

Kinerja Hubungan Pelat-Kolom Struktur *Flat Plate* Bertulangan Geser *Stud Rail* dan Senggang Dalam Menahan Beban Lateral Siklis

Riawan Gunadi¹, Bambang Budiono², Iswandi Imran², Ananta Sofwan²

¹Jurusan Teknik Sipil – Politeknik Negeri Bandung

²Program Studi Teknik Sipil – Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Flat plate adalah struktur gedung dengan elemen utama berupa kolom dan pelat. Struktur *flat plate* tidak diperkuat dengan balok, drop panel, ataupun column/shear capital. Type struktur ini potensial untuk dikembangkan/diimplementasikan secara luas karena efisiensi biaya konstruksi dan fleksibilitas penataan arsitektural. Penelitian-penelitian dalam bidang *flat plate* terfokus pada hubungan pelat-kolom (*slab-column connection*), yang merupakan daerah rentan terhadap kerusakan akibat gempa. Hubungan pelat-kolom memberikan respon terhadap unbalanced moment akibat gempa melalui momen lentur pada daerah lebar efektif dan gaya geser pada penampang kritis pelat. Akumulasi gaya geser tersebut dengan gaya geser akibat gravitasi mengurangi kinerja hubungan pelat-kolom dalam merespon gempa. Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *stud rail* (*shear stud* yang dirangkai dengan strip base) meningkatkan kinerja hubungan pelat-kolom. Pada penelitian ini digunakan dua benda uji hubungan pelat-kolom berskala 1:2 berukuran pelat lebar 1500 mm, panjang 3000 mm, dan tebal 120 mm; dan kolom dengan sisi penampang 300 mm dan tinggi 1570 mm. Tumpuan bawah kolom adalah sendi dan tumpuan kedua ujung pelat adalah rol. Benda uji 1 (*control specimen*) diperkuat dengan *stud rail*. Benda uji 2 diperkuat dengan *stud rail* ditambah sengkang pada sisi kiri dan kanan kolom. Mutu beton adalah f'_c 30 MPa, mutu tulangan pelat dan kolom f_y 365 MPa, sengkang kolom f_y 240 MPa, dan *shear stud* f_y 500 MPa. Pengujian dilakukan dengan beban gravitasi (blok-blok beton yang digantungkan pada pelat) mewakili beban mati dan 30% beban hidup lantai, serta beban lateral siklis dari aktuator mengikuti standar ACI 374.1-05 sampai dengan drift ratio 5.25%. Hasil penelitian yang meliputi kekuatan/kekakuan dan disipasi energi menunjukkan benda uji dengan *stud rail* dan sengkang memiliki kinerja lebih baik. Kurva histeresis cycle ketiga pada drift ratio 3.5% menunjukkan bahwa disipasi energi benda dengan *stud rail* dan sengkang adalah sekitar 130% lebih besar, membuktikan bahwa sengkang menambah efektifitas *stud rail* sebagai tulangan geser.

Kata kunci : *flat plate*, unbalanced moment, *stud rail*, drift ratio, disipasi energy

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kondisi yang menimbulkan kelemahan pada struktur *flat plate* adalah adanya akumulasi tegangan geser pada hubungan pelat-kolom karena adanya beban gravitasi dan transfer *unbalanced moment* akibat beban lateral, khususnya gempa. Akumulasi tegangan geser tersebut mengakibatkan hubungan pelat-kolom tidak sepenuhnya memiliki perilaku yang dibutuhkan oleh struktur penahan beban gempa. Karena adanya kelemahan tersebut, penggunaan type struktur ini masih dibatasi. SNI 2847-2002 dan ACI 318-08 memasukkan type struktur ini ke dalam Struktur Rangka Pemikul Momen Menengah (*Intermediate Moment Frames*).

