid, inti beton tidak memberikan sumbu terhadap kuat torsi ultimit.

Baik teori *Skew Bending* maupun *Space Truss* didasarkan pada balok tulangan sengkang.

Menurut Dowrick (dalam Yulianto, 1997) daktilitas didefinisikan sebagai nilai banding antara deformasi saat runtuh dengan deformasi saat leleh. Deformasi dapat diukur dalam pengertian difleksi, rotasi atau *curvature*. Daktilitas didefinisikan sebagai

$$\mu = \Delta u / \Delta y \quad (2)$$

tetapi karena dalam struktur beton titik leleh tidak jelas, maka definisi daktilitas dapat juga digunakan cara Paulay. Menurut Paulay dkk, (1990), (dalam Subagyo, 1997) daktilitas (μ) dapat diukur menggunakan nilai perbandingan antara regangan ultimit yang mampu ditahan beton tersebut (ϵu) dan regangan luluh (ϵy).

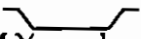
$$\mu = \epsilon u / \epsilon y \quad (3)$$

Regangan ultimit ϵu dapat dihitung berdasarkan $0,8 \sigma$. Untuk kolom spiral, regangan ini dapat ditentukan oleh terjadinya leleh pada tulangan spiral jika tegangan ini terjadi lebih awal dibandingkan dengan regangan berdasarkan $0,80$.

CARA PENELITIAN

Pada penelitian diuji 6 (enam) kolom masing-masing 3 (tiga) kolom dengan beton normal (BN) dan 3 (tiga) kolom dengan beton fiber (BF). Kolom-kolom tersebut berpenampang bulat, berdiameter 200 mm dengan panjang 950 m. Rasio tulangan memanjang masing-masing kolom sama yaitu 2,54% dan tulangan spiral 1,26%. Pada kolom (BF), diberi tambahan fiber lokal 1% dengan aspek rasio $l/d=60$. Pada ujung atas setiap kolom dibebani aksial konstan 250 kN dan beban torsi siklik yang diperbesar hingga terjadi keruntuhan. Pondasi kolom dihubungkan pada lantai kaku dengan memakai 4(empat) buah baut diameter 25 mm, sehingga kolom dianggap sebagai kolom jepit bebas.

Pembuatan kolom benda uji dari bahan-bahan : semen portland tipe I merk Nusantara, pasir dari sungai Bebeng, kricak berasal dari produksi PT Perwita Karya Piyungan. Besi beton dipakai diameter rata-rata 13 mm dan 6 mm masing-masing untuk tulangan memanjang dan tulangan spiral. Fiber dipakai dari bendrat diameter rata-rata 1 mm, dan dipotong-potong panjang 60 mm, kemudian

dibentuk . Air dipakai dari Lab. Struktur Jurusan Tekni Sipil UGM Yogyakarta.

Pembuatan campuran beton dipakai perbandingan bahan susun dari grafik-grafik yang telah dibuat peneliti terdahulu (Suhendro, 1992). Dengan beberapa kali rancangan campuran, akhirnya dipilih bahan campuran dengan perbandingan bahan susun untuk 1 m³.

Tabel 1. Kebutuhan bahan susun rancangan campuran beton per 1 m³

Bahan susun	Beton normal (kg)	Beton fiber (kg)
Semen tipe I	412,8440	408,5846
Pasir	715,5963	708,2133
Kerikil	894,4953	885,2666
Fas	0,55	0,55
Serat fiber Vf=1%	-	70,0

Masing-masing kolom dipasang *strain gauge* sebanyak 2 (dua) buah, yang dipasang pada tulangan memanjang dan tulangan spiral. Pada waktu dilakukan pengecoran kolom, dibuat beton silinder baik pada beton normal maupun beton fiber, masing-masing 10 (sepuluh) buah. Kemudian 5 (lima) buah diuji kuat tekannya dan 5 (lima) buah diuji kuat tarik belah. Pengujian beton silinder tersebut dilakukan di Lab. Bahan konstruksi Teknik, Teknik Sipil UGM. Sedangkan pengujian kolom beton dilakukan di Lab. Teknik Struktur UGM.

Pengujian kolom beton diawali dengan pemberian beban aksial dengan *hydraulic jack*. Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai 250 kN. Beban aksial tersebut dipertahankan konstan (250 kN) kemudian dilanjutkan dengan pembebanan torsi, dengan *hydraulic jack* horisontal. Pertama diberikan beban torsi 100 kg searah jarum jam kemudian dinolkan dan selanjutnya dilakukan pembebanan berlawanan arah jarum jam. Siklus pembebanan tersebut masing-masing dipakai 3 (tiga) kali. Prosedur tersebut dilakukan dengan peningkatan beban 100 kN, sampai terjadi retak. Setelah retak penambahan beban diberikan sebesar 500 kN sampai runtuh dan pengujian dihentikan.

