

Studi Eksperimental Perilaku Hubungan Pelat-Kolom terhadap Kombinasi Beban Gravitasi dan Lateral Siklis

Riawan Gunadi

Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Jl. Gegerkalong Hilir Ciwaruga, Bandung Barat
E-mail: gunadi_rg@yahoo.com

Bambang Budiono

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung, E-mail: b.budiono@lapi.itb.ac.id

Iswandi Imran

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung, E-mail: iswandiimran@gmail.com

Ananta Sofwan

Kelompok Keahlian Rekayasa Struktur, Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10 Bandung, E-mail: ananta@atrya.co.id

Abstrak

Struktur flat slab digunakan secara luas pada bangunan gedung karena beberapa kelebihan dalam aspek struktural maupun arsitektural. Disamping kelebihan tersebut, terdapat kelemahan yang mengakibatkan perilaku yang tidak ideal pada saat struktur menerima kombinasi beban gravitasi dan lateral. Kelemahan tersebut terdapat pada hubungan pelat-kolom, dimana tegangan lentur dan geser terakumulasi sebagai resultan dari beban gravitasi dan momen tak seimbang yang disebabkan oleh beban lateral seperti halnya gempa. Untuk mengatasi masalah tersebut, terutama di daerah gempa potensial seperti halnya sebagian besar wilayah Indonesia, perlu dilakukan penelitian untuk meningkatkan perilaku hubungan pelat-kolom. Tulisan ini melaporkan hasil penelitian yang dilaksanakan dengan tiga benda uji berskala 1:2 dari model hubungan pelat-kolom interior yang dirancang dengan ukuran, material, dan detail yang sama, kecuali detail tulangan gesernya. Benda uji pertama, yang digunakan sebagai spesimen kontrol, menggunakan stud rail standar yang dirancang dengan mengacu standar ACI. Benda uji kedua dan ketiga menggunakan stud rail dengan modifikasi detail. Semua benda uji diuji dengan beban gravitasi konstan yang dimodelkan dengan blok-blok beton dan simpangan lateral siklis yang mencakup respon elastis sampai inelastis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa modifikasi stud rail secara signifikan meningkatkan perilaku hubungan pelat-kolom khususnya dalam hal kekakuan dan disipasi energi.

Kata-kata Kunci: Hubungan pelat-kolom, stud rail, beban gravitasi, beban lateral.

Abstract

Flat slab structures are widely used for buildings because of its advantages both in structural and architectural aspects. Besides its advantages, there is a weakness leads to a poor structural behavior under combined gravity and lateral load. The weakness is concentrated in slab-column connections, where flexural and shear stresses are accumulated as a resultant of gravity load and unbalanced moment caused by lateral load such as earthquake. To solve the problem, especially in potential earthquake zone such as most of the Indonesia region, it is necessary to conduct researches to improve slab-column connections behavior. This paper reports the result of research conducted using three specimens of half scaled interior slab-column connection sub-assemblages designed using simillar dimensions, materials, and details, except the shear reinforcement details. The first specimen, constructed as a control specimen, used standard stud rails designed to comply with ACI codes. The second and third specimens used modified stud rail details. All specimens were subjected to a constant gravity load simulated by concrete blocks and cyclic lateral displacements ranging from elastic to inelastic responses. The experimental results show that modification of the stud rails significantly improves the specimen behavior especially the stiffness and energy dissipation.

Keywords: Slab-column connections, stud rail, gravity load, lateral load.

1. Pendahuluan

Struktur flat slab, yakni sistem struktur gedung dengan elemen utama berupa kolom dan pelat (tanpa balok), banyak dipakai karena beberapa kelebihan. Kelebihan flat slab meliputi acuan-perancah yang sederhana dan ekonomis; tinggi lantai yang lebih rendah sehingga mengurangi efek beban lateral dan pekerjaan *mechanical/electrical*; serta peluang penambahan jumlah lantai pada daerah dengan batasan tinggi bangunan yang ketat (Robertson et al., 2002). Disamping itu, tidak adanya sudut-sudut yang tajam antara pelat dan balok membuat struktur lebih tahan terhadap kebakaran (Erberick dan Elnashai, 2003).

Disamping kelebihan di atas, flat slab memiliki kelemahan terutama jika dibangun di daerah gempa. Perilaku dan metoda design flat slab terhadap beban gravitasi telah dikenal dengan baik, tetapi terhadap beban lateral beberapa masalah belum dapat dirumuskan dengan pasti (Dovich and Wight, 2005). Salah satu fakta yang tercatat adalah kejadian gempa di Mexico City pada tahun 1985, di mana 91 buah gedung waffle slab dan flat slab runtuh dan 44 buah mengalami rusak berat (Megally dan Ghali, 2000). Beberapa penelitian menyebutkan adanya kelemahan pada hubungan pelat-kolom (*slab-column connection*). Penelitian Robertson et al. (2002) dengan beban lateral cyclic menunjukkan terjadinya kerusakan pada daerah hubungan pelat-kolom akibat akumulasi tegangan lentur dan geser yang disebabkan oleh transfer momen takimbang (*unbalanced moment*) antara pelat dan kolom. Menurut Pan dan Moehle (1989), akumulasi tegangan tersebut mengakibatkan struktur memiliki daktilitas rendah dan dapat memicu keruntuhan struktur yang getas.

Kelemahan tersebut mengakibatkan ditetapkannya pembatasan penggunaan flat slab. ASCE 7-05 menetapkan batasan tinggi maksimum untuk struktur flat slab (dalam hal ini belum ada pembatasan dalam SNI). SNI 03-2847-2002 dan ACI 318-08 memasukkan flat slab ke dalam Struktur Rangka Pemikul Momen Menengah (*Intermediate Moment Frame*) dengan konsekuensi flat slab sebagai *single system* hanya dapat digunakan pada wilayah gempa ringan atau sedang. ACI 318-08 mengizinkan penggunaan struktur flat slab pada semua wilayah gempa jika dibangun sebagai sistem ganda/*dual system*, yaitu struktur flat slab sebagai *Intermediate Moment Frame* dipadu dengan dinding beton struktural atau dengan *bracing* (pengecualian ini juga belum diatur dalam SNI).

