

PENGARUH PENGGUNAAN *PREPACKED AGGREGATE CONCRETE* TERHADAP PERBAIKAN JOIN BALOK KOLOM EKSTERIOR PRACETAK PASCA PEMBEBANAN SIKLIK STATIK

Oleh: Siti Aisyah Nurjannah

Pusat Litbang Permukiman Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan – Kab. Bandung 40393

E-mail : hana_uti@yahoo.com

Tanggal masuk naskah: 23 Agustus 2007, Tanggal revisi terakhir : 05 Mei 2008

Abstrak

Saat mengalami beban gempa, struktur rangka bangunan akan menyerap energi gempa secara terus menerus sehingga memasuki keadaan plastis dan mencapai batas kekuatannya, sehingga diharapkan terjadi sendi plastis pada komponen join, yaitu pada ujung balok di muka kolom. Tingkat kerusakan yang terjadi pada struktur bangunan yang menahan beban gempa adalah rusak ringan, rusak sedang, atau rusak berat. Struktur dengan jenis kerusakan ringan dan sedang masih bisa diperbaiki dan diperkuat. Sedangkan, struktur dengan kerusakan tingkat berat tidak dapat diperbaiki. Penelitian ini membahas kinerja join balok kolom eksterior pracetak yang mendapat beban siklik statik dalam dua tahap. Setelah mengalami kerusakan akibat pembebanan tahap ke-1, join diperbaiki. Setelah beton prepack cukup umur, join diuji dengan beban siklik statik tahap ke-2. Hasil uji beban yang dikaji adalah perbandingan kinerja join pada tahap ke-1 dan ke-2 yang meliputi: daktilitas, disipasi energi, momen-kelengkungan, dan pola retak.

Kata-kata kunci: *Daktilitas, disipasi energi, pola retak.*

Abstract

When an earthquake occurs, the building frame structures will dissipated earthquake energy continually and achieve plastic condition and reach the ultimate strength, thus it is expected that the plastic hinges of joint components occurs in the beam edge, in front of the column. The damage stages of resisting-earthquake building structures are light damage, medium damage, and heavy damage. The light damage structures are still can be repaired and strengthened, while the heavy damage structures cannot be repaired. This research discusses performance of an exterior beam column joint which loaded in two stages of cyclic static loading. After the joint had damages in the 1st loading stage, it was repaired. And, after the prepacked concrete reached the adequate age, the joint was loaded in the 2nd loading stage. The determined loading result is the performance comparison between the 1st and the 2nd loading stage which covers: ductility, energy dissipation, moment-curvature, and crack pattern.

Keywords: *Ductility, energy dissipation, crack pattern.*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Indonesia merupakan kawasan kepulauan yang sebagian besar berpotensi mengalami gempa bumi. Kawasan dengan potensi gempa cukup besar meliputi sepanjang bagian barat Pulau Sumatera, sepanjang bagian selatan Pulau Jawa,

bagian timur Pulau Sulawesi, Propinsi NTB, NTT, dan Papua. Dengan potensi kegempaan yang cukup besar, maka hubungan kekuatan struktur bangunan dengan gempa bumi merupakan hal yang harus diperhatikan. Apabila terjadi gempa, struktur bangunan bekerja menahan gempa sehingga mengalami kerusakan dari tingkat ringan, sedang, sampai berat.

Struktur dengan jenis kerusakan ringan dan sedang masih bisa diperbaiki dan diperkuat. Sedangkan, struktur dengan kerusakan tingkat berat tidak dapat diperbaiki.

Rusak ringan struktur adalah kerusakan yang tidak memerlukan perbaikan pada komponen struktur dan nonstruktur. Rusak ringan berupa retak dan leleh pada tulangan. Rusak sedang struktur adalah kerusakan yang masih dapat diperbaiki. Contoh rusak sedang adalah terlepasnya selimut beton dan retak lebar pada daerah sendi plat. Rusak-berat struktur adalah kerusakan struktural yang tak dapat diperbaiki, tetapi struktur tidak sampai runtuh.

Struktur rangka kaku dari beton bertulang yang mengikuti konsep kolom kuat – balok lemah (KKBL) akan merespon beban gempa dengan menyerap energi gempa melalui terbentuknya sendi-sendi plastis di ujung balok yang berada di muka kolom.

Struktur beton bertulang yang mengikuti konsep KKBL memiliki daktilitas yang besar, sehingga sanggup menyerap energi gempa melalui pembentukan sendi plastis pada ujung balok di muka kolom tanpa diikuti kerusakan kolom, sehingga struktur tidak runtuh total.

Kerusakan sendi plastis pada ujung balok dapat diperbaiki sehingga bila memungkinkan, kekuatan dan kekakuan struktur kembali seperti semula. Hal ini dapat menghemat biaya infrastruktur suatu bangunan.

Pada tahun 2002, penelitian tentang kinerja struktur join balok kolom pracetak yang diperbaiki dengan menggunakan *prepacked aggregate concrete* dilaksanakan di Laboratorium Struktur dan Bahan, Institut Teknologi Bandung.

Maksud

Maksud penelitian tersebut adalah untuk mencari tingkat kinerja dan me-

ngembangkan metoda perbaikan struktur join balok kolom eksterior pracetak (JBKE-PC) dan join balok-kolom interior pracetak pada umumnya yang telah mengalami kerusakan akibat beban gempa.

