

KINERJA STRUKTUR PORTAL TERBUKA BETON BERTULANG TERHADAP BEBAN LATERAL

Raden Mariana Sari Badriah¹, Iswandi Imran²

¹Mahasiswa Program Magister Teknik Sipil, Program Pascasarjana,
Universitas Katolik Parahyangan, e-mail: ririe89@yahoo.com

²Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

ABSTRAK

Kejadian gempa bumi telah banyak menyebabkan runtuhnya dan robohnya bangunan beton bertulang terutama rumah dan gedung. Salah satu penyebabnya adalah banyaknya bangunan dibawah tujuh lantai termasuk rumah di bangun tanpa mengikuti peraturan yang ada. Sehingga pada saat gempa terjadi, bangunan tersebut mengalami kerusakan. Penelitian ini akan mencakup aspek pengujian dan analitis. Uji eksperimental dilakukan pada satu portal terbuka yang memiliki satu bentang dan satu tingkat dengan skala model setengah. Kerusakan yang terjadi berupa retak lentur, geser dan rompal pada beton kolom dan sambungan balok kolom. Kerusakan akibat beban lateral diperbaiki dan diuji kembali terhadap beban lateral. Perbaikan portal dilakukan hanya pada beton yang rusak akibat beban lateral. Pembebanan yang diaplikasikan adalah dalam bentuk beban lateral siklik sebagai simulasi beban gempa. Tujuan dari eksperimen ini diharapkan bisa diperoleh kinerja portal beton bertulang sebelum mengalami kerusakan (portal terbuka/portal utuh) dan portal setelah mengalami kerusakan kemudian diperbaiki (portal perbaikan). Dari analisis hasil pengujian, diperoleh kapasitas lateral portal utuh dan portal perbaikan relatif sama. Tetapi, kekakuan dan kemampuan mendisipasi energi serta daktilitas portal utuh lebih besar dibandingkan portal perbaikan. Hal ini menunjukkan bahwa kinerja portal utuh tetap lebih baik dibandingkan portal perbaikan.

Kata Kunci : Portal terbuka, Portal Perbaikan, Perilaku Histeresis, Disipasi energi, dan Daktilitas.

ABSTRACT

Earthquakes have caused the collapse of many reinforced concrete buildings, especially houses and buildings. One reason is the number of buildings under seven floors including homes built without following the rules. So when the earthquake occurred, the building was damaged. This research will include experimental study and analytical aspects of open frame and repaired frame against lateral cyclic load. Experimental tests carried out on the open frames which has one bay and one level with a half scale model. The damaged was characterized by flexural ,shear cracking and spalling of the concrete column, and beam column joint. Repairs carried out only on concrete repair damaged lateral cyclic load. Damage due to lateral loads repaired and re-tested against lateral loads. The loading is applied in the form of cyclic lateral loads as simulated earthquake load. The purpose of this experiment is expected to be obtained the performance of reinforced concrete frame and repaired frame under cyclic lateral loads. From the analysis result, lateral capacities of open frame and repaired frame relatively the same. However, stiffness, ductility and ability to dissipate energy from the open frame greater than repaired frame.

Key words : Open Frame, Repaired Frame, Hysteresis Behavior, energy dissipation, and ductility.

1. PENDAHULUAN

Kejadian gempa bumi telah banyak menyebabkan runtuhnya dan robohnya sarana struktur gedung dan rumah yang menelan korban jiwa dan materil. Salah satu penyebabnya adalah banyaknya bangunan dibawah tujuh lantai termasuk rumah di

bangun tanpa mengikuti peraturan yang ada. Sehingga pada saat gempa terjadi, bangunan tersebut mengalami kerusakan.

Penelitian ini akan mencakup aspek pengujian dan analitis. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian portal beton bertulang tanpa adanya dinding pengisi (portal terbuka) terhadap beban lateral gempa. Portal beton yang rusak akibat beban lateral gempa diperbaiki. Selanjutnya dilakukan pengujian portal perbaikan terhadap beban lateral gempa. Perbaikan portal hanya dilakukan pada betonnya saja. Dari hasil pengujian tersebut diharapkan bisa diperoleh kinerja dari portal beton bertulang sebelum mengalami kerusakan (portal utuh) dan setelah mengalami perbaikan (portal perbaikan) terhadap beban lateral.

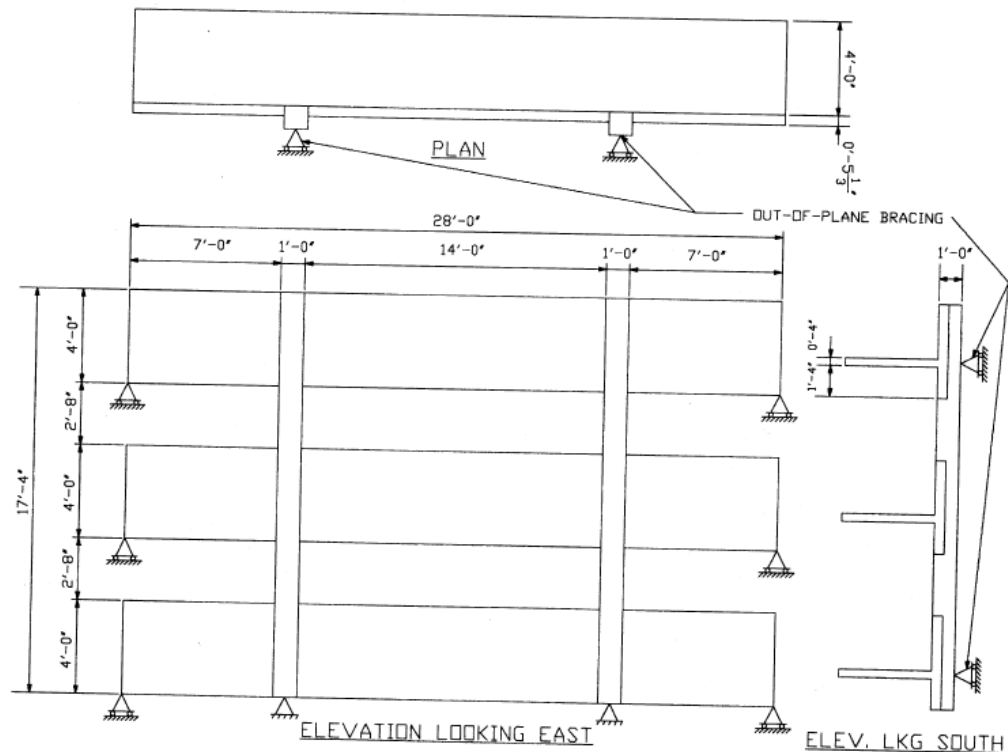
2. STUDI PUSTAKA

2.1 Riset Terdahulu Pengujian Portal Perbaikan [Stoppenhagen et al , 1995]

Pengujian perilaku portal beton bertulang yang diperbaiki telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Pengujian ini dilakukan dengan faktor skala benda uji 2/3 kali prototype bangunan beton bertulang 7 lantai, rangka dua bentang yang mewakili lantai ke tiga, empat dan lima dari gedung 7 lantai yang direncanakan terhadap beban gempa sesuai dengan peraturan UBC 1955 (dilihat pada Gambar 2.1). Mutu beton rencana adalah 3000 psi dengan mutu tulangan kolom 60 psi dan lainnya 40 psi. Dimensi dan detail penulangan dapat dilihat pada Gambar 2.2.

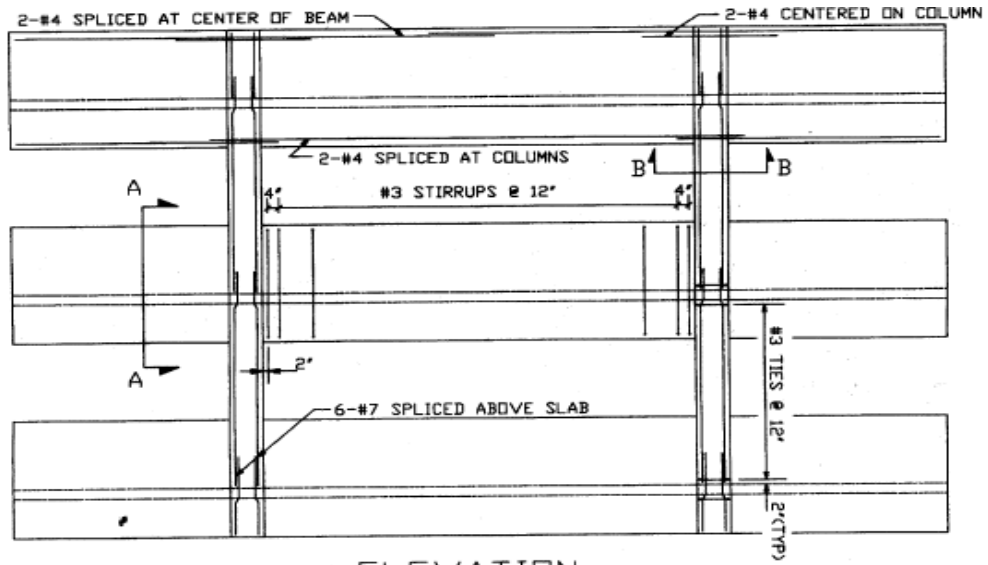
Setelah pengetesan kolom pada lantai pertama mengalami kerusakan berat dengan pengelupasan beton yang berat dan retak geser memperluas sepenuhnya melalui kolom. Lebar retak dalam kolom mencapai 0.5 in, ujung kolom mempunyai perpindahan permanen sebesar 3 in pada lantai pertama. Kolom lantai kedua mengalami kerusakan yang lebih ringan. Balok tidak mengalami kerusakan berat, retak menutup kembali saat beban dilepaskan. Kerusakan kolom lantai pertama bisa dilihat pada Gambar 2.3.

Model (benda uji) rangka beton bertulang dengan kerusakan berat pada kolom yang diperbaiki dengan cara membungkus kolom lama dengan kolom baru. Kerusakan terdiri dari kerusakan retak geser berat dan rompal pada kolom beton.

