

PENGARUH PENGGUNAAN *PS BALL* TERHADAP BALOK BETON BERTULANG DENGAN PEMBEBANAN MONOTONIK DAN PEMBEBANAN SIKLIK

Tan Lie Ing ⁽¹⁾, Ronald Simatupang ⁽²⁾, Deni Setiawan ⁽³⁾

⁽¹⁾Dosen Program Studi S-1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
⁽²⁾Dosen Program Studi S-1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
⁽³⁾Dosen Program Studi S-1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Maranatha
Jalan Prof. Drg. Suria Sumantri No. 65, Bandung 40164
e-mail: lieing.tan@yahoo.com

ABSTRAK

PS Ball sebagai bahan pengganti pasir dan bahan pengisi telah dilakukan dan disimpulkan dapat digunakan sebagai bahan konstruksi bangunan. *PS Ball* sebagai bahan konstruksi bangunan lebih unggul dibanding pasir dalam hal kuat tekan, kekerasan, dan *anti-weathering*. Saat ini, bahan konstruksi bangunan yang sering digunakan adalah beton. Inovasi untuk menciptakan bahan penyusun beton yang ramah lingkungan sangat diperlukan sehingga dilakukan penelitian pengaruh penggunaan *PS Ball* pada balok beton bertulang dengan pembebanan monotonik dan pembebanan siklik.

Tujuan penelitian adalah mengevaluasi pengaruh penggunaan *PS Ball* terhadap elemen struktur beton bertulang dengan pembebanan monotonik dan pembebanan siklik serta menganalisis perilaku elemen struktur setelah dibebani beban monotonik dan beban siklik. Pengujian dilakukan dengan metode eksperimental.

Berdasarkan hasil analisis diperoleh beton bertulang menggunakan *PS Ball* dapat menahan beban sebesar 90 kN sedangkan beton bertulang tanpa *PS Ball* sebesar 79 kN pada saat pembebanan monotonik. Pada pembebanan siklik, disipasi energi kumulatif beton bertulang menggunakan *PS Ball* kinerjanya lebih baik daripada beton bertulang tanpa *PS Ball* dan kurva histerisis beton bertulang menggunakan *PS Ball* lebih stabil dan tidak terjadi *pinching*.

Kata kunci: *PS Ball*, Balok Beton Bertulang, Beban Monotonik, Beban Siklik, Kinerja

ABSTRACT

PS Ball as a substitute of sand and filler has been conducted and concluded that PS Ball can be used as construction materials. PS Ball as building material is better than sand in terms of compressive strength, hardness, and anti-weathering. Nowadays, construction material frequently used is concrete. Innovation to create environmentally friendly building concrete blocks is needed so it is necessary to do research on the impact of PS Ball on the use of reinforced concrete beams with monotonic and cyclic loading.

The purpose of this research is to evaluate the effect of the use of PS Ball against the reinforced concrete structural elements of the monotonic and cyclic loading and to analyze the behavior of structural elements after being loaded by monotonic and cyclic loading. Testing is conducted with experimental methods.

Based on the analysis results of reinforced concrete using PS Ball, it can withstand a load of 90 kN while reinforced concrete without PS Ball only 79 kN during monotonic loading. The cyclic loading, the cumulative energy dissipation of reinforced concrete using PS Ball indicates better performance than non-PS Ball reinforced concrete and hysteresis curve of reinforced concrete using PS Ball is more stable and pinching of does not occur.

Keywords: *PS Ball, Reinforced Concrete Beam, Monotonic Load, Cyclic Load, Performance.*

1. PENDAHULUAN

Penggunaan *PS Ball* sebagai bahan pengganti pasir dan bahan pengisi telah dilakukan dan disimpulkan dapat digunakan sebagai bahan konstruksi bangunan. *PS Ball* unggul dibanding pasir dalam hal kuat tekan, kekerasan, dan *anti-weathering*. Strukturnya sangat kuat, tahan cuaca, dan tidak mudah aus dengan bentuk bulat mengkilap. *PS Ball* tidak berbahaya, ramah lingkungan, dan dihasilkan oleh teknologi yang bebas pengaruh negatif terhadap lingkungan.

Bahan konstruksi bangunan yang sering digunakan adalah beton karena memiliki banyak kelebihan dibandingkan dengan bahan lain. Inovasi material ramah lingkungan terus dikembangkan. Berdasarkan kedua hal tersebut maka dilakukan penelitian pengaruh penggunaan *PS Ball* pada balok beton bertulang dengan pembebanan monotonik dan pembebanan gempa/siklik.

Tujuan utama penelitian adalah mengevaluasi pengaruh penggunaan *PS Ball* terhadap balok beton bertulang dengan pembebanan monotonik dan pembebanan siklik serta menganalisis perilaku elemen struktur setelah dibebani dengan beban monotonik dan beban siklik. Kuat tekan yang digunakan sebesar 25 MPa dan mutu beton sebesar 20 MPa. Benda uji pengujian beban monotonik yaitu 1 benda uji balok beton bertulang tanpa *PS Ball* dan satu benda uji balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* sebagai pengisi dalam campuran beton. Jumlah benda uji yang sama dilakukan untuk pembebanan siklik. *PS Ball* yang digunakan adalah hasil produksi P.T. Purna Baja dengan ukuran saringan No. 100-200.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Beton

Beton merupakan salah satu bahan konstruksi yang umum digunakan untuk bangunan gedung, jembatan, jalan, dan lain lain. Beton merupakan suatu kesatuan yang homogen. Beton diperoleh dengan cara mencampur agregat halus (pasir), agregat kasar (kerikil), air, dan semen. Selain itu dapat diberi bahan tambahan yang bersifat kimiawi ataupun fisikal pada perbandingan tertentu sampai menjadi satu kesatuan yang homogen.

1.2 Tegangan dan Regangan Beton

Tegangan didefinisikan sebagai tahanan terhadap gaya-gaya luar. Intensitas gaya yaitu gaya per satuan luas disebut tegangan dan diberi notasi huruf Yunani " σ " (*sigma*). Tegangan dihitung menggunakan Persamaan 2.1.