Tujuan

Hasil penelitian tersebut diharapkan dapat membantu upaya perbaikan struktur gedung bertingkat (rumah, ruko, atau rusun) yang masih dapat diperbaiki (mengalami rusak ringan s.d. rusak-sedang) dengan metoda yang mudah untuk diterapkan oleh masyarakat.

TINJAUAN PUSTAKA

Join Balok-Kolom

Berdasarkan konsep desain kapasitas, diharapkan join akan berperilaku daktail di bawah beban gempa kuat. Perilaku yang diharapkan dari join balok kolom eksterior adalah daktail dengan memberikan respon inelastik pada saat mengalami beban gempa kuat.

Jenis Gempa

Jenis gempa dikategorikan berdasarkan peluang kejadian [8]:

1. Gempa kecil; perioda ulang 50 tahun. Peluang kejadian per tahun 0,02.
2. Gempa sedang. Peluang kejadian per tahun adalah 0,002.
3. Gempa kuat. Peluang kejadian per tahun adalah 0,0002.

Kriteria Desain dan Mekanisme Join Balok Kolom

Kriteria desain yang disarankan dalam perencanaan join balok kolom adalah:

- Kekuatan join minimal harus sama dengan bagian-bagian struktur pembentuk join, tetapi harus lebih kuat dari sendi plastis. Hal ini diperlukan untuk mengeliminasi daerah yang tidak dapat dimasuki pada saat perbaikan. Dengan demikian, disipasi energi pada daerah

join akan terjadi dengan baik dan kekakuan benda uji berkurang pada saat pembebanan siklik.

- Join harus mampu berdeformasi dan menyalurkan gaya geser rangka struktur
- Kekuatan kolom harus lebih tinggi daripada balok.
- Pada gempa kecil dan gempa sedang, join diharapkan masih berdeformasi elastis, yang berarti juga join tidak boleh memperbesar simpangan antar tingkat dan tidak terjadi kerusakan akibat geser.
- Kapasitas kekuatan kolom tidak boleh berkurang akibat degradasi kekuatan dari join
- Pengaturan tulangan join tidak boleh menimbulkan kesulitan dalam pelaksanaan

Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan struktur untuk menahan respon inelastik sambil mempertahankan sebagian besar dari kekuatan awalnya dalam memikul beban. Daktilitas merupakan perbandingan antara regangan /kelengkungan/ deformasi/rotasi pada kondisi batas dengan regangan /kelengkungan/ deformasi /rotasi pada kondisi leleh pertama.

METODA PENELITIAN

Penelitian secara Eksperimental di Laboratorium

Setelah melakukan studi pustaka hasil penelitian tentang kinerja join balok-kolom monolit dan pracetak terhadap beban gempa, maka penelitian dilanjutkan dengan uji pembebanan siklik statik skala penuh terhadap join balok kolom eksterior pracetak (uji beban ke-1). Setelah diperbaiki, join diuji beban ulang dengan beban siklik statik tahap ke-2.

Hasil uji tahap ke-1 dan tahap ke-2 berupa kurva hubungan beban dengan perpindahan di ujung balok, nilai disipasi energi, kurva hubungan momen dengan

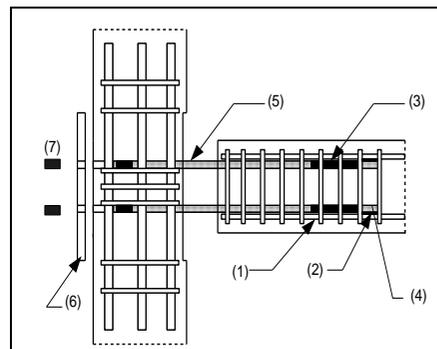
kelengkungan balok, dan pola retak. Hasil uji tahap ke-1 dan tahap ke-2 dibandingkan untuk memperoleh tingkat kinerja join yang telah mendapat perbaikan.

Benda Uji

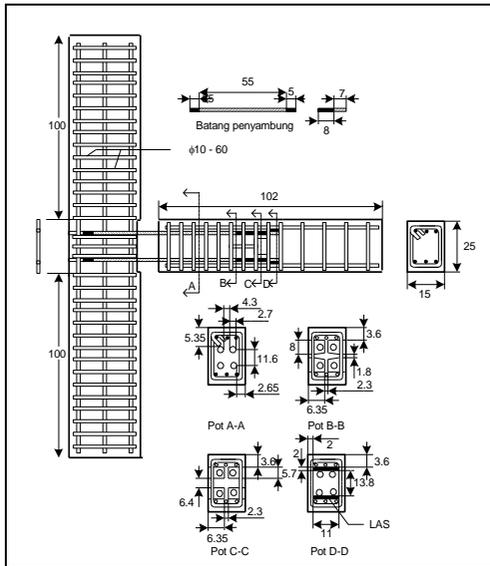
Benda uji adalah join balok-kolom eksterior pracetak dengan dimensi dan penulangan join mengacu pada Tata Cara Perhitungan Beton Bertulang Indonesia SK SNI-T-15-1991-03.