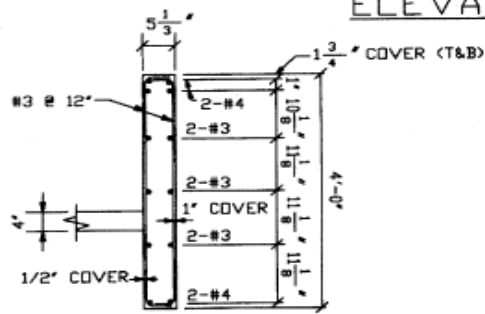


Gambar 2.1 Model Rangka Asli, Dua Bentang Antara Tingkat ke Tiga dan Lima dari Prototype Exterior Tujuh Lantai Rangka Pemikul Momen [Stoppenhagen et al , 1995].

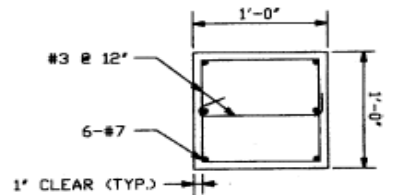
Untuk memperbaiki kerusakan pada kolom tersebut maka kolom baru direncanakan untuk meningkatkan kapasitas lateral dari rangka beton bertulang dan mengalihkan mode kegagalan dari kegagalan geser pada kolom menjadi kegagalan lentur pada balok. Metoda yang dipilih didesain untuk memperbaiki kolom dan meningkatkan kekuatan dari kolom untuk menahan beban gempa saat ini. Kolom yang rusak dibungkus dengan kolom baru yang berisi tulangan longitudinal dan geser. Dalam kasus ini, interaksi antara balok dan kolom baru sangat penting untuk mentransfer kegagalan ke balok. Balok dikasarkkan dengan palu beton elektrik untuk meningkatkan interaksi antara kolom beton yang baru dengan balok. Lubang dibor melalui balok sehingga tulangan geser kolom menerus melalui balok. Konsep perbaikan dapat dilihat pada Gambar 2.4. Semua desain mengacu kepada ACI 318-83. Selain untuk merancang portal untuk menahan beban lateral yang diperlukan peraturan saat ini, kolom dirancang untuk menahan beban lateral yang dihasilkan pada sendi plastis balok. Sesuai dengan persyaratan ACI untuk rangka beton bertulang daktail. Kekuatan kolom didesain 1.2 kali kekuatan balok.



ELEVATION

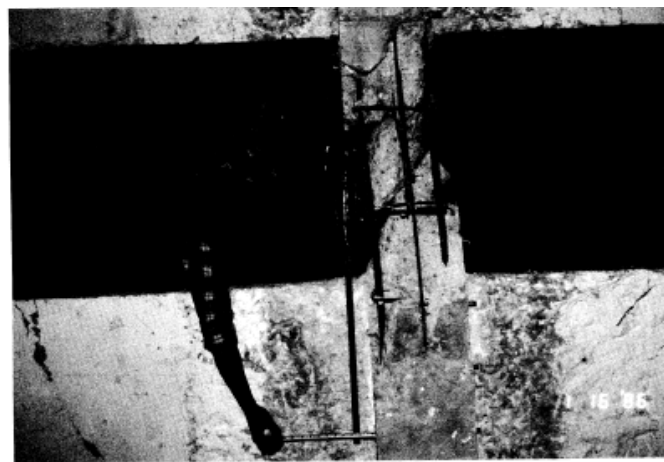


SECTION A-A

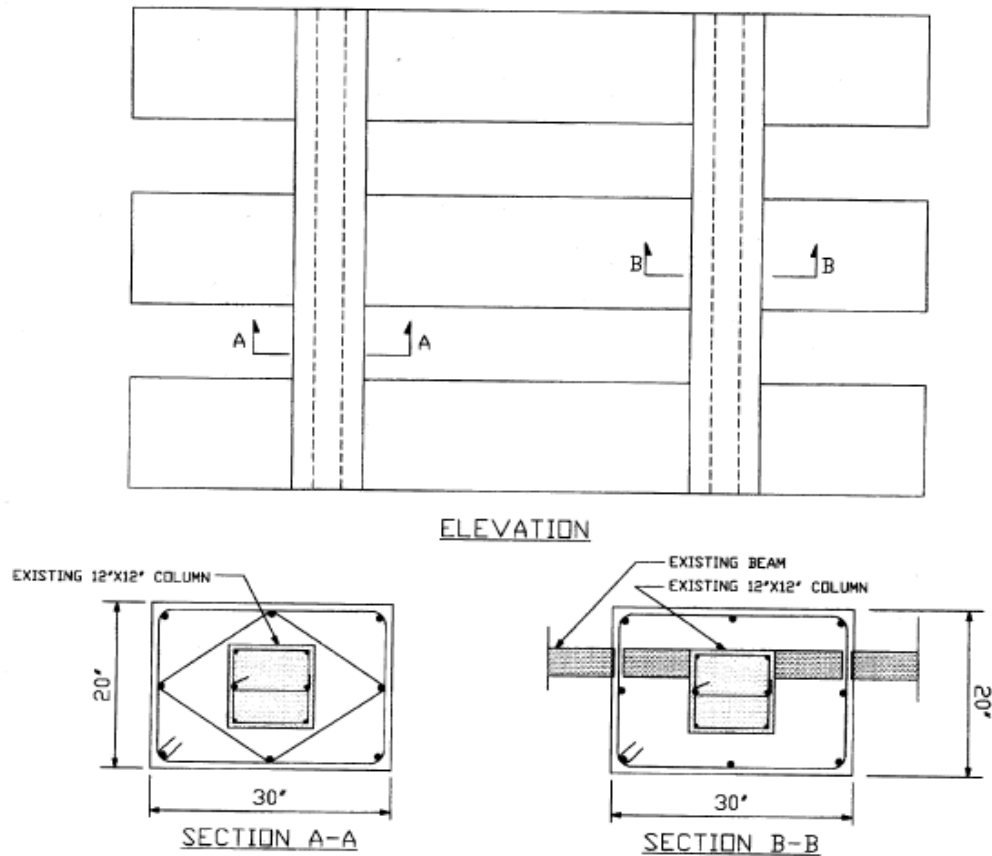


SECTION B-B

Gambar 2.2 Detail Penulangan dengan 2/3 Skala Model Rangka Asli [Stoppenhagen et al , 1995].



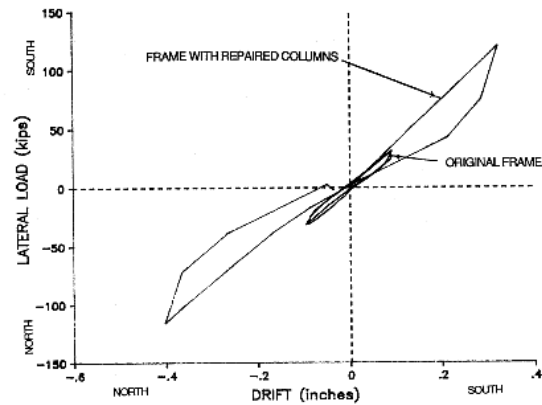
Gambar 2.3 Kerusakan pada Kolom Lantai Pertama [Stoppenhagen et al , 1995].



Gambar 2.4 Konsep Perbaikan untuk Kolom Eksisting yang Rusak [Stoppenhagen et al , 1995].

Hasil uji rangka beton bertulang terhadap beban lateral siklik menghasilkan bahwa kolom berhasil diperbaiki, dan mekanisme kegagalan berhasil dialihkan dari kegagalan kolom akibat geser menjadi kegagalan lentur pada balok. Dari hasil uji menunjukkan bahwa kekuatan lateral rangka beton bertulang yang mengalami rusak berat tidak hanya berhasil dikembalikan namun meningkat untuk memenuhi kekuatan rencana yang dibutuhkan peraturan saat ini.

Kapasitas lateral portal perkuatan adalah sekitar limakali kapasitas lateral yang dihitung dari portal asli dan dua kali lebih besar dari beban lateral gempa UBC 1982. Kekakuan awal portal yang diperbaiki kurang lebih sama dengan kekakuan portal asli, meskipun kekakuan kolom secara teoritis meningkat lima kali.



Gambar 2.5 Beban VS Drift pada Rangka Utuh dan Rangka Perbaikan pada Siklus Drift yang Rendah [Stoppenhagen et al , 1995].

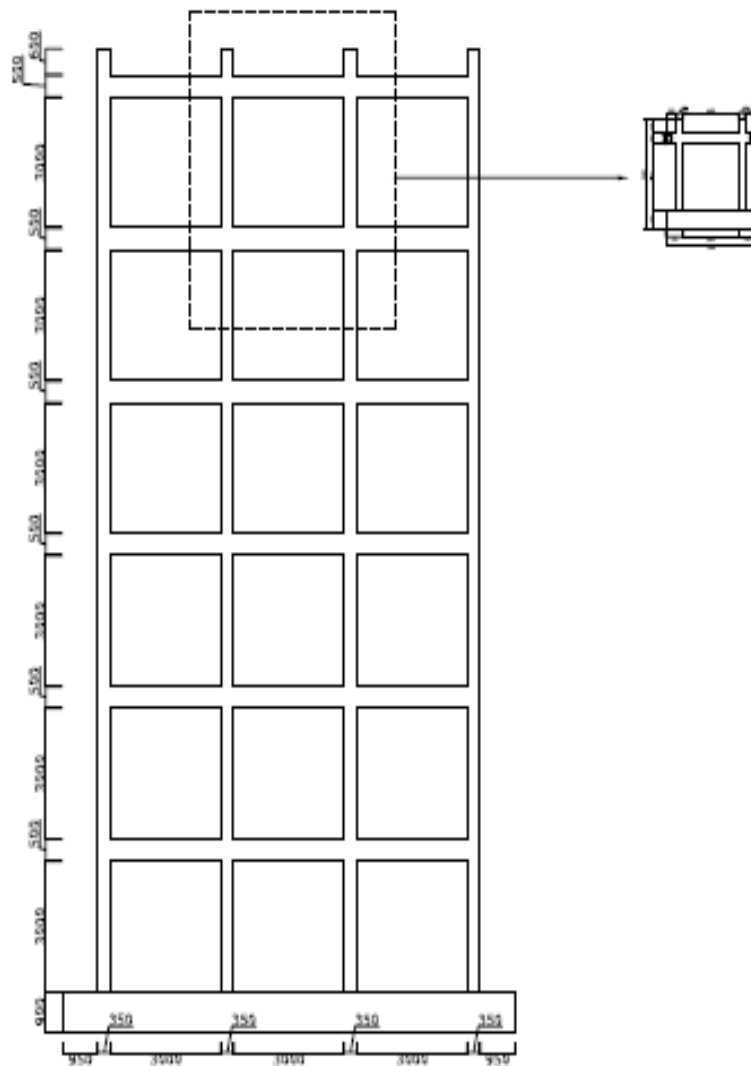
Hal ini setidaknya disebabkan oleh rusaknya ikatan tulangan longitudinal balok yang disebabkan oleh berbagai siklus beban dari tes sebelumnya pada model. Perbaikan ikatan tulangan longitudinal pada balok, dengan injeksi epoxy, mungkin akan memperbaiki kinerja dari struktur perbaikan Modifikasi terhadap detail penulangan dibuat untuk mempermudah pelaksanaan tidak mengurangi efektivitas dari detail tersebut. Pada pengamatan kapasitas lateral portal selama pengujian, tegangan pada tulangan longitudinal dan transversal dari kolom rendah, menunjukkan bahwa kolom berada jauh dibawah kapasitasnya. Lebar retak pada beban ini didukung pengamatan ini. Penulangan kolom didesain sesuai dengan ACI 318 berhasil memperkuat kolom untuk meningkatkan kapasitas dan kinerja dibawah beban siklik.