Dari pembebanan di atas diperoleh data-data beban torsi yang diberikan dengan bantuan *load cell* kapasitas 100 kN dan dilengkapi *transducer* agar diperoleh pembacaan beban lebih teliti. Sudut tor

diperoleh dengan memasang *dial gage* 1 ditengah kolom dan *dial gage* 2 diujung atas kolom. Sedang deformasi kolom arah memanjang diperoleh dari *dial gage* 3 yang dipasang dibawah balok. Data regangan tulangan memanjang dan spiral diperoleh dari pembacaan *strain gauge* yang dipasang pada masing-masing tulangan.

HASIL PENGUJIAN DAN PEMBAHASAN

Pengujian Bahan dan Beton Silinder

Dari pemeriksaan dan pengujian agregat diperoleh hasil, pasir masuk gradasi I (kasar) dengan modulus kehalusan (mhb) 3,064, kandungan lumpur 1,14%, berat jenis 2,688 gr/cm³, dan berat jenis kering muka (SSD) 2,748 gr/cm³. Kerikil dengan butiran maksimum 20 mm, mempunyai modulus kehalusan butir (mhb) 6,879, berat jenis 2,403 gr/cm³, dan berat jenis kering muka (SSD) 2,490 gr/cm³ atau pada daerah gradasi I.

Uji tarik baja diameter 6 mm diperoleh tegangan leleh terendah 350,67 MPa dan tertinggi 360,175 MPa, selisihnya 2,71%. Untuk baja ulir diameter 13 mm diperoleh tegangan leleh terendah 512,852 MPa dan tertinggi 520,90 Mpa, selisihnya 1,57%. Tegangan leleh, regangan leleh, dan modulus elastisitas rata-rata baja diameter 6 mm masing-masing 354,079 MPa, 0,00255, dan 162.860,317 Mpa, sedang baja ulir diameter 13 mm adalah 515,90 Mpa, 0,00243, dan 217.324,742 Mpa (tabel 2 dan 3.).

Tabel 2. Hasil uji tarik baja diameter 6 mm

Nomor benda uji	Tegangan leleh f_y (MPa)	Tegangan ultimit (MPa)	Regangan leleh (ϵ_y)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	360,175	518,784	0,00270	163.659,019
2	354,764	515,568	0,00240	165.777,529
3	350,676	513,608	0,00250	165.413,315
4	350,701	507,854	0,00260	156.591,405
Rata-rata	354,079	513,954	0,00255	162.860,317

Tabel 3. Hasil uji tarik naja ulir diameter 13 mm

Nomor benda uji	Tegangan leleh f_y (MPa)	Tegangan ultimit (MPa)	Regangan leleh (ϵ_y)	Modulus Elastisitas (MPa)
1	509,117	679,460	0,00202	259.183,765
2	520,900	691,342	0,00269	194.499,668
3	512,852	676,119	0,00253	204.674,587
4	520,730	683,459	0,00248	210.914,007
Rata-rata	515,900	682,595	0,00243	217.324,742

Kuat desak rata-rata beton normal 38,3062 MPa, beton fiber 35,2843 Mpa, sedangkan kuat tarik belah rata-rata beton normal 2,7921 MPa, dan beton fiber 3,9322 MPa, naik sebesar 40,83%. (Tabel 4,5,6, dan 7.)

Tabel 4. Hasil uji kuat tekan beton normal, fas 0,55

Kode benda uji	Umur (hari)	Kuat tekan (MPa)	Nilai konversi umur 28 hari *)	Kuat tekan f_c' 28 hari (MPa)	Regangan (ϵ_c)	Keterangan
BN1	28	39,6675	1,000	39,6675	0,00126	Slump 7 cm, Vb time 14 dt
BN2	28	34,0805	1,000	34,0805	0,00110	
BN3	28	38,5501	1,000	38,5501	0,00100	
BN4	37	38,7827	1,029	37,6897	0,00115	
BN5	37	42,7478	1,029	41,54311	0,00100	
Rata-rata				38,3062	0,00110	

Tabel 5. Hasil uji kuat tekan beton fiber, fas 0,55

Kode benda uji	Umur (hari)	Kuat tekan (MPa)	Nilai konversi umur 28 hari *)	Kuat tekan f_c' 28 hari (MPa)	Regangan (ϵ_c)	Keterangan
BF1	28	38,2708	1,000	38,2708	0,00126	Slump 3,5 cm, Vb time 14 dt
BF2	28	32,4004	1,000	32,4044	0,00100	
BF3	28	36,5200	1,000	36,5200	0,00130	
BF4	37	36,8740	1,029	35,8348	0,00130	
BF5	37	34,3599	1,029	33,3915	0,00092	
Rata-rata				35,2843	0,00120	

