

KINERJA BALOK BETON PRA TEGANG PARSIAL PRATARIK YANG TELAH DIPERBAIKI AKIBAT PEMBEBANAN SILKLIK¹**(PERFORMANCE OF RETROFED PRETENSION PARTIAL PRESTRESSED CONCRETE BEAM UNDER CYCLIC LOADING)**Suharwanto¹, Titik Penta Artiningsih², Bambang Budiono³¹Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Wiralodra, Indramayu²Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung³Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung*Abstract*

Production of high rises building and bridge usually use steel frame and concrete. Concrete that specially for beams are usually use pre-stress concrete system. This system to accommodate long span in the structure. If this structure is damage, it can not to easy repair or replacement, because the structure must be remove and then replacement the beam. So, it must be repair by prepack and grouting that is used by polymer concrete to retrofit and serviceability in the long time again. To repair in the field is very difficult to know the strength and stiffness of the pre-stress concrete beam, so the model of scale sample as specimen shall be made in order to accommodate laboratory equipment capacity and field simulation condition. The specimen will be tested in the laboratory by cycle loading to simulate dynamic load such as earth quake load and vehicle load as field condition simulation. The test will be done in the original specimen and then the specimen will be repaired, after that the specimen will be tested in the same load condition in order to simulated in the same condition after repairing. The dynamic load will be applied in the 6 cycle in order to make a 3 ductility that aim to know the condition in rapid time. The result of this research to the retrofit specimen has more deflection than original specimen, because the initial tensile force in pre-stressed concrete has decreased. Beside of that, reinforcement and tendon have been yielded. The load capacity of strength and stiffness for retrofit pre-stressed concrete beam is similar with original, but only small degradation of load capacity, strength, and stiffness at last cycle. They are 10% for load capacity degradation, 17% for strength, and 7% for stiffness. But crack pattern of the entire specimen (original and retrofed condition) are similar, they are flexure crack. Therefore, retrofit specimen has a good performance.

Key words: *grouting, performance, partial pre-stressed concrete beam, prepack, retrofit.*

Abstrak

Pembangunan gedung bertingkat dan jembatan pada umumnya menggunakan rangka baja atau beton. Beton yang digunakan khususnya untuk elemen struktur balok pada umumnya menggunakan system prategang. Sistem ini memungkinkan balok beton yang digunakan mempunyai bentang panjang. Namun apabila elemen struktur balok tersebut mengalami kerusakan tidak dapat di lakukan penggantian secara sebagian atau parsial, sehingga perlu ada cara lain untuk perbaikannya, yaitu dengan cara prepack dan grouting. Bahan yang digunakan untuk perbaikannya adalah beton polimer. Perbaikan ini dimaksudkan untuk memulihkan kembali kinerja dan memperpanjang umur rencana. Perbaikan secara nyata di lapangan sulit untuk langsung diketahui kinerjanya dalam waktu yang singkat, sehingga dibuat pemodelan benda uji yang dibuat dengan skala laboratorium, tetapi dapat menstimulasikan keadaan di lapangan. Pembebanan dilaboratorium dilakukan terhadap model benda uji tersebut pada keadaan awal/original dan setelah dilakukan perbaikan dengan beban siklik kembali yang sama agar elemen struktur balok tersebut dapat mensimulasikan beban dinamis dari gempa atau kendaraan yang bergerak, sehingga pemodelan dan pengaturan pengujian mendekati kondisi lapangan atau kenyataan yang ada seperti kondisi sebelum dan sesudah diperbaiki. Jumlah beban siklik yang diberikan adalah 6 siklus dengan maksud agar model benda uji dapat dibebani hingga daktilitas tingkat 3, sehingga kinerja balok prategang tersebut dapat diketahui dengan cepat. Hasil pengujian yang diperoleh adalah bahwa semua jenis balok beton prategang yang telah diperbaiki (balok retrofit) mengalami defleksi yang lebih besar

dari balok beton prategang original, karena pengurangan daya prategang awal pada kabel prategang, serta baja tulangan dan kabel prategang sudah mengalami sedikit leleh. Kekuatan daya layan balok prategang masih relatif sama pada setiap siklusnya, namun sedikit penurunan daya layan beban siklus terakhir yaitu rata – rata adalah 10 % untuk penurunan kapasitas beban, 17% untuk kekuatan dan 7% untuk kekakuan. Pola retak yang terjadi benda uji (yang awal dan setelah diperbaiki) relatif sama yaitu retak lentur, sehingga kinerja beton yang telah diperbaiki masih dalam kondisi baik dan hamper sama dengan benda uji awalnya.

Kata kunci : beton retrofit, grouting, kabel prategang, kinerja, prategang pratarik prasioal, prepack

I. PENDAHULUAN

Pembangunan gedung bertingkat sebagai sarana untuk rumah tinggal atau perkantoran dan jembatan sebagai sarana yang sangat penting untuk menghubungkan antara dua daerah, menghindari keterisolasian suatu daerah dan menunjang perekonomian suatu negara.

Pembangunan gedung bertingkat dan jembatan tersebut pada umumnya menggunakan rangka baja atau beton. Struktur beton pada elemen struktur balok yang digunakan pada gedung bertingkat yang mempunyai jarak antar kolom yang panjang dan jembatan bentang panjang umumnya adalah dengan sistem prategang. Sistem ini memungkinkan balok beton yang digunakan mempunyai bentang panjang. Namun apabila elemen struktur balok tersebut mengalami kerusakan tidak dapat dilakukan perbaikan secara sebagian atau parsial, sehingga perbaikannya memerlukan sistem tersendiri, yaitu dengan cara dibongkar secara keseluruhan pada struktur pelatnya dan baru kemudian dapat diganti balok yang mengalami kerusakan.

