

PERILAKU *n*-PANEL SYSTEM DALAM MENAHAN BEBAN LATERAL SIKLIK STATIK

Siti Aisyah Nurjannah¹, Nana Pudja Sukmana²

¹Pusat Litbang Permukiman
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Kab. Bandung, 40393
Email: hana_uti@yahoo.com

²Pusat Litbang Permukiman
Jl. Panyaungan, Cileunyi Wetan, Kab. Bandung, 40393
Email: pudjasukmana@gmail.com

Diterima: 7 Juli 2009; Disetujui: 18 Februari 2010

ABSTRAK

*Dalam rencana strategis pembangunan rumah susun sampai 2011, pemerintah mencanangkan pembangunan 1000 menara atau 350.000 unit rumah susun. Pada tahun 2008, rumah susun yang direncanakan untuk dibangun di kawasan perkotaan adalah sebanyak 181 twin block dengan 17.376 unit rumah susun lengkap dengan fasilitas sosial serta prasarana dan sarana dasar permukiman. Sistem struktur beton pracetak dianggap memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan sistem beton konvensional. Pengawasan konstruksi dapat dilakukan dengan lebih mudah dan waktu konstruksi relatif cepat. Dalam rangka mendukung program pemerintah dalam menyediakan rumah susun bagi masyarakat, Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman melakukan penelitian suatu sistem struktur panel beton bertulang pracetak tiga dimensi dengan bukaan yang menggunakan sistem kombinasi sambungan basah dan sambungan kering sejak tahun 2008. Sistem ini dikenal dengan nama *n*-Panel System. Pengujian keandalan model struktur *n*-Panel System dilakukan dengan pengujian beban lateral siklik statik berdasarkan program pembebanan yang direkomendasikan oleh National Earthquake Hazards Reduction Program 1997. Penilaian kinerja model struktur dilakukan berdasarkan pada kriteria keandalan struktur dinding geser menurut Federal Emergency Management Agency (FEMA) 450, nilai daktilitas, faktor reduksi gempa, pola retak dan keruntuhan struktur. Hasil pengujian dengan beban lateral siklik statik memperlihatkan model struktur masih stabil di atas nilai story drift yang ditetapkan dalam FEMA 450. Dengan kestabilan struktur tersebut, kriteria daktilitas yang dicapai adalah daktail penuh, dengan pembatasan nilai faktor reduksi gempa sesuai SNI 03-1726-2002. Hasil pengujian juga memperlihatkan jenis keruntuhan model struktur adalah keruntuhan geser pada dasar panel.*

Kata Kunci: *n*-Panel System, story drift, siklik, beban ideal, pola retak, daktilitas

ABSTRACT

*For a strategic plan of low cost-apartment development until 2011, the government plans to build 1000 towers or 350.000 units of low cost-apartments. In the year 2008, the proposed low cost-apartments which would be built in urban area are counted as many as 181 twin blocks with 17.376 units of low cost-apartments, completed with social facilities and also basic facilities and infrastructures of human settlement. The precast structured concrete system is known to have a number of advantages compared to conventional concrete system. With this system, the quality control during construction becomes easier and the construction period becomes relatively short. In order to support the government program in providing low cost-apartments for the people, Research Center and Development on Human Settlements conducts research on three dimensional precast reinforced concrete panel structural system with openings utilizing wet and dry joints system combination since 2008. This system is named as *n*-Panel System. The performance test of *n*-Panel System structural model was conducted under static cyclic lateral load based on loading history of 1997 National Earthquake Hazards Reduction Program. The assessment of the structural model performance is carried out based on wall structural reliability criterion according to Federal Emergency Management Agency (FEMA) 450, ductility value, earthquake reduction factor, crack patterns and structural failure. The static lateral loading test result shows that the structural model is still stable over story drift value according to FEMA 450. Based on the structural stability, the system is considered to have full ductile response, with structural response modification factor to be in accordance with SNI 03-1726-2002. The test result also shows that the failure mode observed in the model is shear failure on the base of the panel.*

Keywords: *n*-Panel System, story drift, cyclic, ideal load, crack pattern, ductility

PENDAHULUAN

Berdasarkan survei Badan Pusat Statistik tahun 2004, terdapat 5,9 juta keluarga dari 55 juta keluarga Indonesia belum mempunyai rumah. Setiap tahun, terdapat penambahan kebutuhan unit rumah akibat penambahan keluarga baru sebanyak 820.000 unit. Salah satu langkah pemerintah untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah dengan melanjutkan pembangunan rumah susun (*rusun*) sederhana. Dalam rencana strategis pembangunan rusun sampai tahun 2011, pemerintah mencanangkan pembangunan 1000 menara atau 350.000 unit rusun layak huni dan pada tahun 2008 rusun yang dibangun adalah sebanyak 181 *twin block* dengan 17.376 unit rusun, lengkap dengan fasilitas sosial serta prasarana dan sarana dasar permukiman di kawasan perkotaan.

Sistem struktur beton pracetak dianggap memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan sistem beton konvensional. Di antaranya adalah keterjaminan mutu karena proses pembuatan komponen-komponen struktur diproduksi di pabrik. Komponen-komponen struktur tersebut meliputi balok, kolom dan pelat. Dengan sistem ini, pengawasan konstruksi dapat dilakukan dengan lebih mudah dan waktu konstruksi relatif cepat karena pekerjaan di lapangan secara umum hanya meliputi proses perakitan komponen-komponen struktur tersebut. Sehingga, secara keseluruhan penggunaan sistem ini dapat mengefisienkan biaya total pembangunan rusun.

Tujuan kegiatan penelitian ini adalah untuk mengukur kinerja model sistem pracetak *n-Panel System* melalui pengujian model tiga dimensi skala laboratorium terhadap beban lateral siklik statik sebagai simulasi beban gempa.

Pengujian keandalan model struktur *n-Panel System* dilakukan dengan pengujian beban lateral siklik statik berdasarkan program pembebanan yang direkomendasikan oleh *National Earthquake Hazards Reduction Program* (NEHRP) 1997.

Kegiatan penelitian dilakukan di Balai Struktur dan Konstruksi Bangunan serta Balai Bahan Bangunan, Pusat Penelitian dan Pengembangan Permukiman, Bandung.

TINJAUAN PUSTAKA

Dinding geser adalah suatu dinding yang bersifat struktural serta dirancang untuk menahan kombinasi gaya geser, momen dan tekan aksial akibat gempa.