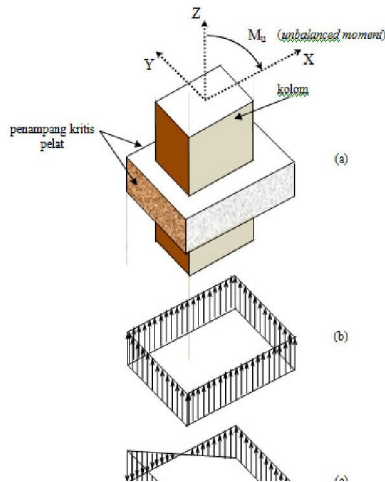
Untuk dapat digunakan di wilayah gempa kuat sebagai Struktur Rangka Pemikul Momen Khusus (*Special Moment Frames*), perlu dikembangkan detail tulangan yang dapat meningkatkan kinerja struktur *flat plate* dalam menahan kombinasi beban gravitasi dan beban gempa.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *stud rail* bekerja efektif dalam memberikan perkuatan terhadap tegangan geser pada hubungan pelat-kolom (Robertson et al., 2002). Dengan mempertimbangkan hal tersebut, pengembangan detail yang dilakukan pada penelitian ini tetap didasarkan pada penggunaan *stud rail* sebagai elemen utama penahan beban geser pada hubungan pelat-kolom.

1.2 Tujuan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan detail tulangan geser agar hubungan pelat-kolom dapat berperilaku lebih baik dalam menahan kombinasi beban gravitasi dan gempa.

Beban gravitasi dan transfer *unbalanced moment* antara pelat dan kolom mengakibatkan terjadinya tegangan geser pada penampang kritis seperti pada Gambar 1-1.



Gambar 1-1 Penampang kritis pada hubungan pelatkolom (a), tegangan geser akibat gravitasi (b), dan tegangan geser akibat transfer *unbalanced moment* (c)

Untuk mengatasi akumulasi tegangan geser tersebut diperlukan detail tulangan geser untuk mencegah terjadinya keruntuhan geser yang bersifat getas. Beberapa penelitian yang telah dilakukan membuktikan bahwa *stud rail* berfungsi efektif dalam menahan tegangan geser. Pada Gambar 1-1 dapat dilihat bahwa sebagian dari akumulasi tegangan geser akan bekerja sebagai “torsion” pada penampang kritis pelat di sisi-sisi kolom. Karena itu, pada penelitian ini penggunaan sengkang untuk pengembangan detail diarahkan untuk dapat menahan efek “torsion” pada sisi-sisi kolom tersebut.

Apabila penggunaan sengkang untuk melengkapi *stud rail* dapat meningkatkan kinerja hubungan pelat-kolom dalam menahan beban gravitasi dan lateral, maka usaha pengembangan lebih lanjut dapat dilakukan untuk menghasilkan detail tulangan geser yang aman digunakan di wilayah gempa potensial.

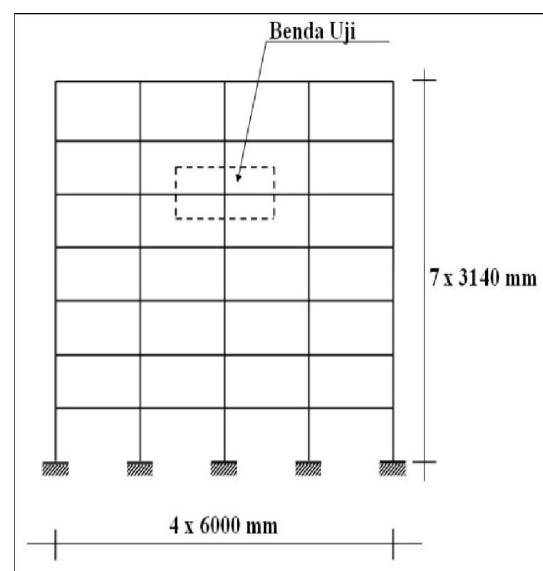
2. KEUTAMAAN PENELITIAN

Penelitian tentang struktur *flat plate*, atau *flat slab* secara lebih umum, belum banyak dilakukan di Indonesia, sementara type struktur ini sudah mulai digunakan dalam membangun gedung bertingkat. Di lain pihak, sebagian besar wilayah Indonesia merupakan daerah yang berpotensi mengalami gempa bumi. Dengan demikian penelitian tentang struktur *flat plate* memiliki arti penting dan perlu menjadi bagian dari *road map* penelitian struktur penahan beban gempa.