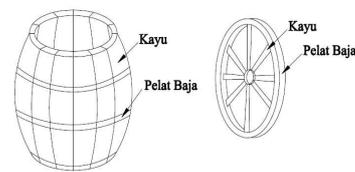
Salah satu sistem perbaikan yang digunakan untuk mempermudah adalah dengan menggunakan *prepack* (pengganti sebagian beton yang mengalami rusak) dan *grouting* (penyemprotan bahan cairan yang dapat meresap dan pada celah-celah retak). Perbaikan ini dimaksudkan untuk memulihkan kembali kinerja dan memperpanjang umur rencana, sehingga daya layan jembatan menjadi bertambah. Perbaikan yang dilakukan pada elemen struktur balok tersebut di atas sulit untuk diketahui kinerjanya dalam waktu yang singkat, karena lendutan yang terjadi pada balok tersebut dalam jangka panjang, sehingga dibuat suatu model benda uji dengan skala tertentu yang dapat mempresentasikan seperti halnya kenyataan di lapangan agar dapat diuji di laboratorium sesuai dengan kapasitas alat ujinya untuk membenai balok tersebut. Benda uji dibuat lalu di test dengan uji beban siklik hingga rusak, kemudian diperbaiki seperti pada pola perbaikan yang telah dijelaskan di atas, kemudian dilakukan uji beban siklik kembali seperti semula. Pembebanan siklik dimaksudkan agar struktur balok tersebut

dapat menerima beban dinamis dari gempa atau kendaraan yang bergerak, sehingga pemodelan dan pengaturan pengujian benda uji mendekati kondisi lapangan atau kenyataan yang ada. Dengan demikian kinerja balok tersebut dapat diketahui dengan cepat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Beton Prategang Parsial

Perkembangan penggunaan prategang (*pre-stressed*) sebenarnya sudah sejak lama yaitu pada tangki kayu yang diberi sabuk besi dan penggunaan roda pedati yang dikelilingi plat besi pada ujung lingkaran.



Gambar 1. Tangki kayu dan Roda Pedati

Hal ini berkembang terus hingga pada struktur balok dimana beban tekan pada balok beton diberikan terlebih dahulu oleh kabel prategang sebelum beban mati dan beban hidup bekerja. Dengan demikian, struktur balok tersebut akan lebih mampu menahan beban yang bekerja di atasnya. Beton prategang adalah beton dimana tegangan-tegangan tekan internal yang besar diberikan terlebih dahulu serta didistribusikan secara menyeluruh pada penampang struktur beton tersebut, sehingga balok tersebut dapat melawan tegangan – tegangan yang diakibatkan oleh beban luar hingga suatu tingkat yang diinginkan (Gilbert, 1990; and Nawy 1996). Pengertian prategang beton ada dua macam yaitu :

1) Pra tarik (*Pre-Tensioning*)

Suatu metode untuk memberikan prategang pada beton dimana kabel/tendon di tarik sebelum beton dicor.

2) Pasca Tarik (*Post-Tensioning*)

Suatu metode untuk memberikan prategang pada beton dimana kabel/tendon ditarik sesudah beton mengeras.

Beban yang bekerja pada balok beton tidak sepenuhnya dipikul oleh gaya prategangnya, namun hanya sebagian dan bagian yang lain dipikul oleh beton bertulang. Sistem balok prategang yang demikian disebut "Balok Prategang Parsial". Balok beton prategang parsial tersebut sangat

tergantungan pada perbandingan parsial prategangnya (*Partial Prestressing Ratio* atau PPR). Nilai PPR diukur berdasarkan perbandingan antara momen lentur yang diakibatkan oleh gaya prategang dan momen lentur total (Liliana, 1997). Jika dituliskan dalam bentuk persamaan adalah :

$$PPR = \frac{M_{np}}{M_n} \times 100\% \quad (1)$$

Dimana :

PR = *Partial Prestressing Ratio*

M_{np} = Momen nominal prategang

M_n = Momen nominal total penampang

Nilai PPR yang diberikan pada balok prategang apabila terlalu kecil akan mengakibatkan balok berfungsi dan berperilaku seperti balok bertulang biasa dan tendon menjadi tidak efektif, tetapi sebaliknya akan bersipat getas. Kegetasan balok prategang penuh diakibatkan oleh putus tendon, sehingga balok beton sudah tidak dapat menahan beban lagi dan langsung runtuh (Artiningsih, 1998). Hal ini sangat membahayakan bagi pengguna.

2.2. Kuat Lentur Balok Prategang

Kekuatan balok dipengaruhi oleh beban yang dikenai pada balok tersebut. Apabila beban yang bekerja terus bertambah, maka kekuatan balok semakin berkurang. Beban yang bekerja tersebut menimbulkan gaya-gaya dalam berupa gaya aksial, geser, dan momen dan gaya-gaya dalam tersebut akan menimbulkan tegangan pada struktur balok (Park and Paulay, 1975). Tegangan-tegangan inilah yang akan dilawan oleh komponen-komponen yang ada pada elemen struktur balok seperti material beton, baja tulangan, dan kabel prategang (lihat persamaan 2). Oleh karena itu, komponen-komponen tersebut harus seimbang, sehingga balok yang dibentuk dapat menahan beban dengan baik dan aman. Gaya dalam berupa momen yang bekerja pada balok mengakibatkan lenturan atau defleksi. Defleksi pada balok harus lebih kecil dari defleksi yang diijinkan, dan apabila defleksi yang terjadi berlebihan, maka balok akan timbul retak-retak. Retak-retak tersebut dapat membahayakan struktur, karena retak dapat menyebabkan korosi pada tulangan, interusi zat-zat kimia yang agresif, dan mengurangi besarnya atau kapasitas penampangannya.