Pengamatan pola retak dan perubahan tegangan dalam tulangan transversal menunjukkan bahwa torsi karena lokasi eksentrik dari balok ke kolom perkuatan harus dipertimbangkan dalam desain. Pengamatan interaksi yang sangat bagus antara portal eksisting yang rusak dan beton kolom perbaikan sangat penting bagi keberhasilan metoda perbaikan. Semua indikasi menunjukkan bahwa seluruh bagian kolom berperilaku monolit. Interaksi memungkinkan transfer gaya antar lantai dan antara berbagai elemen portal. Interaksi mengalihkan mode kegagalan dari kegagalan geser pada kolom menjadi kegagalan lentur pada balok.

3. PROGRAM PENGUJIAN

Prototipe yang dipilih adalah bangunan beton bertulang dengan 3 bentang tipikal seperti yang disajikan pada Gambar 3.1. Prototipe didesain dengan peraturan beton

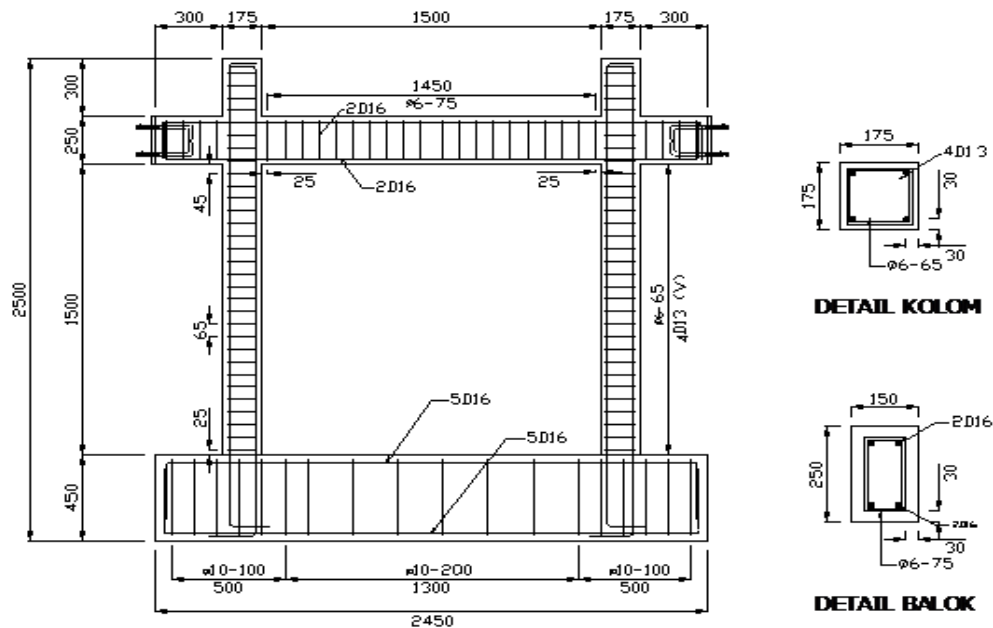
Indonesia yang memiliki korelasi dengan peraturan ACI 318-99 dengan detail penulangan mengacu pada kategori SRPMM. Benda uji yang diteliti merupakan portal satu bentang dengan lapis paling atas dari prototipe bangunan dan menggunakan faktor skala benda uji (model) setengah kali dari prototip. Pemilihan faktor skala didasarkan pada pertimbangan kemampuan pembebanan uji alat (*loading frame* dan *actuator*) dan luas area yang tersedia dilaboratorium. Pengujian dengan skala yang sama dengan penelitian ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti seperti mehrabie et al. (1996), dan Ghassan Al-Chaar et al. (2002). Setiap benda uji (model) memiliki tinggi portal sebesar 1500 mm dengan tipikal bentang adalah 1500 mm atau memiliki aspek ratio (h/L) sebesar 1.



Gambar 3.1 Prototip dan model.

Tabel 3.1 Prototipe dan Model Portal Beton Bertulang.

Parameter	Prototip	Model
Tinggi Portal	3000 mm	1500 mm
Lebar Portal	3000 mm	1500 mm
Kolom		
Panjang	350 mm	175 mm
Lebar	350 mm	175 mm
Tulangan Longitudinal	4 D 26 ($\rho=1.73$	4D13 ($\rho=1.73$ %)
Tulangan sengkang	%) $\phi 12-130$ mm	$\phi 6-65$ mm
Balok		
Tinggi	500 mm	250 mm
Lebar	300 mm	150 mm
Tulangan Longitudinal	Atas : 2D32 ($\rho=1.072$ %)	Atas : 2D16 ($\rho=1.072$ %)
Tulangan sengkang	Bawah : 2D32 ($\rho=1.072$ %) $\phi 12-150$ mm	Bawah : 2D16 ($\rho=1.072$ %) $\phi 6-75$ mm

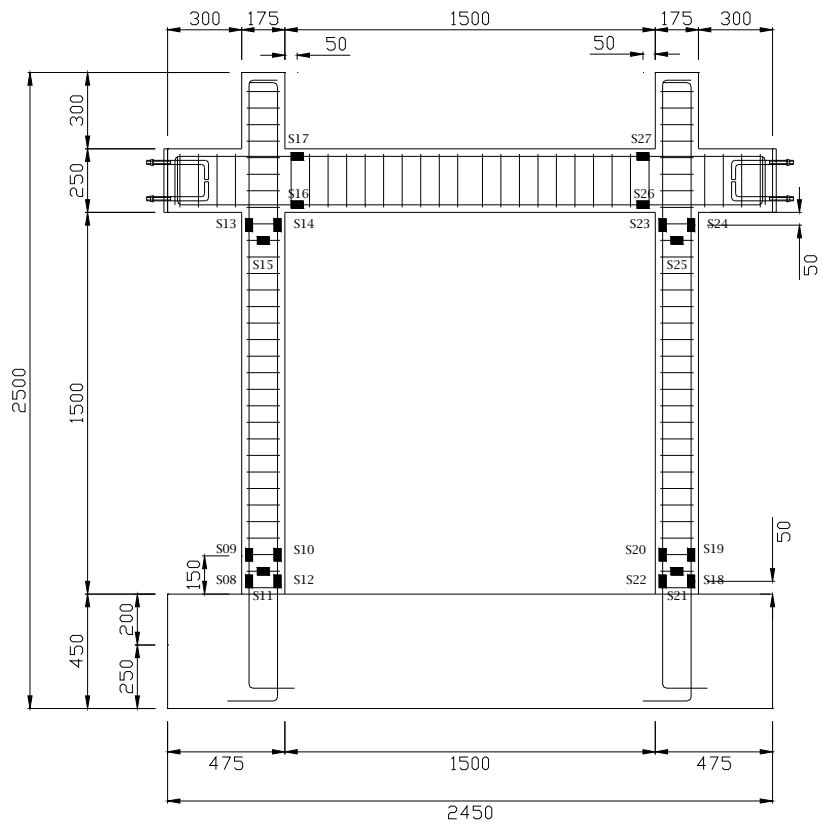


Gambar 3.2 Tipikal Penulangan Portal.

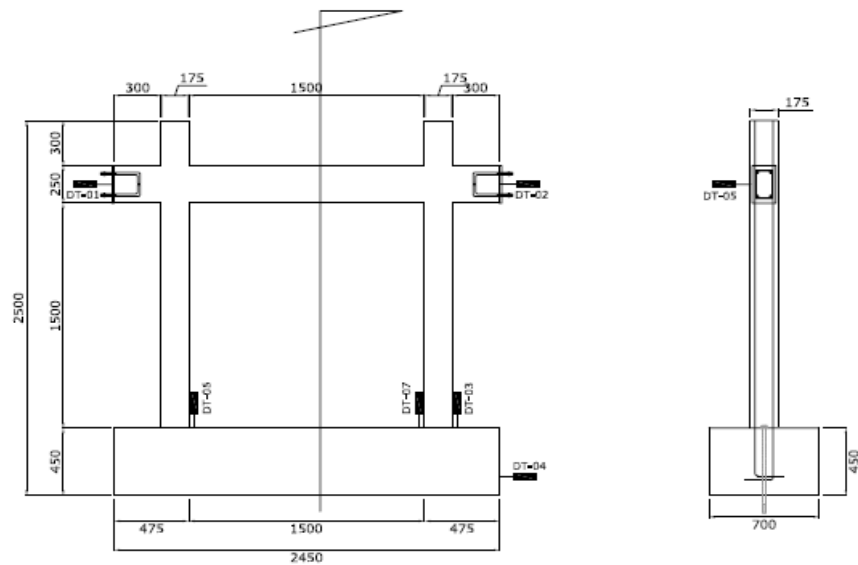
Pada penelitian ini strain gauges digunakan untuk mengukur regangan yang terjadi pada baja tulangan, baik baja tulangan lentur maupun geser. Lokasi pemasangan strain gauges dapat dilihat pada Gambar 3.2.