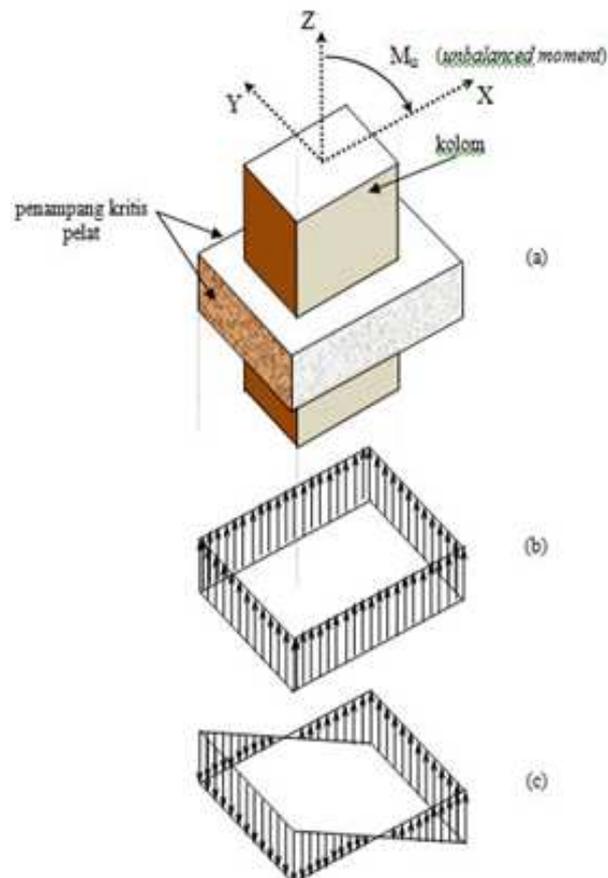
Uraian tentang kelebihan dan kelemahan struktur flat slab tersebut di atas menggambarkan pentingnya upaya untuk meningkatkan perilaku struktur flat-slab, khususnya hubungan pelat-kolom, agar dapat berfungsi dengan baik dalam memikul kombinasi beban gravitasi dan lateral terutama akibat gempa.

2. Hubungan Pelat-Kolom

Menurut ACI 352.1R-89, hubungan pelat-kolom mencakup daerah joint dan bagian dari pelat yang berbatasan dengan kolom. Transfer beban gravitasi antara pelat dan kolom menimbulkan tegangan geser pada pelat di sekeliling kolom yang disebut dengan penampang kritis. ACI 352.1R-89 menyebutkan bahwa posisi penampang kritis adalah pada jarak yang tidak lebih dari setengah tebal efektif pelat ($d/2$) dari muka kolom atau dari tepi luar tulangan geser jika digunakan tulangan geser pada pelat. Tegangan pada penampang kritis akibat beban gravitasi dan momen takimbang adalah seperti pada **Gambar 1** di bawah.

Untuk hubungan pelat-kolom yang menerima beban gravitasi V_u dan *un-balanced* momen M_u uni aksial, besaran tegangan geser menurut ACI 421.1R-99 pada penampang kritis seperti pada gambar di atas dimodifikasi menjadi

$$v_u = \frac{V_u}{A_c} + \frac{\gamma_v M_u x}{J} \quad (1)$$



Sumber: Budiono et al. (2012)

Gambar 1. Penampang kritis (a), tegangan akibat beban gravitasi (b) dan tegangan akibat transfer *unbalanced moment* (c)

Dimana:

v_u : tegangan geser total pada penampang kritis (MPa)

A_c : luas penampang kritis (mm²)

γ : fraksi dari *un-balanced* moment yang ditransfer sebagai tegangan geser eksentris

$$= 1 - \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \sqrt{\frac{l_x}{l_y}}}$$

l_x : panjang sisi penampang kritis pada arah beban lateral (mm)

l_y : panjang sisi penampang kritis pada arah tegak lurus beban lateral (mm)

X : jarak pada arah beban lateral dari titik-titik yang ditinjau diukur dari pusat penampang kritis (mm)

J : property penampang kritis yang analog dengan momen inersia polar (mm⁴)

$$= d \left[\frac{l_x^3}{6} + \frac{l_y l_x^2}{2} \right] + \frac{l_x d^3}{6}$$

d : tinggi efektif penampang pelat (mm)

Suku pertama pada ruas kanan **Persamaan 1** menghasilkan tegangan geser akibat beban gravitasi yang menyumbang *punching shear* yang berpotensi menimbulkan keruntuhan getas pada hubungan pelat-kolom. Dalam bentuk lain, besaran beban gravitasi dinyatakan dengan *gravity shear ratio* (GSR), yaitu ratio antara tegangan geser akibat beban gravitasi pada penampang kritis (dengan mengabaikan adanya tulangan geser) terhadap tegangan nominal penampang kritis, atau

$$GSR = \frac{v_{ug}}{v_n} = \frac{V_u/A_c}{v_n} \quad (2)$$

dimana v_n adalah tegangan geser nominal penampang kritis yang disumbangkan oleh beton seperti yang didefinisikan dalam SNI 03-2847-2002.

Pengaruh beban gravitasi pelat yang dinyatakan dalam bentuk *punching shear* ataupun *gravity shear ratio* merupakan faktor yang dapat memperburuk perilaku hubungan pelat-kolom dalam menerima beban lateral siklis seperti halnya gempa. Pengujian terhadap hubungan pelat-kolom dengan kombinasi beban gravitasi dan lateral siklis menunjukkan bahwa beban gravitasi yang besar secara signifikan mengurangi kapasitas untuk mentransfer *un-balanced moment* (Robertson and Durrani, 1992), mengurangi *lateral drift capacity* (Robertson and Durrani, 1992; Megally

and Ghali, 2000; serta Robertson and Johnson, 2006), dan mengurangi kekakuan (Robertson and Durrani, 1992). Beban gravitasi yang besar juga mengakibatkan retak awal pada hubungan pelat-kolom sebelum beban lateral bekerja (Robertson et al., 2002). Retakan awal dapat mengurangi kekakuan awal (*initial stiffness*) dan dapat berkembang secara cepat serta memperbesar laju penurunan kekakuan pada saat beban lateral bekerja. Hubungan pelat-kolom dengan beban gravitasi yang sama mengalami laju penurunan kekakuan yang hampir sama. Pengujian dengan pengaruh beban gravitasi yang bervariasi menunjukkan bahwa semua benda uji hubungan pelat-kolom mengalami penurunan kekakuan dengan kecenderungan yang sama sampai dengan *drift ratio* 1%, dan setelah itu benda uji dengan beban gravitasi yang lebih tinggi mengalami penurunan kekakuan yang berlangsung dengan sangat cepat (Du, 1993).

Upaya untuk meningkatkan perilaku hubungan pelat-kolom telah dilakukan dengan menggunakan *drop panel*, *shear capital*, *column capital*, sengkang tertutup, sengkang terbuka, *stirrup cage*, dan *shear stud*. *Drop panel*, *shear capital*, dan *shear stud* secara signifikan dapat meningkatkan kuat geser (*punching strength*) hubungan pelat-kolom, tetapi *drop panel* dan *shear capital* tidak mampu meningkatkan daktilitas hubungan pelat-kolom. Di samping itu *shear capital* juga tidak mampu meningkatkan *punching strength* jika terdapat transfer momen yang besar dari kolom ke pelat. Fakta-fakta tersebut membuktikan bahwa *shear stud* bekerja lebih efektif dibanding *drop panel* maupun *shear capital* (Megally dan Ghali, 2000) dan lebih efektif pula dibanding *stirrup cage* (Lips and Muttoni, 2010). Keunggulan *shear stud* dibanding sengkang juga dinyatakan dalam ACI 421.1R-99, yang menjelaskan bahwa angkur mekanis pada *shear stud* bekerja lebih efektif dari pada sengkang.