$$M_n = M_{np} + M_{nsc} + M_{nst} \quad (2)$$

Dimana :

M_n = Momen nominal total penampang

M_{np} = Momen nominal prategang

M_{nsc} = Momen nominal tulangan tekan

M_{nst} = Momen nominal tulangan tarik

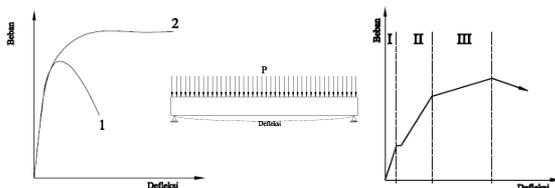
2.3. Perilaku Hubungan Beban Defleksi

Perilaku balok akan terlihat pada saat dibebani, dimana balok dapat berdeformasi hingga balok tersebut mengalami runtuh (gambar 2.a). Keruntuhan tersebut diakibatkan oleh kekuatan atau kapasitas balok yang terbatas, sehingga balok tersebut akan mengalami perubahan geometri berupa lenturan atau defleksi. Perilaku balok ini dapat diamati melalui kurva hubungan beban - defleksi (Gambar 2.b). Secara umum ada dua tipe kurva yang menunjukkan perbedaan karakteristik balok. Kurva 1 menunjukkan bahwa balok yang dibebani bersifat getas (*brittle*) yang umumnya terjadi pada balok beton mutu tinggi atau balok prategang penuh, sedangkan kurva 2 menunjukkan sifat duktail (*ductile*) atau liat yang terjadi pada balok mutu beton rendah atau prategang parsial/sebagian.

Defleksi pada balok dipengaruhi oleh beban yang bekerja, sifat material yang mengalami perubahan, sifat kelelahan material, rangkai, dan perubahan geometri balok tersebut. Perubahan-perubahan ini akan menimbulkan tegangan dan regangan pada materialnya, seperti beton dan besi tulangan. Perubahan tegangan dan regangan yang semakin besar ini akan mengakibatkan material mengalami kelelahan dan kehancuran, sehingga balok akan mengalami retak-retak yang semakin lama semakin bertambah jumlah dan lebar retaknya, yang selanjutnya balok beton akan menjadi hancur atau runtuh (Park & Paulay, 1975)'.

Secara umum kurva hubungan beban-defleksi dapat digambarkan dan diidealisasikan sebagai hubungan trilinear (gambar 3) (Nawy dan Edward, 1996). Daerah pertama adalah tahap sebelum terjadi retak (*Pre-cracking*), daerah kedua adalah tahap pada saat setelah terjadi retak (*postcracking*), dan daerah ketiga adalah tahap pada saat tulangan sudah mengalami leleh namun balok masih mampu untuk menahan beban (*post serviceability cracking*). Sebelum terjadi retak, penampang

balok beton mempunyai perilaku yang elastis. Tegangan tarik pada balok beton pada kondisi ini kurang dari kapasitas modulus runtuh (*modulus of rupture*/ f_r). Setelah terjadi retak, kapasitas modulus runtuh beton terlampaui, sehingga kekuatan lentur penampang balok beton akan menurun dan garis kurva hubungan beban-defleksi akan menurun atau lebih landai bila dibandingkan dengan kondisi sebelum retak. Peningkatan beban yang terus menerus mengakibatkan kekuatan balok semakin menurun. Hal ini diakibatkan oleh menurunnya kekuatan elemen-elemen pembentuk struktur (beton, baja tulangan, dan kabel prategang), dimana tahap ini baja tulangan dan kabel prategang telah mengalami leleh dan kekuatan penampang semakin menurun yang ditunjukkan dengan semakin banyak jumlah dan lebar retak. Pada tahap ini, peningkatan beban sudah tidak sebanding dengan peningkatan defleksi, sehingga garis kurva hubungan beban-defleksi akan semakin landai dari kondisi atau tahap sebelumnya. Tahap berikutnya adalah tahap keruntuhan. Tahap ini ditunjukkan oleh semakin panjang dan besar lebar retaknya. Tahap ini ditunjukkan oleh semakin panjang dan besar lebar retaknya. Hal ini mengakibatkan garis netral pada penampang balok semakin mendekati serat tertekan pada balok, dan pada akhirnya balok tersebut mengalami keruntuhan, karena tegangan tekan yang terjadi melebihi kapasitas tekan atau mutu beton.



Gambar 2 Defleksi balok dan kurva beban deformasi pada balok

Gambar 3 Idealisasi kurva hubungan beban-deformasi pada balok

2.4. Perilaku Daktilitas

Daktilitas didefinisikan sebagai perbandingan antara simpangan maksimum beban sebelum runtuh dengan simpangan leleh awal struktur yang ditinjau. Dalam perencanaan struktur, daktilitas dibagi menjadi beberapa tingkat, yaitu:

- 1) Daktilitas tingkat 1, pada stuktur beton yang diproporsikan berdasarkan suatu ketentuan terhadap penyelesaian detail khusus pada struktur, dimana struktur tersebut tidak diberi kemungkinan pada struktur untuk memberikan respon inelastik terhadap beban siklik yang bekerja tanpa mengalami keruntuhan. Oleh karena itu, Struktur sepenuhnya berlaku elastis dan besarnya daktilitas (μ) pada kondisi tersebut adalah 1.
- 2) Daktilitas tingkat 2, pada stuktur beton yang diproporsikan berdasarkan suatu ketentuan terhadap penyelesaian detail khusus pada struktur, dimana struktur tersebut masih memungkinkan untuk memberikan respon inelastik terhadap beban siklik yang bekerja tanpa mengalami keruntuhan. Besarnya Daktilitas (μ) pada kondisi tersebut adalah 2. Kondisi semacam ini disebut juga kondisi daktilitas terbatas.
- 3) Daktilitas tingkat 3, pada stuktur beton yang diproporsikan berdasarkan suatu ketentuan terhadap penyelesaian detail khusus pada struktur, dimana struktur tersebut masih memungkinkan untuk struktur memberikan respon inelastik terhadap beban siklik yang bekerja. Disamping itu, sruktur tersebut juga masih mampu menjamin pengembangan mekanisme sendi plastik dengan kapasitas disipasi energi yang diperlukan tanpa mengalami keruntuhan. Besarnya daktilitas (μ) pada kondisi adalah 4. Kondisi semacam ini disebut juga kondisi daktilitas penuh.