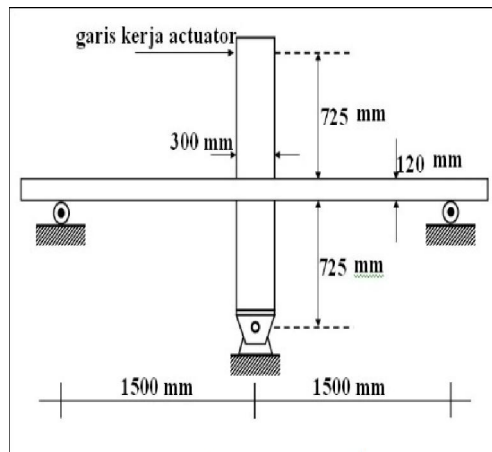
Karena *state of the art* dalam pengembangan tulangan geser hubungan pelat-kolom mengarah pada penggunaan *stud rail*, maka pengujian ini diawali dengan modifikasi dari detail *stud rail* yang biasa digunakan.

3. METODOLOGI

Sesuai dengan tujuan penelitian, pengujian dilakukan terhadap dua benda uji yang merupakan model hubungan pelat-kolom dari struktur prototype gedung bertingkat. Benda uji pertama, selanjutnya disebut Benda Uji CRT (dengan tulangan geser *Cross Type Stud Rail*) digunakan sebagai *control specimen*. Benda uji kedua, selanjutnya disebut Benda Uji CRS, menggunakan detail tulangan geser yang berbeda (*Cross Type Stud Rail plus Stirrup*).



Gambar 3-1. Struktur gedung prototype

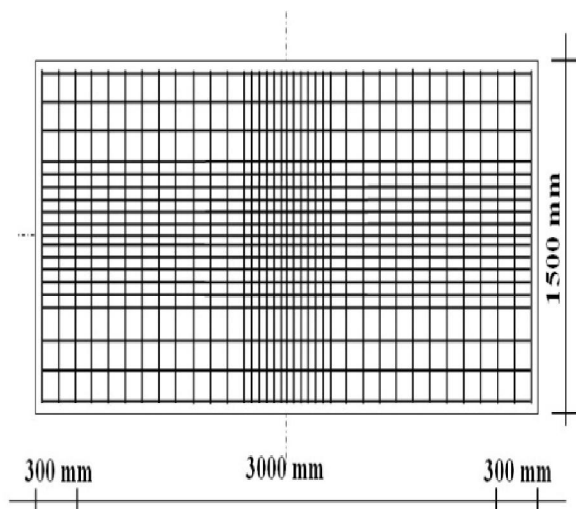


Gambar 3-2. Sistem struktur benda uji

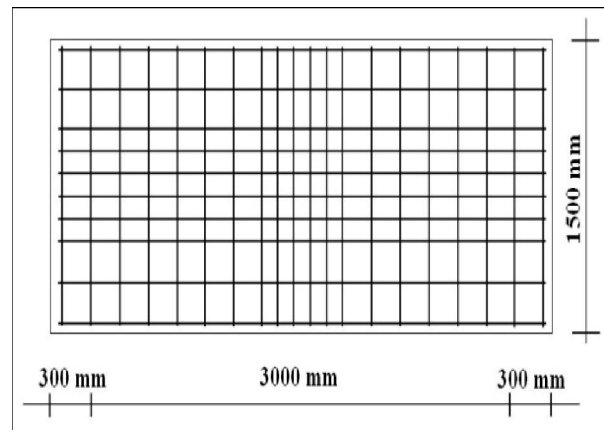
Kedua benda uji dibebani dengan beban gravitasi pada pelat lantainya, dan beban lateral siklis yang sama pada puncak kolomnya. Pengujian dilakukan sampai dengan *drift ratio* 5.25%, dan penilaian terhadap efektifitas tulangan geser dilakukan berdasarkan perbandingan respon struktur pada kondisi non linear.

3.1 Benda Uji

Dua benda uji yang digunakan dirancang dengan skala 1:2 (*half scale*), dengan ukuran pelat lebar 1500 mm, panjang 3000 mm, dan tebal 120 mm; dan kolom dengan sisi penampang 300 mm dan tinggi 1570 mm. Mutu beton adalah f'_c 40 MPa, mutu tulangan pelat dan kolom f_y 365 MPa, sengkang f_y 240 MPa, dan *shear stud* f_y 500 MPa. Kedua ujung kolom memodelkan *inflection point* kolom di bawah dan atas lantai (masing-masing pada pertengahan tinggi kolom), sedangkan kedua ujung pelat masing-masing memodelkan tengah bentang pelat lantai bangunan prototype.