Shear stud yang dirangkai dalam bentuk *stud rail* kebanyakan digunakan dalam konfigurasi orthogonal atau sirkular (Broms, 2007). Dengan menggunakan *stud rail*, tegangan geser pada hubungan pelat-kolom akan diperkuat oleh *shear stud*, sementara penampang kritis akan melebar ke luar pada jarak yang diasumsikan sejauh $d/2$ dari ujung luar *stud rail*. Dengan demikian luas penampang kritis A_c dan momen inersia polar J akan membesar sehingga tegangan geser v_u yang dirumuskan dalam **Persamaan 1** dan GSR pada **Persamaan 2** akan mengecil. Dalam hal ini Ritchie et al. (2006) merekomendasikan formula berikut untuk menghitung momen inersia polar penampang kritis J dengan memperhitungkan keberadaan *stud rail* sebagai berikut.

$$J = \frac{d}{3} \Sigma [l_{ij} (x_i^2 + x_i x_j + x_j^2)] \quad (3)$$

dimana l_{ij} adalah panjang sisi poligon penampang kritis, sedangkan x_i dan x_j adalah koordinat ujung-ujung sisi poligon (pada arah beban lateral) dengan pusat koordinat pada titik berat penampang kritis.

Meskipun penggunaan *stud rail* memberikan hasil yang baik tetapi masih terdapat persoalan yang belum sepenuhnya terpecahkan terutama berkaitan dengan kekakuan awal yang kecil khususnya apabila terjadi retakan awal, laju penurunan kekakuan yang relatif tinggi, disipasi energi yang relatif kecil, dan resiko kerusakan getas akibat *punching shear*.

3. Program Pengujian

Studi ini diarahkan pada upaya peningkatan perilaku hubungan pelat-kolom dengan melakukan modifikasi terhadap detail dan konfigurasi *stud rail*. Kajian terhadap perilaku hubungan pelat-kolom terhadap kombinasi beban gravitasi dan lateral siklis dilakukan dengan menganalisis hasil uji eksperimental terhadap tiga benda uji hubungan pelat-kolom dimana salah satu benda uji digunakan sebagai pembanding (spesimen kontrol). Agar sesuai dengan kapasitas peralatan laboratorium, pengujian dilakukan dengan skala 1:2 (*half scale*). Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban gravitasi konstan untuk memodelkan beban hidup dan beban mati pelat, serta beban lateral siklis untuk memodelkan pengaruh gempa (Budiono et al., 2012).

3.1 Benda uji

Spesimen atau benda uji yang digunakan merupakan model hubungan pelat-kolom interior dari struktur *flat plate*. Posisi kedua ujung kolom benda uji 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. Tiga benda uji yang digunakan, yang selanjutnya disebut Benda Uji CRT (*Cross Type stud rails*), CRS (*Cross type stud rails plus Stirrup*), dan ISR (*Integrated Stud Rails*) memiliki perbedaan pada detail tulangan geser pelat yang digunakan.

Seluruh benda uji berukuran seragam, dengan ukuran pelat lebar 1500 mm, panjang 3000 mm, dan tebal 120 mm; dan kolom dengan sisi penampang 300 mm dan tinggi 1570 mm. Kuat tekan beton (f'_c) untuk semua benda uji adalah seperti pada **Tabel 1**, sedangkan hasil uji material tulangan adalah seperti pada **Tabel 2**.

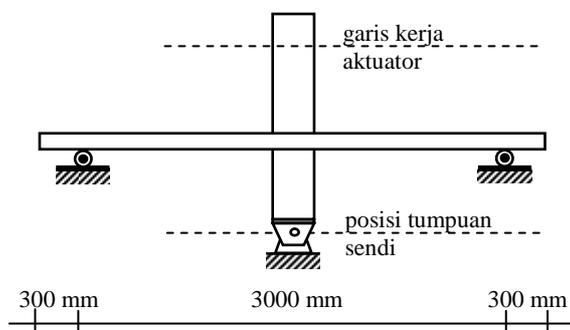
Tabel 1. Kuat tekan beton untuk semua benda uji

| No. | Benda Uji | f'_c (MPa) |
|-----|-----------|--------------|
| 1 | CRT | 46.21 |
| 2 | CRS | 46.16 |
| 3 | ISR | 46.17 |

Tabel 2. Hasil uji material tulangan

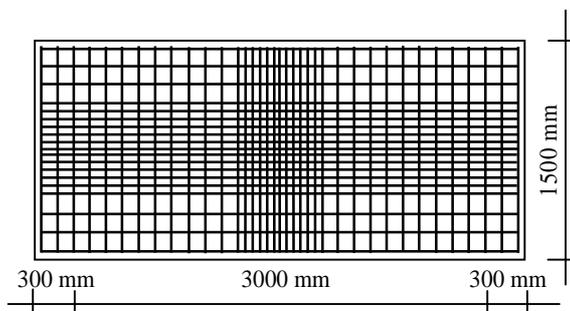
| Posisi | Diameter (mm) | Tegangan leleh (MPa) |
|-------------------|---------------|----------------------|
| Tulangan kolom | 13.84 | 332.4 |
| Sengkang kolom | 5.94 | 306.7 |
| Tulangan pelat | 7.96 | 321.5 |
| Sengkang pelat | 3.90 | 280.5 |
| <i>Shear stud</i> | 7.68 | 701.6 |

Pada arah memanjang (searah dengan beban lateral) tulangan atas dan bawah pelat masing-masing adalah 19 buah dan 10 buah sedangkan spasi sengkang pelat khusus untuk Benda Uji CRS adalah 40 mm. Tulangan memanjang kolom adalah 12 buah, sedangkan spasi sengkang kolom adalah 50 mm. Spasi untuk *shear stud* pada arah orthogonal untuk semua benda uji adalah 40 mm sedangkan pada arah diagonal untuk Benda Uji ISR adalah 57 mm.