LVDT adalah alat yang digunakan untuk mengukur perpindahan yang terjadi pada bagian-bagian tertentu benda uji. LVDT digunakan untuk mengukur perpindahan yang terjadi. Lokasi Pemasangan LVDT dapat dilihat pada Gambar 3.3.

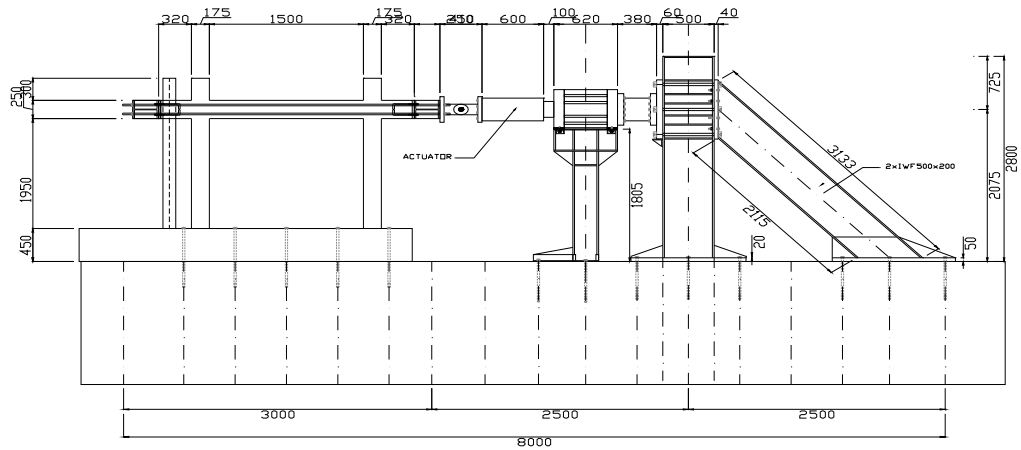
Setup pengujian dirancang sesuai dengan kondisi beban lateral di berikan oleh alat *servocontrolled hydraulic actuator* yang memiliki kapasitas 1000 KN dan stroke sebesar ± 100 mm, untuk mentransfer gaya tarikan pada benda uji portal arah yang berlawanan maka pada balok dipasang 4 *steel rod* yang kaku berdiameter 25 mm yang dihubungkan dengan profil rangka baja yang menjaga agar pembebanan *pseudo-static* terjadi hanya pada bidang portal (*in-plane*) . Setup pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.5. Setup pengujian portal dilaboratorium dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.3 Lokasi Pemasangan Strain Gauges.



Gambar 3.4 Lokasi Pemasangan LVDT.

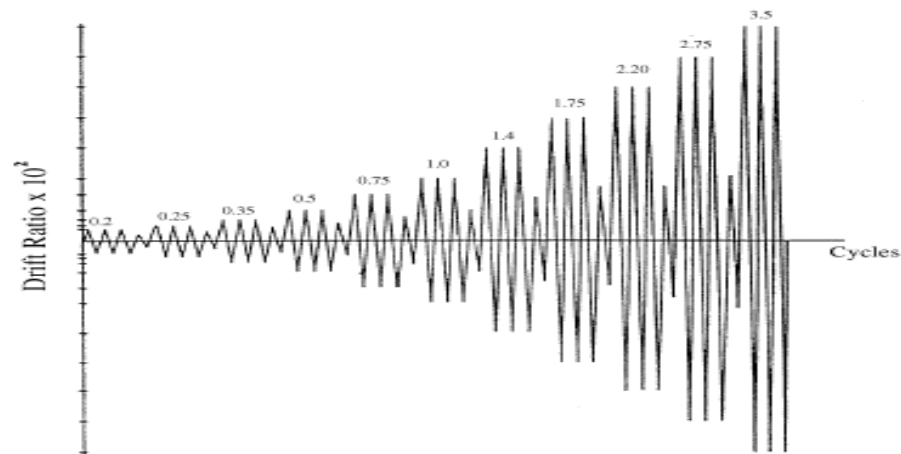


Gambar 3.5 Rencana Setup Pengujian Portal.



Gambar 3.6 Contoh Setup Pengujian Portal uji.

Beban siklik yang diaplikasikan pada specimen mengacu pada rekomendasi ACI 374.1-05. Rencana pembebanan siklik pada portal beton bertulang dapat dilihat pada Gambar 3.7.



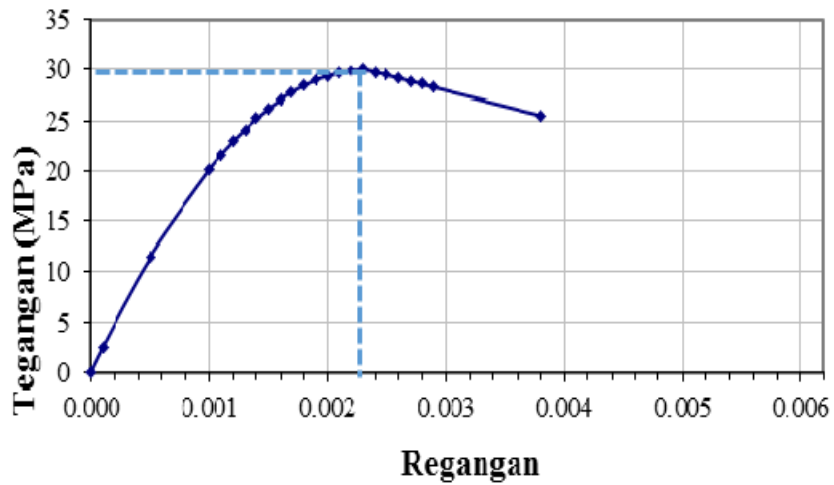
Gambar 3.7 Siklus Pembebanan [ACI 374.1,2005].

4. EVALUASI HASIL PENGUJIAN

4.1 Evaluasi hasil Pengujian Material.

Pada saat pengecoran beton dari campuran beton tersebut diambil untuk dibuat benda uji silinder ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan beton. Nilai kuat tekan rata-rata beton yang didapatkan pada umur tes adalah sebesar 30 MPa. Berdasarkan model hubungan tidak terkekang digambarkan dengan menggunakan referensi Park & Paulay, hal.13 didapat grafik tegangan-regangan untuk beton mutu 30 Mpa. Pada saat tegangan maksimum 30 Mpa didapat regangan 0.0023. Grafik hubungan tegangan- regangan untuk beton dapat dilihat pada Gambar 4.1

Tulangan untuk portal beton bertulang digunakan 3 jenis diameter baja tulangan yaitu 6,13,16 mm. Tulangan kemudian dites tarik untuk memperoleh tegangan leleh dan tegangan putusnya. Rangkuman hasil pengujian disajikan pada Tabel 4.1. Berdasarkan rumus menegotto-pinto dengan bantuan program Xtract diperoleh hubungan tegangan-regangan baja tulangan seperti terlihat pada Gambar 4.2. Nilai tegangan-regangan, dan modulus elastisitas baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 4.1.

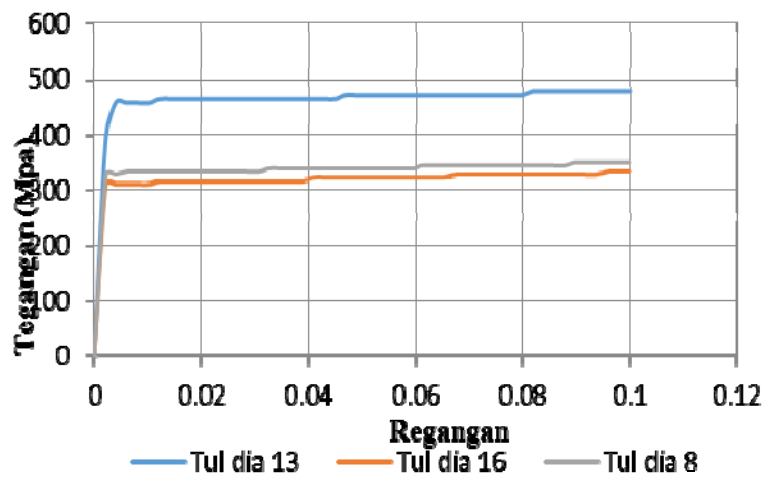


Gambar 4.1 Grafik Tegangan-Regangan Beton.

Tabel 4.1 Propertis Baja Tulangan.

Diameter Tulangan	Tegangan Leleh (Fy) (Mpa)	Tegangan putus (Fu) (Mpa)	Regangan Leleh	Modulus Elastisitas (Mpa)
D-16 Ulir	311.8	469.87	0.00217	143686.4
D13-Ulir	460	630	0.0039	117948.72
φ6-Polos	330	420	0.00217	152073.73

Dengan tegangan leleh yang besar akan membuat tegangan lekat antara baja tulangan dengan beton akan meningkat.



Gambar 4.2 Grafik Tegangan-Regangan Baja Tulangan.