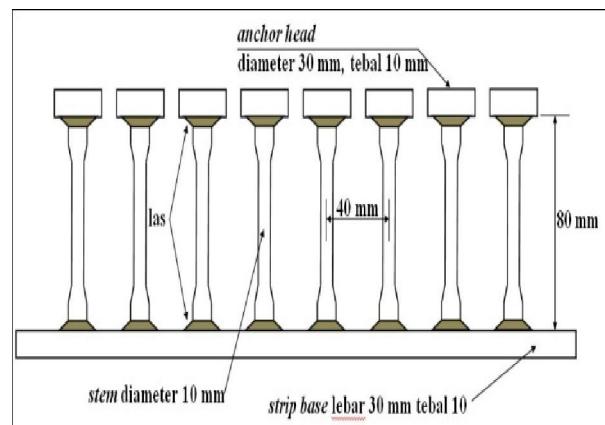


Gambar 3-3 Tulangan atas pelat (pada arah memanjang 19 buah diameter 7.56 mm)



Gambar 3-4 Tulangan bawah pelat (pada arah memanjang 10 buah diameter 7.56 mm)

Stud rail yang digunakan dibuat dari besi as diameter 12 mm yang dibentuk menjadi *shear stud/stem* diameter 8 mm, dirangkai dengan *strip base* tebal 10 mm dan lebar 30 mm. *Anchor head* dibuat dari besi as dengan diameter 30 mm. Untuk sambungan antara *strip base* dengan *shear stud* dan *shear stud* dengan *anchor head* digunakan las.

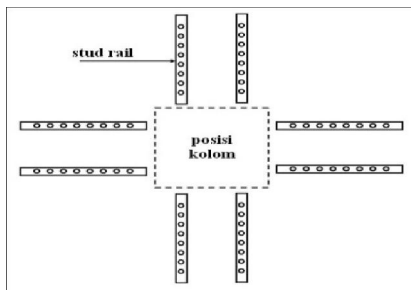


Gambar 3-5 Tampak samping design stud rail

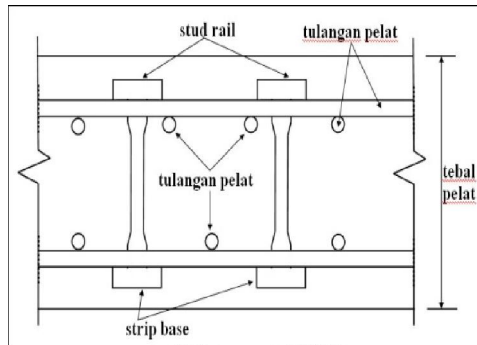


Gambar 3-6 Stud rail hasil fabrikasi

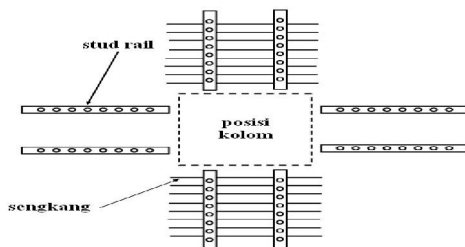
Benda Uji CRT (sebagai *control specimen*) dilengkapi dengan *stud rail* standar pada arah memanjang dan melintang. Benda Uji CRS dilengkapi dengan *stud rail* yang sama, ditambah dengan sengkang pada kedua sisi kolom.