Join eksterior pracetak menggunakan sambungan mekanis mur kopel (Gambar 1 dan 2). Gaya tarik/tekan pada tulangan balok (1) melalui pelat kopel (2) disalurkan ke tulangan penyambung tetap (3). Gaya-gaya ini kemudian disalurkan ke tulangan penyambung bebas melalui mur kopel (4).

Pelat kopel dan tulangan penyambung-tetap (5) dipasang pada tulangan balok dengan menggunakan las sebelum proses pengecoran berlangsung. Pada proses ini, tulangan penyambung tetap harus terpasang presisi sehingga memungkinkan untuk disambung pada tulangan penyambung bebas dengan mur kopel. Pelat ujung (6) diperlukan khusus pada sambungan balok-kolom eksterior, yang bersama-sama mur (7) membentuk *beam stub*.



Gambar 1. Sambungan JBKE-PC



Gambar 2. Penulangan JBKE-PC

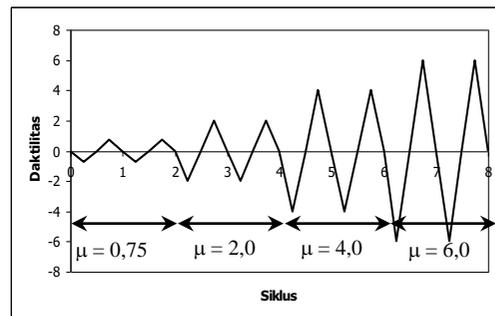
Bahan Perbaikan Join Balok – Kolom

Bahan yang dipakai untuk cor ulang bagian sendi plastis yang telah rusak adalah agregat lolos saringan berdiameter 19,5 mm dan tertahan pada saringan dengan diameter 12,5 mm serta semen *Sika Grout 215* agar memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi daripada beton lama.

Prosedur Pembebanan

Analisis numerik dilakukan untuk merencanakan riwayat pembebanan yang diberikan pada benda uji. Analisis numerik dengan pemodelan beban siklik statik dilakukan untuk memperkirakan beban horizontal yang menyebabkan tercapainya leleh (P_y) pada benda uji. Dengan perkiraan beban leleh yang terjadi maka direncanakan jumlah siklus, *step* pembebanan, dan besaran beban puncak untuk tiap siklus pembebanan. Riwayat beban dilakukan dengan menambah perpindahan yang terukur secara teratur (kontrol-perpindahan) agar data yang diperoleh pada daerah plastis cukup akurat.

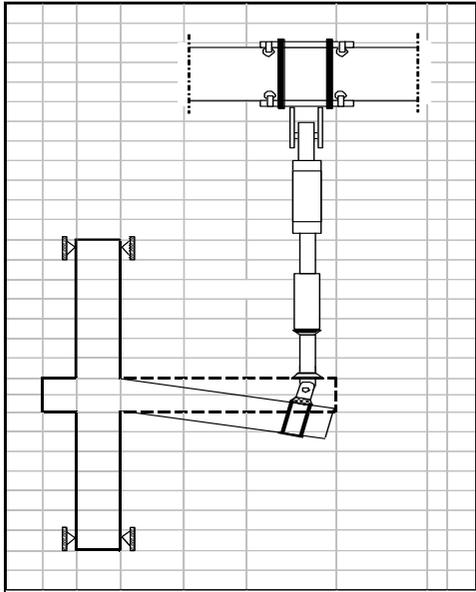
Riwayat pembebanan untuk pengujian benda uji sistem struktur dilakukan berdasarkan pada kontrol-beban pada dua siklus pertama. Pembebanan pada siklus selanjutnya dilakukan dengan kontrol-perpindahan. Riwayat pembebanan pada pengujian ini mengacu pada *NEHRP Recommended Provision for The Development of Seismic Regulation for New Building*, edisi 1994 yang dipublikasikan oleh *Federal Emergency Management Agency 222A and 223A*, Washington D.C.



Gambar 3. Siklus Rencana Pembebanan Berdasarkan NEHRP 1994

Set up Pengujian

Benda uji join eksterior diletakkan pada *loading frame* baja. Bagian bawah kolom dijepitkan pada pelat baja di atas lantai, sedangkan sekeliling bagian bawah kolom dijepit oleh *frame* dan dua pelat baja. Di sekeliling bagian atas kolom dijepit oleh *frame* dan dua pelat baja serta mendapat gaya aksial tekan dari *Load Cell* yang merupakan pengganti beban mati dan beban hidup bangunan. Pembebanan siklik oleh aktuator diaplikasikan pada jarak 900 mm dari muka kolom.



Gambar 4. Sistem Hubungan Pembebanan Siklik

Instrumen Pengujian

Untuk mengukur regangan, defleksi, dan rotasi pada elemen baja dan beton diperlukan instrumen berikut:

1. *Loading frame* (rangka baja) yang menahan benda uji.
2. *Load Cell* untuk membaca besarnya gaya aksial yang bekerja pada kolom.
3. Aktuator sebagai alat pembebanan bolak-balik pada ujung balok.
4. Komputer dan *software DARTEC* untuk mengontrol besarnya pembebanan dan perpindahan pada ujung balok.
5. *Data Logger* Tipe UCAM 70 untuk mencatat data pengujian.
6. *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT) untuk mengukur perpindahan yang terjadi pada struktur.
7. *Strain Gauge* baja dan beton untuk mengukur regangan.
8. *Inclinometer* untuk mengukur besarnya rotasi pada kolom di daerah joint dan ujung balok.