Tabel 6. Hasil uji kuat tarik belah beton normal, fas 0,55

Kode benda uji	Umur (hari)	Kuat tarik belah (MPa)	Nilai konversi umur 28 hari *)	Kuat tarik belah ftrk, 28 hari (MPa)	Keterangan
BN6	28	2,7165	1,000	2,7165	Slump 7 cm, Vb time 10 dt
BN7	28	2,4770	1,000	2,4770	
BN8	28	2,9832	1,000	2,9832	
BN9	37	3,8842	1,029	3,1957	
BN10	37	2,6629	1,029	2,5879	
Rata-rata				2,7921	

Tabel 7. Hasil uji kuat tarik belah beton fiber, fas, 0,55

Kode benda uji	Umur (hari)	Kuat tarik belah (MPa)	Nilai konversi umur 28 hari *)	Kuat tarik belah ftrk, 28 hari (MPa)	Keterangan
BF6	28	3,5743	1,000	3,5743	Slump 73,5 cm, Vb time 14 dt
BF7	28	3,5743	1,000	3,5743	
BF8	28	4,0760	1,000	4,0760	
BF9	37	4,0747	1,029	3,9599	
BF10	37	4,6061	1,029	4,4763	
Rata-rata				3,9322	

Kuat Torsi Kolom

Hasil pengujian saat terjadi torsi retak awal dan ultimit yang dilakukan pada kolom beton benda uji, dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan cara *Skew Bending* dan *Space Truss* dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Kuat torsi kolom

Kode benda uji	Kuat torsi (kNm)							
	Eksperimen				Skew Bending		Space Truss	
	ke	T_{cr}	ke	T_{ult}	T_{cr}	T_{ult}	T_{cr}	T_{ult}
BN1	2	-8,0	1	-9,0	5,12	8,02	6,66	7,54
BN2	3	+6,0	1	+9,0	5,12	8,02	6,66	7,54
BN3	1	+9,0	1	+11,0	5,12	8,02	6,66	7,54
Rata-rata		7,67		9,67	5,12	8,02	6,66	7,54
BF2	3	-6,0	1	-10,0	6,81	9,15	8,18	11,64
BF3	1	+7,0	2	-10,5	6,81	9,15	8,18	11,64
Rata-rata		6,5		10,25	6,81	9,15	8,18	11,64

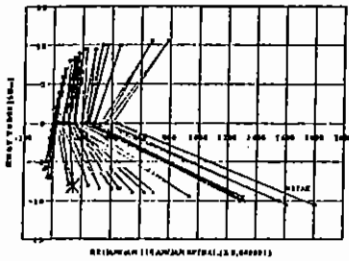
Kuat torsi retak benda uji untuk beton normal BN1, BN2, dan BN3 terjadi masing-masing sebesar -8 kNm siklus 2, $+6$ kNm siklus ke 3, dan 9 kNm pada siklus 1. Rata-rata dari ketiga benda uji tersebut adalah $7,67$ kNm. Kuat torsi retak benda uji untuk beton fiber, BF2, dan BF3 masing-masing sebesar -6 kNm pada siklus ke 3 dan $+7$ kNm pada siklus ke 1. Rata-rata dari kedua benda uji tersebut adalah sebesar $6,50$ kNm. Kalau dibandingkan maka kuat torsi retak kolom dengan fiber terjadi penurunan sebesar $15,25\%$, yang mestinya terjadi kenaikan. Hal ini disebabkan oleh beberapa kemungkinan antara lain mutu beton yang lebih rendah dari beton normal, terjadinya keropos pada kolom beton fiber, atau mungkin penyebaran fiber yang tidak merata.

Kalau hasil eksperimen beton normal (BN) dibandingkan dengan teori *Skew Bending* dan *Space Truss*, maka torsi retak pertamanya lebih besar masing-masing sebesar $49,81\%$ dan $15,17\%$. Untuk beton fiber (BF) torsi retak pertamanya relatif sama dengan teori *Skew Bending*, namun lebih kecil dari teori *Space Truss* sebesar $25,85\%$.

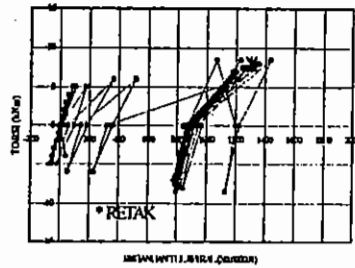
Salah satu respon kolom terhadap beban torsi siklik berupa hubungan torsi dengan regangan spiral. Hubungan antara torsi dengan regangan spiral masing-masing untuk beton normal dan beton fiber ditunjukkan pada gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa retak awal dapat terjadi pada saat dibebani searah tulangan spiral seperti pada BN2, BN3, dan BF3 maupun berlawanan seperti pada BN1 dan BF2. Disamping itu dapat dilihat juga bahwa sebelum terjadi retak regangan spiral sebanding dengan torsinya, setelah itu pergerakan tidak teratur yaitu regangan semakin besar dan tidak linear lagi hingga mencapai runtuh.