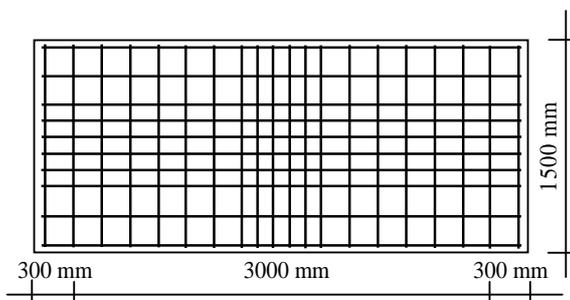
Sumber: Budiono, et al (2012)

Gambar 2. Sistem struktur tipikal benda uji



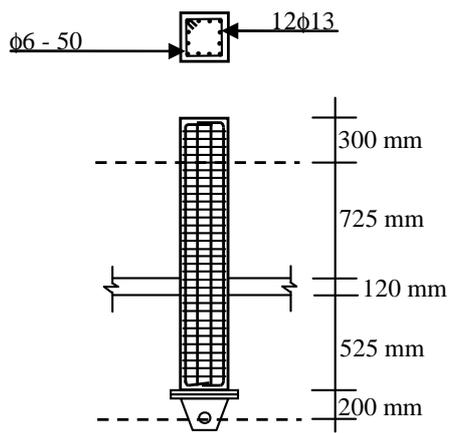
Sumber: Budiono, et al (2012)

Gambar 3. Tulangan atas pelat



Sumber: Budiono et al. (2012)

Gambar 4. Tulangan bawah pelat



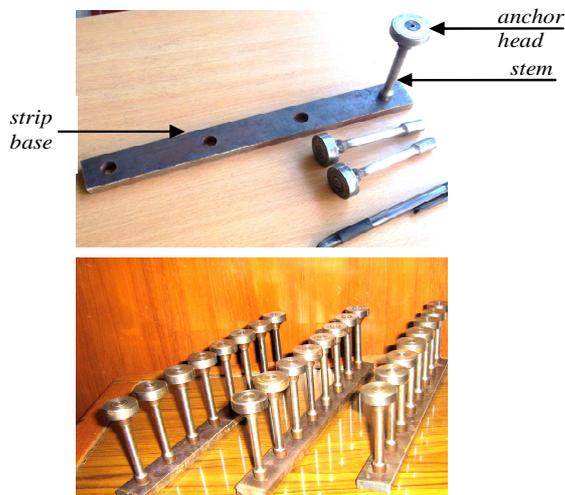
Sumber: Budiono, et al (2012)

Gambar 5. Tulangan kolom



Gambar 6. Benda uji hasil pengecoran

Perbedaan antar benda uji terletak pada detail tulangan geser (*stud rail*). *Stud rail* yang digunakan dibuat dari besi as diameter 12 mm yang dibentuk menjadi *shear stud/stem* diameter 7.68 mm, dirangkai dengan *strip base* tebal 10 mm dan lebar 30 mm.



Sumber : Budiono et al. (2012)

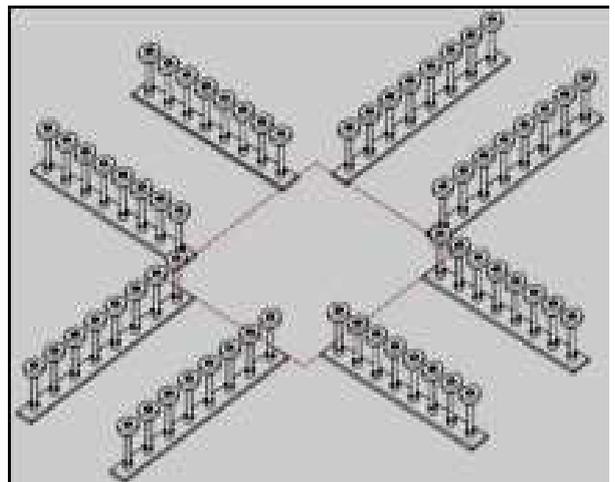
Gambar 7. Stud rail hasil fabrikasi

Anchor head dibuat dari besi as dengan diameter 30 mm yang dipotong membentuk tebal 10 mm. Untuk sambungan antara *strip base* dengan *stem* dan *stem* dengan *anchor head* digunakan las.

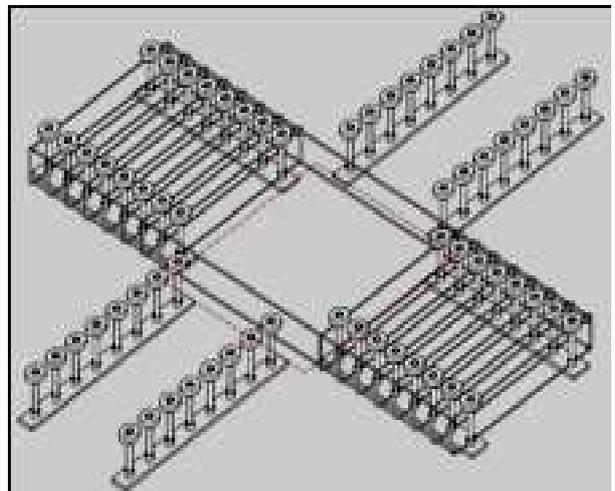
Benda Uji CRT (*Cross Type stud rails*) sebagai specimen kontrol dilengkapi dengan *stud rail* standar pada arah orthogonal seperti pada **Gambar 8**.

Benda Uji CRS (*Cross type stud rails plus Stirrup*) dilengkapi dengan *stud rail* yang sama, ditambah sengkang pada pelat di kedua sisi kolom seperti pada **Gambar 9**.

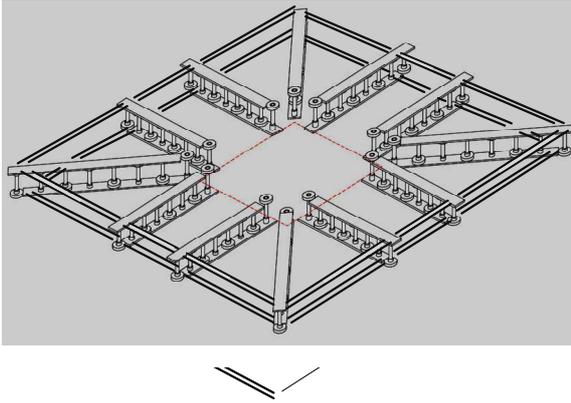
Benda Uji ISR (*Integrated Stud Rails*) dilengkapi dengan *stud rail* pada arah orthogonal dan diagonal. *Stud rail* dipasang secara *bottom-up* dan *top-down* sehingga terdapat *strip base* pada bagian bawah dan atas. *Stud rail* kemudian dirangkai masing-masing pada bagian *strip base* bawah dan atas dengan menggunakan pelat strip lebar 15 mm dan tebal 8mm seperti pada **Gambar 10**.



Gambar 8. Konfigurasi stud rail pada Benda Uji CRT



Gambar 9. Konfigurasi stud rail pada Benda Uji CRS



Gambar 10. Konfigurasi stud rail pada benda uji ISR



Gambar 11. Blok beton sebagai beban gravitasi pada pelat lantai

4. Instrumentasi

Pengukuran perpindahan (*displacement*) dilakukan dengan menggunakan LVDT (*Linear Voltage Displacement Transducer*) yang dipasang pada beberapa titik sesuai dengan tujuan pengukuran yaitu

- Pada posisi aktuator untuk mengukur perpindahan pada ujung atas kolom untuk mendapatkan hubungan antara gaya dan perpindahan lateral
- Posisi tumpuan rol untuk mengontrol agar perpindahan (pada arah beban lateral, ke arah samping, dan pada arah vertikal) pada tumpuan rol bernilai kecil dan tidak berpengaruh signifikan terhadap ketelitian pengujian

Pengukuran regangan dilakukan dengan pemasangan *strain gauges* pada permukaan pelat beton, tulangan lentur pelat, serta *stud rail* (pada bagian *stem*, *strip base*, sengkang pelat, dan pelat penghubung *stud rail*).