Salah satu jenis dinding geser adalah *uncoupled wall*. Untuk *uncoupled wall*, pengujian harus dilakukan dengan *drift ratio* yang terus ditingkatkan hingga mencapai: (a) 1,5 kali *drift*

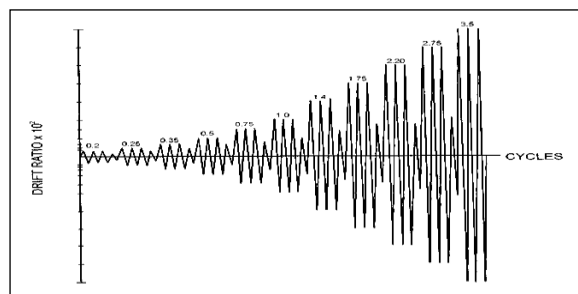
ratio yang berhubungan dengan simpangan desain atau (b) mengikuti nilai berdasarkan persamaan berikut (BSSC, 2003):

$$0,80 \% \leq \delta/h_w (\%) = \{0,67 \times (h_w / l_w) + 0,5\} \% \leq 3,00 \% \dots\dots\dots(1)$$

dengan:

- h_w : ketinggian total dinding model struktur
- l_w : panjang total dinding pada arah gaya geser

Setiap *drift ratio* diaplikasikan pada model uji sebanyak tiga siklus pada setiap arah pembebanan (dorong atau tarik). Riwayat simpangan adalah seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 1.



Gambar 1 Riwayat Simpangan Siklik (Hawkins and Ghosh, 1997)

Untuk *coupled wall*, h_w/l_w dalam persamaan (1) adalah nilai terkecil h_w/l_w untuk dinding tunggal model struktur.

Dalam *Federal Emergency Management Agency* (FEMA) 450, kriteria penerimaan kestabilan struktur dinding geser beton pracetak adalah sebagai berikut:

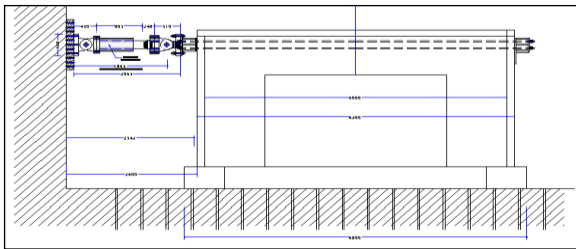
1. Beban lateral pada akhir pengujian harus tidak kurang dari 0,8 kali beban maksimum.
2. Perbandingan disipasi energi relatif tidak boleh kurang dari 1/8.
3. Kekakuan secan antara *drift ratio* -1/10 sampai dengan +1/10 *drift* maksimum tidak boleh kurang dari 0,10 kali kekakuan pada *drift ratio* awal.

METODE PENELITIAN

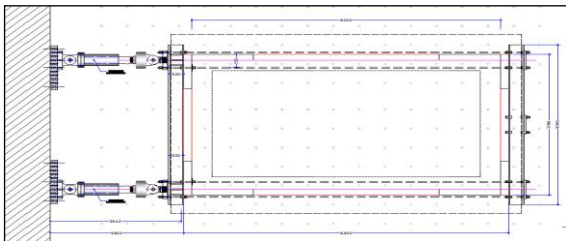
Penelitian dilakukan melalui pengujian bahan dan struktur model uji. Pengujian bahan meliputi pengujian beton dan baja tulangan. Pengujian beton berupa silinder untuk memperoleh nilai kuat tekan beton. Sedangkan, pengujian baja tulangan dilakukan untuk memperoleh nilai kuat leleh baja tulangan. Pengujian bahan tersebut dilaksanakan di Balai Bahan Bangunan.

Pengujian model uji struktur tiga dimensi *n-Panel System* dengan beban lateral siklik statik dilakukan untuk memperoleh kinerja model struktur tersebut. Pengujian ini dilaksanakan di Balai Struktur dan Konstruksi Bangunan.

Model uji diletakkan di atas fondasi yang direncanakan mempunyai kekakuan yang memadai dan disesuaikan dengan kondisi perletakan arah vertikal. Sambungan fondasi pada lantai reaksi di ruang pengujian berupa beberapa anker yang dipasang pada arah vertikal. Beban lateral siklik statik berasal dari *jack* dengan kapasitas 100 ton sebanyak dua buah seperti yang diperlihatkan dalam Gambar 2 dan 3.



Gambar 2 Tampak Samping Set up Pengujian *n-Panel System* (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



Gambar 3 Tampak Atas Set up Pengujian *n-Panel System* (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

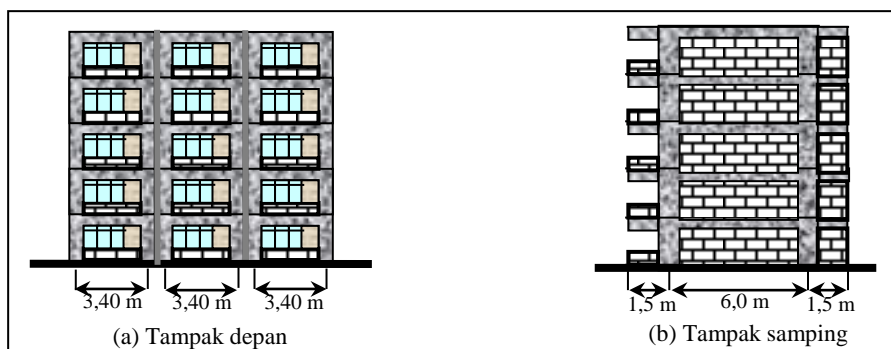
Pada pelaksanaan pengujian, digunakan beberapa alat ukur yang telah dikalibrasi dan telah dilakukan penyesuaian dengan faktor koreksi yang ada pada setiap alat ukur yang digunakan. Alat yang berfungsi untuk mengukur regangan yang terjadi pada baja tulangan adalah *strain gauge*. Beberapa buah *strain gauge* dipasang di lokasi-lokasi tertentu. Pada pengujian ini, *strain gauge* yang digunakan adalah tipe FLA-6-11. Alat untuk mengukur perpindahan atau lendutan yang terjadi pada model uji adalah *Linear Variable Displacement Transducer* (LVDT). Beberapa buah LVDT ditempatkan pada lokasi-lokasi yang akan diamati perpindahannya. Pada pengujian ini, digunakan satu alat ukur bernama *wire gauge*. Fungsi alat ini

sama dengan LVDT, namun kapasitas pengukurannya lebih besar. Alat untuk mengukur beban horisontal yang sedang diberikan pada model uji pada saat perpindahan tertentu adalah *load cell*. Pada pengujian ini, digunakan dua buah *load cell* dengan kemampuan pengukuran beban masing-masing sampai dengan 100 ton.

Dalam melakukan perancangan *n-Panel System*, jenis sistem dinding struktural yang dipilih adalah Sistem Dinding Penumpu. Sistem struktural ini tidak memiliki rangka ruang pemikul beban gravitasi secara lengkap. Dinding geser berperan sebagai dinding penumpu yang memikul hampir semua beban gravitasi. Beban lateral juga dipikul oleh dinding geser (BSN, 2002). Model uji *n-Panel System* tidak memiliki rangka ruang. Pada model uji tersebut, panel berperan sebagai dinding pemikul beban gravitasi dan beban lateral.

Model bangunan adalah suatu unit hunian/ perkantoran lima lantai seperti yang diperlihatkan pada Gambar 4. Modul denah bangunan berukuran total: lebar 3,60 m; panjang panel dari as ke as serta *cantilever* sisi kiri dan sisi kanan (6,00+1,50+1,50) m; sehingga luasnya menjadi 32,40 m². Tipe panel dinding terdiri dari dua jenis. Tipe ke-1 dari as ke as berdimensi panjang 6,00 m, mempunyai *cantilever* sisi kiri dan kanan masing-masing 1,50 m, tinggi 3,00 m, lebar kaki kolom 1,20 m, tinggi balok 0,90 m dan tebal 0,15 m. Tipe ke-2 dari as ke as berdimensi panjang 3,4 m, tinggi 3,00 m, lebar kaki kolom 0,75 m, tinggi balok 0,90 m dan tebal 0,15 m. Massa total bangunan adalah 188,78 ton.