Kuat torsi ultimit (T_{ult}) hasil eksperimen kolom beton fiber baik dari pada beton normal, yaitu meningkat sebesar 6% . Kalau hasil eksperimen kolom beton normal, dibandingkan dengan teori *Skew Bending* dan *Space Truss* hasilnya lebih tinggi masing-masing sebesar $20,57\%$ dan $28,25\%$. Sedang pada hasil eksperimen kolom beton fiber dibandingkan dengan *Skew Bending* lebih besar $12,02\%$, namun lebih kecil dari *Space Truss* sebesar $13,56\%$. Perbedaan yang terjadi mungkin disebabkan oleh tegangan sengkang yang belum mencapai tegangan lelehnya, yaitu baru mencapai $201,62$ MPa dan $163,19$ MPa, masing-masing untuk benda uji beton normal dan beton fiber. Sedangkan dalam perhitungan dianggap sengkang sudah mencapai tegangan leleh. Tegangan leleh tulangan sengkang sebesar 354 MPa. Gambar grafik hubungan torsi dengan regangan tulangan spiral setelah retak

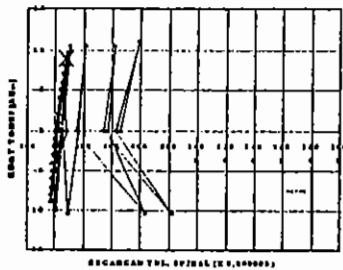
awal sampai runtuh, baik kolom beton normal dan fiber dapat dilihat pada gambar 1.



a. Kolom BN1



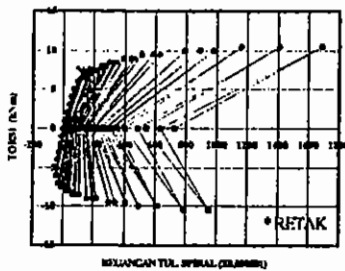
b. Kolom BN2



c. Kolom BN 3



d. Kolom BF 2



e. Kolom BF 3

Gambar 1. Grafik hubungan torsi-regangan spiral

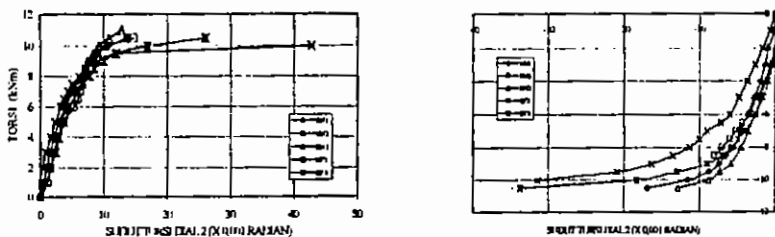
Sudut Torsi dan Daktilitas

Gambar 2. adalah grafik hubungan torsi - sudut torsi dial 2 rata-rata. Setelah terjadi retak, penambahan sudut berangsur-angsur membesar sampai terjadi kuat batas dan runtuh (tabel 9.).

Tabel 9. Sudut torsi yang terjadi pada ujung kolom dan daktilitas

Kode benda uji	Sudut Torsi Retak/leleh θ_y (0,001 rad)	Sudut torsi ult θ_{ult} (0,001 rad)	Sudut torsi Runtuh θ_{rt} (0,001 rad)	Daktilitas (θ_{rt}/θ_y)
BN1	2,85	18,70	9,60	3,37
BN2	2,80	23,35	18,35	7,34
BN3	7,45	12,85	27,15	3,64
Rata-rata	4,27	18,30	18,37	4,78
BF2	6,10	16,65	31,3	5,13
BF3	5,48	31,33	37,78	6,89
Rata-rata	5,79	23,94	34,54	6,01

Dari tabel 9. terlihat bahwa kolom beton fiber (BF) mempunyai daktilitas yang lebih baik dibandingkan kolom beton normal. Peningkatan daktilitas kolom beton fiber terhadap kolom beton normal mencapai 125%.