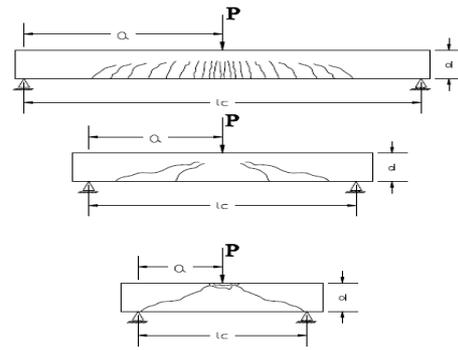
2.5. Ragam Keruntuhan Balok dan Pola Retak

Kondisi Pembebanan yang mengakibatkan balok beton mengalami perubahan adalah momen retak, leleh dan batas atau runtuh. Momen retak adalah momen yang bekerja pada balok yang mengakibatkan balok retak pertama. Hal ini diakibatkan oleh tegangan tarik yang terjadi pada beton serat terluar telah terlampaui. Dengan demikian, material beton mengalami retak, terutama pada serat bagian bawah balok yang mengalami tarik. Oleh karena itu, balok beton ditambah dengan baja tulangan dan kabel prategang agar gaya tarik yang

melebihi kapasitas tegangan tarik beton dapat dipikul oleh baja tulangan dan kabel prategang, sehingga balok tersebut tetap dapat menerima beban bekerja. Momen leleh adalah momen yang bekerja pada balok yang mengakibatkan baja tulangan dan kabel prategang menjadi leleh. Hal ini seiring dengan meningkatnya tegangan tarik yang bekerja pada baja tulangan dan kabel prategang yang semakin membesar. Kemudian balok tersebut mengalami momen retak dan momen leleh, selanjutnya balok tersebut mengalami keruntuhan. Keruntuhan ini terjadi karena baja tulangan, kabel prategang dan beton sudah sama-sama tidak mampu menahan beban. Pada umumnya keruntuhan balok didahului oleh terlepasnya selimut beton dan meningkatnya jumlah dan lebar retak atau memberikan tanda-tanda sebelum runtuh, sehingga apabila diterapkan dalam struktur bangunan, penghuni dapat melarikan diri sebelum bangunan tersebut runtuh.

Retak pada beton bertulang diakibatkan oleh kelebihan beban dan dipengaruhi oleh besarnya momen dan gaya geser yang bekerja. Ada tiga jenis retak yang umumnya terjadi pada balok. Jenis-jenis tersebut (MacGregor,1997;1997; Park and Paulay,1975) adalah :

- a. **Retak Lentur (*Flexural Cracked*)**, terjadi pada daerah yang mengalami momen lentur besar dan gaya geser kecil atau lebih dominan momen lentur. Retak ini terjadi setelah tegangan tarik beton pada serat tarik balok terlampaui. Bentuk pola retak ini hampir tegak lurus arah sumbu balok (Gambar 4.a).
- b. **Retak Geser Lentur (*Flexural Shear Cracked*)**, merupakan perambatan retak miring dari retak lentur yang telah terjadi sebelumnya. Oleh karena itu, retak jenis ini terjadi pada bagian yang sudah mengalami retak lentur. Bentuk pola retak ini adalah beragam, yaitu dari mulai tegak hingga miring dan pada umumnya balok akan mengalami retak-retak pada seluruh bagian (Gambar 4b).
- c. **Retak Geser Pada Badan Balok (*Web Shear Cracked*)**, umumnya terjadi pada balok yang mempunyai penampang relatif lebih tipis dan momennya relatif kecil dibanding dengan gaya gesernya. Retak jenis ini pada umumnya membentuk sudut 45° terhadap sumbu balok (Gambar 4.c).



Gambar 4. Pola retak untuk berbagai fungsi kelangsingan balok

Retak – retak pada balok merupakan perilaku awal sebelum mengalami keruntuhan. Hal ini dapat di gambarkan sebagai indikasi bahwa struktur balok tersebut semakin lama semakin lemah untuk menahan peningkatan beban yang bekerja. Keruntuhan balok ini diakibatkan oleh tegangan-tegangan dan energi yang terjadi pada balok tidak dapat di serap oleh material pembentuknya, karena material tersebut mempunyai mempunyai batas kemampuan tertentu.