HASIL UJI DAN PEMBAHASAN

Mutu Beton dan Baja

Kekuatan tekan beton untuk uji beban tahap ke-1 dan kekuatan tekan beton *prepack* untuk uji beban tahap ke-2 diperoleh dari uji kuat tekan beton silinder berdiameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Tabel 1. Kuat Tekan Beton Tahap ke-1

No. Sampel	Berat (kg)	Gaya Tekan (kN)	Kuat Tekan (MPa)	Rata-rata (MPa)
1	12,38	860,00	48,67	45,73
2	12,51	729,10	41,26	
3	12,40	835,00	47,25	

Nilai kuat tekan beton *prepack* (tahap ke-2) adalah 49,92 MPa.

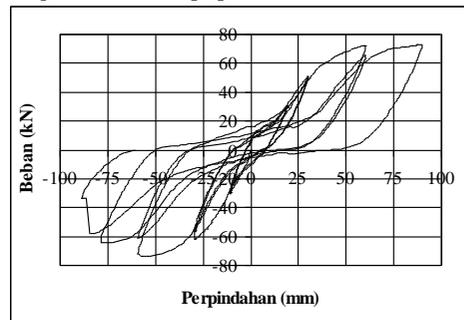
Nilai tegangan leleh baja diperoleh dari uji tarik baja berdiameter $\phi 10$, D15, dan D16.

Tabel 2. Nilai Tegangan Leleh Baja

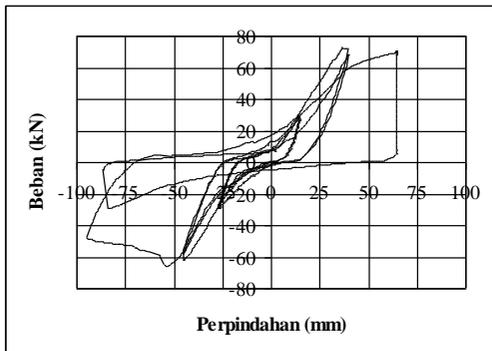
Nomor Benda Uji	Jenis	Ukuran	f_y (MPa)
1	Ulir	D 16	338
2	Ulir	D15	325
3	Polos	$\phi 10$	355

Hasil Uji Beban

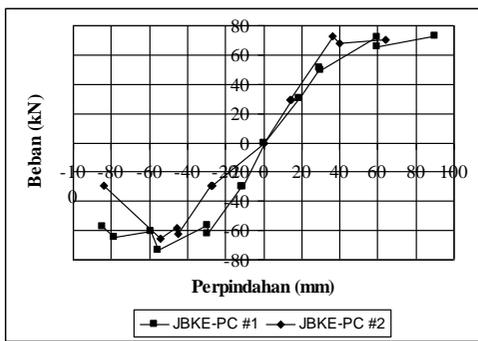
Perbandingan Perilaku Hubungan antara Beban Aksial (P) dan Perpindahan (d)



Gambar 5. Kurva Histeresis Beban Perpindahan JBKE-PC ke-1



Gambar 6. Kurva Histeresis Beban Perpindahan JBKE-PC ke-2



Gambar 7. Perbandingan Kurva Envelope Beban Perpindahan Join Eksterior Pracetak ke-1 dan ke-2

Kurva histeretik beban – perpindahan join pracetak ke-1 dan ke-2 memperlihatkan terjadinya *slip* yang ditunjukkan oleh bentuk kurva yang langsing pada bagian tengah (*pinching*). *Pinching effect* menyebabkan penurunan kemampuan struktur untuk mendisipasi energi. Penyebab terjadinya *pinching effect* tersebut adalah kelemahan pada sambungan baut antara tulangan penyambung dengan pelat di dalam balok dan *slip*. Pada kurva beban – perpindahan join pracetak ke-2, terjadi perlemahan tambahan akibat sambungan telah mendapat beban siklik statik ke-1. *Slip* terjadi akibat beberapa hal sebagai berikut:

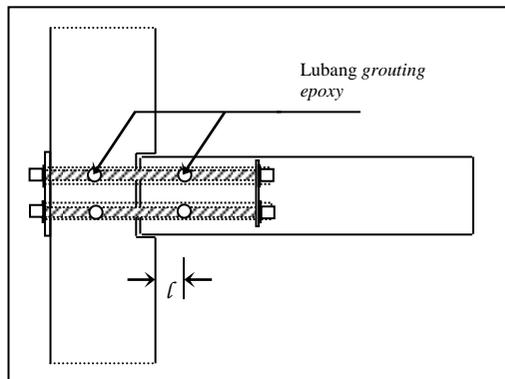
- Lemahnya lekatan antara tulangan dengan beton. Kekuatan lekatan merupakan fungsi dari kuat tekan

beton dan tekstur permukaan tulangan baja (polos atau ulir). Pada tulangan polos, mekanisme lekatan tersebut tergantung pada ikatan adhesi dan friksi antara beton dengan permukaan tulangan. Sedangkan, pada tulangan ulir, mekanisme lekatan beton dengan baja tergantung pada ikatan adhesi, friksi antara beton dengan permukaan tulangan, dan *interlocking* antara beton dengan ulir.