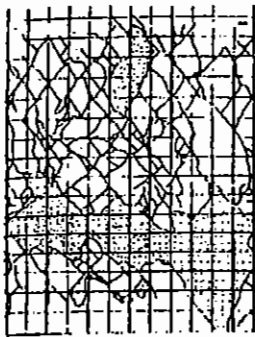


Gambar 2. Grafik hubungan torsi - dial 2

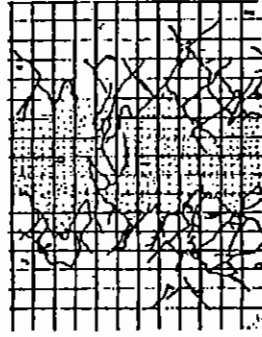
Pola Retak dan Spalling

Pengamatan pola retak torsi dilakukan pada setiap kolom benda uji. Akibat beban torsi bolak-balik, retak saling memotong dan jaraknya cukup rapat. Kolom beton normal (BN), dibandingkan dengan kolom beton fiber (BF) pola retakan lebih teratur. Pola retakan

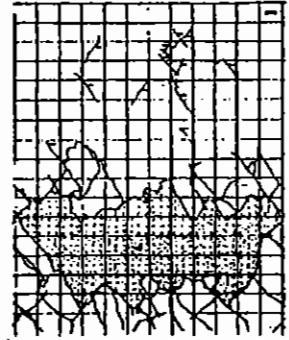
pada kolom beton fiber lebih pendek dari pada kolom beton normal. Spalling kolom beton normal lebih banyak/luas dibanding dengan kolom beton fiber (Gambar 3.).



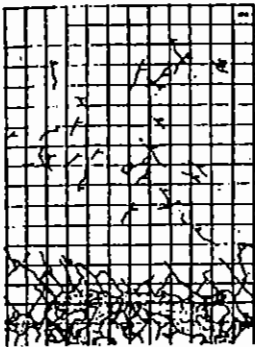
a. Kolom BN1



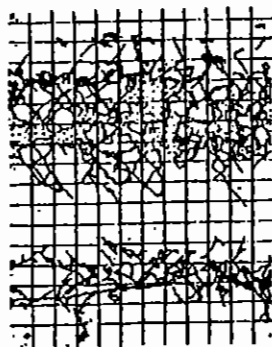
b. Kolom BN 2



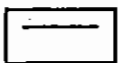
c. Kolom BN 3



d. Kolom BF 2



e. Kolom BF 3



Retak



Spalling

Gambar 3. Retak dan Spalling setelah pengujian selesai

Kekakuan Torsi Retak

Kekakuan torsi retak didefinisikan sebagai perbandingan antara kuat torsi kolom saat mengalami retak pertama dengan sudut torsi pada retak pertama tersebut. Hasil perhitungan kekakuan torsi dapat dilihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Hasil Perhitungan kekakuan torsi retak.

Kode Benda Uji	Torsi retak T_{cr} (kNm)	Sudut torsi retak θ_{cr} (x 0,001 rad)	Kekakuan torsi retak (K_{cr}) (kNm/rad)
BN1	-8,0	2,85	2807,02
BN2	+6,0	5,50	1090,91
BN3	+9,0	7,45	1208,05
Rata-rata			1701,99
BF2	-6,0	3,25	1846,15
BF3	+7,0	3,87	1826,30
Rata-rata			1826,30

Dari Tabel 10. tersebut diatas terlihat bahwa kolom dengan beton normal (BN), mempunyai kekakuan torsi retak kolom yang lebih rendah dibanding kolom dengan beton fiber (BF). Nilai rata-rata dari kekakuan retak kolom beton normal sekitar 7,3 % lebih rendah dibanding dengan kolom beton fiber, kecuali BN 1.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Dengan penambahan fiber 1 % pada beton normal, diperoleh peningkatan kuat tarik belah beton 40,83 %, sedangkan kuat tekan hampir sama.
2. Penelitian ini memakai $\rho_s = 1,45$ %, $\rho_{ps} = 33,4$ % ϕP_n diperoleh tegangan leleh sengkang sebesar 201,62 Mpa untuk beton normal dan 163,19 Mpa untuk beton fiber.
3. Dengan keadaan model yang sedikit keropos, maka penambahan serat fiber pada kolom beton dengan tulangan spiral :
 - a. tidak mempengaruhi peningkatan kuat torsi secara jelas pada saat retak pertama, justru turun 15,25 %, namun pada saat ultimit naik sebesar 6%.
 - b. daktilitas kolom beton fiber dapat meningkat sampai 125 %.