Ragam keruntuhan pada balok beton sangat tergantung pada kelangsingan balok yang dinyatakan dalam a/d untuk beban terpusat dan l_c/d untuk beban merata, dimana a adalah bentang geser, l_c adalah bentang bersih balok, dan d adalah tinggi efektif penampang balok. Seperti halnya jenis-jenis retak, keruntuhan juga ada beberapa jenis, yaitu :

- a. **Keruntuhan Lentur (*Flexural Failure*)**, umumnya terjadi pada balok dengan perbandingan antara a/d lebih besar dari 5 (lima). Keruntuhan jenis ini diawali oleh timbulnya beberapa retak vertical halus di daerah tengah bentang. Penambahan beban secara terus menerus menyebabkan peningkatan retak mulai merambat ke arah garis netral, baik lebar maupun panjangnya. Hal ini menyebabkan turunnya luas daerah tekan. Efek ini akan sangat terlihat pada saat tegangan mencapai atau melebihi tegangan lelehnya. Bila proses ini berlanjut terus, maka tegangan pada daerah tekan mencapai batas kekuatan tekan atau mutu beton. Tercapainya tegangan tekan yang sama dengan batas kekuatan tekan beton mengakibatkan balok beton mengalami keruntuhan atau kehancuran. Kehancuran

ini diakibatkan oleh gaya lentur pada balok yang bekerja. Apabila kondisi tulangan memanjang balok direncanakan sebagai tulangan lebih lemah daripada beton (*under reinforced*) dan keruntuhan tulangan adalah liat atau daktail, maka balok beton tersebut juga bersifat daktail, sehingga keruntuhan yang terjadi juga keruntuhan daktail yang diawali oleh keruntuhan pada tulangan. Keruntuhan jenis ini akan memberikan peringatan yang cukup bagi penghuninya sebelum balok tersebut hancur.

- b. **Keruntuhan Tarik Diagonal (*Diagonal Tension Failure*)**, terjadi pada balok yang mempunyai perbandingan a/d antara 2,5 hingga 5,0. Keretakan dimulai dengan terjadinya retak-retak lentur (*vertical*) di tengah bentang. Bila pembebanan terus bertambah, maka balok akan mengalami retak-retak lentur yang menyebar ke daerah-daerah lain dengan momen yang lebih kecil, tetapi daya gesernya besar, sehingga balok tersebut mengalami retak geser lentur. Dengan demikian, peningkatan gaya geser akan mengakibatkan retak semakin lebar dan merambat sampai menembus sisi atas balok dan menyebabkan keruntuhan balok. Keruntuhan jenis ini bersifat sangat getas dan pada saat terjadinya keruntuhan lendutan yang terjadi masih relatif kecil.
- c. **Keruntuhan Tekan Geser (*Shear Compression Failure*)**, umumnya terjadi pada balok yang memiliki perbandingan a/d berkisar antara 1,0 hingga 2,5. Seperti halnya keruntuhan tarik diagonal, beberapa retak lentur mulai berkembang pada daerah tengah bentang dan berhenti pada saat terjadi kerusakan lekatan antara tulangan dan beton di sekitarnya pada daerah perletakan. Hilangnya daya lekat antara tulangan dan beton tersebut mengakibatkan terlepasnya penjangkaran baja tulangan memanjang pada daerah ujung balok, sehingga retak tersebut akan berkembang ke arah tumpuan dan berbentuk miring terhadap sumbu balok secara tiba-tiba, bahkan bentuk kemiringannya lebih curam daripada keruntuhan tarik diagonal. Retak miring ini terus berkembang dan merambat ke arah garis netral, yang kemudian diakhiri dengan kehancuran balok beton di sisi bagian bawah dan atas.

Keruntuhan jenis ini relatif kurang getas bila dibandingkan dengan keruntuhan tarik diagonal. Hal ini disebabkan adanya re-distribusi tegangan pada daerah tersebut. Namun keruntuhan ini masih kurang memberikan peringatan terlebih dahulu atau peringatan terbatas bagi penghuninya. Oleh karena itu, balok yang mengalami keruntuhan semacam ini masih digolongkan sebagai balok getas.

2.6. Beton Polimer Sebagai Bahan Perbaikan Struktur Beton

Dewasa ini, perbaikan struktur di tempat yang telah mengalami kerusakan adalah cara yang paling praktis dan ekonomis (praktis karena mudah untuk dikerjakan dan waktu yang relatif lebih singkat daripada membongkar dan membangun ulang struktur yang mengalami kerusakan dan ekonomis karena tidak memerlukan biaya yang terlalu besar). Bahan-bahan yang digunakan untuk memperbaiki struktur sangat beragam, namun dalam penelitian ini bahan yang digunakan adalah beton polimer. Beton polimer adalah beton yang dibuat dengan bahan dasar polimer sebagai bahan perekat antara agregat dan matrik beton.

Beton polimer mulai diteliti dan dikembangkan sejak tahun 1950-an, yaitu pada saat diperkenalkannya marmer tiruan dari bahan polimer. Gagasan penerapan beton polimer dimulai sejak tahun 1970-an, diantaranya adalah perbaikan struktur beton bertulang, pelapisan permukaan jalan (*overlay*), lantai jembatan, pondasi mesin, panel pracetak, kotak sampah bahan kimia, pipa bahan gerusan dan elemen struktur tahan agresi kimia.

Sejak awal penggunaannya, bahan polimer digunakan dalam rekayasa beton, terutama meningkatkan rekatan antara butiran agregat (*binding*), menambah ketahanan terhadap korosi, meningkatkan kuat tekan dan kuat tarik. Hal ini didilatarbelakangi oleh sifat fisik bahan polimer sebagai bahan perekat (*adhesive*).