5. Beban Gravitasi Pelat

Beban gravitasi yang digunakan meliputi separuh dari berat sendiri pelat (akibat penggunaan skala 1:2) sebesar 2.822 KN/m², *superimposed dead load* sebesar 2.148 KN/m², dan 30% beban hidup lantai sebesar 0.735 KN/m². Beban gravitasi total sebesar 5.705 kN/m² itu dimodelkan dengan blok-blok beton yang digantungkan pada pelat seperti pada Gambar 11.

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 dan ISR blok-blok beton dipasang pada saat tumpuan rol belum terpasang sehingga seluruh beban gravitasi membebani kolom. Dengan pola pembebanan yang berbeda serta variasi pada berat benda uji, didapatkan *gravity shear ratio* (GSR atau ratio dari tegangan geser akibat gravitasi pada penampang kritis pelat dengan kuat geser nominal pada penampang tersebut dengan mengabaikan tulangan) seperti pada Tabel 3.

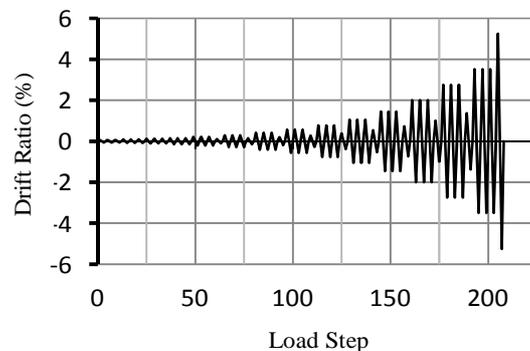
Tabel 3. Gravity shear ratio (GSR)

| Benda Uji | V_u (KN) | A_c (mm ²) | V_{ug} (MPa) | V_n (MPa) | GSR (%) |
|-----------|------------|--------------------------|----------------|-------------|---------|
| CRT | 23.60 | 152497.2 | 0.150 | 2.258 | 6.86 |
| CRS | 42.86 | 152497.2 | 0.281 | 2.257 | 12.46 |
| ISR | 43.84 | 152497.2 | 0.287 | 2.257 | 12.74 |

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

6. Beban Lateral Siklis

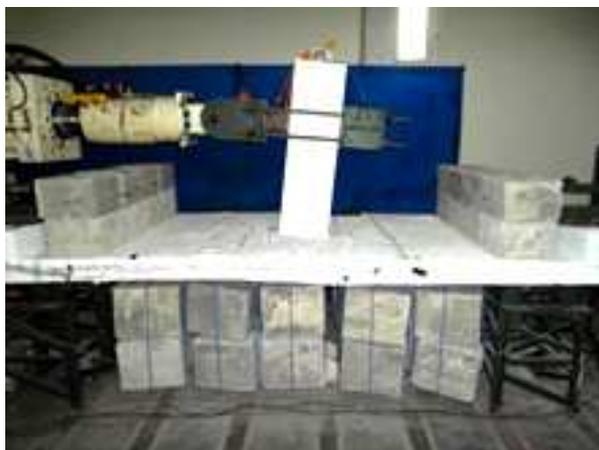
Beban lateral siklis dalam bentuk *displacement control* dilakukan dengan aktuator mengikuti aturan pada ACI 374.1-05. Pembebanan dilakukan secara bertahap dimulai dari kondisi elastis sebelum tulangan lentur pelat leleh, dalam hal ini dimulai dari drift ratio 0.6%. Pembebanan dilakukan sampai kondisi inelastis, dalam hal ini sampai dengan *drift ratio* 5.25% seperti ditunjukkan pada Gambar 12 sampai dengan Gambar 14 (Budiono et al., 2012).



Gambar 12. Pola pembebanan lateral siklis



Gambar 13. Kondisi benda uji pada awal pengujian (*drift ratio 0%*)



Gambar 14. Kondisi inelastis benda uji pada akhir pengujian (*drift ratio 5.25%*)

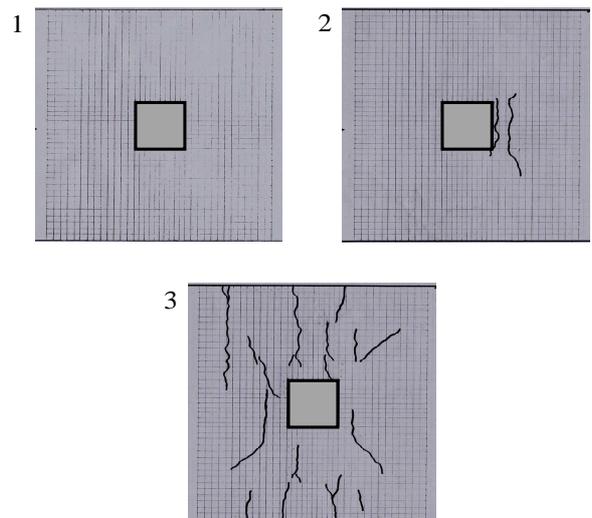
7. Hasil Pengujian

Perbedaan metoda pemasangan beban gravitasi menimbulkan perbedaan respon pada awal pengujian. Benda Uji CRS dan ISR dengan beban gravitasi yang sepenuhnya menimbulkan momen negatif pada pelat mengalami retak awal (*initial crack*) pada pelat di sekitar kolom akibat terlampauinya momen retak (*cracking moment*).

Sementara itu tidak terjadi retak awal pada hubungan pelat-kolom benda uji CRT karena reaksi tumpuan rol pada ujung-ujung pelat mengurangi momen negatif pada hubungan pelat kolom sehingga nilai momen negatif pelat pada hubungan pelat-kolom lebih kecil dari pada momen retak (*cracking moment*).

7.1 Pola retak

Sebelum beban lateral bekerja, atau pada saat benda uji hanya dipengaruhi oleh beban gravitasi, pola retak yang terjadi adalah seperti pada Gambar 15. Pada saat itu benda uji CRT tidak mengalami keretakan seperti halnya benda uji CRS dan ISR.

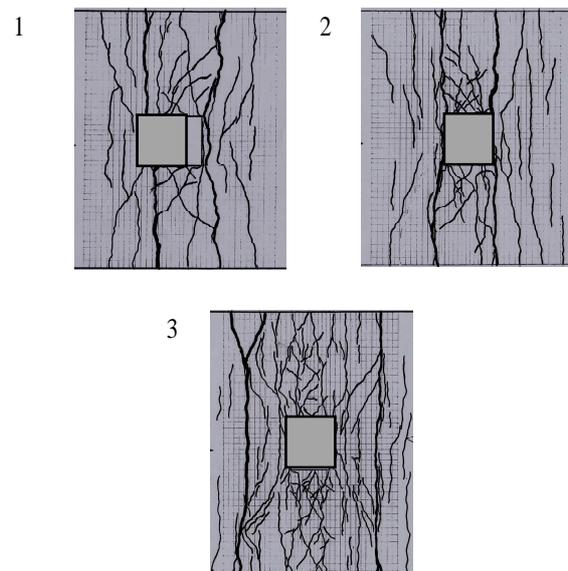


Sumber: Budiono et al. (2012)

Gambar 15. Kondisi retak awal (*drift ratio 0%*) pada benda uji CRT (1), CRS (2), ISR (3)

Pengujian dilanjutkan dengan beban lateral sampai dengan *drift ratio 5.25%* dengan *rate* pembebanan yang sangat rendah untuk menghindari efek beban dinamis. Pola retak pada akhir pengujian yaitu pada *drift ratio 5.25%* adalah seperti pada Gambar 16.