4.2 Evaluasi Hasil pengujian Portal Terbuka terhadap Beban siklik

4.2.1 Perilaku Histeresis Benda Uji Portal Utuh Terhadap Beban lateral Siklik

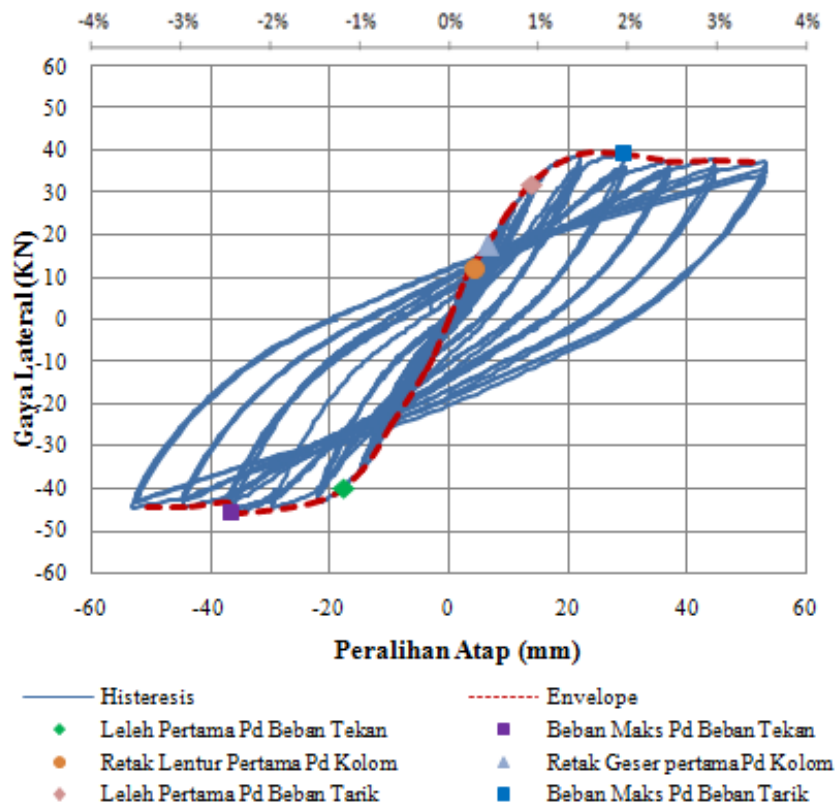
4.2.1.1 Perilaku Histeresis Benda Uji Portal Utuh Terhadap Beban lateral Siklik

Pengujian siklik pada portal utuh dilakukan sampai drift mencapai 3.5%. Tiga siklus penuh diterapkan pada setiap rasio drift. Gambar 4.3 memperlihatkan hasil pengujian siklik yang dilakukan pada portal utuh, berupa kurva histeresis dengan beban pada sumbu axisnya dan peralihan atap pada sumbu ordinatnya.

Pada pengamatan saat pengujian diperoleh pola retak lentur pertama yang terjadi pada kolom bagian atas yaitu pada level beban 12 KN arah pembebanan tarik dan perpindahan lateral sebesar 4.5 mm atau rasio drift sebesar 0.3 % (Gambar 4.4a). Sedangkan pola retak geser pertama pada kolom khususnya pada daerah beam-column joint terjadi pada level pembebanan arah tarik pada level beban 17.5 KN dan perpindahan lateral 6.75 mm atau rasio drift 0.45 % (Gambar 4.4b). Seiring dengan peningkatan beban kemudian terbentuk retakan-retakan baru pada kolom khususnya pada kolom bagian atas dan bawah. Pada rasio drift 2.5 % pola retak mulai membesar, hal ini juga terlihat dari semakin menggemuknya bentuk kurva.

Berdasarkan kurva histeresis portal utuh (Gambar 4.3) diperoleh portal utuh mengalami leleh pertama kali saat level gaya lateral -40 KN pada arah pembebanan tekan dengan peralihan atap -17.5 mm atau rasio drift -1.17 %, sedangkan untuk arah pembebanan tarik leleh pertama kali saat level gaya lateral 33.42 KN dengan perpindahan lateral 14.55 mm atau rasio drift 0.97%. Gaya lateral maksimum yang terjadi pada arah pembebanan tarik sebesar 39.04 KN dan peralihan atap sebesar 29.43 mm atau rasio drift 1.96%, sedangkan pada arah pembebanan tekan sebesar -46.123 KN dan peralihan atap -36.24 mm atau rasio drift -2.4% . Pengujian berlanjut dengan penambahan rasio drift secara bertahap sampai drift rasio 3.5%. Kurva histeresis secara keseluruhan yang diperoleh, memperlihatkan gambaran perilaku yang baik karena tidak terjadi penurunan kekakuan dan kekuatan yang drastis.

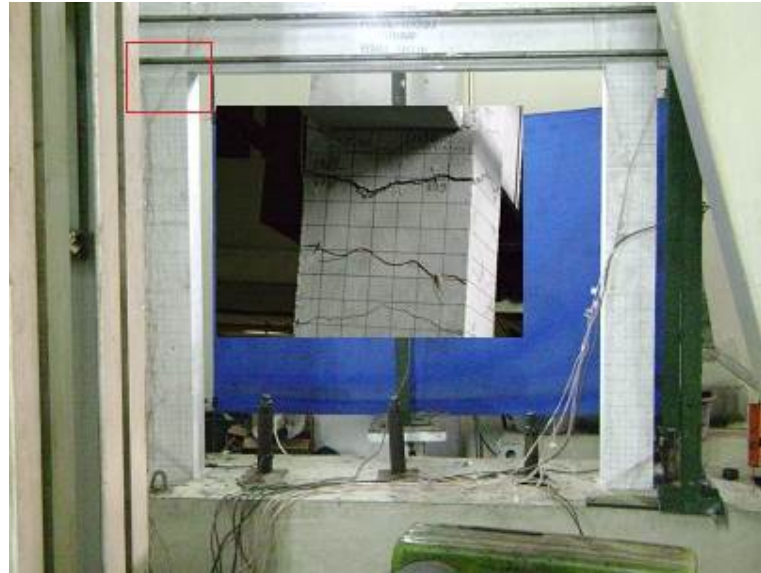
Rangkuman kondisi penting benda uji dapat dilihat pada Gambar 4.3 dan Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Kurva Histeresis Portal Utuh.

Tabel 4.2 Rangkuman Kondisi Umum Benda Uji Portal Utuh.

Kondisi Benda Uji	Beban KN	Perpindahan/Drift mm/%
Retak Lentur Pertama pada kolom	12	4.5/0.3%
Retak Geser Pertama pada Kolom	17.5	6.75/0.45%
Leleh Pertama pada Arah Beban Tekan	-40	-17.5/-1.17%
Leleh Pertama pada Arah Beban Tarik	33.42	14.55/0.97%
Beban Maksimum pada Arah Beban Tekan	-46.123	-36.24/-2.5%
Beban Maksimum pada Arah Beban Tarik	39.04	29.43/1.96%



(a) Retak Lentur Pertama



(b) Retak Geser Pertama

Gambar 4.4 Retak Pertama pada Portal Utuh.

4.2.1.2 Perilaku Histeresis Benda Uji Portal Perbaikan Terhadap Beban lateral Siklik

Pengujian siklik pada portal perbaikan dilakukan sampai drift mencapai 3.5%. Tiga siklus penuh diterapkan pada setiap rasio drift. Gambar 4.5 memperlihatkan hasil pengujian siklik yang dilakukan pada portal perbaikan, berupa kurva histeresis dengan beban pada sumbu axisnya dan peralihan atap pada sumbu ordinatnya.

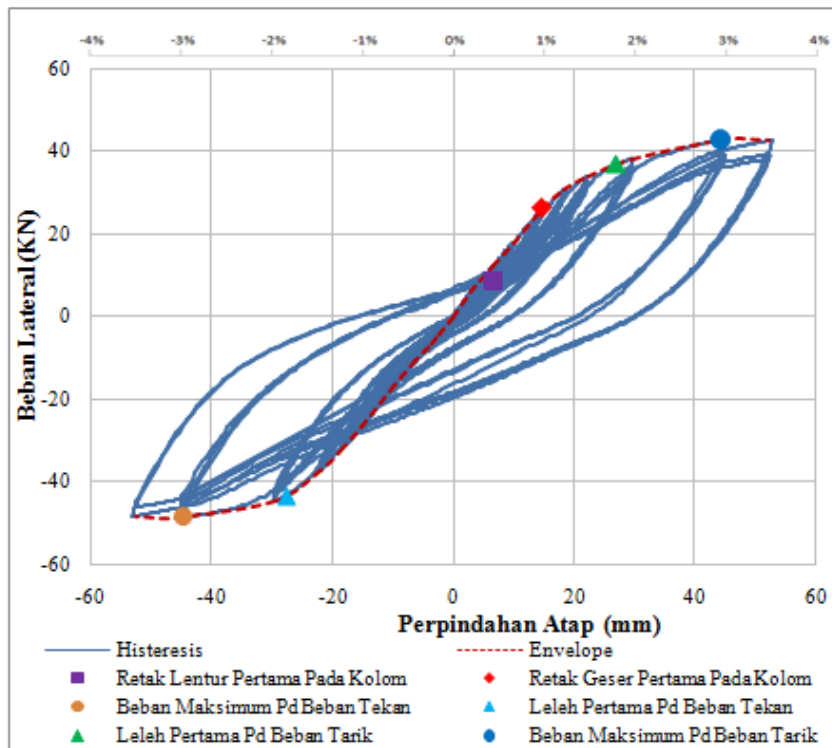
Pada pengamatan saat pengujian diperoleh pola retak lentur pertama yang terjadi pada kolom yaitu pada level beban 8.4 KN arah pembebanan tarik dan perpindahan lateral sebesar 6.65 mm atau rasio drift sebesar 0.45 % (Gambar 4.6a). Sedangkan pola retak geser pertama pada kolom khususnya pada daerah beam-column joint terjadi pada level pembebanan arah tarik pada level beban 26.15 KN dan perpindahan lateral 14.72 mm atau rasio drift 1 % (Gambar 4.6b). Seiring dengan peningkatan beban kemudian terbentuk retakan-retakan baru pada kolom khususnya pada kolom bagian atas dan bawah. Pada rasio drift 2.5 % pola retak mulai membesar, hal ini juga terlihat dari semakin menggemuknya bentuk kurva.

Berdasarkan kurva histeresis portal perbaikan (Gambar 4.6) diperoleh portal perbaikan mengalami leleh pertama kali saat level beban 37 KN pada arah pembebanan tarik dengan perpindahan lateral 27 mm atau rasio drift 1.8%, sedangkan untuk arah pembebanan tekan leleh pertama kali saat level beban -43.5 KN dengan perpindahan lateral -27.5 mm atau rasio drift -1.83%. Beban maksimum yang terjadi pada arah pembebanan tarik sebesar 42.807 KN dan perpindahan lateral sebesar 44.3 mm atau rasio drift 2.95%, sedangkan pada arah pembebanan tekan sebesar -48.64 KN dan perpindahan lateral -44.56 mm atau rasio drift -2.97% . Pengujian berlanjut dengan penambahan rasio drift secara bertahap sampai drift rasio 3.5%. Kurva histeresis secara keseluruhan yang diperoleh, memperlihatkan gambaran perilaku yang baik karena tidak terjadi penurunan kekakuan dan kekuatan yang drastis.