Beberapa keuntungan lainnya yang telah diperoleh dari penggunaan bahan polimer adalah waktu pengerasan (*setting time*) lebih cepat bila dibandingkan dengan pasta semen, karena memiliki keunggulan diantaranya : lebih kedap terhadap air (*permeable*), awet (*durability*), tahan terhadap agresi bahan

kimia, kuat tekan dan tariknya tinggi, sedangkan kekurangannya diantaranya adalah : harganya relatif tinggi, sekitar 5 – 40 kali harga beton semen (Suraatmadja,1998), sehingga penggunaan beton polimer sebagai bahan konstruksi secara menyeluruh tidak memungkinkan dan digunakan sebagai bahan-bahan tertentu dalam konstruksi. Penggunaannya antara lain adalah :

- Sebagai bahan pelapis atau penutup retakan pada pekerjaan pengisian retakan (*grouting*);
- Sebagai bahan perekat (*adhesive*) ;
- Sebagai bahan *prepack*;
- Sebagai bahan pelapis dinding,lantai dan permukaan bangunan lainnya (*coating*)
- Sebagai bahan beton semprot (*shotcrete*)

Bahan beton polimer yang sedang diteliti dan dikembangkan oleh Laboratorium Struktur dan Bahan (LSB),Jurusan Teknik Sipil ITB, dan sudah terdaftar di Departemen Kehakiman; Direktorat Hak Cipta, Paten Besar; dan Merk tanggal 04/03/1999 No. Publikasi 020.759.A diberi nama JDB. Material JDB adalah suatu material yang berbahan dasar polimer mutu tinggi dan direncanakan khusus untuk keperluan pekerjaan konstruksi, sehingga JDB dibuat berbagai jenis sesuai dengan fungsinya. Jenis tersebut adalah :

- a. **JDB-01 Grout**, adalah material yang digunakan untuk bahan pengisi retakan (*Grout*) pada Struktur yang mengalami retak-retak akibat kerusakan yang dapat diakibatkan oleh mutu atau kualitas material yang kurang baik, struktur yang tidak mampu menahan beban yang bekerja, atau gempa yang melebihi 6 pada skala Richter. Retakan-retakan tersebut akan menyebabkan kebocoran pada pelat atap atau masuknya zat-zat kimia yang agresif ke dalam beton, sehingga mengakibatkan korosi pada tulangan atau kekuatan material betonnya menjadi menurun. Oleh karena itu, struktur yang mengalami retak-retak tersebut harus secepatnya di perbaiki agar waktu layan struktur menjadi bertambah.
- b. **JDB-02 Sealent**, adalah material yang digunakan sebagai bahan penutup retakan-retakan sebelum retakan tersebut diisi. Tujuannya adalah agar material bahan pengisi tidak keluar atau berhamburan kemana-mana pada saat pengisian

retakan, karena sistem atau cara melakukan pengisian retaka nadalah dengan sistem pemompaan.

- c. **JDB-03 Bond**, adalah Material yang digunakan sebagai penyambung kedua benda menjadi satu, misalnya pada struktur beton pracetak. Bahan ini sangat berguna bagi pembangunan gedung pada saat ini, dimana sistem yang digunakan untuk pembangunan gedung adalah sistem pracetak. Sistem ini akan mempercepat waktu pelaksanaan, sehingga biaya pembangunan dapat dikurangi dan gedung dapat secepatnya dimanfaatkan.
- d. **JDB-04 Prepack**, adalah material yang digunakan dalam pembuatan beton prepack. Beton prepack adalah beton yang dibuat dengan cara memasukan agregat kasar ke dalam cetakan terlebih dahulu dan menjadi bahan pengikat berupa beton polimer dipompakan ke dalam cetakan tersebut, sehingga rongga-rongga di dalam cetakan tersebut terisi semua. Sistem ini sesuai untuk memperbaiki struktur yang rusak parah,kehilangan material beton di beberapa tempat, atau penggantian material beton di beberapa tempat yang mengalami kerusakan. Beton prepack ini juga dapat di gunakan sebagai sambungan antara beberapa komponen beton precetak yang mempunyai konektor atau besi penghubung. Dengan demikian struktur menjadi lebih solid dan seperti satu kesatuan elemen struktur.
- e. **JDB-05 Coat**, adalah material yang digunakan sebagai pelapis bagian luar (*Coating*) pada permukaan dinding, lantai atau lainnya yang berhubungan dengan lingkungan yang sifatnya merusak, seperti bahan kimia agresif atau karena goresanabrasi. Bahan ini juga dapat dapat mengurangi rembesan air dari permukaan, sehingga lantai atau dinding menjadi kedap terhadap air. Hal ini sangat berguna pada lantai atap agar tidak terjadi kebocoran.
- f. **JDB-06 Shotcrete**, adalah material yang di gunakan untuk pembuatan beton semprot. Beton semprot adalah beton yang cara penggunaannya di semprotkan dengan pompa bertekanan tinggi. Pemamfaatan beton semprot ini adalah untuk menambal atau mengganti selimut beton yang telah mengelupas, sehingga waktu layan struktur menjadi bertambah.

Hal ini karena baja tulangan akan tertutup kembali dan serangan bahan kimia agresif dapat dihindari sehingga korosi tulangan dapat dicegah.

2.7 Pemilihan Parameter Pengujian Dan Benda Uji

Pemilihan parameter pengujian merupakan hal yang penting agar penelitian dapat berjalan dan terarah sesuai dengan tujuan, sedangkan penentuan benda uji dimaksudkan agar benda uji yang dibuat dapat di uji sesuai dengan kapasitas peralatan yang tersedia di laboratorium dan dengan skala yang benar, sehingga fenomena atau perilaku benda uji yang diteliti di peroleh dengan rinci atau di peroleh data yang baik valid. Pemilihan parameter pengujian dan dimensi benda uji adalah :

a. **Parameter pengujian**, yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Kuat tekan beton;
- Perbandingan (ratio) tulangan tekan dan tarik;
- PPR

b. **Benda uji**, agar data pengujian memperoleh hasil yang optimum dan akurat, maka pada penelitian ini dilakukan pemodelan benda uji dengan skala tertentu yang dapat merepresentasikan kondisi beton di lapangan pada saat digunakan sebagai elemen struktur. Oleh karena itu, kriteria benda uji yang diambil adalah :

- Untuk kuat tekan beton yang digunakan pada elemen struktur balok prategang dibuat benda uji berupa silinder beton.
- Untuk benda uji elemen struktur balok berupa balok persegi yang diberi kabel prategang dengan dimensi tingginya adalah 300 mm, lebarnya adalah 150 mm, dan panjang keseluruhan benda uji adalah 3000 mm, tetapi blok ujung prategangnya (*end block*) adalah 500 mm, sehingga panjang daerah uji adalah 2000 mm, sedangkan tebal selimut betonnya adalah 25 mm.