Beban lateral gempa pada setiap lantai bangunan dihitung dengan metode statik ekuivalen seperti yang tertera pada Tabel 1. Nilai beban lateral gempa total rencana yang diambil adalah yang paling besar, yaitu pada tanah lunak. Pemilihan lokasi tanah lunak adalah agar beban lateral rencana yang harus ditahan oleh struktur adalah beban terbesar yang mungkin ada. Distribusi beban lateral gempa statis rencana pada arah yang sejajar dengan arah memanjang panel tertera pada Tabel 2.



Gambar 4 Tampak Model Bangunan (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

Tabel 1 Analisis Beban Lateral Gempa Statik Rencana

No.	Uraian	Tanah Lunak	Tanah Sedang	Tanah Keras
1	W_{tot} (Massa Bangunan Total); ton		188.78	
Koefisien Gempa untuk wilayah gempa 6:				
2	C_1 = faktor respons getar dari spektrum gempa rencana (BSN, 2002)	0.95	0.9	0.83
3	I = Faktor keutamaan (BSN, 2002)	1	1	1
4	f_1 = faktor kuat lebih beban dan bahan yang terkandung di dalam struktur gedung (BSN, 2002)	1.6	1.6	1.6
5	μ_m = faktor daktilitas maksimum struktur gedung (BSN, 2002)	2.7	2.7	2.7
6	R_m (Faktor Reduksi Gempa Maksimum) = $\mu \cdot f_1$ (BSN, 2002)	4.5	4.5	4.5
7	V_{tot} (Gaya geser dasar horizontal total) = $(C_1/R) \times I \times W_{tot}$	39.85	37.76	34.82

Sumber: Pusat Litbang Permukiman, 2008

Tabel 2 Distribusi Beban Lateral Gempa Statis Rencana pada Arah Memanjang Panel

Tingkat	Berat	h_i	$W_i \times h_i$	F_i	$F_i/2$
	W_i (t)	(m)	(t.m)	(t)	(t)
5	33.77	15.7	530.26	12.23	6.11
4	37.76	12.56	474.21	10.93	5.47
3	37.76	9.42	355.66	8.2	4.1
2	37.76	6.28	237.11	5.47	2.73
1	41.74	3.14	131.05	3.02	1.51
W total =	188.78	$\Sigma W_i \times h_i =$	1728.29	39.85	19.93

Sumber: Pusat Litbang Permukiman, 2008

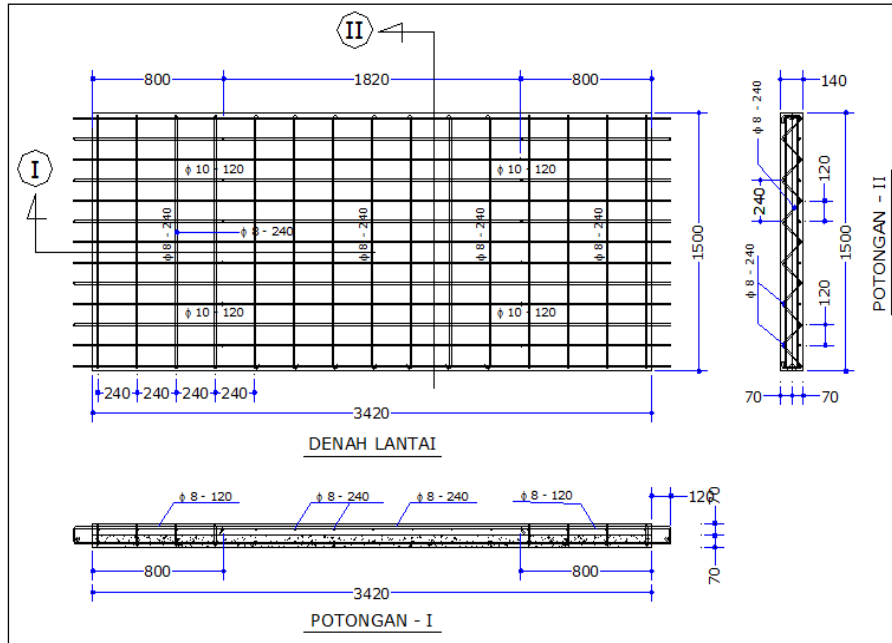
Beban lateral gempa total rencana (V_{tot}) pada tanah lunak untuk satu modul bangunan adalah sebesar 39,85 ton. Dengan demikian, model uji dinding geser harus direncanakan minimal mampu memikul beban lateral rencana (V_n) sebesar = $f_1 \times V_{tot} = 1,6 \times 39,85 = 63,76$ ton.

Benda uji bangunan tiga dimensi terdiri dari dua panel dinding tipe ke-1, dua panel dinding tipe ke-2 dan empat modul pelat lantai antar tingkat; yaitu suatu modul yang dicor setebal 0,07 m (*half slab*), yang kemudian dicor lagi setebal 0,07 m saat dipasang sebagai bagian struktur benda uji, sehingga menjadi *full slab* seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5, 6 dan 7. Benda uji ini ditempatkan di atas fondasi beton yang dijangkarkan ke lantai ruangan laboratorium.

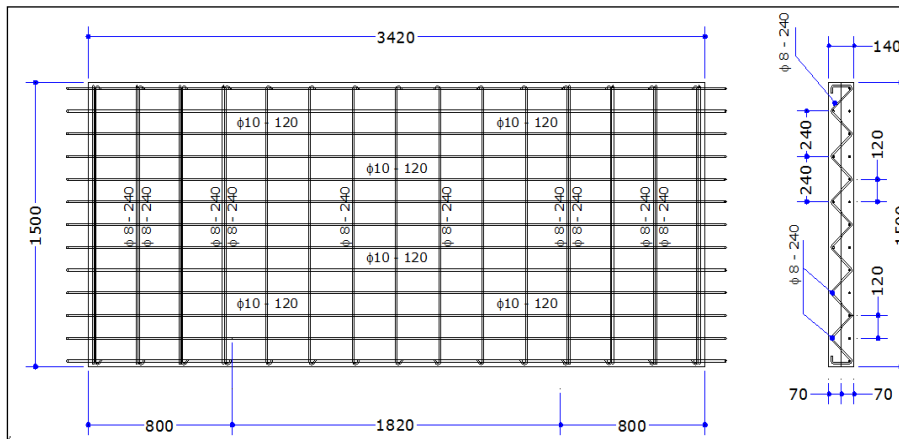
Panel tipe ke-1 mempunyai dimensi panjang 6,0 m, tinggi 3,0 m, lebar kaki kolom 1,20 m, tinggi balok 0,90 m dan tebal 0,15 m dengan bukaan di tengah

panel berdimensi panjang 3,6 m dan tinggi 2,1 m. Panel tipe ke-2 mempunyai dimensi panjang 3,4 m, tinggi 3,0 m, lebar kaki kolom 0,75 m, tinggi balok 0,90 m dan tebal 0,15 m dengan bukaan di tengah panel berdimensi panjang 1,9 m dan tinggi 2,1 m. Pada setiap kaki panel tipe ke-1 dan tipe ke-2, terdapat kolom berdimensi 150 mm x 150 mm dan tulangan 4 D13 (Gambar 8 dan 9).