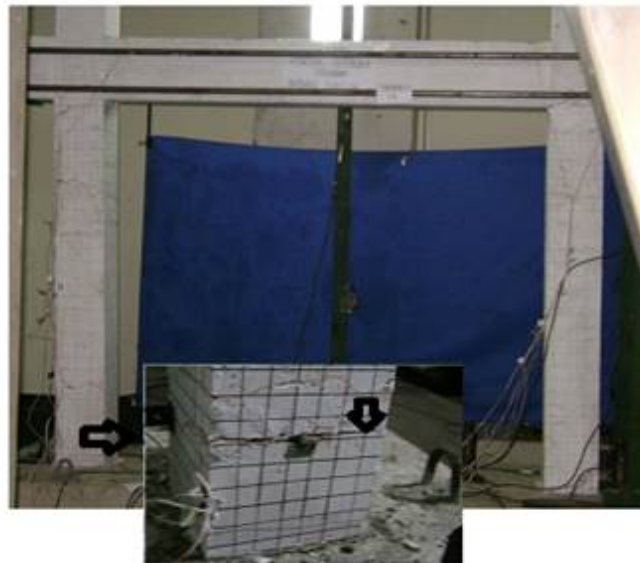
Rangkuman kondisi penting benda uji dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.5.

Tabel 4.3 Rangkuman Kondisi Umum Benda Uji Portal Perbaikan.

Kondisi Benda Uji	Beban KN	Perpindahan/Drift mm/%
Retak Lentur Pertama pada kolom	8.4	6.65/0.45%
Retak Geser Pertama pada Kolom	26.15	14.72/0.98%
Leleh Pertama pada Arah Beban Tekan	-43.5	-27.5/-1.5%
Leleh Pertama pada Arah Beban Tarik	37	27/1.8%
Beban Maksimum pada Arah Beban Tekan	-48.64	-44.56/-2.97%
Beban Maksimum pada Arah Beban Tarik	42.81	44.3/2.95%



Gambar 4.5 Kurva Histeresis Beban Terhadap Perpindahan Lateral Portal Perbaikan.



(a) Retak Lentur Pertama.

Gambar 4.6 Retak Pertama pada Portal Perbaikan.



(b) Retak Geser Pertama.

Gambar 4.6 Retak Pertama pada Portal Perbaikan (lanjutan).

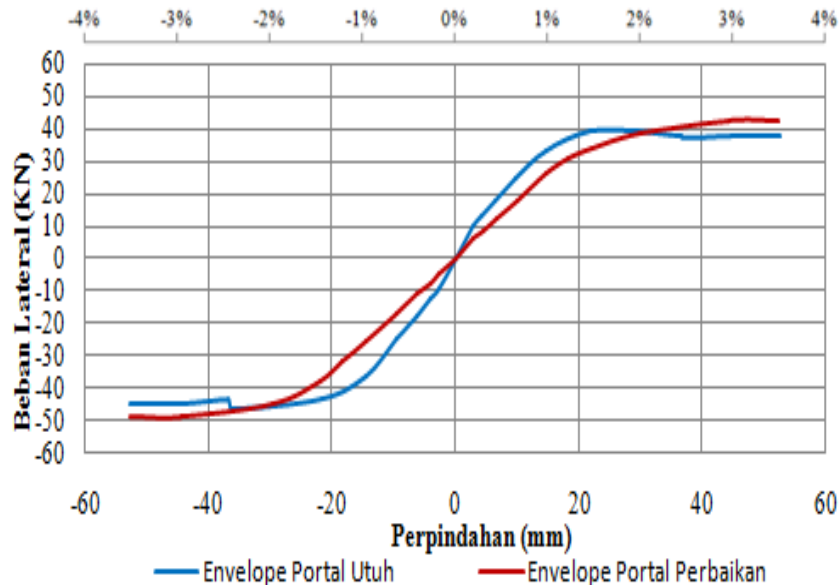
4.2.2 Perbandingan Kurva Envelop Portal Beton Bertulang

Berdasarkan kurva histeresis yang diperoleh dari hasil eksperimental dapat dibentuk kurva envelop untuk menggambarkan pembebanan monotonik dari Benda uji Portal terbuka tersebut yang dapat dilihat pada Gambar 4.7.

Berdasarkan kurva envelop dari hasil pengujian portal utuh dan portal perbaikan, maka diperoleh:

1. Portal perbaikan memiliki kapasitas lateral maksimum lebih tinggi 5.5 % dibanding portal utuh. Hal ini enunjukkan bahwa kapasitas lateral portal utuh dan portal perbaikan relatif sama.
2. Kekakuan portal utuh untuk level drift dibawah 2% lebih besar dibanding portal perbaikan. Hal ini terlihat pada level beban tertentu drift yang dicapai oleh portal utuh memiliki drift lebih kecil dibandingkan portal perbaikan. Pada drift diatas 2 % terjadi sebaliknya. Hal ini disebabkan efek perbaikan struktur mulai bekerja.
3. Portal utuh dan portal perbaikan mengalami pelelehan tulangan pada level beban yang relatif sama, tetapi portal perbaikan mengalami perpindahan lateral / drift yang lebih besar dibandingkan dengan portal utuh.

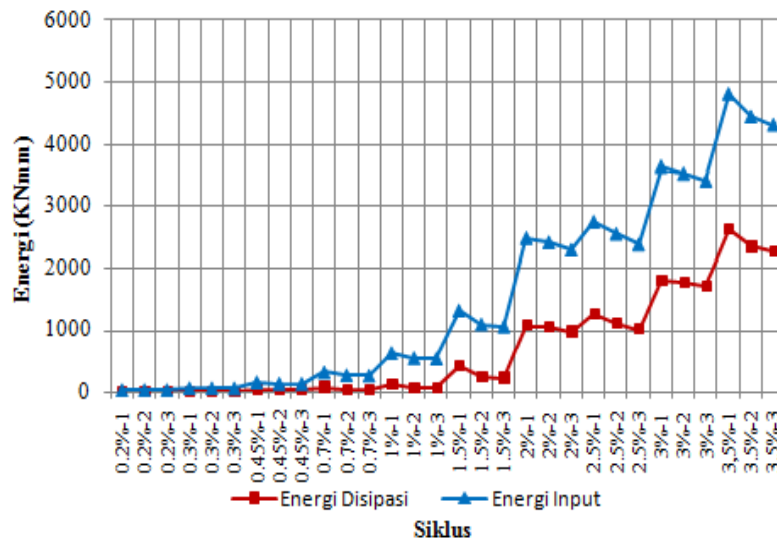
4. Baik pada portal utuh maupun portal perbaikan, saat level beban gempa maksimum dengan perpindahan lateral/drift maksimum tetap bisa mempertahankan kekuatannya.



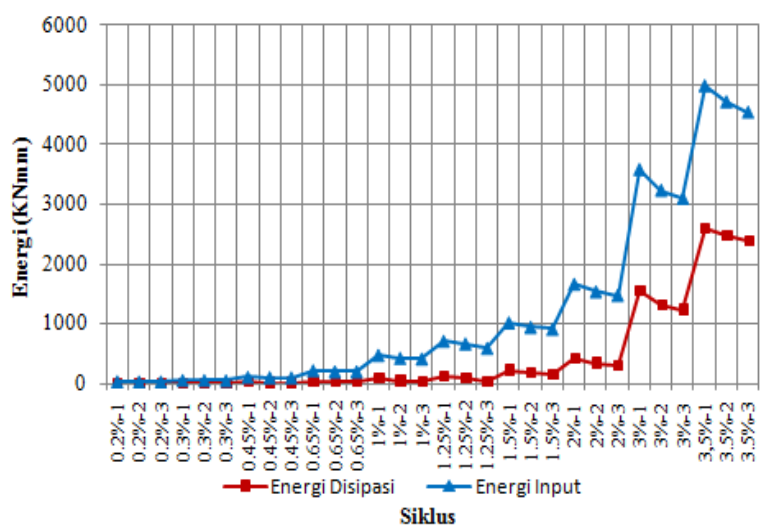
Gambar 4.7 Kurva Envelop Portal Utuh dan Portal Perbaikan.

4.2.3 Disipasi Energi

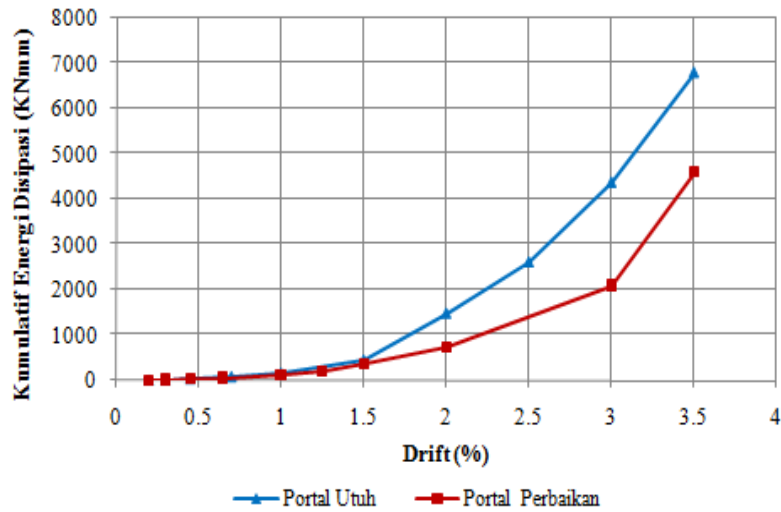
Grafik energi disipasi dan energi input setiap siklus pembebanan disajikan pada Gambar 4.8 dan 4.9. Grafik perbandingan energi disipasi portal utuh dan portal perbaikan disajikan pada gambar 4.10. Pada Gambar 4.8 dan 4.9 terlihat pada setiap spesimen baik energi disipasi portal utuh maupun portal perbaikan cenderung meningkat setiap adanya peningkatan level drift, tetapi untuk setiap siklus pengulangan pada setiap level drift yang sama besarnya energi disipasi cenderung menurun. Hal ini disebabkan karena perkembangan retak pada level drift yang sama relatif konstan (tidak terbentuk retak baru yang signifikan) atau hanya terjadi pelebaran retak pada lokasi yang sama. Berdasarkan Gambar 4.10 disipasi energi yang terjadi pada portal utuh lebih stabil dibandingkan dengan portal perbaikan. Hal ini terlihat dari besarnya energi disipasi kumulatif pada portal utuh lebih besar daripada portal perbaikan. Total energi disipasi kumulatif portal utuh sebesar 6794.22 KNmm pada pembebanan mencapai drift 3.5% siklus ke 3, sedangkan pada portal perbaikan total energi disipasi kumulatif sebesar 4587.99 KNmm pada pembebanan mencapai drift 3.5% siklus ke 3.