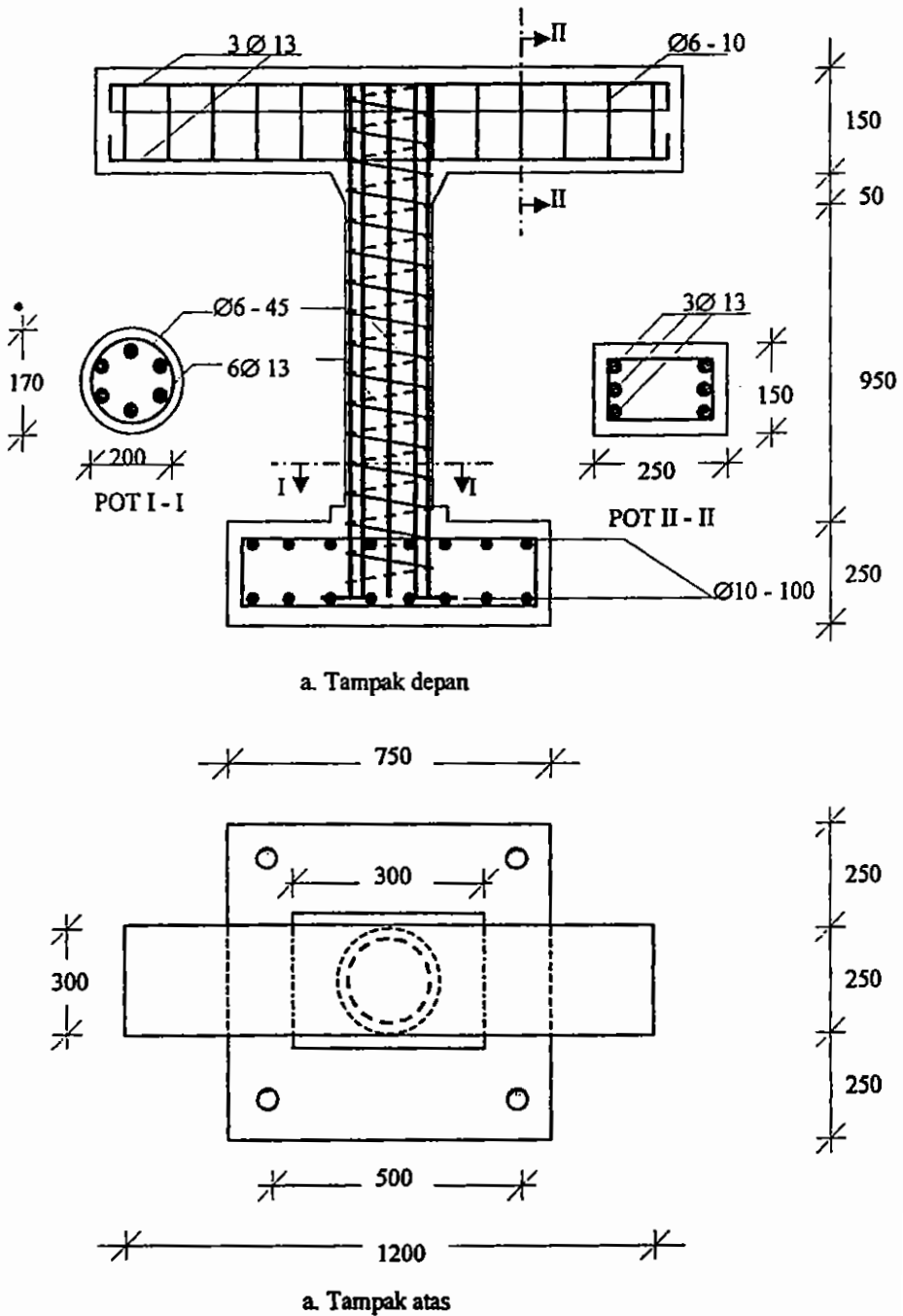
4. Hasil eksperimen kuat torsi retak pertama kolom beton normal (BN) dibandingkan dengan cara *Skew Bending* dan *Space Truss*, hasilnya lebih tinggi masing-masing sebesar 49,81 % dan 15,17 %. Sedangkan kuat torsi retak pertama eksperimen kolom beton fiber dibandingkan dengan cara *Skew Bending* hasilnya sama, namun kalau dibandingkan dengan cara *Space Truss*, hasilnya lebih rendah 25,85 %.
5. Kuat torsi ultimit eksperimen kolom beton normal dibandingkan dengan cara *Skew Bending* dan *Space Truss* hasilnya lebih tinggi 20,57 % dan 28,25 %. Untuk kolom beton fiber, kuat torsi ultimitnya dibandingkan dengan cara *Skew Bending* hasilnya lebih besar 12,02 %, sedang dengan *Space Truss* lebih rendah 13,56 %.
6. Sebelum terjadi retak awal, penambahan sudut torsi linier terhadap penambahan beban torsi, namun setelah terjadi retak awal, penambahan sudut berangsur-angsur membesar sampai terjadi runtuh. Pada kolom dengan beton normal terjadi keruntuhan yang bersifat mendadak, sedangkan kolom dengan beton fiber tidak (daktail)
7. Kolom dengan beton normal (BN) yang dibebani aksial dan torsi siklik, terjadinya spalling selimut beton ditandai dengan terkelupasnya selimut beton dari inti kolom, sedangkan kolom dengan beton fiber (BF) selimut beton masih tertahan (tidak runtuh). Luas bidang spalling untuk kolom beton normal lebih besar dibandingkan dengan kolom beton fiber.
8. Kekakuan kolom beton fiber sedikit lebih baik dibandingkan dengan kolom beton normal yaitu sekitar 7,3 % lebih tinggi dari kolom beton normal.