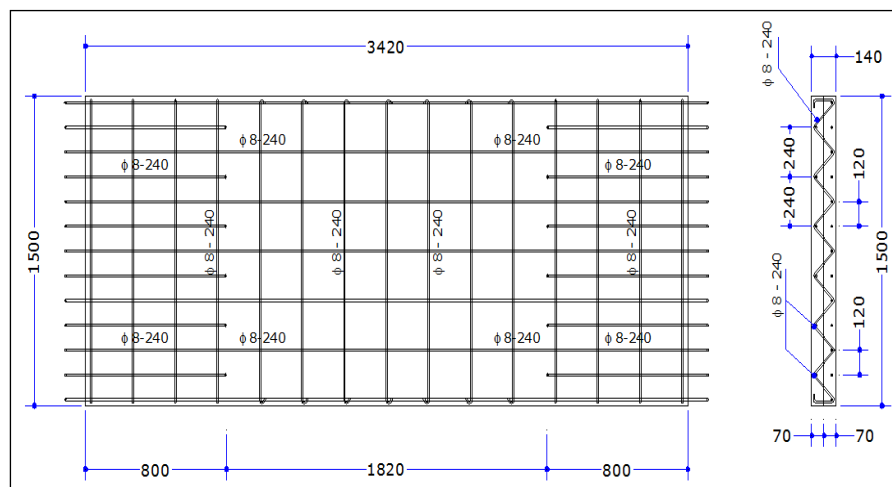
Setiap modul pelat lantai mempunyai dimensi panjang 3,42 m, lebar 1,5 m dan tebal total 0,14 m. Bagian panel dinding dikosongkan untuk mengakomodasi adanya ruang terbuka yang luas, atau dapat diisi dengan dinding partisi. Semua panel dinding dan pelat lantai ini dirangkaikan satu sama lain sedemikian rupa sehingga membentuk ruang. Sambungan yang digunakan adalah jenis sambungan kering (las) dan sambungan basah dengan adukan nonsusut seperti yang tertera pada Gambar 10.



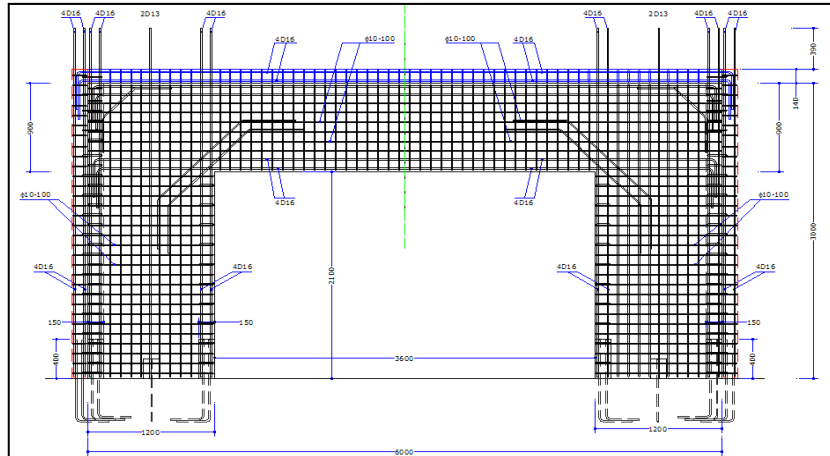
Gambar 5 Detail Tulangan Modul Pelat Lantai (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



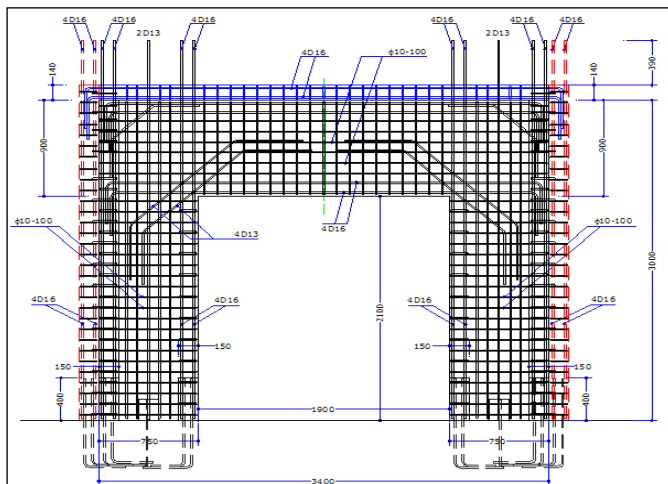
Gambar 6 Detail Tulangan Lapisan Bawah Modul Pelat Lantai (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



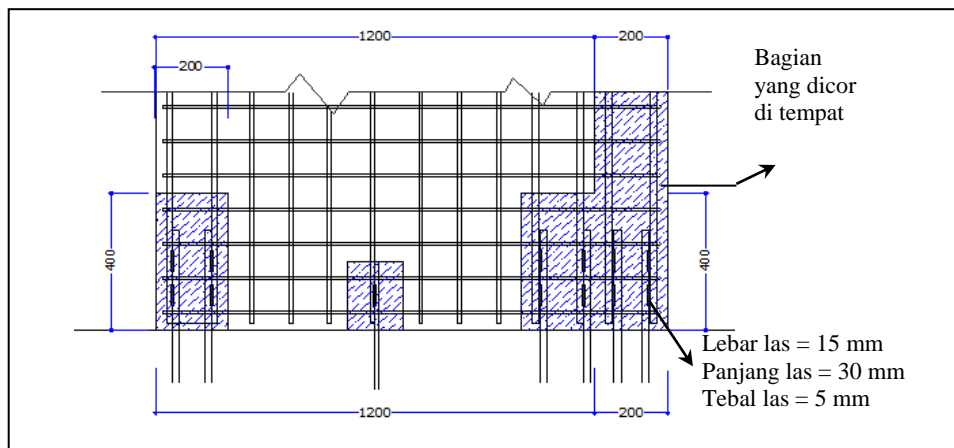
Gambar 7 Detail Tulangan Lapisan Atas Modul Pelat Lantai (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



Gambar 8 Detail Tulangan Model Uji Panel Tipe ke-1 (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



Gambar 9 Detail Tulangan Model Uji Panel Tipe ke-2 (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