Gambar 4.8 Perbandingan Energi Input dan Energi Disipasi pada Portal Utuh.

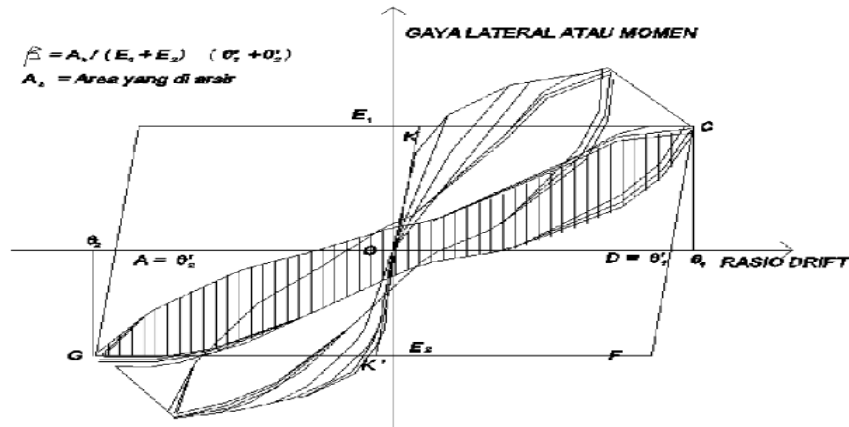


Gambar 4.9 Perbandingan Energi Input dan Energi Disipasi Pada Portal Perbaikan.



Gambar 4.10 Perbandingan Energi Disipasi Portal Utuh dan Portal Perbaikan.

Untuk melihat kestabilan sistem struktur pada level perpindahan maksimum, ACI 374.1-05 mensyaratkan rasio energi disipasi relatif pada siklus terakhir pada pembebanan siklik tidak boleh kurang dari 1/8 (0,125). Gambaran umum mengenai rasio energi disipasi relatif dapat dilihat pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 Definisi Rasio Energi Disipasi Relatif [ACI 374.1,2005].

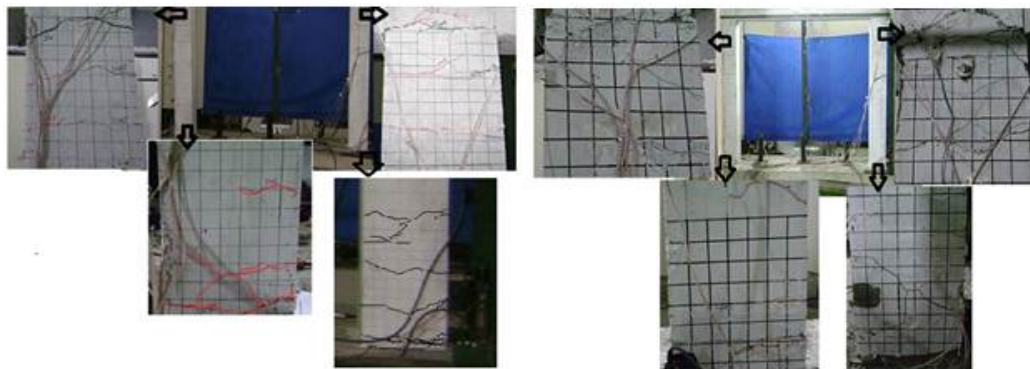
Rasio energi disipasi relatif β didefinisikan sebagai perbandingan luas daerah yang diarsir terhadap luas daerah ABCD dan DFGA. Nilai rasio energi disipasi relatif disajikan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Rasio Energi Disipasi Relatif.

Spesimen	Luas Daerah yang diarsir kN-mm	Luas daerah dibatasi oleh ABCD dan DFGA kN-mm	Rasio Energi disipasi relatif β
Portal Utuh	2447.541	5994.53	0.41
Portal Perbaikan	2620.85	5325.378	0.45

Mengacu pada hasil pengujian yang telah dilakukan, rasio energi disipasi relatif β pada model portal terbuka lebih besar dari $1/8(0.125)$, sehingga masih memenuhi kriteria yang disyaratkan ACI 374.1-05 atau dengan kata lain struktur masih memiliki kemampuan untuk menjaga stabilitasnya sebelum runtuh.

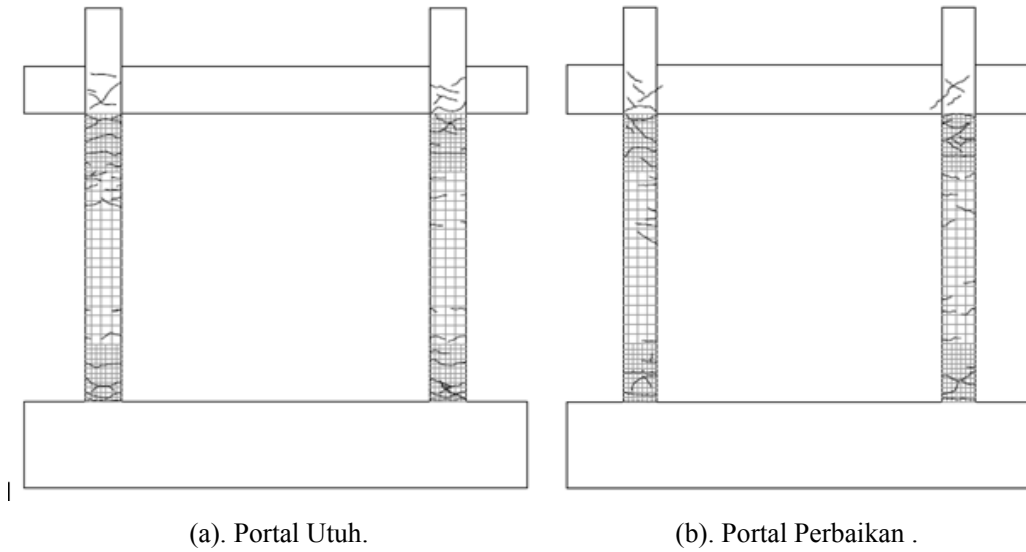
Disipasi energi umumnya terlihat dalam bentuk kerusakan dan keretakan pada elemen struktur. Pola Peretakan yang terjadi disajikan pada gambar 4.12. Berdasarkan pengamatan saat pengujian diperoleh pola retak yang terjadi pada portal utuh maupun portal perbaikan akibat beban siklik menunjukkan pola retak yang relatif sama. Retak pertama baik pada portal merupakan retak lentur yang sebagian besar terjadi pada kolom bagian atas dan bawah (tumpuan) dan sambungan balok dan kolom, serta disusul dengan retak geser. Berdasarkan pengamatan visual lebar retak yang terjadi pada portal terbuka kurang dari 0.3 cm, dan terjadi rompal pada daerah sendiplastis. Sketsa pola keruntuhan akhir disajikan pada gambar 4.13.



(a). Portal Utuh.

(b) Portal Perbaikan.

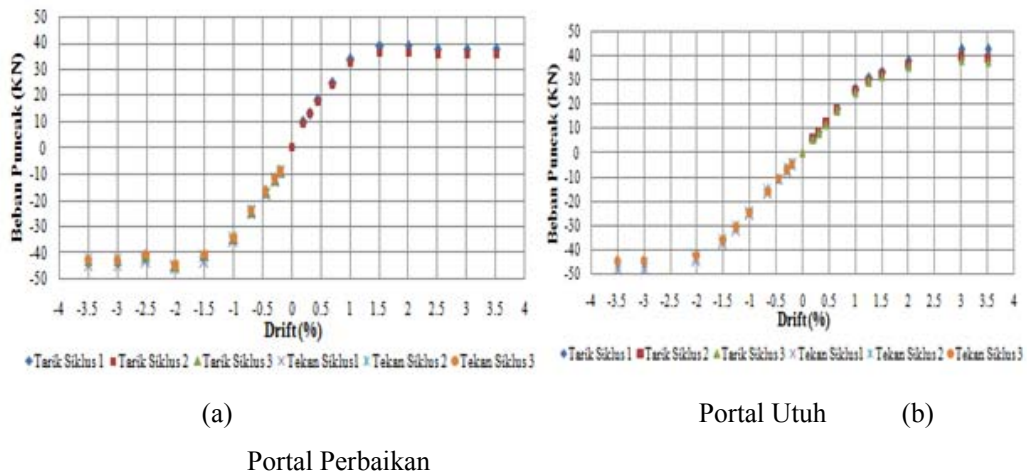
Gambar 4.12 Gambar Pola Retak Akhir.



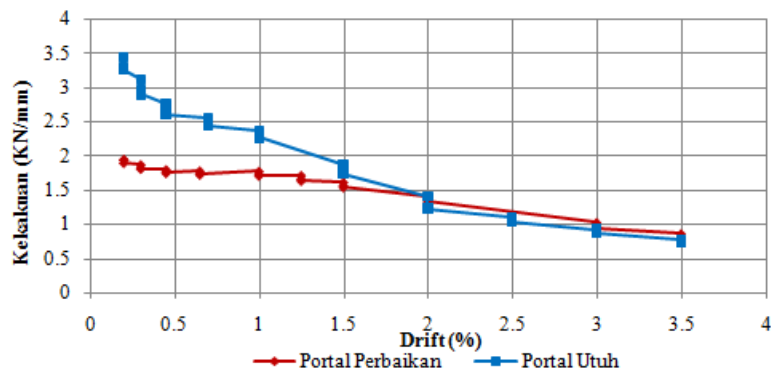
Gambar 4.13 Sketsa Pola Retak Akhir.