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (2.1)$$

dengan:

σ = Tegangan (MPa)

P = Gaya aksial (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

Jika suatu benda ditarik atau ditekan, gaya P yang diterima benda mengakibatkan adanya ketegangan antar partikel dalam material yang besarnya berbanding lurus. Perubahan tegangan partikel ini menyebabkan adanya pergeseran struktur material regangan atau himpitan yang besarnya juga berbanding lurus. Pergeseran menyebabkan terjadi perubahan bentuk material. Rasio perbandingan antar ΔL terhadap L disebut *strain* (regangan) dan dilambangkan dengan “ ϵ ” (*epsilon*). Regangan dihitung menggunakan Persamaan 2.2.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \dots \dots \dots (2.2)$$

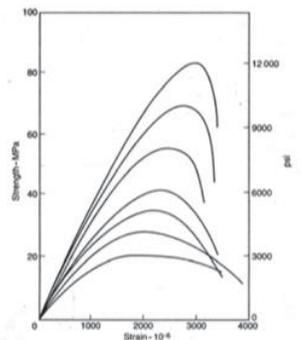
dengan:

ϵ = Regangan ($\mu\epsilon$ atau $\mu\text{m/m}$)

ΔL = Perubahan panjang benda (μm)

L = Panjang benda mula-mula (m)

Kurva tegangan-regangan pada Gambar 2.1 menampilkan hasil yang dicapai dari hasil uji tekan terhadap sejumlah silinder uji beton standar berumur 28 hari. Semakin tinggi mutu beton, modulus elastisitasnya semakin besar. Beton dengan kekuatan lebih tinggi bersifat lebih getas (*brittle*); beton dengan kekuatan lebih rendah lebih *ductile* (ulet) daripada beton berkekuatan lebih tinggi, artinya beton tersebut akan mengalami regangan yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan (*failure*).



Gambar 2.1 Contoh Kurva Tegangan-Regangan Pada Beton Dengan Berbagai Variasi Kuat Tekan
Sumber: Neville, A.M., 2003

1.3 Klasifikasi Beton

Menurut SNI 03-2847-2002, beton berdasarkan berat satuannya diklasifikasikan menjadi tiga, antara lain:

1. Beton ringan: berat satuan $\leq 1.900 \text{ kg/m}^3$
2. Beton normal: berat satuan antara $2.200 \text{ kg/m}^3 - 2.500 \text{ kg/m}^3$
3. Beton ringan: berat satuan $> 2.500 \text{ kg/m}^3$

Menurut SNI 03-6468-2002, beton berdasarkan kuat tekan diklasifikasikan menjadi tiga, antara lain:

1. Beton mutu rendah (*low strength concrete*) : $f_c' < 20 \text{ MPa}$
2. Beton mutu sedang (*medium strength concrete*) : $f_c' = 21 \text{ Mpa}-40 \text{ MPa}$
3. Beton mutu tinggi (*high strength concrete*) : $f_c' \geq 41 \text{ MPa}$

1.4 Jenis Beton

Beton terdiri atas beberapa jenis, antara lain:

1. Beton normal, yaitu beton yang menggunakan agregat normal seperti semen, pasir, kerikil, dan air tanpa campuran bahan lain.
2. Beton bertulang, yaitu beton yang menggunakan tulangan dengan jumlah dan luas tulangan tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan, dengan atau tanpa pratekan dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua material bekerja bersama-sama dalam menahan gaya yang bekerja.
3. Beton pracetak, yaitu elemen beton tanpa atau dengan tulangan yang dicetak di tempat yang berbeda dari posisi akhir elemen dalam struktur.
4. Beton *prestress* (pratekan), yaitu beton bertulang dimana telah diberikan tegangan dalam untuk mengurangi tegangan tarik potensial dalam beton akibat pemberian beban yang bekerja.
5. Beton ringan total atau beton ringan berpasir, yaitu beton yang seluruh agregat terdiri dari agregat halus dengan berat normal.
6. Beton ringan struktural, yaitu beton yang mengandung agregat ringan yang memenuhi ketentuan dan persyaratan *ASTMC330* dan mempunyai unit massa kering udara seperti yang ditentukan oleh *ASTMC567*.

2.5 Material Penyusun Beton

Beton umumnya tersusun dari tiga bahan penyusun utama yaitu semen, agregat, dan air. Semen merupakan bahan campuran yang secara kimiawi aktif setelah berhubungan dengan air. Agregat tidak berperan penting dalam reaksi kimia tersebut,

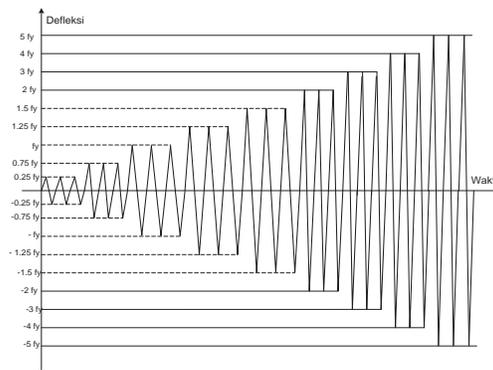
tetapi berfungsi sebagai bahan pengisi mineral yang dapat mencegah perubahan-perubahan volume beton setelah pengadukan selesai dan memperbaiki keawetan beton yang dihasilkan.

Pada umumnya beton mengandung rongga udara sekitar 1% sampai 2%, pasta semen (semen dan air) sekitar 25% sampai 40%, dan agregat (agregat halus dan agregat kasar) sekitar 60% sampai 75%. Untuk mendapatkan kekuatan yang baik tergantung pada sifat dan karakteristik dari masing-masing bahan penyusun.

2.6 Pembebanan

Pembebanan yang diaplikasikan pada benda uji dibagi menjadi dua jenis pembebanan, yaitu pembebanan monotonik dan pembebanan siklik. Pembebanan monotonik adalah pembebanan satu arah terhadap struktur beban nol hingga yang menyebabkan struktur mencapai kehancuran. Pengaturan pembebanan yang penting dalam pengujian ini adalah pengaturan kecepatan pembebanan. Pada penelitian ini dilakukan dengan kecepatan pembebanan sebesar 0,03mm/detik, kecepatan pembebanan ditentukan sama untuk setiap jenis pembebanan yang diaplikasikan pada benda uji.

Pada pembebanan siklik terjadi perubahan arah pembebanan pada struktur bangunan yang diakibatkan oleh gempa bumi. Pembebanan siklik dianggap selesai jika beban puncak yang dapat diterima oleh struktur pada suatu siklus tertentu mengalami penurunan. Pola pembebanan siklik yang diaplikasikan pada benda uji dibagi menjadi 10 grup. Gaya diberikan pada satu arah pembebanan dari defleksi nol hingga mencapai defleksi tertentu, kemudian arah gaya diubah berlawanan hingga defleksi balok mencapai nilai tertentu. Batasan defleksi dalam satu grup pembebanan mengacu pada defleksi leleh dan kelipatannya. Seluruh pembebanan dilakukan dengan kecepatan 0,03 mm/detik. Gambar 2.2 menunjukkan pola pembebanan siklik yang diterapkan.