Gambar 10 Detail Sambungan Tulangan Vertikal Panel Berupa Kombinasi Sambungan Lewatan dan Las (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian tulangan baja dilakukan terhadap enam BJTP-8, enam BJTP-10, enam BJTD-13 dan tiga BJTD-16. Pengujian bahan beton dilakukan terhadap tiga silinder uji 10/20 sebagai bahan beton fondasi, empat silinder uji 15/30 sebagai bahan beton dinding, tiga silinder uji 15/30

sebagai bahan beton pelat lantai, tiga silinder uji 15/30 sebagai bahan beton kolom dan tiga silinder uji 15/30 sebagai bahan beton *topping* pelat. Nilai rata-rata hasil uji kuat leleh dan kuat batas tulangan baja serta kuat tekan beton tertera pada Tabel 3 dan Tabel 4. Nilai kuat leleh tulangan baja ulir direncanakan sebesar 390 MPa, kuat leleh

rencana baja polos 240 MPa dan kualitas bahan las (elektroda) adalah sesuai dengan spesifikasi AWS A5.1 E6013, yaitu kuat leleh minimum 415 MPa dan kuat tarik minimum 495 MPa. Nilai kuat tekan beton rencana untuk fondasi, panel dinding, *half slab* dan *topping* untuk *half slab* adalah 30 MPa. Nilai kuat tekan beton rencana untuk kolom adalah 35 MPa. Hasil uji tersebut memperlihatkan kekuatan bahan baja tulangan BJTP-8 dan BJTP-10 memenuhi nilai rencana. Sedangkan, kekuatan bahan baja tulangan BJTD-13 dan BJTD-16 tidak memenuhi nilai rencana. Nilai kuat tekan beton untuk fondasi, lantai semi pracetak dan *topping* memenuhi nilai rencana. Sedangkan, nilai kuat tekan beton untuk panel dinding dan kolom tidak memenuhi rencana.

Tabel 3 Nilai Rata-rata Kuat Leleh dan Kuat Batas Tulangan Baja

No.	Baja Tulangan	Dia. (mm)	fy	fu	ε (10-6)	ε max (10-6)
			rata-rata (MPa)	rata-rata (MPa)		
1	BJTP-8	8	255.15	389.76	1275.75	1948.8
2	BJTP-10	10	341.44	497.34	1707.2	2486.7
3	BJTD-13	13	263.69	391.51	1318.45	1957.55
4	BJTD-16	16	295.1	437.34	1475.5	2186.7

Sumber: Puslitbang Peremukiman, 2008

Tabel 4 Nilai Rata-rata Kuat Tekan Beton

No.	Komponen	fc'
		(MPa)
1	Fondasi	44.76
2	Panel Dinding	29.85
3	Lantai Semi Pracetak	32.08
4	Kolom	34.96
5	Topping	36.85

Sumber: Puslitbang Peremukiman, 2008

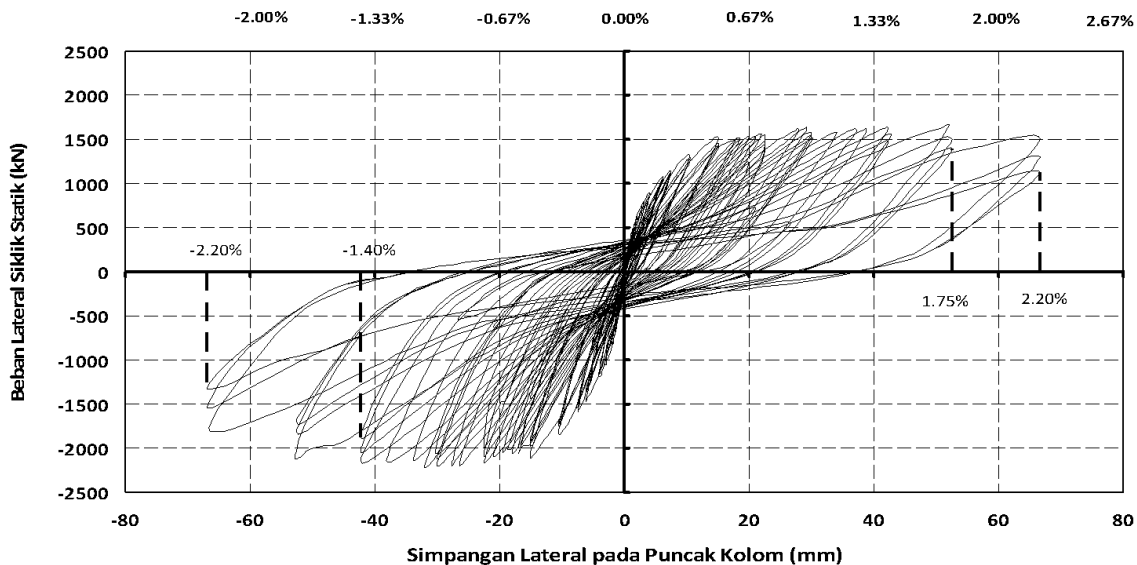
Pengujian *n-Panel System* dengan beban lateral siklik statik dilakukan untuk mengetahui perilaku benda uji dengan mengkaji beberapa parameter pengukur tingkat kinerja, yaitu beban ideal, kestabilan struktur, pola retak dan daktilitas.

Pengujian dengan beban lateral siklik statik harus dilakukan hingga *story drift* (δ/h_w) mencapai nilai tertentu berdasarkan persamaan (1).

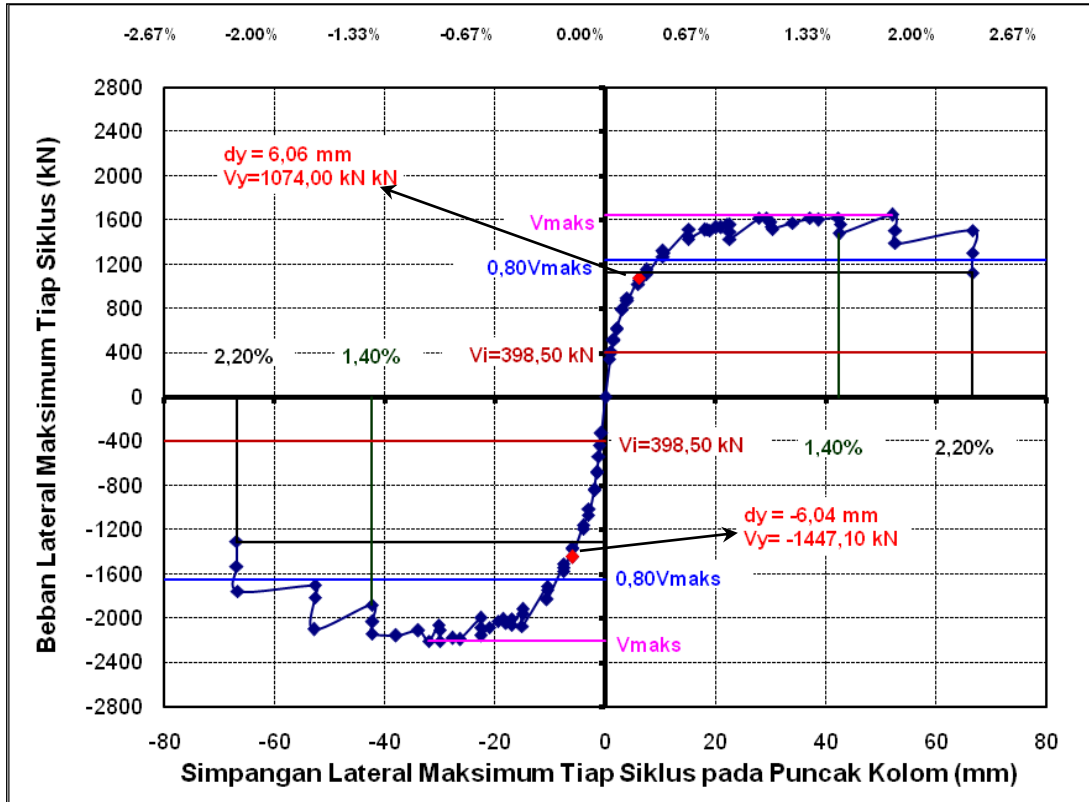
Panjang modul pada persamaan (1) adalah panjang total panel (l_w) sebesar (0,15+1,20) m x 2 panel. Tinggi benda uji (h_w) adalah (3,00+0,14) m. Maka, diperoleh *story drift* minimal yang harus diaplikasikan pada model uji sampai saat akhir pengujian adalah 1,279 %. Pada saat pengujian, beban lateral terus ditingkatkan sampai dengan 2,200 % untuk melihat kinerja struktur pada *story drift* yang masih bisa dicapai oleh model uji.