III. METODOLOGI PENELITIAN

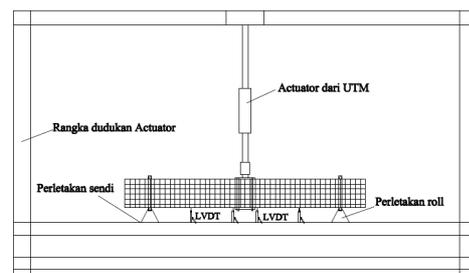
3.1 Metode Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini didasarkan atas peraturan-peraturan (*code*)/standard

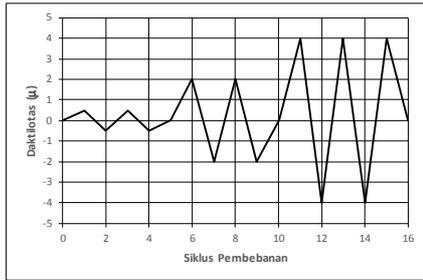
yang sudah biasa digunakan, seperti ASTM 1996 dan SK-SNI. Tahapan-tahapan pelaksanaan penelitian ini antara lain :

- 1) **Pekerjaan persiapan**, dimulai dengan studi literatur terhadap buku-buku panduan (*teks book*) yang berhubungan dengan kegiatan penelitian yang akan dilakukan sebelum benda uji di buat.
- 2) **Pekerjaan pengujian kuat tekan beton**, dilakukan terhadap sifat-sifat mekanik yang terdiri dari, kuat tekan silinder beton berdasarkan ASTM C.39 - 94, dan uji *slump* beton adalah ASTM C. 143 - 90a. Sebelum dilakukan pengujian kuat tekan terlebih dahulu dilakukan pelapisan permukaan dengan belerang (*capping*) dengan maksud untuk meratakan permukaan tekan beton.
- 3) **Pekerjaan Pengujian Benda Uji Balok Beton Prategang**, berdasarkan ASTM C 78 - 94. Pengujian beban-defleksi pada balok tersebut berupa beban terpusat yang menghasilkan kondisi beban lentur murni dan kondisi kombinasi beban lentur dan geser. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan kapasitas penampang yang dapat menahan/memikul beban layan hingga runtuh/hancur dengan cara ekperimental. Sistem pengujiannya atau setup benda uji dapat dilihat pada (Gambar 5).

Pola pembebanan siklik yang dilakukan adalah secara bertahap (Gambar 6). Tahapan pertama dibebani dengan dua siklus pembebanan elastis, yang besarnya adalah 60% dari perkiraan beban leleh atau tingkat daktilitas 1 ($\mu = 1$). Beban leleh tersebut diperoleh dari hasil perhitungan secara teoritis. Pembebanan kemudian dilanjutkan ke tingkat daktilitas yang lebih tinggi, yaitu daktilitas yang lebih tinggi, yaitu daktilitas 2 ($\mu = 2$) dan tingkat daktilitas 3 ($\mu = 4$). Pembebanan dihentikan pada saat benda uji mengalami runtuh atau hancur.



Gambar 5. Pengaturan pengujian benda Uji balok beton prategang



Gambar 6. Pengaturan pembebanan siklus untuk benda Uji balok beton prategang

4) **Pekerjaan Perbaikan Benda Uji Balok Beton Prategang**, dilakukan dengan sistem *prepack* pada benda uji Balok prategang yang telah mengalami kerusakan atau kehancuran akibat pembebanan yang telah dikenakan. Bagian balok yang mengalami kerusakan berat dibongkar terlebih dahulu (Gambar 7). Kemudian bagian tersebut diganti elemen betonnya dengan bahan JDB-04 Prepack. Sedangkan bagian balok yang mengalami retak-retak perbaikannya dilakukan dengan cara *grouting*. Bahan *grouting* yang digunakan adalah JDB-01 Grouth. Dengan demikian balok tersebut menjadi utuh kembali dan siap untuk diuji kembali.



Gambar 7. Bagian balok beton prategang yang dibongkar dengan bahan JDB-04 Prepack.

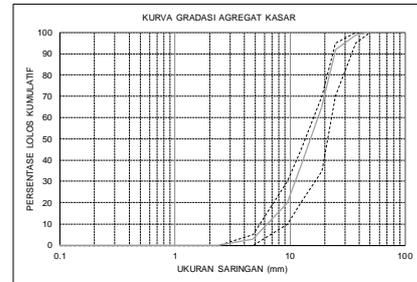
3.2 Pengujian Material

1) **Pemeriksaan agregat Kasar dan halus**, dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 8 & 9, sebagai berikut :

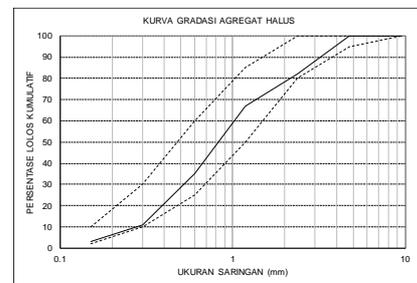
Tabel 1. Sifat – sifat fisik agregat kasar dan halus