DAFTAR PUSTAKA

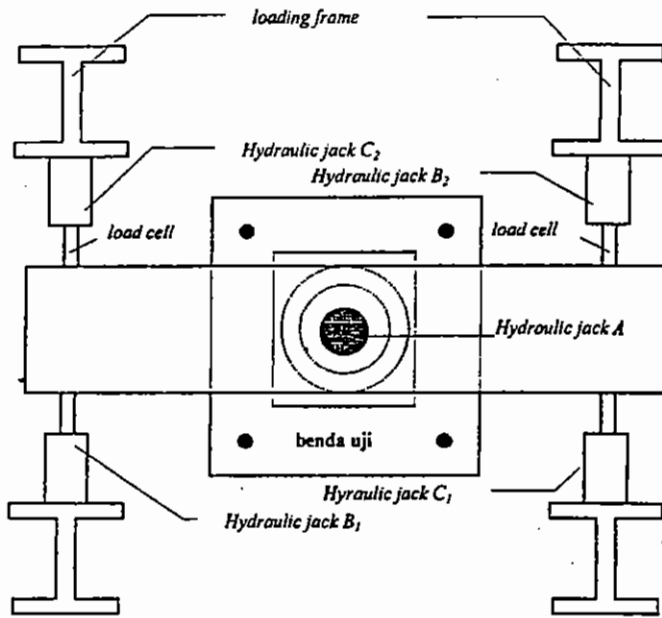
- Ahmad, S.H, and Shah, S.P, 1982, *Stress - Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforced Beams in Torsion*, ACI Journal, November-December, Title No. 83-81, pp 938-942.
- Bayasi, M.Z., and Zeng, J., 1997, *Composite Slab Construction Utilizing Carbon Fiber Reinforced Mortar*, ACI Structural Journal, July-August, Title No. 94-S41, pp 442-457.
- Dharma Giri, I.B., 1998, *Pengaruh Tulangan Spiral Terhadap Kapasitas dan Perilaku Torsi Kolom Beton Bertulang Penampang Lingkaran*, Tesis S-2, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.

- Dipohusodo, I., 1994, *Struktur Beton Bertulang*, PT Gramedia, Jakarta
- 1994, El Dash, K.M, and Ahmad, S.H, 1995, *A Model for Stress-Strain Relationship of Spirally Confined Normal an High Strength Concrete Columns*, Magazine of Concrete Research, June, No. 171, pp 177-184.
- El niema, E.I., 1993, *Fiber Reinforced Beams Under Torsion*, ACI Structural Journal, September-October, Title No. 90-S50, pp 13-20.
- Hsu, T.T.C., 1984, *Torsion of Reinforced Concrete*, Van Norstrand Reinhold Company, New York.
- Mamaghain, I.H.P., Shen, C., Mizuno, E., and Usami, T., 1995, *Cyclic Behavior of Structural Steel*, Journal of Engineering Mechanics, November, pp 1158-1164.
- Purba, P., 1999, *Pengaruh Beban Aksial Terhadap Torsi Siklik Kolom Beton Bertulangan Spiral*, Tesis S-2, Program Pasca Sarjana Universitas Gadjah Mada Yogyakarta.
- Rahal, K. N. and Collins, M.P., 1996, *Simple Model for Predicting Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Sections*, ACI Structural Journal, Title No 93-S62, Nov-Dec 1996, pp 658-667.
- Sabnis, G.M., Haris, H.G., White, R.N., Mirsa, M.S., 1983, *Structural Modelling and Experiments Techniques*, Prentice Hall Inc, New York.
- Sheikh, S.A., and Toklucu, M.T., 1993, *Reinforced Concrete Columns Confined By Circular Spirals and Hoops*, ACI Structural Journal, September-October, Title No. 90-S56, pp 542-553.
- Soroushian, P., and Lee, C.D., 1990, *Distribution and Orientation of Fibers in Steel Fiber Reinforced Concrete*, ACI Material Journal, September-October, Title No. 87-M44, pp 433-439.
- Sudarmoko, 1990, *Beton Serat Suatu Bentuk Baru*, PAU Ilmu Teknik, UGM Yogyakarta.
- Suhendro, B., 1992, *Pengaruh Pemakaian Fiber Secara Parsial Pada Perilaku dan Kapasitas Balok Beton Bertulang (Hasil Full Scale Model Tes)*, PAU Ilmu Teknik, UGM Yogyakarta.
- Tegos, I.A., 1989, *Fiber Reinforced Concrete Beams with Circular Section*, ACI Structural Journal, July-August, Title No. 86-S54, pp 473-482.