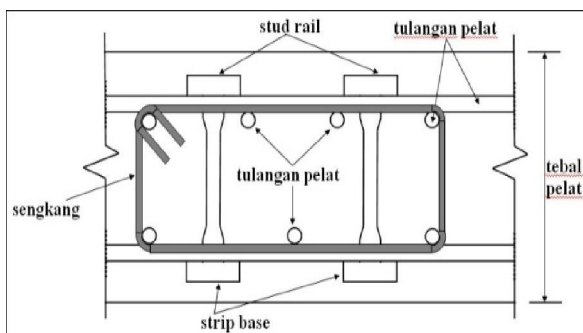
Gambar 3-7 Denah stud rail pada Benda Uji CRT



Gambar 3-8 Potongan stud rail pada Benda Uji CRT



Gambar 3-9 Denah stud rail dan sengkang pada Benda Uji CRS



Gambar 3-10 Potongan stud rail pada Benda Uji CRS

3.2 Instrumentasi

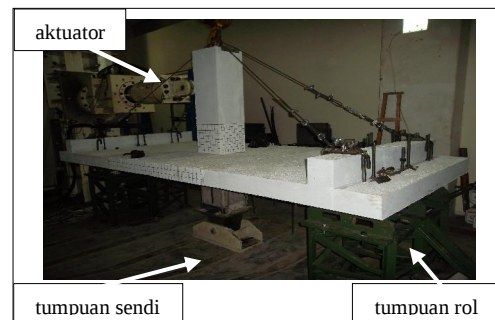
Instrumentasi yang digunakan terutama dimaksudkan untuk mengukur perpindahan dan regangan. Pengukuran dengan LVDT dilakukan untuk mendapatkan data perpindahan horizontal ujung atas kolom, perpindahan horizontal ujung

pelat, serta perpindahan vertikal dan horizontal tumpuan rol.

Pengukuran dengan *strain gauge* dilakukan untuk mendapatkan data regangan pada tulangan atas dan bawah pelat, *shear stud*, *strip base*, sengkang, serta permukaan beton di atas dan bawah pelat.

3.3 Set Up Pengujian

Posisi benda uji ditumpu oleh sendi pada ujung bawah kolom dan oleh rol pada ujung depan dan belakang pelat. Ujung atas kolom dan kedua sisi pelat dalam posisi bebas (tidak ditumpu).



Gambar 3-11 Struktur benda uji pada saat set-up pengujian

1.1. Beban gravitasi yang dimodelkan dengan blok-blok beton yang mewakili separuh dari berat sendiri pelat (akibat penggunaan skala 1:2), *superimposed dead load*, dan 30% beban hidup lantai dengan nilai total sekitar 5.390 kN/m^2 .



Gambar 3-12 Blok beton sebagai beban gravitasi pelat lantai

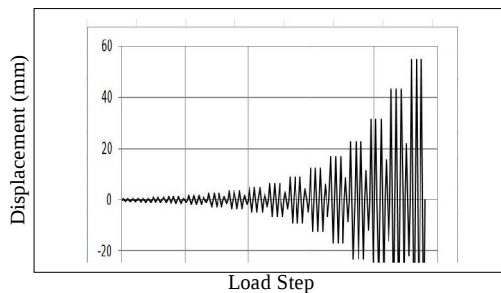
Untuk Benda Uji CRT, blok-blok beton dipasang pada kondisi semua tumpuan sudah terpasang, sehingga beban gravitasi terbagi antara kolom dan tumpuan rol pada ujung-ujung pelat. Untuk Benda Uji CRS blok-blok beton dipasang pada saat tumpuan rol belum terpasang sehingga seluruh beban gravitasi membebani kolom. Dengan pola pembebanan yang berbeda, pada Benda Uji CRT didapatkan *gravity shear ratio* (GSR, ratio dari tegangan geser akibat gravitasi pada penampang kritis pelat dengan kuat geser pada penampang tersebut) sebesar 7.8%, sedangkan pada Benda Uji

CRS didapatkan GSR sebesar 16%.

Set up actuator pada posisi netral (gaya dan perpindahan sama dengan nol) dilakukan dengan menempatkan ujung actuator tepat pada tepi kolom pada saat semua tumpuan maupun beban gravitasi sudah terpasang.

3.4 Beban Lateral

Beban lateral siklis dalam bentuk *displacement control* dilakukan dengan actuator mengikuti aturan pada ACI 374.1-05. Pembebanan dilakukan secara bertahap sampai dengan *drift ratio* 5.25%, dan pada setiap *drift ratio* dilakukan pembebanan dengan tiga *cycle*.