- Penggunaan baut menyebabkan adanya celah antara baut dengan selongsong.
- Adanya celah antara tulangan penyambung dengan selongsong
- Terjadinya *buckling* pada tulangan ketika mengalami tekan.

Cara mengatasi *slip* dengan cara:

- Meng-*grout* celah yang terletak di antara tulangan dengan selongsong dengan menggunakan *epoxy*. Lubang *grouting* pada kolom adalah $\frac{1}{2} h_c$ dan jarak l kira-kira adalah $\frac{1}{3}$ dari panjang tulangan penyambung balok-kolom. Polimer harus dipastikan memenuhi celah yang ada. Kemudian celah yang tersisa ditutup dengan lilin malam agar polimer tidak tumpah.
- Baut dikencangkan kembali, kemudian dilas ke pelat pada kolom.



Gambar 8. Grouting Celah Selongsong

Pada Gambar 5 dan 6, terlihat bahwa nilai perpindahan positif join pracetak tahap

ke-2 lebih kecil daripada join pracetak tahap ke-1. Sedangkan, nilai perpindahan negatif join pracetak tahap ke-2 lebih besar daripada join pracetak tahap ke-1. Hal ini disebabkan kelemahan pada bagian bawah balok, akibat proses *prepack* yang tidak sempurna. Pada bagian bawah balok terdapat *honeycomb* (keropos).

Honeycomb tersebut terjadi karena beberapa hal sebagai berikut:

- Tidak terdapat agregat halus (diameter <0,075 mm) yang berfungsi sebagai pengisi celah antara beton dengan agregat kasar (diameter >4,75 mm).
- Terdapat agregat yang berbentuk pipih, sehingga terjadi rongga antara beton dengan agregat.
- Proses pepadatan tidak sempurna.
- Pada saat pengecoran, sudah terjadi *setting time* (*Setting time Sika Grout 215*: 25 menit).

Honeycomb mengakibatkan nilai kuat tekan beton menurun, sehingga serat balok bagian bawah tidak kuat menahan beban tekan. Pada saat mendapat beban tekan, perpindahan arah negatif menjadi besar. Sebaliknya, pada saat pembebanan tarik, serat balok bagian atas kuat menahan tekan, sehingga perpindahan positifnya kecil. Perilaku ini dijelaskan pada Gambar 10. *Honeycomb* ini juga mengakibatkan nilai momen inersia *gross* (I_g) menurun, sehingga nilai momen inersia efektif (I_{eff}) juga menurun (persamaan 1 s.d. 6). Akibatnya, terjadi perpindahan yang besar pada ujung balok JBKE-PC tahap ke-2 karena:

- Nilai $E_{c2} < E_{c1}$
- Nilai $I_{eff2} < I_{eff1}$
- Nilai $EI_{eff2} < EI_{eff1}$

Cara mencegah terjadinya *honeycomb* adalah dengan melakukan beberapa hal berikut:

- Menggunakan bahan aditif *retarder* untuk memperlambat pengerasan beton.

- Penggunaan *nonshrinkage* mortar sebagai agregat halus yang mengisi celah antara beton dengan agregat kasar.



Foto 1. Kondisi JBKE-PC ke-1 Pascapembebanan Pertama (Atas)

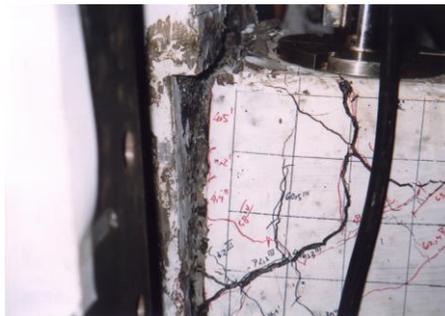


Foto 2. Sambungan Balok dengan Kolom JBKE-PC ke-2 pada Kondisi Akhir Pembebanan

Nilai perpindahan (d) merupakan fungsi dari modulus elastisitas beton (E_c) dan kuat tekan beton (f'_c), seperti yang dinyatakan pada persamaan-persamaan berikut:

$$\delta = \frac{d^2 y}{dx^2} = \iint \frac{M}{E_c I_{eff}} dA \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{P_i \times L^3}{3E_c I_{eff}} \quad (2)$$

$$I_{eff} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{cr_aktual}} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{cr_aktual}} \right)^3 \right] I_{cr} \quad (3)$$

$$M_{cr} = W_x \times f_r \quad (4)$$

$$M_{cr} = \frac{1}{6} b h^2 \times 0,7 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

$$I_g = \frac{1}{12} b h^3 \quad (6)$$

Daktilitas

Nilai daktilitas ditentukan dari perbandingan perpindahan ujung balok saat *ultimate* dibandingkan dengan saat leleh pertama. Nilai perpindahan saat leleh pertama diperoleh dari pendekatan persamaan linear yang dibentuk dari nilai (d, P) puncak pada siklus ke-2 dan ke-3.