Gambar 2.2 Pola Pembebanan Siklik

2.7 Daktilitas

Dalam perencanaan struktur bangunan khususnya terhadap beban gempa, parameter daktilitas merupakan salah satu parameter yang penting untuk menentukan deformasi maksimum yang dapat dicapai oleh struktur yang masih mampu mempertahankan kekuatannya sebelum runtuh. Daktilitas ultimit didefinisikan sebagai rasio peralihan atap saat kondisi maksimum (Δ_u) terhadap peralihan atap saat leleh (Δ_y). Daktilitas ultimit dihitung menggunakan Persamaan 2.3.

$$\mu_u = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \dots\dots\dots (2.3)$$

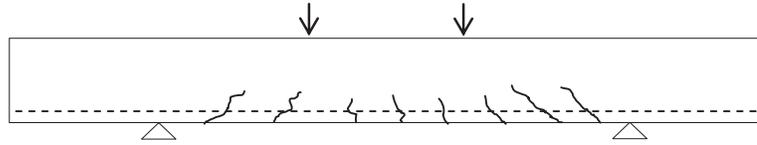
2.8 Disipasi Energi

Energi Total yang diberikan kepada struktur didefinisikan sebagai energi input. Berdasarkan sifat bahan struktur energi input terdiri dari energi elastis dan inelastik yang bersifat (terdisipasi). Disipasi energi umumnya terlihat dalam bentuk kerusakan pada elemen struktur. Energi disipasi didefinisikan sebagai luas daerah yang dibatasi oleh kurva histeresis gaya lateral-peralihan atap pada setiap siklus pembebanan.

2.9 Pola Retak Beton

Pada saat struktur beton bekerja menahan beban-beban yang dipikulnya, balok beton akan mengalami tegangan-tegangan pada badannya. Beton tanpa retak biasanya terjadi pada beban-beban kecil ketika tegangan-tegangan tarik masih lebih rendah daripada modulus keruntuhan (tegangan tarik lentur pada saat beton mulai retak), seluruh penahan melintang balok menahan lentur, dengan tekan pada satu sisi dan sisi lainnya. Ketika beton mulai retak diakibatkan karena beban terus ditingkatkan melampaui modulus keruntuhan balok, retak mulai terjadi di bagian bawah balok. Momen pada saat retak ini mulai terbentuk yaitu ketika tegangan tarik dibagian bawah balok sama dengan modulus keruntuhan yang disebut momen retak, M_{cr} . Jika beban ini terus ditingkatkan, retak ini mulai menyebar dan mendekati sumbu netral. Retak terjadi pada tempat-tempat disepanjang balok dimana momen aktualnya lebih besar daripada momen retak.

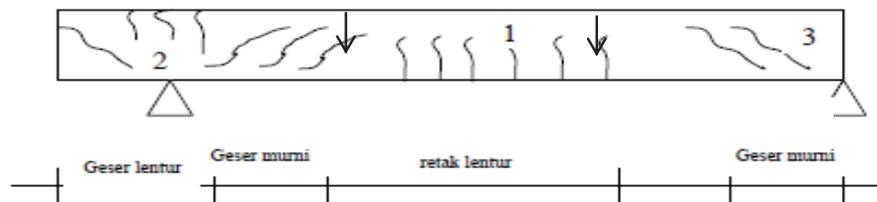
Selain retak lentur, pada umumnya juga terjadi retak geser. Hal ini disebabkan oleh penyaluran pembebanan pada masing-masing balok tidak sama. Retak geser merupakan tanda bahwa retak tarik mulai terjadi dan merupakan kelanjutan dari retak lentur. Retak geser tidak diperbolehkan dalam pengujian lentur maupun konstruksi bangunan, karena akibat retak geser suatu bangunan akan langsung runtuh dalam seketika. Jenis kegagalan lentur dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Kegagalan Lentur
Sumber: Nilson Arthur H, David Darwin, Charles W. Dolan, 2010

Pada dasarnya ada 3 jenis retak pada struktur (Gambar 2.3), yaitu:

1. Retak lentur murni (*flexural crack*), retak yang terjadi di daerah yang mempunyai momen lentur besar. Arah retak hampir tegak lurus sumbu balok.
2. Retak geser lentur (*flexural shear crack*), retak yang terjadi pada bagian balok yang sebelumnya terjadi keretakan lentur. Retak geser lentur merupakan perambatan retak miring dari retak yang sudah terjadi sebelumnya.
3. Retak geser murni (*shear crack*), retak yang terjadi pada daerah dimana gaya geser maksimum bekerja dan tegangan normal sangat kecil.



Gambar 2.3 Jenis-jenis Retak pada Balok
Sumber: Pratikto, 2009

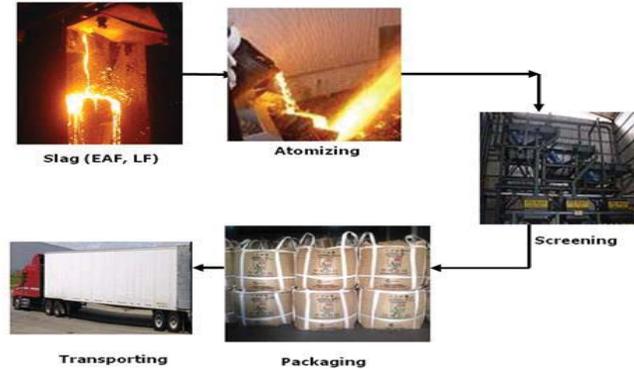
2.8 PS Ball

Slag EAF merupakan produk samping dengan volume besar yang terbentuk dalam proses pembuatan baja (15% sampai 20% dari kapasitas baja cair) dimana masih mengandung sisa-sisa metal. Teknologi *slag atomizing (Slag Atomizing Technology: SAT)* merupakan sistem baru untuk membentuk *slag* cair menjadi butiran kecil (*atomize*) dari *Electric Arc Furnace (EAF)* dengan efisiensi tinggi. Material hasil dari proses *SAT* berbentuk bola dengan diameter dan ukuran yang berbeda-beda, dan disebut *PS (Precious Slag) Ball*. Pada 1 Desember 2008 *SATPlant* di P.T. Purna Baja Harsco (kawasan pabrik P.T. Krakatau *Steel*) mulai beroperasi, dengan kapasitas 5.000 ton per bulan.