Dapat dilihat bahwa pada benda uji CRT dan CRS retak utama yang digambarkan dengan garis tebal terletak di dekat permukaan kolom sementara retak utama pada benda uji ISR terletak lebih jauh dari muka kolom yaitu di sekitar tepi luar *stud rail*.



Sumber: Budiono et al. (2012)

Gambar 16. Pola retak benda uji CRT (1), CRS (2), ISR (3) pada *drift ratio 5.25%*

7.2 Kurva histeretik

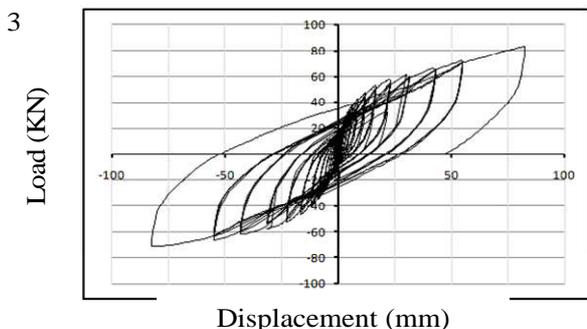
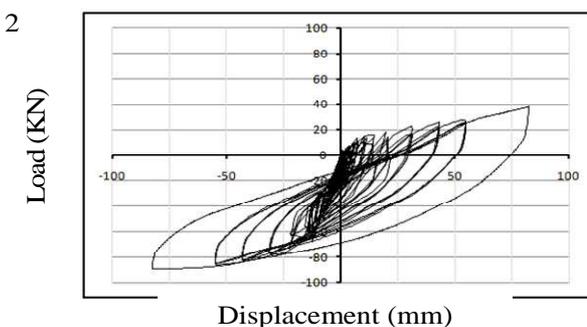
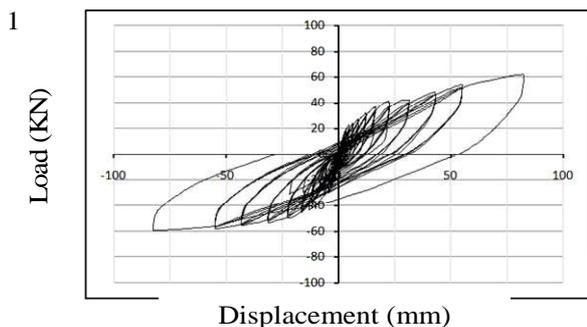
Hubungan antara beban lateral dengan *displacement* ujung atas kolom mulai dari kondisi elstatis sampai dengan akhir pengujian adalah seperti pada **Gambar 17**.

Hasil pengujian dalam bentuk hubungan beban-perpindahan tersebut selanjutnya akan digunakan dalam menganalisis perilaku hubungan pelat-kolom dalam kaitannya dengan kekakuan dan disipasi energi.

7.3 Kekakuan

Kekakuan hubungan pelat-kolom didefinisikan sebagai *peak to peak stiffness* (Robertson and Durrani, 1992; Han et al., 2009). Perhitungan kekakuan dilakukan berdasarkan kurva histeretik pada cycle ketiga untuk setiap nilai *drift ratio* seperti pada **Gambar 18** yang dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta X} \tag{4}$$



Gambar 17. Kurva histeretik benda uji CRT (1), CRS (2), dan ISR (3)

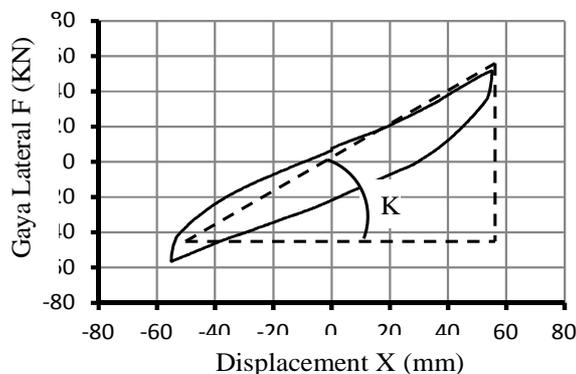
Dimana:

K : kekakuan lateral hubungan pelat kolom (KN/mm)

ΔF : selisih antara gaya lateral F pada kondisi *displacement* puncak positif dan negative (KN)

ΔX : selisih antara *displacement* puncak X arah positif dan negatif (mm)

Perhitungan kekakuan dilakukan pada cycle ketiga untuk setiap nilai *drift ratio*. Kekakuan awal (*initial stiffness*) diasumsikan sebagai *peak to peak stiffness* pada *drift ratio* 0.6%. Hasil perhitungan kekakuan selama pengujian untuk semua benda uji tercantum pada **Tabel 4**.



Gambar 18. Kurva histeretik dari cycle ketiga untuk perhitungan kekakuan (*peak to peak stiffness*) pada suatu nilai *drift ratio*

Tabel 4. Hasil perhitungan kekakuan untuk semua benda uji

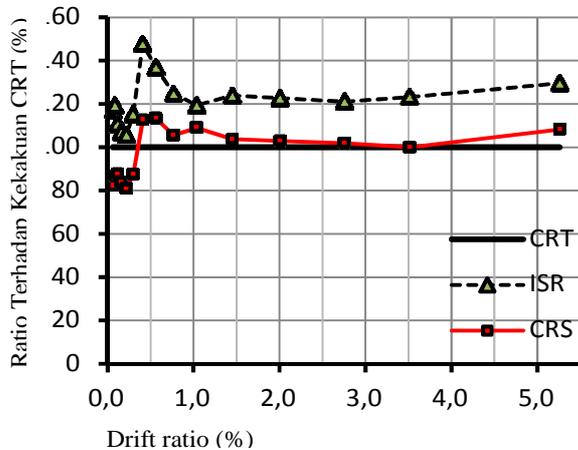
| Drift Ratio (%) | Kekakuan Lateral (KN/mm) | | |
|-----------------|--------------------------|-------|--------|
| | CRT | CRS | ISR |
| 0.06 | 9.923 | 8.149 | 11.616 |
| 0.08 | 8.486 | 7.352 | 10.135 |
| 0.11 | 8.178 | 7.179 | 9.056 |
| 0.16 | 7.526 | 6.326 | 8.050 |
| 0.22 | 6.319 | 5.106 | 6.685 |
| 0.30 | 5.032 | 4.409 | 5.805 |
| 0.41 | 3.412 | 3.842 | 5.043 |
| 0.56 | 3.057 | 3.469 | 4.187 |
| 0.77 | 2.744 | 2.895 | 3.425 |
| 1.04 | 2.345 | 2.557 | 2.800 |
| 1.45 | 1.837 | 1.905 | 2.276 |
| 2.01 | 1.437 | 1.479 | 1.763 |
| 2.76 | 1.150 | 1.171 | 1.393 |
| 3.51 | 0.975 | 0.975 | 1.202 |
| 5.26 | 0.708 | 0.767 | 0.918 |