Tabel 3. Nilai Daktilitas JBKE Pracetak ke-1

No.	Perpindahan Leleh	Rata ² Perpindahan <i>Ultimate</i>	Daktilitas (μ)	Faktor Reduksi Beban Gempa (R)
	(mm)	(mm)	Du/dy	
1	24.35	89.79	3.69	5.90
2	-16.89	-81.5	4.82	7.71
Rata-rata			4.26	6.81

Tabel 4. Nilai Daktilitas JBKE Pracetak ke-2

No.	Perpindahan Leleh	Rata ² Perpindahan <i>Ultimate</i>	Daktilitas (μ)	Faktor Reduksi Beban Gempa (R)
	(mm)	(mm)	Du/dy	
1	19.13	64.28	3.36	5.38
2	-32.81	-69.06	2.10	3.36
Rata-rata			2.73	4.37

Nilai daktilitas pada JBKE-PC ke-2 lebih kecil daripada nilai daktilitas pada JBKE-PC ke-1 karena kemampuan join dalam mendisipasi energi telah menurun akibat pembebanan siklik statik pertama. Berdasarkan SNI – 1726 – 2002, termasuk daktilitas parsial. Nilai faktor reduksi beban gempa diperoleh berdasarkan Tabel 2 (5).

Nilai daktilitas pembebanan dorong lebih besar daripada pembebanan tarik karena pada bagian bawah balok *prepack* terdapat *honeycomb* yang menyebabkan perpindahan ujung balok lebih besar pada saat pembebanan dorong.

Nilai daktilitas join pasca uji beban kedua menurun menjadi 64,08 % dari nilai daktilitas join pasca uji beban pertama.

Disipasi Energi

Nilai disipasi energi (DE) yang bisa dibandingkan hanya sampai siklus kelima, karena pada siklus ke-6, pembebanan sudah tidak dilakukan sebanyak satu siklus utuh akibat keterbatasan ruang gerak balok pada *loading frame*.

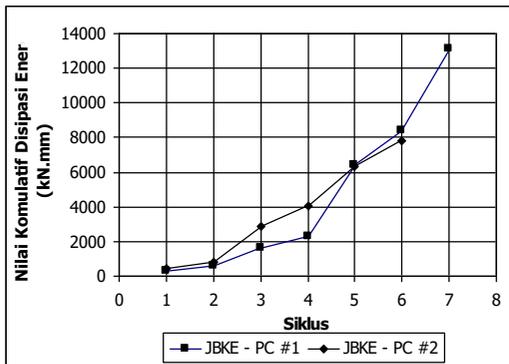
Tabel 5. Disipasi Energi Benda Uji (BU) Join Pracetak ke-2

Daktilitas	Siklus	Energi Disipasi Join Pracetak (kN.mm)		Rasio DE BU ke-2/ DE BU ke-1
		BU ke-1	BU ke-2	
0,75	1	293.720	462.994	1.576
	2	307.780	338.726	1.101
2	3	1050.850	2085.521	1.985
	4	637.340	1135.045	1.781
4	5	4089.910	2318.932	0.567
	6	2004.890	1470.082*	0.733
6	7	4730.100		
Total DE		13114.590	7811.300	59.6%

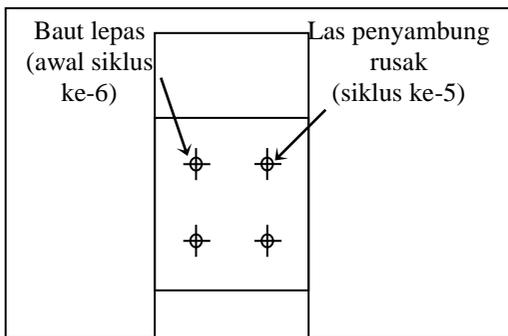
* Siklus ke-6 hanya dilakukan setengahnya karena tidak mencapai nilai perpindahan dan nilai beban terbesar.

Tabel 6. Disipasi Energi per Siklus dan Daktilitas Energi Kumulatif

Daktilitas	Si-klus	Energi Kumulatif	
		JBKE - PC ke-1	JBKE – PC ke-2
		(kN-mm)	(kN-mm)
0,75	1	293,72	462,99
	2	601,50	801,72
2	3	1652,35	2887,24
	4	2289,69	4022,29
4	5	6379,60	6341,22
	6	8384,49	7811,30
6	7	13114,59	-



Gambar 9. Perbandingan Nilai Kumulatif = Disipasi Energi JBKE-PC ke-1 dan JB KE-PC ke-2



Gambar 10. Baut Tulangan Penyambung Balok ke Kolom

Pada joint pracetak ke-2, nilai disipasi energi lebih besar daripada joint pracetak ke-1 hanya pada siklus pertama sampai dengan siklus ke-4. Sejak siklus ke-5 nilai disipasi energi jauh menurun akibat las tulangan penyambung kanan atas yang rusak. Sedangkan pada awal siklus ke-6, baut tulangan penyambung kiri atas lepas, sehingga tulangan penyambung tersebut tidak berfungsi lagi. Akibatnya struktur tidak mampu mendisipasi energi dengan baik.