4.2.4 Kekuatan dan Kekakuan

Penurunan kekuatan pada portal utuh terlihat dari penurunan beban puncak dalam setiap drift setiap siklus pengujian, hal ini bisa dilihat pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Grafik Penurunan Beban Puncak.



Gambar 4.15 Kekakuan Struktur Portal.

Berdasarkan Gambar 4.15 Spesimen yang digunakan dalam penelitian mengalami penurunan kekakuan akibat pembebanan siklik. Penurunan kekakuan mengakibatkan penurunan kemampuan struktur dalam menahan beban. Seiring dengan banyaknya siklus pembebanan, penurunan kekakuan juga akan semakin terlihat. Berdasarkan gambar 4.15 pada awal drift yaitu drift 0.2 % terlihat kekakuan struktur portal perbaikan memiliki kekakuan yang lebih rendah ± 44% dari portal utuh. Mulai drift ± 2 % kekakuan portal perbaikan relatif sama dengan portal utuh.

4.2.5 Daktilitas

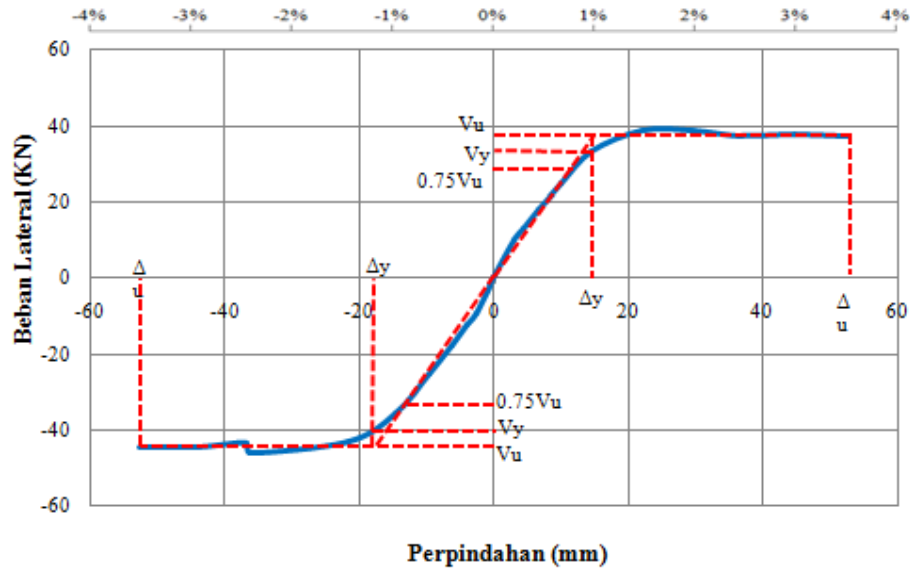
Berdasarkan FEMA 356 tabel 6.6 nilai maksimum untuk daktilitas perpindahan yaitu:

- (1) *Low ductility demand* : $\mu < 2$
- (2) *Moderate ductility demand* : $\mu = 2 - 4$
- (3) *High Ductility demand* : $\mu > 4$

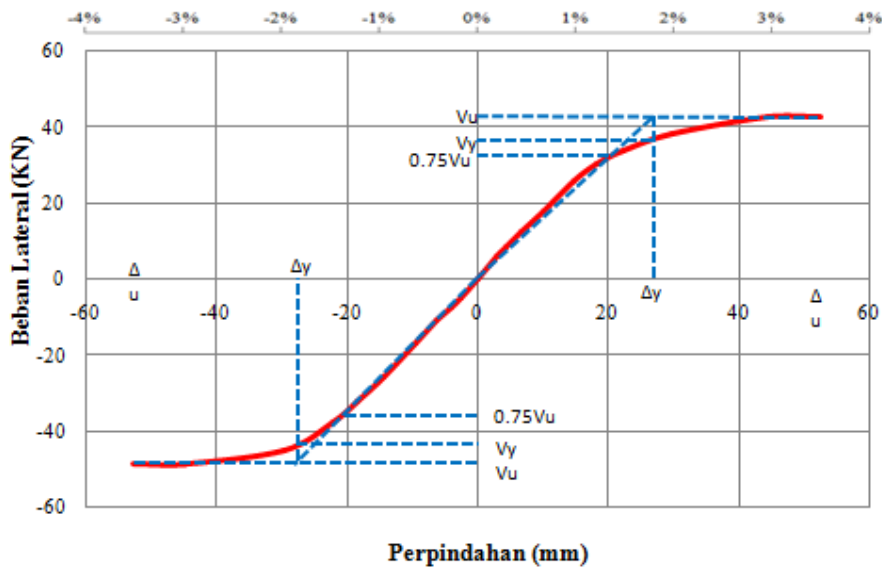
Tabel 4.5 Daktilitas Model Pengujian

Spesimen	Arah Beban	Beban Saat Leleh	Peralihan Saat kondisi Maksimum	Peralihan saat leleh tulangan	Daktilitas	Daktilitas Rata-rata
		V_y (KN)	Δu (mm)	Δy (mm)	$\Delta u / \Delta y$	$\Delta u / \Delta y$
Portal Utuh	Tarik	33.42	52.61	14.55	3.75	3.38
	Tekan	40	52.69	17.5	3.01	
Portal Perbaikan	Tarik	37	52.34	27	1.94	1.95
	Tekan	43	52.69	27	1.95	

Berdasarkan Tabel 4.5 Daktilitas portal utuh lebih tinggi dibanding portal perbaikan. Makin tinggi nilai μ yang dimiliki struktur, makin rendah pula nilai beban gempa yang menyebabkan pelelehan pertama.



(a)



(b)

Gambar 4.16 (a) Kurva Envelop Portal Utuh, (b) Kurva Envelop Portal Perbaikan.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, portal perbaikan memiliki kapasitas lateral yang relatif sama dengan portal utuh. Portal utuh dan portal perbaikan mengalami pelelehan tulangan pada level beban yang relatif sama, tetapi portal perbaikan mengalami perpindahan lateral / drift yang lebih besar dibandingkan dengan portal utuh. Besarnya energi disipasi kumulatif pada portal utuh lebih besar daripada portal perbaikan. Daktilitas portal utuh lebih tinggi dibanding portal perbaikan. Berdasarkan hal tersebut dapat dilihat bahwa portal utuh tetap memberikan kinerja yang lebih baik dari portal perbaikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih juga diberikan pada pihak-pihak yang telah banyak membantu penulis dalam menyelesaikan jurnal ini, terutama kepada Bapak Iswandi Imran selaku pembimbing, seluruh staff dan teknisi Laboratorium Struktur dan Bahan, Teknik Sipil ITB serta teknisi Laboratorium Mekanika Struktur PAU ITB, atas segala bantuan dan fasilitas yang diberikan selama penulis melaksanakan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

1. Al-Chaar, G., Issa, M., Sweeney, S. (2002). "Behaviour of Masonry-Infilled Nonductile Reinforced Concrete Frames", *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 128(8), 1055-1063.
2. American Society for Testing and Materials. (1997). "Standard Test Method and Definitions for Mechanical Testing of Steel Product", ASTM A 370-97, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
3. American Society for Testing and Materials. (1994). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens", Volume 04.02, ASTM C 39, American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
4. American Concrete Institute. (2005). "Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary", ACI 374.1, American Concrete Institute.
5. Aryanto, A. (2008). "Kinerja portal beton bertulang dengan dinding Pengisi bata ringan terhadap beban gempa".
6. Federal Emergency management Agency. (2000). "Prestandard and commentary for The Seismic Rehabilitation Of Buildings", FEMA 356.
7. Ghobarah, A. (2004). "On Drift Limits Associated with Drift Level", *Proceeding of The International Workshop-The Pacific Eartquake Engineering Research Center*.

8. Guner, S., dan Vecchio, F.J. (2010). "Pushover Analysis of Shear-Critical Frames: Verification and Application". ACI Structural Journal, Vol 107, No. 1. S-07.
9. Imran, I., Hoedajanto, D., dan Suharwanto. (2005). "Lessons from Aceh Earthquake; Performance Study of Office Building in Banda Aceh", Proceedings of HAKI Conference, Conference of Earthquake & Tsunami, Jakarta.
10. Imran, I., Suarjana, M., Hoedajanto, D., Soemardi, B., Abduh, M. (2006). "Lessons from Yogyakarta Earthquake; Performance Study of Office Building", HAKI Journal, Vol. 7, No.1, pp. 1-13.
11. Imran, I., Ismail, F., Sumiartha, P., Nawir, H. (2007). "The 6 March 2007 West Sumatra Earthquake: Lessons Learned and recommendations", International Workshop on Earthquake Engineering and Tsunami, Padang. July 2007.
12. Mehrabi, A. B., Shing, P. B., Schuller, M., and Noland, J. (1996). "Experimental evaluation of masonry-infilled RC frames." J. Struct. Eng. ASCE, 122(3), 228–237.
13. Paulay, T and Priestley, M.J.N. (1992). "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building", J. Wiley and Sons, NY, 744 pp.
14. Park, R dan Paulay, T. (1975). "Reinforced concrete Structures", John Wiley, Canada.
15. Standar Nasional Indonesia. (2000). "Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung", SNI-03-2847-2002, Standar Nasional Indonesia.
16. Standar Nasional Indonesia. (2002). "Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Gedung", SNI 03-2847-2002, Standar Nasional Indonesia.
17. Stoppenhagen, D.R., Jirsa, J.O., and Wyllie, L.A. (1995). "Seismic Repair and Strengthening of Severely Damaged Concrete Frame." ACI Structural Journal, Vol 92, No. 2. S-17.
18. Vecchio, F.J, dan Emara, M.B. (1992). "Shear Deformations in Reinforced Concrete Frames." ACI Structural Journal.