Dari hasil perhitungan di atas dapat dilihat bahwa selama pengujian (pada semua nilai *drift ratio*) benda Uji ISR mempunyai nilai kekakuan lateral yang paling tinggi, sementara Benda Uji CRS mempunyai nilai kekakuan awal terkecil tetapi mulai dari *drift ratio* 0.41% sampai dengan akhir pengujian (*drift ratio* 5.25%) kekakuan Benda Uji CRS dapat melampaui kekakuan Benda Uji CRT sebagai spesimen kontrol. Perbandingan kekakuan Benda Uji CRS dan ISR relatif terhadap kekakuan Benda Uji CRT sebagai spesimen kontrol ditunjukkan pada **Gambar 19**. Dapat dibuktikan pula bahwa ketiga benda uji mempunyai *trend* penurunan kekakuan yang serupa tetapi Benda Uji CRS mengalami penurunan kekakuan yang relatif paling kecil seperti ditunjukkan pada **Gambar 20**.

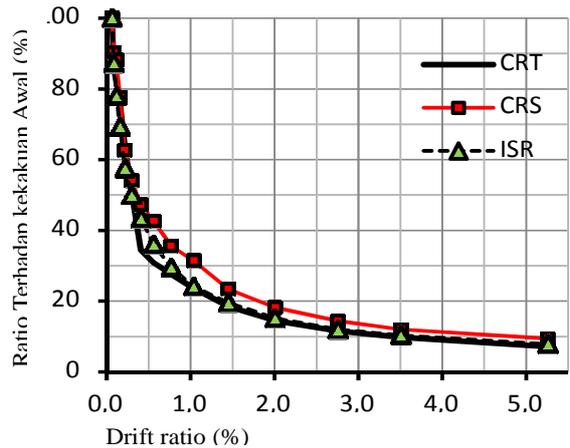
7.4 Disipasi energi

Energi yang diperhitungkan merupakan jumlah hasil perkalian gaya dengan *increment* perpindahan lateral pada kondisi non linear. Dalam hal ini perhitungan disipasi energi dilakukan dengan mengacu kepada ACI 374.1-05, yaitu dengan menghitung luasan kurva histeresis dari cycle ketiga pada setiap nilai *drift ratio*. Hasil perhitungan disipasi energi untuk semua benda uji adalah seperti pada **Tabel 5**.

Hasil perhitungan membuktikan bahwa disipasi energi terbesar terjadi pada benda Uji ISR sementara disipasi energi terkecil terjadi pada Benda Uji CRT seperti ditunjukkan pada **Gambar 21**. Perbandingan masing-masing disipasi energi dapat dilihat dengan lebih jelas pada **Gambar 22** di mana ditunjukkan bahwa ratio disipasi energi Benda Uji ISR relatif terhadap Benda Uji CRT mencapai nilai maksimum sebesar 199.4% pada *drift ratio* 1.06%, sementara ratio disipasi energi Benda Uji CRS relatif terhadap Benda Uji CRT mencapai nilai maksimum sebesar 186.8% pada *drift ratio* 0.06%.



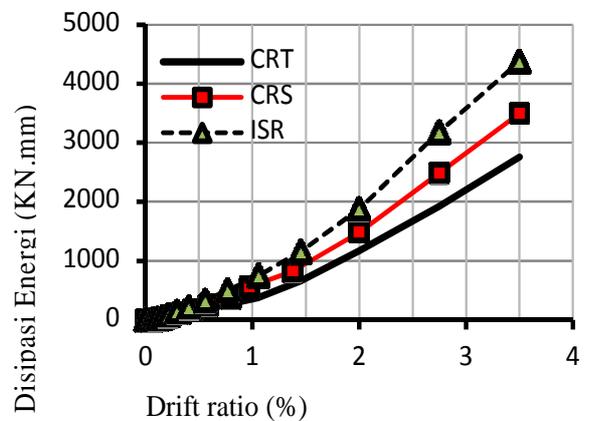
Gambar 19. Perbandingan kekakuan benda uji CRS dan ISR terhadap kekakuan benda uji CRT



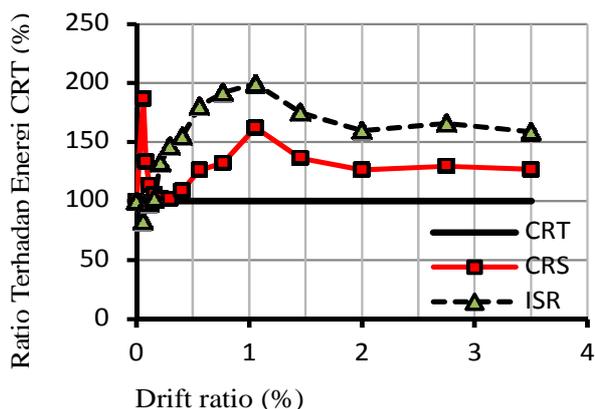
Gambar 20. *Trend* penurunan kekakuan pada semua benda uji

Tabel 5. Hasil perhitungan disipasi energi untuk semua benda uji

| Drift Ratio (%) | Disipasi Energi (KN.mm) | | |
|-----------------|-------------------------|----------|-----------|
| | CRT | CRS | ISR |
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.06 | 7.2585 | 13.55700 | 6.0251458 |
| 0.08 | 13.4477 | 17.99017 | 13.155085 |
| 0.11 | 23.5214 | 19.66095 | 23.074302 |
| 0.16 | 39.9214 | 46.03574 | 40.760865 |
| 0.22 | 60.8361 | 70.07339 | 80.572328 |
| 0.30 | 93.1649 | 109.4391 | 136.51745 |
| 0.41 | 139.1176 | 170.2386 | 215.37105 |
| 0.56 | 181.9299 | 243.7739 | 328.03769 |
| 0.77 | 261.0866 | 363.7858 | 501.08277 |
| 1.04 | 376.2638 | 556.56 | 750.39255 |
| 1.45 | 662.5602 | 821.5125 | 1159.5014 |
| 2.01 | 1176.4289 | 1486.237 | 1879.1442 |
| 2.76 | 1919.0510 | 2487.139 | 3182.2538 |
| 3.51 | 2758.0872 | 3500.769 | 4374.9795 |