SAT merupakan proses merubah *slag* cair (1500°C - 1550°C) menjadi bola-bola kecil dengan diameter berkisar antara 0,1 mm sampai 4,5 mm. Dengan bantuan air, aliran udara berkecepatan tinggi menghasilkan pertukaran panas yang cepat dan mengubah aliran *slag* menjadi bola-bola (*PS Ball*) dengan permukaan yang mengkilap. *PS Ball*

memiliki 4 ukuran dari butir kasar sampai dengan butir halus, yaitu 4-10 MESH, 10-20 MESH, 20-40 MESH, dan 40-200 MESH.

PS Ball produk ramah lingkungan hasil olahan limbah B3 yang dapat digunakan untuk material blasting sebagai pengganti pasir kuarsa. Pada Gambar 2.4 dapat dilihat proses produksi *PS Ball*.



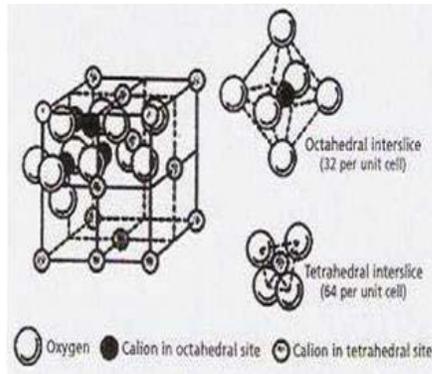
Gambar 2.4 Proses Produksi PS Ball
Sumber: P.T. Purna Baja Harsco

Dalam proses *SAT*, *slag* cair didinginkan dengan cepat oleh udara dan air berkecepatan tinggi. Berbagai unsur tidak stabil membentuk $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$, $\text{SiO}_2\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dan $\text{Mg-Fe}_2\text{O}_3$. Tidak ada CaO bebas di dalam produk, dan permukaan akan mengkilap dengan adanya struktur spinel. Struktur spinel merupakan bentuk kombinasi dari $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$, CaO-SiO_2 . Pada Gambar 2.5 dapat dilihat bentuk butiran *PS Ball*.



Gambar 2.5 Karakteristik PS Ball
Sumber: P.T. Purna Baja Harsco

PS Ball cocok untuk berbagai penerapan, berkat sifat fisik dan kimianya. Yang paling penting adalah fakta *PS Ball* tidak berbahaya dan ramah lingkungan dan dihasilkan oleh teknologi yang bebas pengaruh negatif terhadap lingkungan. Struktur kimiawi dari *PS Ball* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Struktur Spinel *PS Ball*
Sumber: P.T. Purna Baja Harsco

Struktur spinel merupakan ciri utama material ini. Struktur fisik dan kimia yang stabil yang menghilangkan alasan polusi. Nilai persentase kandungan kimiawi dari *PS Ball* dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Persentase Kandungan Kimiawi *PS Ball*

Kandungan Kimia	Nilai
T-Fe	20,83%
M-Fe	<0,10%
FeO	3,35%
Fe ₂ O ₃	26,06%
SiO ₂	12,69%
CaO	40,30%
Al ₂ O ₃	2,20%
MgO	7,95%
Na ₂ O	<0,10%
Kekerasan	739,8 HVC
Diameter	0,1-4,5 mm
Massa Jenis	2,3 kg/l
Permeabilitas Air	530 cm/s
Kekuatan Tekan	323 kg/cm ³

Sumber: P.T. Purna Baja Harsco

Karakteristik material *PS Ball* dibandingkan dengan material lain yang ada dapat dilihat pada Tabel 2.2.

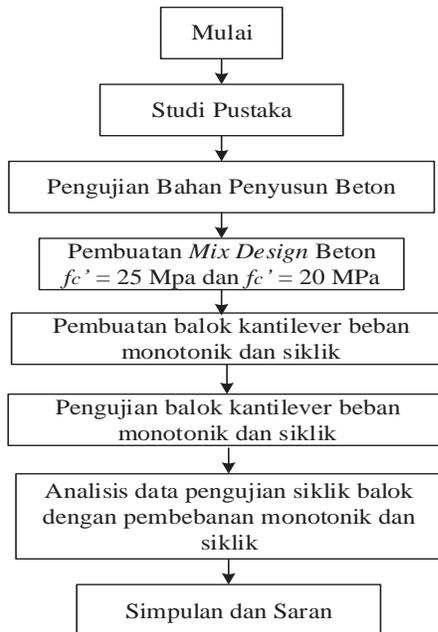
Tabel 2.2 Karakteristik Material PS Ball

<i>Classification</i>	<i>PS Ball</i>	<i>Sand</i>	<i>Garnet</i>	<i>Glass Bead</i>	<i>Stell Ball</i>
<i>Actual Specific Gravity</i>	3,45	2,62	4,2	2,6	7,2
<i>Mohs Hardness</i>	7,5	5,5	7,5	5	8,5
<i>Rockwell Hardness (HRC)</i>	43	30	40	28	50
<i>Brightness (quality grade)</i>	<i>Very good</i>	<i>Normal</i>	<i>Good</i>	<i>Normal</i>	<i>Very good</i>
<i>Reusability</i>	<i>1-3 times</i>	<i>One time</i>	<i>1-3 times</i>	<i>One time</i>	<i>5-7 times</i>

Sumber: P.T. Purna Baja Harsco

3. METODE PENELITIAN

Tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1. Standar pengujian yang digunakan adalah Standar Nasional Indonesia (SNI). Kadar PS Ball yang digunakan berdasarkan hasil penelitian terdahulu adalah 15%.