Pada joint pracetak ke-2, nilai disipasi energi pada suatu siklus lebih besar daripada joint pracetak ke-1, disebabkan oleh nilai perpindahan maksimum akibat beban tarik dan perpindahan minimum akibat beban dorong pada benda uji ke-2 selalu lebih besar daripada benda uji ke-1.

Penyebab perilaku ini adalah sebagai berikut:

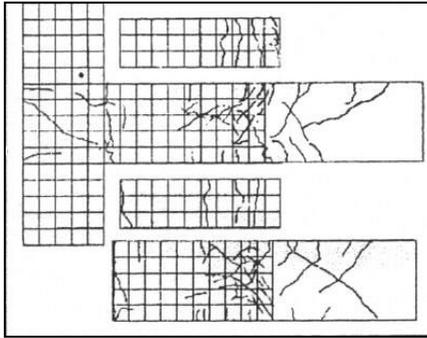
1. Tulangan baja yang telah leleh pada pengujian siklik pertama pada joint ke-1, menyebabkan regangan yang semakin besar di sepanjang tulangan baja. Sehingga, perpindahan yang terukur pada ujung balok semakin besar. Semakin banyak mengalami beban siklik, regangan maksimum akan semakin besar (7).
2. Balok ke-2 tidak bersifat homogen lagi karena daerah sendi plastis merupakan beton yang baru dicor. Lekatan antara beton lama dengan beton baru tidak sekuat beton lama, sehingga menimbulkan deformasi yang lebih besar.
3. Nilai momen inersia efektif balok *prepack* lebih rendah daripada beton lama, sehingga deformasi yang terjadi akan semakin besar. Perilaku ini dapat dinyatakan dari persamaan (1) sampai (6). Semakin kecil nilai $E_c I_{eff}$, maka deformasi yang terjadi akan semakin besar.

Secara keseluruhan, nilai total disipasi energi JBKE-PC ke-2 adalah 59,60 % daripada nilai total disipasi energi JBKE-PC ke-1.

Pada gambar 9, terlihat bahwa rasio nilai disipasi energi joint pracetak ke-2: pracetak ke-1 lebih besar dari 1,0 pada siklus ke-1 sampai dengan siklus ke-4. Sedangkan, pada siklus ke-5, terjadi hal sebaliknya. Hal ini disebabkan oleh kerusakan las tulangan penyambung kanan atas joint pracetak sehingga nilai disipasi energinya turun drastis.

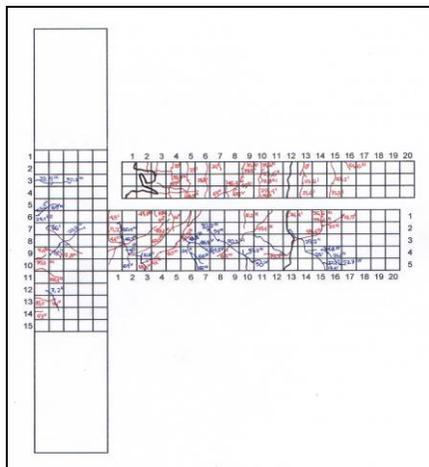
Pola Retak

Pola retak akibat beban siklik statik pada JBKE-PC ke-1 dan JBKE-PC ke-2 adalah sebagai berikut:



Gambar 11. Pola Retak JBKE-PC ke-1

Retak pada JBKE-PC ke-1 bermula pada pertemuan antara balok dengan kolom dengan beban 6,5 kN (dorong) dan 5,7 kN (tarik). Saat beban mencapai 28 kN, terjadi retak pada balok. Retak terjadi secara intensif pada lokasi sejarak 250 mm sampai dengan 750 mm dari muka kolom. Retak yang dominan adalah jenis retak geser lentur. Terjadinya pergeseran lokasi retak ini karena kekuatan di daerah ujung balok sangat tinggi akibat adanya tambahan kekuatan dari tulangan penyambung dan *prepack* polimer serta karena adanya tegangan tekan awal akibat pengencangan mur-kopel (saat pembuatan JBKE-PC ke-1). Secara keseluruhan, pola keruntuhan tersebut menyebabkan sendi plastis yang menyerap energi gempa terjadi pada ujung balok di muka kolom.



Gambar 12. Pola Retak JBKE-PC ke-2

Keterangan:

- Warna biru : retak akibat beban tarik (+)
- Warna merah : retak akibat beban dorong(-)
- Warna hitam : batas antara beton lama dan beton baru

Pada pengujian JBKE-PC ke-2, retak pertama akibat beban dorong terjadi saat beban mencapai 8 kN pada jarak 68 cm dari muka kolom. Retak ini terjadi tepat pada sambungan antara beton lama dengan beton baru (*prepack*).

Sambungan tersebut mulai mengalami kerusakan akibat daya adhesi antara beton lama dengan beton baru tidak terlalu kuat. Sedangkan, retak pertama yang terjadi akibat beban tarik terjadi saat beban mencapai 17,4 kN pada jarak 75 cm dari muka kolom. Retak awal akibat uji siklik sebelumnya merambat sebagai retak lentur yang terjadi pada beban tarik sebesar 48 kN pada siklus ke-3 dan pada beban dorong sebesar 61,6 kN pada siklus ke-3. Retak yang telah terjadi pada ujung balok terus merambat ke ujung balok dan sebagian besar membentuk retak lentur. Sedangkan retak pada kolom relatif sedikit dan hanya merupakan retak rambut.