Hubungan beban lateral siklik dan simpangan pada ujung atas model uji diperlihatkan pada Gambar 11. Pada awal pengujian saat *story drift* 0 % s.d. 0,671 %, kurva masih memperlihatkan adanya disipasi energi yang baik. Bentuk kurva mulai memperlihatkan adanya *pinching* (penyempitan lebar kurva pada arah diagonal di sekitar pusat sumbu grafik) pada saat *story drift* di atas 0,671 %. Hal ini disebabkan benda uji mulai mengalami kerusakan akibat beban geser.

Pada Gambar 12, diperlihatkan beban ideal (V_i) dan beban leleh (V_y). Nilai beban leleh adalah lebih tinggi daripada beban ideal. Nilai beban leleh diperoleh dari hasil uji. Sedangkan, beban ideal dihitung dengan menggunakan data hasil uji bahan dan dimensi detil tulangan. Beban ideal yang diperoleh dari hasil perhitungan adalah 389,50 kN.



Gambar 11 Kurva Hubungan Beban-Simpangan (Pusat Litbang Peremukiman, 2008)



Gambar 12 Kurva *Envelope* Hubungan Beban dengan Simpangan (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

Kestabilan benda uji struktur *n-Panel System* ditinjau berdasarkan tiga kriteria sebagai berikut (BSSC, 2003).

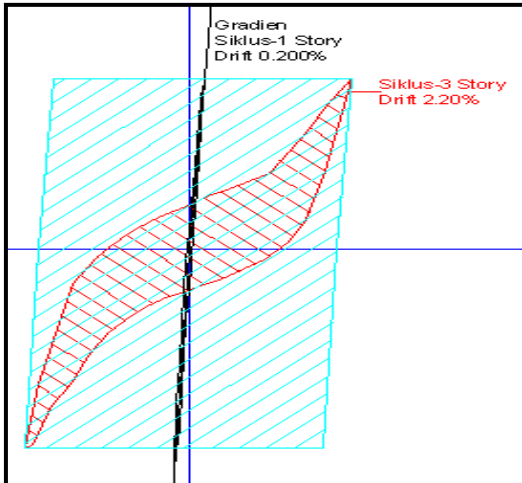
Kriteria kestabilan struktur ke-1 mensyaratkan nilai beban lateral pada akhir pengujian minimal adalah 80 % dari beban lateral puncak pada *story drift* berdasarkan persamaan (1). Nilai beban dorong pada *story drift* 1,75 % siklus ke-3 adalah 84,30 % dari beban dorong maksimum. Nilai beban tarik pada *story drift* 1,40 % siklus ke-3 adalah 85,21 % dari beban tarik maksimum. Karena benda uji masih stabil pada *story drift* 1,75 % siklus ke-3 (pembebanan dorong) dan 1,40 % siklus ke-3 (pembebanan tarik), maka model uji memenuhi syarat kestabilan struktur ke-1 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 12. Demikian pula, model uji memenuhi kriteria kestabilan struktur ke-1 pada *story drift* yang lebih kecil daripada 1,75 % siklus ke-3 (pembebanan dorong) dan 1,40 % siklus ke-3 (pembebanan tarik).

Kriteria kestabilan struktur ke-2 mensyaratkan nilai rasio luas area yang dibentuk dari perpotongan garis sejajar yang dibentuk dari kekakuan model uji saat siklus pertama di *story drift* 0,2 % dengan puncak siklus ke-3 di *story drift* yang ditinjau dibandingkan dengan luas area yang dibentuk oleh kurva histeresis siklus ke-3 di *story drift* yang ditinjau harus lebih besar atau sama

dengan 0,125. Pada akhir pengujian, yaitu pada *story drift* 2,20 %, nilai rasio area adalah 0,228. Maka, model uji memenuhi kriteria kestabilan struktur ke-2 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13. Demikian pula, model uji memenuhi kriteria kestabilan struktur ke-2 pada *story drift* yang lebih kecil daripada 2,20 % siklus ke-3 (pembebanan dorong dan pembebanan tarik).

Kriteria kestabilan struktur ke-3 mensyaratkan nilai rasio kekakuan model uji saat awal pengujian dengan gradien yang dibatasi oleh deformasi sebesar 1/10 *story drift* berdasarkan persamaan (1) pada kurva histeresis siklus ke-3 di *story drift* yang ditinjau harus sama atau lebih besar dari 0,10. Kriteria ini dipenuhi di *story drift* 1,287 % siklus ke-3 pada pembebanan dorong dan pembebanan tarik dengan nilai rasio kekakuan berturut-turut adalah 0,119 dan 0,121 seperti yang diperlihatkan pada Gambar 14. Demikian pula, model uji memenuhi kriteria kestabilan struktur ke-3 pada *story drift* yang lebih kecil daripada 1,287 % siklus ke-3 (pembebanan dorong dan pembebanan tarik).

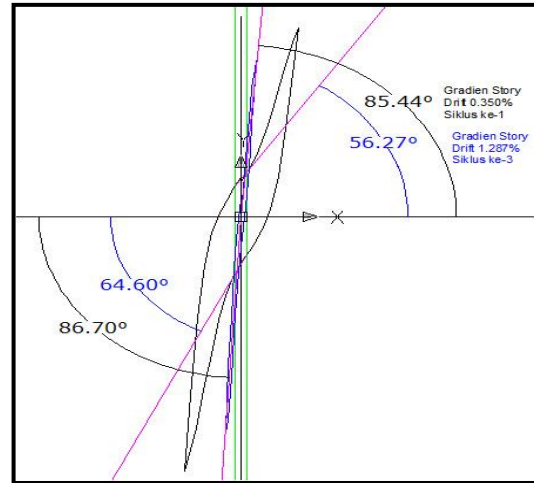
Dari peninjauan tiga kriteria kestabilan struktur tersebut, model uji *n-Panel System* memenuhi syarat karena stabil pada *story drift* 1,287 % siklus ke-3. *Story drift* ini lebih besar daripada *story drift* minimum yang harus dicapai berdasarkan persamaan (1), yaitu 1,279 %.