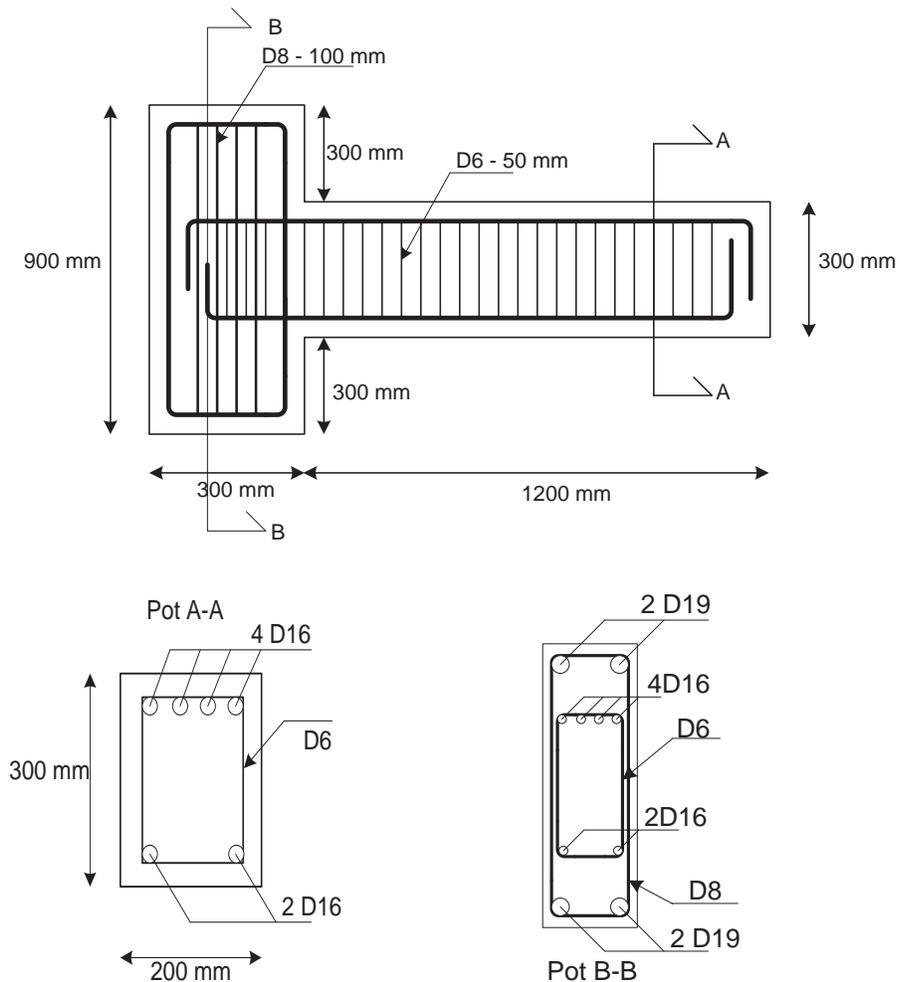


Gambar 3.1 Flowchart Penelitian

Balok uji yang digunakan dalam pengujian merupakan balok kantilever dan spesifikasi balok uji yang digunakan adalah sebagai berikut:

A. Properti benda uji balok

Gambar 3.2 memperlihatkan properti balok yang akan diuji dengan menggunakan beban monotonik dan beban siklik. Tulangan longitudinal yang digunakan adalah baja tulangan ulir diameter 16 mm sebanyak 4 buah pada tulangan tarik dan 2 buah pada tulangan tekan. Tulangan transversal menggunakan baja tulangan polos dengan diameter 8 mm yang dipasang sejarak 50 mm di sepanjang bentang balok.



Gambar 3.2 Properti Balok Uji

Desain balok yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. $f_c' = 30 \text{ MPa}$.
2. $f_y = 400 \text{ MPa}$.
3. $L = 1.2 \text{ m}$.
4. $b = 200 \text{ mm}$.

5. $h = 300 \text{ mm}$.
 6. $d' = 40 \text{ mm}$.
 7. $d = h - d' = 260 \text{ mm}$.
 8. Tulangan tarik menggunakan tulangan ulir dengan D16 mm sebanyak 4 buah.
 9. Tulangan tekan menggunakan tulangan ulir dengan D16 mm sebanyak 2 buah.
 10. Tulangan transversal menggunakan tulangan polos dengan diameter 6 mm.
- B. Persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi dalam pendesainan sesuai dalam SNI-03-2847-2002 adalah sebagai berikut:

1. Persyaratan tulangan tarik

Persyaratan yang harus dipenuhi untuk tulangan tarik yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Luas tulangan yang digunakan tidak boleh lebih kecil:

$$A_{s_{\min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} b x d$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{\sqrt{30}}{4 x 400} 200 x 260$$

$$A_{s_{\min}} = 178.0098 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan tarik yang digunakan dalam desain adalah sebesar $804,2477 \text{ mm}^2$,
 $A_s > A_{s_{\min}} \rightarrow 804,2477 \text{ mm}^2 > 178,0098 \text{ mm}^2$ sehingga memenuhi syarat dan tulangan yang digunakan tidak boleh lebih kecil:

$$A_{s_{\min}} = \frac{1.4}{f_y} b x d$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{1.4}{400} 200 x 260$$

$$A_{s_{\min}} = 182 \text{ mm}^2$$

- b. Jarak bersih antar tulangan tarik sejajar dalam lapis yang sama tidak boleh kurang db. Jarak antar tulangan tarik sejajar yang digunakan dalam desain sebesar 20mm.

2. Persyaratan tulangan tekan

- a. Luas tulangan tekan yang digunakan tidak boleh lebih kecil dari:

$$A_{s_{\min}} = \frac{\sqrt{f_c'}}{4 f_y} b x d$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{\sqrt{30}}{4 x 400} 200 x 260$$

$$A_{s_{\min}} = 178.0098 \text{ mm}^2$$

Luas tulangan tekan yang digunakan dalam desain sebesar 402.1239 mm^2 , sehingga $A_s > A_{s_{\min}} \rightarrow 402.1239 \text{ mm}^2 > 178.0098 \text{ mm}^2$ sehingga memenuhi syarat dan tulangan yang digunakan tidak boleh lebih kecil dari:

$$A_{s_{\min}} = \frac{1.4}{f_y} b x d$$

$$A_{s_{\min}} = \frac{1.4}{400} 200 x 260$$

$$A_{s_{\min}} = 182 \text{ mm}^2$$

b. Jarak bersih antar tulangan sejajar dalam lapis yang sama tidak boleh kurang dari db.

3. Persyaratan tulangan transversal

a. Jarak sengkang maksimum yang digunakan tidak boleh melebihi:

- $d/4 = 62,5\text{mm}$
- $8d = 128\text{mm}$
- $24 \text{ db} = 144\text{mm}$
- 300mm

b. Jarak sengkang yang didapatkan dalam perhitungan sebesar 45mm untuk semua jenis tulangan tarik dan tulangan tekan yang digunakan dalam pengujian, sehingga memenuhi syarat jarak sengkang yang dibutuhkan.

c. Disepanjang daerah dua kali tinggi ($2h = 600\text{mm}$) balok pada kedua sisi suatu penampang dimana leleh lentur diharapkan dapat terjadi sehubungan dengan terjadinya deformasi inelastik struktur rangka.