Retak yang dominan terjadi pada JBKE-PC ke-2 adalah retak lentur dan retak geser lentur. Penyebabnya adalah beban momen yang lebih dominan daripada beban geser pada daerah sendi plastis. Tulangan longitudinal balok yang telah leleh akibat pembebanan siklik sebelumnya tidak dapat menahan beban siklik statik secara optimal. Sehingga, beban siklik statik lebih dominan ditahan oleh beton. Mekanisme ini menyebabkan terjadinya retak lentur pada sendi plastis. Pembebanan siklik yang semakin besar menyebabkan perambatan retak yang disebut retak geser lentur.

Pola keruntuhan struktur tersebut menyebabkan sendi plastis yang menyerap energi gempa terjadi pada ujung balok di muka kolom.

Kinerja Join Eksterior Pracetak terhadap Beban Gempa

Pada penelitian ini, join eksterior ke-1 (uji beban siklik statik ke-1) dan join eksterior ke-2 (uji beban siklik statik ke-2) mampu menahan beban gempa sampai dengan daktilitas parsial yang ditetapkan dalam Standar Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung SNI – 1726 – 2002.

KESIMPULAN DAN SARAN

Saran

Berdasarkan studi hasil uji beban siklik terhadap benda uji Join Balok Kolom Eksterior Pracetak ke-1 dan benda uji Join Balok-Kolom Eksterior Pracetak ke-2, dapat disimpulkan beberapa hal, yaitu:

1. Daktilitas parsial JBKE-PC ke-1 adalah 3,69 (+) dan 4,82 (-), sedangkan daktilitas parsial JBKE-PC ke-2 adalah 3,36 (+) dan 2,10.
2. JBKE-PC ke-2 dapat mendisipasi energi sebesar 59,6 % dari JBKE-PC ke-1. Nilai disipasi energi BU Pracetak ke-2 sangat dipengaruhi oleh *pinching effect* yang disebabkan adanya *slip* antara tulangan penyambung dengan beton.
3. Pada JBKE-PC ke-2, nilai disipasi energi setiap siklus hampir selalu lebih besar daripada BU Pracetak ke-1 karena BU Pracetak ke-2 bersifat lebih daktil dan mampu menahan beban yang lebih besar.
4. Retak yang dominan terjadi pada BU Pracetak ke-2 adalah retak lentur dan retak geser lentur.
5. Pada JBKE-PC ke-2, perambatan retak awal akibat beban dorong (siklus ke-1; daktilitas = 0,75) bermula dari bagian balok terlemah, yaitu pada sambungan beton lama dengan beton baru. Sedangkan, perambatan retak awal akibat beban tarik (siklus ke-1;

daktilitas = 0,75) berasal dari retak rambut akibat uji siklik sebelumnya.

Saran

Dari kesimpulan tersebut, dapat ditarik beberapa saran sebagai berikut:

1. Dengan meninjau nilai disipasi energi total pada JBKE-PC ke-2, sebaiknya tulangan penyambung balok ke kolom dan baut join pracetak diganti dengan yang baru agar mampu mendisipasi energi lebih optimal.
2. Untuk memperkuat sambungan antara beton lama dengan beton baru (*prepack*), sebaiknya dipergunakan bahan *aditive* dan *plasticizer* pada beton *prepack* sehingga dapat diperoleh komposisi campuran Sika Grout dengan kadar semen Sika yang lebih tinggi (W/C rendah). Komposisi campuran ini akan meningkatkan nilai kuat tekan beton, sehingga kekuatan lekatan antara beton lama dengan beton baru meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1995. Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318–95). Detroit: American Concrete Institute.
- Anonim. 1994. NEHRP Recommended Provision for The Development of Seismic Regulation for New Building. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency
- Anonim. 1991. Mechanical Connection of Reinforcing Bars (ACI 439.3R–91). Detroit: American Concrete Institute.
- Anonim. 2002. Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung SNI – 1726 – 2002.
- Anonim. 1991. Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan & Gedung (SK-SNI-1991-03).

- Bayzoni. 2001. Analisis Eksperimental *Exterior Beam – Column Joint* Pracetak, Tesis Magister Jurusan Teknik Sipil, Rek. Struktur. ITB.
- Das, B.M. 1993. Principles of Geotechnical Engineering, 3rd ed. Boston: PWS Publishing Company.
- Park, R. and Paulay, T. 1975. Reinforced Concrete Structures. New York: John Wiley & Sons.
- Paulay, T. and Priestly, M.J.N. 1992. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings. New York: John Willey & Sons.
- Nurjannah, S.A. 2002. Analisis Perbaikan dan Perilaku Join Eksterior Monolit dan Pracetak di Bawah Beban Siklis dengan Metoda *Prepacked Aggregate Concrete*. Tesis Pasca Sarjana Jurusan Teknik Sipil KBK Rekayasa Struktur. ITB.
- Nurjannah, S.A. dan Permadi, H. 1999. Analisis Penampang Beton Prategang Parsial Akibat Momen Siklis dan Tekan Aksial Konstan. Skripsi Sarjana Jurusan Teknik Sipil KBK Rekayasa Struktur ITB.