Gambar 3-13 Pola pembebanan lateral siklis

4. HASIL PENGUJIAN

Metoda pemasangan beban gravitasi menimbulkan perbedaan respon pada awal pengujian. Benda Uji CRS dengan beban gravitasi yang sepenuhnya menimbulkan momen negatif pada pelat mengalami retak awal (*initial crack*) pada pelat di sekitar kolom akibat terlampaunya momen retak (*cracking moment*) yang menurut SNI 2847-2002 sebesar

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}$$

(4-1)

dalam satuan N dan mm, di mana

f_r = modulus keruntuhan lentur beton

$$= 0.7 \sqrt{f'_c}$$

I_g = momen inerti penampang pelat

y_t = jarak dari sumbu penampang bruto (dengan mengabaikan tulangan) ke serat tarik terluar

Sementara itu pada Benda Uji CRT tidak terjadi retak awal karena reaksi perletakan tumpuan rol

pada ujung-ujung pelat mengurangi momen negatif pelat sehingga momen retak tidak terlampaui.

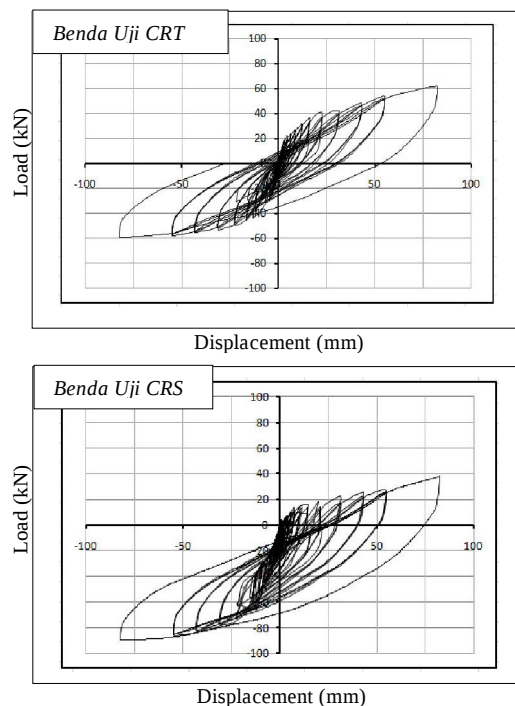


Gambar 4-1 Kondisi pada akhir pengujian

Selanjutnya pengujian dilakukan dengan beban lateral siklis sampai dengan *drift ratio* 5.25%. Pemberian beban lateral diberikan dengan kecepatan (*rate*) pembebanan yang sangat rendah untuk mencegah terjadinya efek gerak dinamik. Kondisi akhir struktur adalah seperti pada Gambar 4-1.

4.1 Hubungan Beban – Perpindahan

Hubungan beban-perpindahan untuk kedua benda uji, yang merupakan rekaman dari data actuator adalah seperti berikut.



Gambar 4-2 Kurva Histeresis pada Benda Uji CRT dan CRS

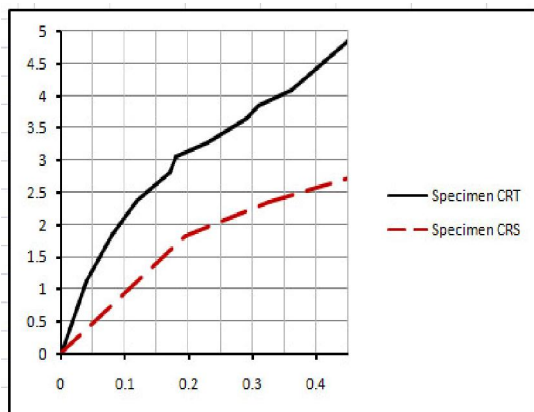
Benda Uji CRS menunjukkan gaya lateral tekan dan tarik yang tidak simetris akibat pola retak awal yang juga tidak simetris.

4.2 Drift Capacity

Kedua benda uji menunjukkan *drift capacity* yang baik, ditunjukkan dengan belum adanya penurunan kekuatan sampai dengan akhir pengujian yaitu *drift ratio* 5.25%.