4. Persyaratan beton

a. Kuat tekan beton yang digunakan tidak boleh kurang dari 20 MPa , kuat tekan beton yang digunakan dalam desain sebesar 30 MPa .

b. Bentang bersih balok tidak boleh kurang dari empat kali tinggi efektifnya ($L > 4d$) $\rightarrow 1.200\text{mm} > 1.000\text{mm}$, dalam desain digunakan bentang bersih sebesar 1.200mm , sehingga masih memenuhi syarat.

c. Perbandingan lebar terhadap tinggi tidak boleh kurang dari $0,3$

$$\frac{b}{h} > 0.3 \rightarrow \frac{200}{300} > 0.3 \rightarrow 0.6 > 0.3 \dots OK$$

5. Persyaratan panjang penyaluran

Panjang penyaluran dasar λ_{dh} untuk suatu batang terkait dengan f_y sama dengan 400 MPa (Gambar 3.3) diambil sebesar:

$$\lambda_{dh} = \frac{100d_b}{\sqrt{f_c'}}$$

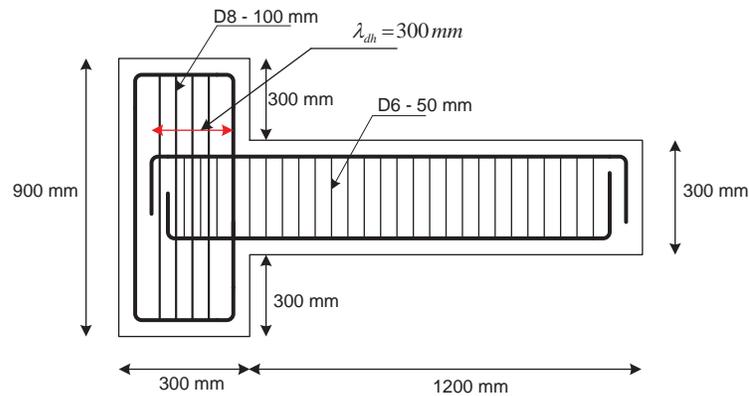
dengan:

λ_{dh} : Panjang Penyaluran (mm)

d_b : Diameter Tulangan (mm)

f_c' : Mutu Beton (MPa)

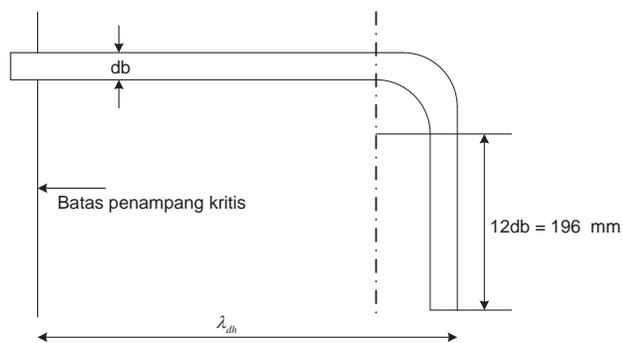
$$\lambda_{dh} = \frac{100 \times 16}{\sqrt{30}} = 292 \text{ mm}$$



Gambar 3.3 Panjang Penyaluran Tulangan

6. Persyaratan kait yang digunakan dalam spesimen

Persyaratan kait yang digunakan dalam pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Kait

4. ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Pengujian Balok Beton Bertulang Menggunakan *PS Ball* dan Balok Beton Bertulang Tanpa *PS Ball* Dengan Beban Monotonik

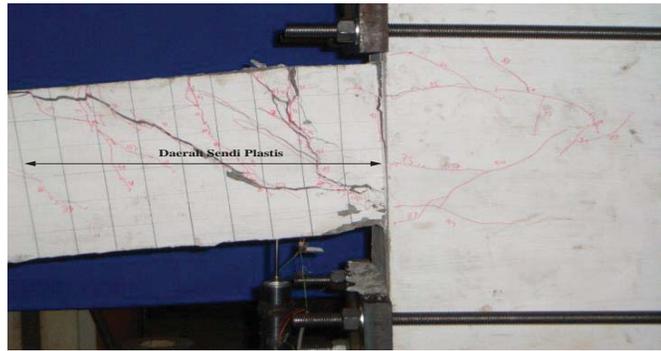
Hasil pengujian diperoleh beban leleh balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* ketika dibebani dengan beban monotonik adalah sebesar 50 kN dengan *displacement* leleh sebesar 20 mm. Pada kondisi *ultimate* balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dapat menahan beban sebesar 79,01 kN dan mengalami keruntuhan pada saat *displacement* mencapai 135 mm. Daktilitas perpindahan ditentukan dari perbandingan perpindahan *ultimate* terhadap perpindahan leleh dari balok, diperoleh daktilitas tulangan sebesar 6,5.

Hasil pengujian balok beton bertulang tanpa *PS Ball* didapatkan beban leleh dengan beban monotonik adalah sebesar 48,5 kN dengan *displacement* leleh sebesar 14,5 mm. Balok beton bertulang tanpa *PS Ball* dapat menahan beban hingga sebesar 90 kN. Balok beton bertulang tanpa *PS Ball* mengalami keruntuhan pada saat *displacement* mencapai 66,4 mm. Daktilitas perpindahan balok beton bertulang tanpa *PS Ball* yang didapat dari hasil pengujian dengan menggunakan beban monotonik adalah sebesar 4,5. Hal ini menunjukkan bahwa balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* lebih daktil daripada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*.

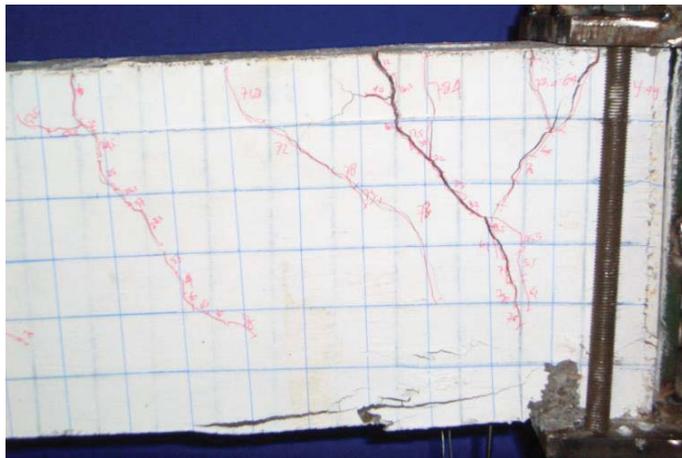
Perbandingan hasil pengujian balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dan balok beton bertulang tanpa *PS Ball* mengenai perilakunya ketika diberi beban monotonik dapat dilihat pada Tabel 4.1. Pola keruntuhan pada balok beton bertulang tanpa *PS Ball* dengan beban monotonik dapat dilihat pada Gambar 4.1 dan pola keruntuhan pada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dengan beban monotonik dapat dilihat pada Gambar 4.2.