Gambar 13 Area Disipasi Energi pada Story Drift 2,20 % Siklus ke-3 (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

Berdasarkan batas kestabilan, diperoleh nilai daktilitas (μ) yang merupakan perbandingan simpangan maksimum saat struktur masih memenuhi syarat kestabilan struktur (δ_u) dengan simpangan saat terjadi leleh tulangan baja pertama kali (δ_y) seperti pada Tabel 5.

Kondisi leleh pertama pada pembebanan dorong terjadi saat *step* ke-271, *story drift* 0,20 % siklus ke-1, pada tulangan longitudinal D13 yang menghubungkan dinding geser dengan fondasi dan tercatat oleh *strain gauge* (SG)-7, adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 15. Sedangkan, kondisi leleh pertama pada pembebanan tarik



Gambar 14 Perbandingan Gradien Kurva pada Story Drift 1,287 % Siklus ke-3 (Hasil Analisis)

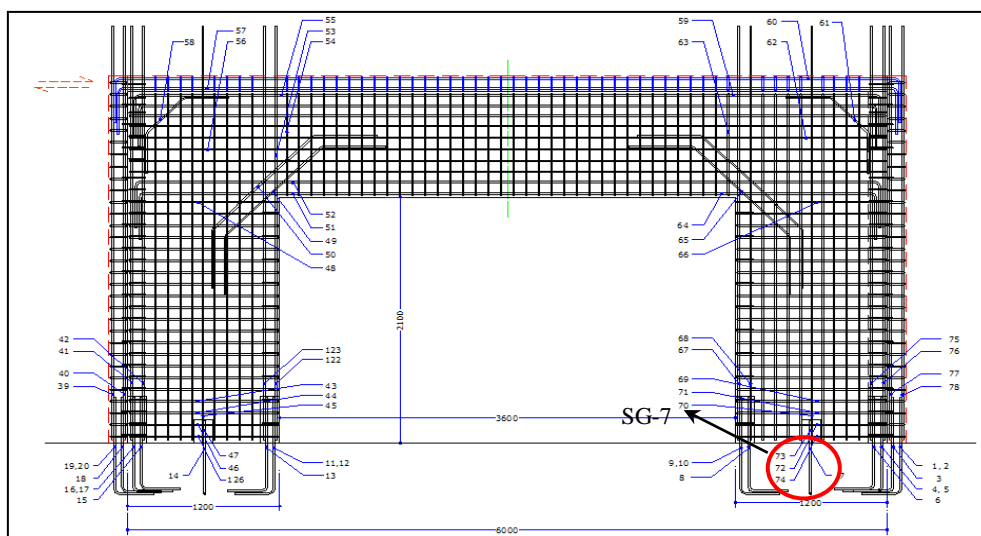
terjadi saat *step* ke-283 di *story drift* 0,20 % siklus ke-1, pada tulangan longitudinal D16 yang menghubungkan kolom interior yang dekat dengan *jack* pemberi beban dengan fondasi dan tercatat pada SG-28, adalah seperti yang diperlihatkan pada Gambar 16.

Karena model uji berupa bangunan satu lantai, maka lokasi disipasi energi paling banyak terjadi di bagian dasar panel yang tersambung dengan fondasi seperti yang diperlihatkan dalam pola retak pada Gambar 17. Maka, faktor reduksi gempa (R) model uji dibatasi sebesar 6,50 (BSN, 2002).

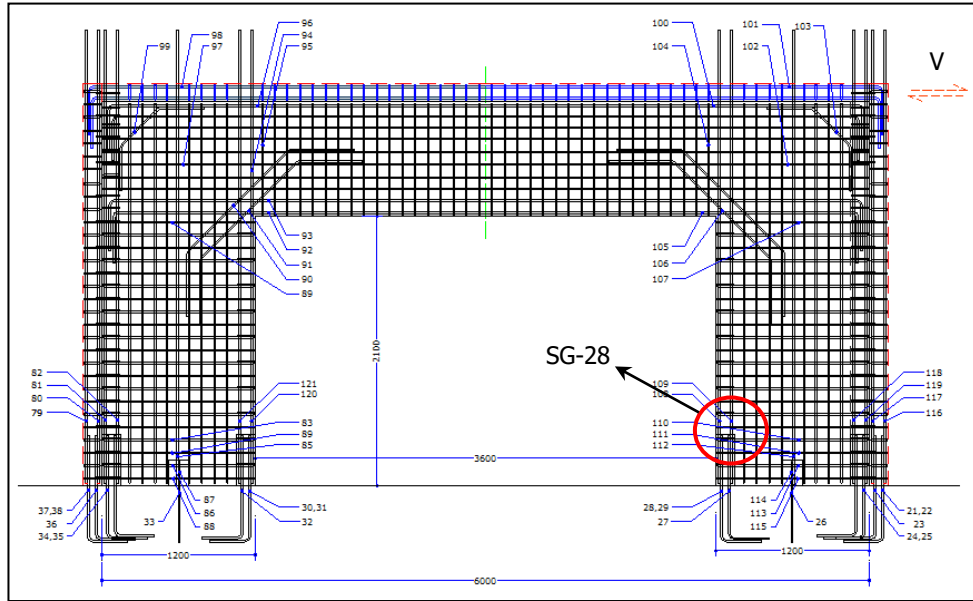
Tabel 5 Nilai Daktilitas Model Uji *n-Panel System* Berdasarkan Nilai Simpangan

Jenis Pembebanan	δ_y	δ_u	Story drift stabil	μ hasil uji	R
	(mm)	(mm)			
Dorong	6.06	38.60	1,287 % siklus ke-3	6.37	6.50
Tarik	-6.04	-37.98	1,287 % siklus ke-3	6.29	6.50

Sumber: Hasil Analisis



Gambar 15 Lokasi Strain Gauge Sisi Utara (Pusat Litbang Permukiman, 2008)



Gambar 16 Lokasi *Strain Gauge* Sisi Selatan (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

Perilaku keruntuhan benda uji dianalisis dari pola keretakan pada sisi panel yang menahan beban lateral siklik statik yang ditingkatkan dengan kontrol simpangan. Retak awal berupa retak rambut terjadi pada *step* ke-170 di daerah kaki panel vertikal sisi pada kiri bagian dalam dan kanan bagian luar, masing-masing pada satu lokasi garis retak, yaitu pada deformasi 3,02 mm dengan beban tarik sebesar 1015,30 kN. Pada saat retak awal, belum ada tulangan yang leleh. Retakan terus bertambah pada daerah kaki panel vertikal, diikuti oleh terjadinya leleh pertama pada *step* ke-271 pada saat beban dorong dan *step* ke-283 pada saat beban tarik. Di akhir siklus-siklus pembebanan berikutnya, kerusakan besar terjadi pada kedua kaki panel vertikal bagian dalam. Sedangkan, pada kaki panel vertikal bagian luar, kerusakan hanya berupa retak-retak kecil. Kondisi ini memperlihatkan bahwa tulangan kaki panel vertikal bagian luar masih memberikan kekuatan yang dapat dibuktikan dari grafik hasil uji, di mana penurunan kekuatan relatif kecil. Beban dorong pada menjelang akhir pengujian beban dorong (*story drift* 2,20 % siklus ke-1) adalah 91,25 % dari beban dorong puncak; dan beban tarik pada menjelang akhir pengujian beban tarik (*story drift* 2,20 % siklus ke-1) adalah 79,73 % dari beban tarik puncak (Gambar 12). Berdasarkan pola retak, model uji memperlihatkan perilaku yang cukup baik dalam memencarkan energi dari beban lateral gempa karena terjadi retakan geser yang menyebar dan terus bertambah sampai pada *story drift* 2,20 %.