4.3 Kekakuan

Kekakuan awal diperhitungkan sebagai ratio antara gaya dan perpindahan pada awal bekerjanya beban lateral (pada sub step beban lateral yang pertama). Karena dimensi dan material yang relatif seragam, maka perbedaan kekakuan dapat disebabkan oleh detail tulangan dan/atau retakan awal pelat akibat bekerjanya beban gravitasi (dalam hal ini besaran beban gravitasi dinyatakan dengan *gravity shear ratio*). Perbandingan kekakuan awal antar benda uji dinyatakan dalam gambar berikut.

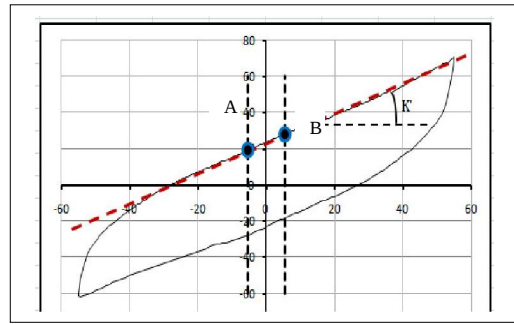


Gambar 4-3 Kondisi kekakuan awal Benda Uji CRT dan CRS

Kekakuan pada *drift ratio* 3.5% dihitung berdasarkan hubungan gaya-perpindahan pada kondisi perpindahan mendekati nol, yaitu kemiringan kurva histeresis pada interval perpindahan -0.35% sampai +0.35% (titik A dengan displacement -5.495 mm sampai B dengan displacement +5.495 mm) seperti ditunjukkan pada Gambar 4-4. Perbandingan nilai kekakuan tersebut dengan kekakuan awal masing-masing benda uji adalah seperti pada tabel berikut.

Tabel 4-1 Kekakuan pada drift ratio 3.5%

BENDA UJI	KEKAKUAN AWAL	KEKAKUAN PADA DRIFT RATIO 3.5%	RATIO K'/K_0
	K_0 (kN/mm)	K' (kN/mm)	
CRT	29.175	0.711	2.4
CRS	9.412	0.743	7.9



Gambar 4-4. Kekakuan pada drift ratio 3.5% (K')

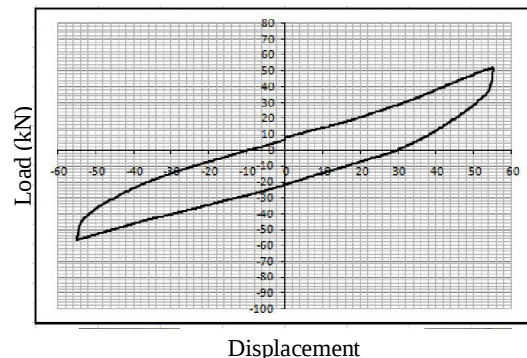
4.4 Disipasi Energi

Salah satu kelayakan struktur (*acceptance criteria*) berdasarkan ACI 374.1-05 adalah besaran disipasi energi. Perbandingan disipasi energi antara kedua benda uji adalah sebagai berikut.

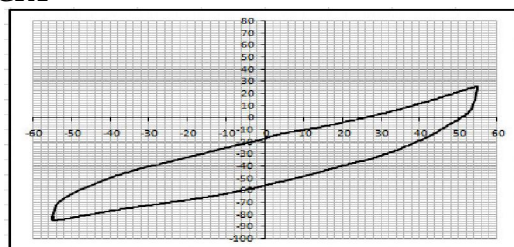
Tabel 2.1 Perbandingan disipasi energi pada cycle ketiga drift ratio 3.5%

BENDA UJI	DISIPASI ENERGI (kN.mm)	PERBANDINGAN RELATIF TERHADAP BENDA UJI CRT (%)
CRT	2596	100.0
CRS	3364	129.6

Dalam hal ini disipasi energi dihitung dari luasan kurva histeresis cycle ketiga pada *drift ratio* 3.5%.