Tabel 4.1 Perbandingan Balok Beton Bertulang Menggunakan *PS Ball* dan Balok Beton Bertulang Tanpa *PS Ball* Dengan Beban Monotonik

Kondisi	Kurvatur		Momen (kNm)		Beban (kN)	
	Balok Menggunakan <i>PS Ball</i>	Balok Tanpa <i>PS Ball</i>	Balok Menggunakan <i>PS Ball</i>	Balok Tanpa <i>PS Ball</i>	Balok Menggunakan <i>PS Ball</i>	Balok Tanpa <i>PS Ball</i>
Retak	8,36E-06	1,45E-06	23,19	14,64	15,46	9,76
Leleh	4,2E-05	2,2E-06	75	72,75	50	48,5
<i>Ultimate</i>	8,72E-05	4,17E-	118,1	134,4	79,01	90



Gambar 4. 1 Pola Keruntuhan pada Balok Beton Bertulang Tanpa PS Ball dengan Pengujian Monotonik



Gambar 4.2 Pola Keruntuhan pada Balok Beton Bertulang Menggunakan PS Ball dengan Pengujian Monotonik

4.2 Analisis Pengujian Balok Beton Bertulang Menggunakan *PS Ball* dan Balok Beton Bertulang Tanpa *PS Ball* Dengan Beban Siklik

Pengujian siklik pada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dilakukan sampai pada kondisi dimana *displacement* balok mencapai $4\Delta_y$. Hal ini dikarenakan balok beton bertulang sudah mencapai kondisi leleh. Besarnya energi disipasi dari balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* pada saat diaplikasikan pembebanan siklik dapat dilihat pada Tabel 4.2.

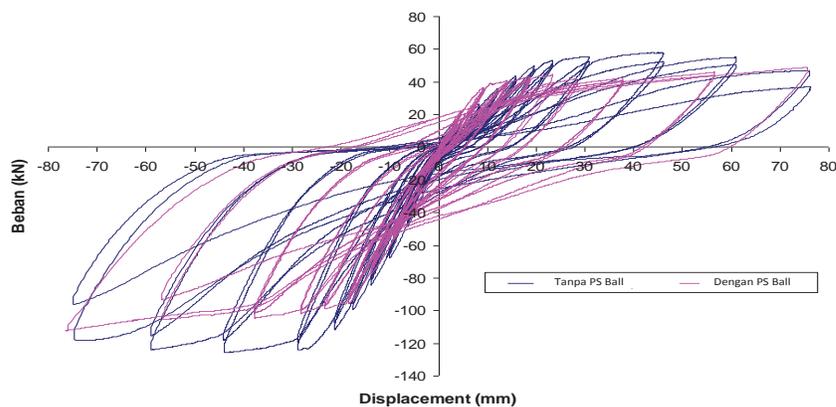
Tabel 4.2 Energi Disipasi Balok Beton Bertulang Menggunakan *PS Ball*

Siklus	Energi Disipasi (kNmm)		Total Energi Disipasi (kNmm)	Energi Disipasi Rata-Rata (kNmm)	Energi Disipasi Kumulatif (kNmm)
	Tarik	Tekan			
0.25 Δy	17.99	13.29	31.28	32.73	32.73
	19.38	14.81	34.19		
0.5 Δy	42.95	59.28	102.23	100.42	133.15
	40.40	58.20	98.60		
0.75 Δy	166.91	280.02	446.93	374.95	508.10
	109.71	193.27	302.98		
Δy	242.38	522.12	764.49	733.76	1241.86
	212.28	490.74	703.02		
1.25 Δy	402.03	899.31	1301.34	1404.32	2646.18
	431.47	1075.82	1507.29		
1.5 Δy	681.82	1624.38	2306.21	2389.01	5035.19
	710.30	1761.51	2471.81		
2 Δy	1203.44	2857.47	4060.90	4212.72	9247.91
	1275.60	3088.94	4364.54		
3 Δy	2594.03	5867.37	8461.40	7949.39	17197.30
	2499.79	4937.60	7437.39		
4 Δy	3763.56	8908.68	12672.24	12672.24	29869.54
	-	-	-		

Energi disipasi rata-rata adalah nilai rata-rata dari total energi disipasi pada setiap siklus. Energi disipasi kumulatif merupakan penjumlahan secara kumulatif dari energi disipasi rata-rata. Total disipasi energi kumulatif balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* adalah sebesar 29869,54 kNmm. Pola keruntuhan yang terjadi pada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* adalah keruntuhan akibat lentur. Hal ini dapat dilihat dari pola retak yang terjadi pada spesimen yaitu retakan yang terjadi berupa retakan vertikal. Beban tekan maksimum yang dapat dipikul tulangan tarik pada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* adalah sebesar 112,20 kN. Pada kurva histerisis terjadi *pinching* pada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*. Penurunan disipasi energi semakin besar seiring dengan semakin bertambahnya beban, dapat dilihat pada Tabel 4.3. Perbedaan energi disipasi kumulatif antara balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dan balok beton bertulang tanpa *PS Ball* adalah sebesar 50%. Gambar 4.3 memperlihatkan perbandingan kurva histerisis balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dan balok beton bertulang tanpa *PS Ball*.