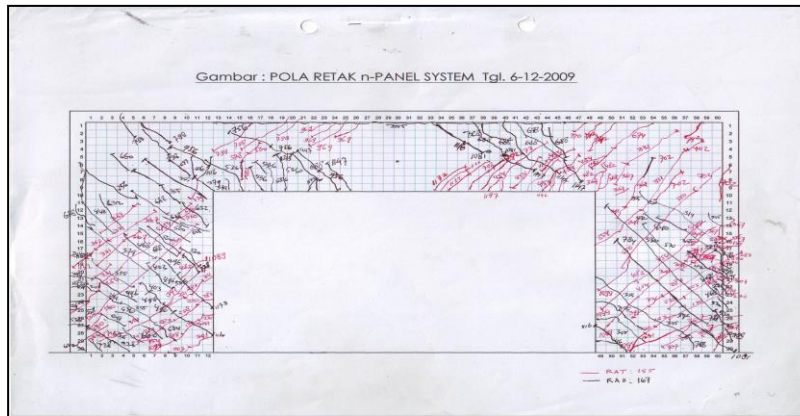
Menjelang akhir pengujian, tulangan longitudinal pada kaki panel vertikal di bagian dalam terputus. Tetapi, model uji masih memberikan kekuatan sisa dan masih dalam kondisi berdiri.

Tulangan-tulangan penahan gaya geser yang dipasang diagonal mengalami leleh pada *step* pembebanan dan *story drift* yang berbeda-beda. Lokasi *strain gauge* pada tulangan tersebut seperti yang diperlihatkan pada Gambar 15 dan 16. Tulangan penahan gaya geser mengalami leleh pertama pada pada *step* ke-306 di *story drift* 0,20% siklus ke-2, yaitu pada deformasi 6,04 mm dan beban tarik sebesar 1374,20 kN. Pada Tabel 6 diperlihatkan *step*, regangan, *strain gauge*, *story drift* dan siklus saat leleh pertama terjadi pada tulangan diagonal penahan gaya geser.

Pola keretakan pada bagian panel horisontal memperlihatkan kerusakan akibat gaya geser. Retak yang dominan terdapat pada bagian pojok panel. Pada bagian tengah panel horisontal tidak terdapat retak.

Dari pola keretakan secara keseluruhan, terlihat bahwa model uji mendisipasi energi melalui keruntuhan geser pada panel-panel vertikal dan panel-panel horisontal, terutama pada kaki-kaki panel vertikal yang tersambung dengan fondasi.

Tabel 7 memperlihatkan *step*, regangan, *strain gauge*, *story drift* dan siklus saat leleh pertama terjadi pada tulangan longitudinal panel horisontal.



Gambar 17 Pola Keretakan pada Panel yang Menahan Beban Lateral Siklik Statik (Pusat Litbang Permukiman, 2008)

Tabel 6 Step Pembebanan, Nilai Regangan, *Strain Gauge*, *Story Drift* dan Siklus Saat Leleh Pertama pada Tulangan Longitudinal Penahan Gaya Geser

Step	Regangan (m)	SG shear	Story drift	Siklus ke-	Sisi
306	1581	SG-49	0,20 %	2	Utara-kiri
439	1544	SG-65	0,75 %	1	Utara-kanan
454	1520	SG-106	0,35 %	1	Selatan-kanan
536	1549	SG-91	0,50 %	1	Selatan-kiri
838	1538	SG-50	0,75 %	1	Utara-kiri
1116	1502	SG-90	1,20 %	2	Selatan-kiri

Sumber: Hasil Analisis

Tabel 7 Step Pembebanan, Nilai Regangan, *Strain Gauge*, *Story Drift* dan Siklus Saat Leleh Pertama pada Tulangan Longitudinal Bagian Panel Horizontal

Step	Regangan (μ)	SG geser	Story drift	Siklus ke-	Jenis Beban	Sisi
387	1531	97	0,250 %	2	Tarik	Selatan kiri, horisontal, tengah
535	1530	64	0,500 %	1	Dorong	Utara-kanan, horisontal, bawah
550	1541	51	0,500 %	1	Tarik	Utara-kiri, horisontal, bawah
784	1517	100	0,736 %	3	Dorong	Selatan-kanan, horisontal, atas

Sumber: Hasil Analisis

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian terhadap model *n-Panel System*, diperoleh kesimpulan bahwa model uji tersebut memenuhi kriteria kestabilan struktur yang sesuai dengan FEMA 450 dan termasuk dalam kategori dinding pracetak daktail penuh dengan nilai faktor reduksi gempa dibatasi sebesar 6,50. Keruntuhan yang terjadi adalah akibat gaya geser pada kaki panel. Hal ini terlihat dari *pinching* pada kurva histeresis, pola retak dan leleh pada tulangan.

Berdasarkan hasil penelitian, perlu dilakukan kajian lebih lanjut untuk memperoleh detail tulangan baja yang lebih efisien agar menghasilkan sistem struktur yang lebih baik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Tim Peneliti Laboratorium Struktur dan Konstruksi Bangunan,

Pusat Litbang Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum.

Makalah ini bersumber dari Laporan Pengembangan Teknologi Pracetak (*n-Panel System*) yang dibiayai dengan APBN Tahun Anggaran 2008.

DAFTAR PUSTAKA

- BSN. 2002. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Bangunan Gedung SNI - 1726 - 2002*.
- BSN. 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung SNI - 1726 - 2002*.
- BSSC. 2003. *NEHRP RECOMMENDED PROVISIONS FOR SEISMIC REGULATIONS FOR NEW BUILDINGS AND OTHER STRUCTURES (FEMA 450) Part 1: Provisions*, hlm. 167-169.
- Hawkins, N. M. and Ghosh, S. K., *Proposed Revision to 1997 NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) Recommended Provisions for Seismic Regulation for Precast Concrete*

- Structures, Part 2-Seismic-Forces-Resisting Systems*. PCI Journal, September-Oktober 2000, pp. 34-42.
- Paulay, T. and Priestly, M.J.N. 1992. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York: John Wiley & Sons.
- Pusat Litbang Permukiman. 2008. *Laporan Pengembangan Teknologi Pracetak (n-Panel System)*.
- Yuliari, E. dan Suhelda. 2008. Tugas Akhir Sarjana Teknik Sipil ITB. *Evaluasi Perbandingan Konsep Desain Dinding Geser Tahan Gempa Berdasarkan SNI Beton*.