Gambar 4-5 Kurva histeresis cycle ke 3 pada drift ratio 3.5% untuk perhitungan disipasi energi benda uji CRT



Gambar 4-6 Kurva histeresis cycle ke 3 pada drift ratio 3.5% untuk perhitungan disipasi energi benda uji CRS

5. DISKUSI DAN KESIMPULAN

Benda uji CRT dan CRS mempunyai dua perbedaan, yaitu detail tulangan geser yang berbeda dan *gravity shear ratio* yang juga berbeda. Dalam kondisi demikian, sebenarnya tidak dapat dilihat secara langsung perbedaan kinerja benda uji akibat perbedaan detail tulangan geser. Namun demikian, hasil penelitian terdahulu menyebutkan bahwa beban gravitasi yang besar menyebabkan penurunan momen inerti efektif pelat dan struktur flat slab. Dengan demikian, apabila struktur dengan beban gravitasi besar berperilaku lebih baik daripada struktur dengan beban gravitasi yang lebih kecil seperti dalam kasus penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa detail struktur tersebut menghasilkan perilaku yang lebih baik. Secara khusus dapat diambil kesimpulan yang mencakup beberapa hal.

a. Drift Capacity

ACI 374.1-05 mensyaratkan bahwa pengujian harus dilakukan minimal sampai dengan *drift ratio* 3.5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sampai dengan *drift ratio* 5.25% kedua benda uji masih belum menunjukkan penurunan yang berarti dalam hal puncak kurva histeresis. Hal tersebut menunjukkan bahwa kedua benda uji memiliki *drift capacity* yang baik.

b. Kekakuan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa Benda Uji CRT mempunyai kekakuan awal (*initial stiffness*) yang lebih besar. Hal tersebut sejalan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa beban gravitasi besar yang menyebabkan retakan awal akan mengakibatkan penurunan kekakuan awal struktur. Pada *drift ratio* 3.5%, Benda Uji CRS mempunyai kekakuan yang lebih besar. Hal tersebut menunjukkan Benda Uji CRT mengalami penurunan kekakuan (*stiffness degradation*) yang lebih besar. Apabila dikaitkan dengan syarat pada ACI 374.1-05, dapat dikatakan bahwa Benda Uji CRS memenuhi syarat penurunan kekakuan (memiliki ratio kekakuan pada *drift ratio* 3.5% terhadap kekakuan awal sebesar 7.9% atau lebih besar dari syarat sebesar 5%).

c. Disipasi energi

Persyaratan disipasi energi yang diatur dalam ACI 374.1-05 berkaitan dengan besaran energi yang diukur pada cycle ketiga *drift ratio* 3.5%. Hasil perhitungan luasan kurva histeresis pada kondisi tersebut menunjukkan bahwa Benda Uji CRS mampu menyerap energi 29.6% lebih banyak dibanding Benda Uji CRT.

Dari uraian di atas secara umum dapat disimpulkan lebih jauh bahwa penggunaan sengkang sebagai pelengkap tulangan geser meningkatkan perilaku hubungan pelat-kolom struktur *flat-plate*.

6. PENELITIAN LANJUTAN

Beberapa hal yang perlu dicatat dari penelitian ini adalah

- Pemasangan sengkang cukup susah untuk dilakukan karena terhalang tulangan pelat dua arah yang sudah terpasang.
- Bentuk/ukuran pelat yang digunakan mengakibatkan momen pelat akibat beban gravitasi memiliki nilai yang sangat berbeda pada arah memanjang dan melintang pelat. Hal tersebut sangat mungkin mempengaruhi perilaku hubungan pelat-kolom dalam merespon beban gravitasi dan beban lateral siklis.
- Beban gravitasi yang digunakan masih kecil (diukur dari besarnya *gravity shear ratio* pada penampang kritis pelat), sementara hasil-hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa besaran *gravity shear ratio* sangat mempengaruhi kinerja hubungan pelat-kolom.

Dari beberapa evaluasi di atas, perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan detail yang lebih mudah dilaksanakan dan dimensi benda uji yang dapat menjelaskan pengaruh momen bi-aksial pelat yang lebih seimbang dan *gravity shear ratio* yang lebih besar.

7. DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 374, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary* (ACI 374.1-05)
2. ACI Committee 318, 2008, *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-08) AND *Commentary*
3. Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung* (SNI 03-2847-2002)
4. Han et al., 2009, *Stiffness Reduction Factor for Flat Slab Structures under Lateral Loads*, Journal of Structural Engineering, ASCE
5. Robertson et al., 2002, *Cyclic testing of Slab-Column Connections with Shear Reinforcement*, ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 5, halaman 605-613.