Tabel 4.3 Energi Disipasi Balok Beton Bertulang Tanpa PS Ball

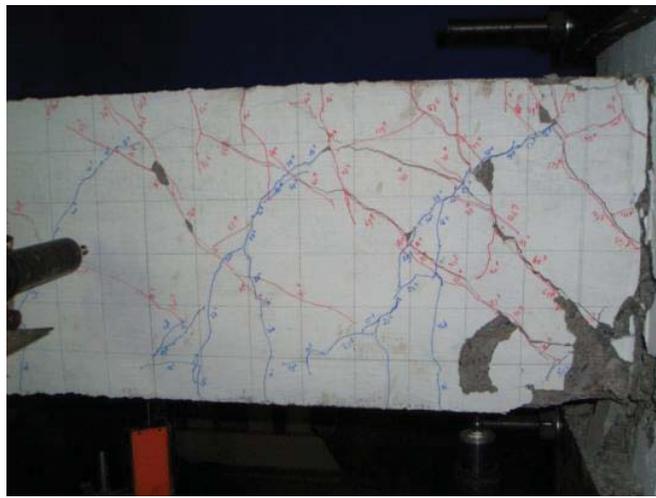
Siklus	Energi Disipasi (kNmm)		Total Energi Disipasi (kNmm)	Energi Disipasi Rata-Rata (kNmm)	Energi Disipasi Kumulatif Rata-Rata (kNmm)
	Tarik	Tekan			
0.25 Δy	9.12	19.31	28.42	26.66	26.66
	11.75	13.14	24.89		
0.5 Δy	27.88	49.77	77.65	75.78	102.44
	25.09	48.82	73.91		
0.75 Δy	51.98	100.59	152.57	140.22	242.66
	46.22	81.65	127.87		
Δy	103.12	206.76	309.89	307.23	549.89
	100.18	204.39	304.57		
1.25 Δy	155.40	319.58	474.98	467.43	1017.32
	149.13	310.75	459.88		
1.5 Δy	208.37	472.74	681.11	677.17	1694.49
	206.90	466.34	673.23		
2 Δy	378.29	849.42	1227.71	1224.60	2919.09
	372.64	848.85	1221.49		
3 Δy	958.96	2231.80	3190.76	2814.87	5733.96
	767.11	1671.87	2438.98		
4 Δy	1374.79	3329.47	4704.25	4161.73	9895.69
	1141.40	2477.80	3619.21		
5 Δy	1730.28	4315.03	6045.31	5210.49	15106.18
	1265.22	3110.46	4375.68		



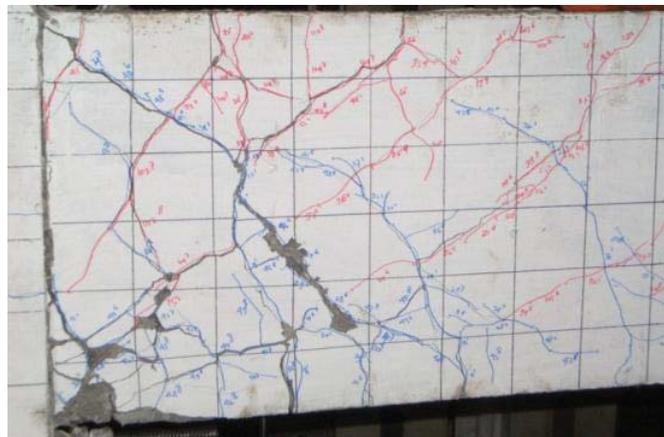
Gambar 4.3 Perbandingan Kurva Histerisis Balok Beton Bertulang Menggunakan PS Ball dan Balok Beton Bertulang Tanpa PS Ball

Beban puncak balok beton bertulang tanpa *PS Ball* lebih tinggi daripada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball*. Selain itu kurva histeresis balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* lebih stabil daripada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*. Hal ini dapat dilihat dari kurva histeresis dimana semakin besar pembebanan yang diaplikasikan pada balok maka kurva histeresis yang terbentuk semakin besar. Pada kurva histeresis balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* tidak terjadi *pinching* seperti yang terjadi pada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*.

Pola retak balok beton bertulang tanpa *PS Ball* dengan beban siklik dapat dilihat pada Gambar 4.4 dan pola retak balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* dengan beban siklik dapat dilihat pada Gambar 4.5.



Gambar 4.4 Pola Retak Balok Beton Bertulang Tanpa *PS Ball* dengan Beban Siklik



Gambar 4.5 Pola Retak Balok Beton Bertulang Menggunakan *PS Ball* dengan Beban Siklik

5. SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan dapat ditarik simpulan sebagai berikut:

- 1) Balok beton bertulang tanpa *PS Ball* mampu menahan beban sebesar 90 kN sedangkan balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* mampu menahan beban sebesar 79 kN. *Displacement* balok beton bertulang tanpa *PS Ball* sebesar 20 mm sedangkan *displacement* balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* sebesar 14,5 mm.
- 2) Hasil pengujian siklik dilihat dari disipasi energi kumulatif menyatakan bahwa balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* menerima disipasi energi kumulatif lebih baik daripada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*. Hal ini mengindikasikan bahwa balok beton bertulang menggunakan *PS Ball performance*-nya terhadap beban siklik lebih baik daripada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*.
- 3) Hasil pengujian siklik dilihat dari kurva histerisis memperlihatkan bahwa balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* lebih stabil daripada balok beton bertulang tanpa *PS Ball*. Selain itu, pada balok beton bertulang menggunakan *PS Ball* tidak terjadi *pinching* sedangkan balok beton bertulang tanpa *PS Ball* mengalami *pinching*.

6. UCAPAN TERIMAKASIH

- 1) Kepada Yang Terhormat, Direktur Riset dan Pengabdian Masyarakat Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi yang telah mendanai penelitian ini.
- 2) Kepada Yang Terkasih, Ronald Simatupang yang telah memberikan ide-ide dan membantu dalam penelitian-penelitian yang telah dilaksanakan selama ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI 318-02, 2002, *Building Codes Requirement for Structural Concrete and Commentary*, ACI Committee.
2. ACI 374.1, 2005, *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*
3. Annual book of ASTM Standard, Designation C22, *Test Method for Bulk Density (Unit Weight)*.
4. Annual book of ASTM Standard, Designation C33/33M, *Standard Specification for Concrete Aggregate*.

5. Annual Book of ASTM Standard, Designation C39a-93, *Standard Specification for Concrete Agregat*.
6. Annual book of ASTM Standart, Designation C40, *Test Method for Organic Impurities In Fine Aggregates for Concrete*.
7. Annual Book of ASTM Standard, Designation C78-94, *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimen in Laboratory*.
8. Annual book of ASTM Standard, Designation C136, *Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”*.
9. Annual book of ASTM Standart, Designation C143, *Standard Test Methodfor Slump of Hydraulic Cement Concrete*.
10. Annual book of ASTM Standard, Designation C873, *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast In Place In Cylindrical Molds*.
11. Annual book of ASTM Standard, Designation C989, *Spec for Slag Cement for Use In Concrete and Mortars*.
12. ASTM A706M-93a, *Standard Specification for Low-Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement*, Annual Book of ASTM Standards, Volume 01.04, pp. 353-357.
13. Hamzah, A., 1999, *Sifat Fisik dan Mekanik Beton Mutu Tinggi dengan Campuran Copper Slag*, Tugas Akhir S-1, FTSP, ITS, 1999.
14. Idris dan Rifai, 2002, *Beton*.
15. Neville, A.M., 2003, *Properties of Concrete*.
16. SNI 03-2834-2000, 2000, *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*.
17. SNI 03-2847-2002, 2002, *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*.