Gambar 21. Disipasi energi pada setiap nilai *drift ratio*



Gambar 22. Perbandingan disipasi energi benda uji CRS dan ISR relatif terhadap disipasi energi benda uji CRT

8. Kesimpulan

Benda Uji CRT sebagai spesimen kontrol mempunyai dua perbedaan dibanding dua benda uji yang lain. Perbedaan pertama adalah efek beban gravitasi (*gravity shear ratio*) Benda Uji CRT yang mempunyai nilai terkecil dibandingkan dengan dua benda uji lainnya. Perbedaan kedua terdapat pada detail tulangan geser yang digunakan. Sementara itu Benda Uji CRS dan ISR berbeda pada detail tulangan gesernya. Beberapa hal yang perlu didiskusikan sebagai akibat dari perbedaan-perbedaan tersebut di atas adalah sebagai berikut

1. Sejalan dengan hasil penelitian Robertson et al. (2002), perbandingan hasil pengujian menunjukkan bahwa Benda Uji CRS mengalami retak awal akibat pengaruh gravitasi yang lebih besar sementara benda Uji CRT tidak mengalami retak awal. Akibat dari retak awal tersebut Benda Uji CRS mempunyai kekakuan awal yang lebih kecil.
2. Fakta yang berbeda terlihat pada perbandingan Benda Uji ISR dan CRT di mana meskipun pada Benda Uji ISR terjadi retak awal akibat pengaruh beban gravitasi yang lebih besar tetapi Benda Uji ISR mempunyai kekakuan awal yang lebih besar. Dapat disimpulkan dalam hal ini bahwa pengembangan detail dan konfigurasi tulangan geser pada Benda Uji ISR mampu mengembangkan kekakuan awal dengan lebih baik. Dalam hal ini detail dan konfigurasi tulangan geser pada Benda Uji ISR mampu mengkompensasikan penurunan kekakuan akibat keretakan pada beton.
3. Berbeda dengan hasil penelitian Du (1993), meskipun Benda Uji CRS dan ISR mempunyai pengaruh beban gravitasi yang lebih besar tetapi ketiga benda uji tetap mengalami penurunan kekakuan dengan *trend* yang sama sampai dengan akhir pengujian, bahkan Benda Uji CRS mengalami penurunan kekakuan yang relatif paling kecil.

Hal tersebut membuktikan bahwa modifikasi detail tulangan geser dengan menggunakan sengkang seperti pada Benda Uji CRS mampu memperbaiki laju penurunan kekakuan pada hubungan pelat-kolom yang menahan kombinasi beban gravitasi dan beban lateral siklis.

4. Disipasi energi pada ketiga benda uji mengalami peningkatan akibat ketidaklinearan yang terjadi seiring dengan meningkatnya *drift ratio*. Perbandingan ketiga benda uji menunjukkan bahwa kondisi disipasi energi sedikit berbeda pada drift ratio yang sangat kecil, tetapi mulai dari drift ratio 0.157% dan seterusnya Benda Uji ISR mempunyai disipasi energi yang terbesar sementara Benda Uji CRT sebagai spesimen kontrol mempunyai disipasi energi paling kecil.

Dengan demikian pada hasil pengujian ini dapat ditunjukkan bahwa pengembangan detail dan konfigurasi tulangan geser pada Benda Uji ISR bekerja paling efektif dalam meningkatkan kekakuan dan disipasi energi, sementara pengembangan detail pada Benda Uji CRS bekerja paling efektif dalam mengurangi laju penurunan kekakuan.

Daftar Pustaka

- American Concrete Institute, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural testing and Commentary (ACI 374.1-05)*, ACI Committee 374, USA
- American Concrete Institute, 2008, *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*, ACI Committee, USA
- American Concrete Institute, 1999, *Shear Reinforcement for Slabs (ACI 421.1R-99)*, Joint ACI – ASCE Committee 421
- American Concrete Institute, 2004, *Recommendations for Design of Slab – Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352.1R-89)*, ACI – ASCE Committee 352
- American Society of Civil Engineers, 2006, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (ASCE 7-05)*, USA: American Society of Civil Engineers.
- Badan Standarisasi Nasional, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung (SNI 03 – 2847 – 2002)*, Jakarta: Badan Standarisasi Nasional.
- Broms, 2007, Ductility of Flat Plates: Comparison of Shear Reinforcement System, *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 6, November-December 2007, pages 703-711

- Budiono, B., Imran, I., Sofwan, A., dan Gunadi, R., 2012, *Perilaku Histeresis Pelat-Kolom Beton Sub-Assemblage Bertulangan Geser Terhadap Beban Lateral Siklis*, Laporan Penelitian, ITB.
- Dovich, L. and Wight, J.K., 2005, Effective Slab Width Model for Seismic Analysis of Flat Slab Frames, *ACI Structural Journal*, Vol. 102 No. 6
- Du, Yong, 1993, *Seismic Resistance of Slab Column Connections in Non-Ductile Flat-Plate Buildings*, Thesis, Rice University
- Erberik, M.A. and Elnashai, A.S., 2003, *Seismic Vulnerability of Flat Slab Structures, Technical Report Mid-America Earthquake Center DS-9 Project (Risk Assessment Modeling)*, Civil and Environmental Engineering Department, University of Illinois at Urbana – Champaign
- Han, S.W., Park, Y.M., and Kee, S.H., 2009, Stiffness Reduction Factor for Flat Slab Structures under Lateral Loads, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 135, No. 6, June 1, 2009, pages 743-750
- Lips, S., and Muttoni, A., 2010, *Experimental Investigation of Reinforced Concrete Slabs With Punching Shear Reinforcement*, 8th fib Ph.D Symposium in Kgs. Lyngby, Denmark
- Megally, S. and Ghali, A., 2000, Punching Shear Design of Earthquake-Resistant Slab-Column Connections, *ACI Structural Journal*, Vol. 97 No. 5
- Megally, S. and Ghali, A., 2000, Punching of Concrete Slabs Due to Column Moment Transfer, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 126 No. 2
- Pan, A. and Moehle, J.P., 1989, Lateral Displacement Ductility of Reinforced Concrete Flat Plates, *ACI Structural Journal*, Vol. 86 No. 3
- Ritchie, M., Ghali, A., Dilger, W., and Gayed, R.B., 2006, Unbalanced Moment Resistance by Shear in Slab-Column Connections: Experimental Assessment, *ACI Structural Journal*, Vol. 103 No. 1
- Robertson, I.N., and Durrani, A.J., 1992, Gravity Load Effect on Seismic Behavior of Interior Slab-Column Connections, *ACI Structural Journal*, Vol. 89 No. 1
- Robertson, I.N., and Johnson, G., 2006, Cyclic Lateral Loading of Nonductile Slab-Column Connections, *ACI Structural Journal*, Vol. 103 No. 3
- Robertson, I.N., Kawai, T., Lee, J., and Enomoto, B., 2002, Cyclic Testing of Slab – Column Connections with Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, Vol. 99 No. 5