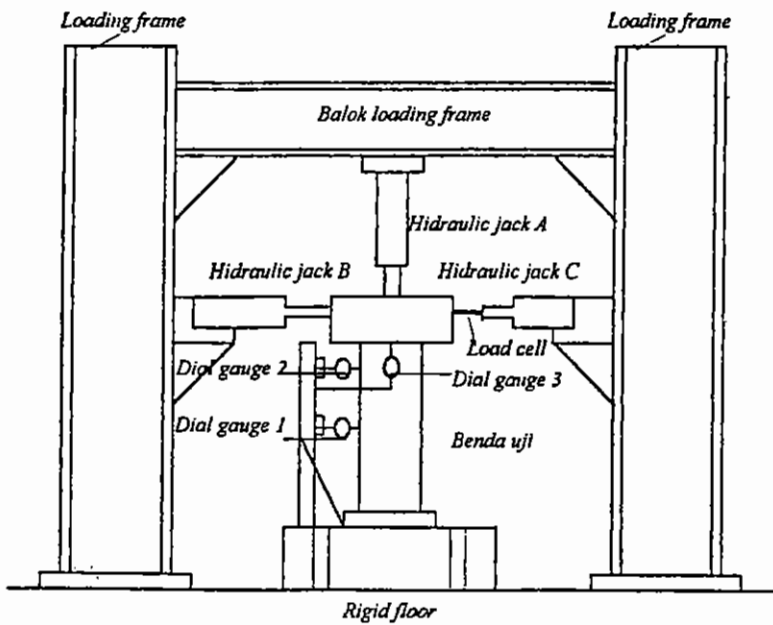
Triwijono, A., 1997, *Analytical Study for Strength and Ductility of Concrete Columns Confined by Spiral Reinforcement*, The International Advanced Course on Earthquake Disaster Prevention for Building Engineer, Indonesia.



Gambar 4. Tampak depan dan tas benda uji dan penulangan (ukuran dalam mm)

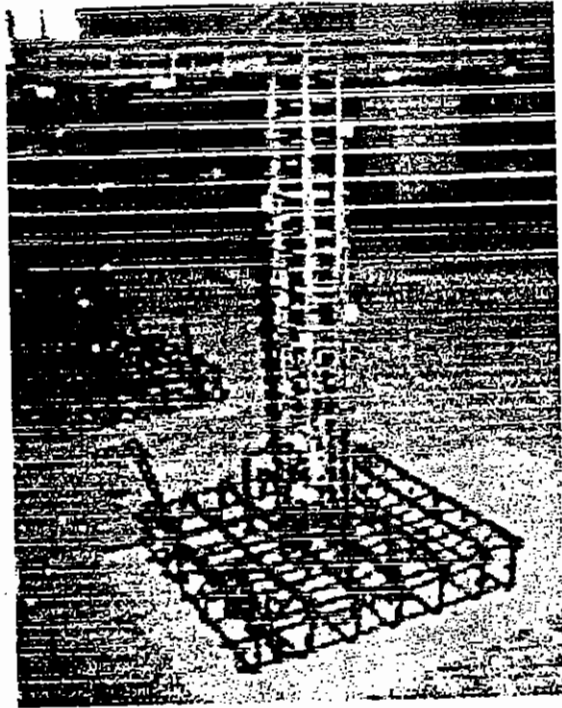


(a). denah set-up alat uji dengan benda uji

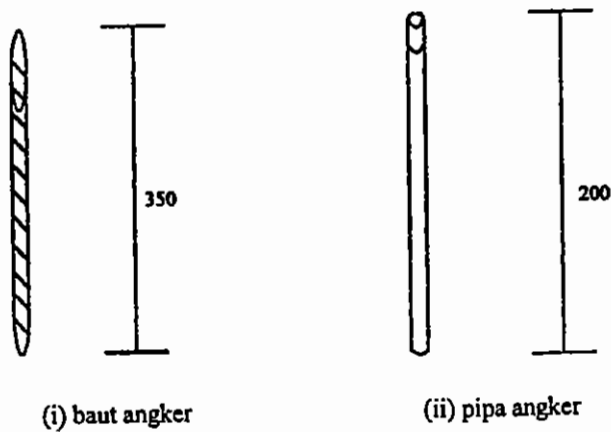


(b) Tampak samping

Gambar 5. Set-up alat uji



Gambar 6. Tulangan benda uji



**Gambar 7. Baut dan pipa angker
(ukuran dalam mm)**