Jenis Pengujian	Ag. Kasar	Ag. Halus
Apparent Sfesific gravity	2.705	2.658
Bulk psesipic gravity (kering)	2.449	2.405
Bulk psesipic gravity (SSD)	2.544	2.500
Absorpsi of water (%)	3.874	3.950

Berat Volume padat (kg/lt)	1463	1445
Berat Volume gembur (kg/lt)	1.306	1.321
Agregat maksimum (mm)	4.750	19.00
Kadar Lumpur (%)	-	4.348
Angka kehalusan	-	2.753
Kadar air (%)	4.340	7.370
Kadar Organik	-	7.370



Gambar 8. Kurva gradasi agregat kasar



Gambar 9. Kurva gradasi agregat halus

2) **Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan dan Kabel Prategang**, dilakukan dengan menggunakan alat UTM (*Universal Testing Mechine*). Tujuan Pengujian ini adalah untuk mngetahui kuat tarik leleh atau mutu baja dan kabel tendon, sehingga data tentang sifat fisik material tersebut dapat diketahui secara pasti, sehingga perhitungan model benda uji dapat mendekati kenyataan dan dapat diperoleh dimensi benda uji yang akurat dan optimal. Hasil pengujian ini dapat dilihat pada tabel 2. Pembebanan dilakukan secara bertahap dengan laju pembebanan sebesar 150 Kg/menit.

Tabel.2. Hasil Uji tarik baja tulangan dan tendon.

Jenis Benda Uji	φ (mm)	Luas (mm ²)	Kuat Luluh (f _y) (MPa)	Kuat Maksimum (f _u) (MPa)
Tendon	12.70	98.70	1232.4	1449.9
Tendon	12.70	98.70	1249.5	1470.0
Ulir	12.30	118.80	294.6	441.9
Ulir	12.32	119.17	314.7	467.5

Ulir	12.33	119.42	272.1	418.7
Ulir	9.37	68.96	423.4	570.7
Ulir	9.39	69.31	414.8	563.4
Ulir	9.38	69.53	414.4	567.1
polos	7.50	44.13	249.9	363.4
Polos	7.55	44.13	269.6	375.1
polos	7.55	44.13	249.3	339.9

Kabel baja prategang yang digunakan pada penelitian ini adalah terdiri 7 untai (strands) dengan diameter setiap kabel (wire) adalah 0,5 inci (12,5mm). Karakteristik kabel tersebut adalah :

Tegangan batas (*ultimate strength*) (f_{pu}) = 18085.10 kg/cm²

Modulus elastisitas (E_p) = 200,0000 kg/cm²

Gaya Prategang (F_p) = 50 kN

3.3 Perencanaan Campuran (Mix Design) Beton

Hasil uji sifat-sifat karakteristik tersebut diatas digunakan sebagai data masukan dalam perencanaan campuran beton. Perhitungan perencanaan ini dimaksudkan untuk mendapatkan komposisi bahan-bahan pembentuk beton yang proposional, sehingga beton yang diperoleh mempunyai mutu yang baik dan sesuai rencana. Mutu beton adalah mutu normal (30 Mpa) dan mutu tinggi (45 dan 50 Mpa). Hasil komposisi campuran beton dapat dilihat pada Tabel 3. Hasil komposisi campuran beton tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Komposisi Campuran Beton untuk 1 m³

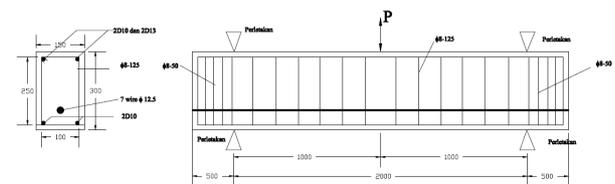
Mutu Beton (MPa)	Semen (kg)	Abu Terbang (kg)	Ag. Halus (kg)	Ag. Kasar (kg)	Air (kg)	w/c	Superplastisizer (liter)
30	379.630	-	764.484	916.055	176.438	0.540	
45	404.564	71.394	517.125	1099.014	163.614	0.404	5.949
50	444.488	78.439	475.816	1099.014	164.225	0.367	6.536

3.4 Pembuatan Dan Pengujian Benda Uji

a. **Pembuatan benda uji**, dibuat dengan skala yang disesuaikan dengan kapasitas alat uji di laboratorium agar benda uji dapat diuji hingga runtuh, sehingga perilakunya dapat diketahui. Dimensi balok tersebut dapat dilihat pada Gambar 10. Sedangkan penamaan benda ujinya adalah :

- 1) BA3060:beton prategang dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1, mutu beton = 30 Mpa dan PPR = 60%.

- 2) BM3060:beton prategang dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1,75, mutu beton = 30 Mpa dan PPR= 60%
- 3) BM4560 : beton prategang dengan rasio tulangan atas dan bawah =1,75, mutu beton = 45 Mpa, dan PPR = 60%
- 4) BM5060 : beton prategang dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1,75, mutu beton = 50 Mpa, dan PPR = 60%
- 5) BAR3060 : beton prategang retrofit dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1, mutu beton = 30 Mpa dan PPR = 60%
- 6) BMR3060 : beton prategang retrofit dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1.75, mutu beton = 30 Mpa ,dan PPR = 60%
- 7) BMR4560 : beton prategang retrofit dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1.75, mutu beton = 45 Mpa, dan PPR = 60%
- 8) BMR5060 : beton prategang retrofit dengan rasio tulangan atas dan bawah = 1.75, mutu beton = 50 Mpa dan PPR = 60%



Gambar 10. Dimensi dan jarak pembebanan balok prategang

Tabel 4. Jenis atau tipe benda uji yang dibuat pada penelitian

Tulangan	Benda Uji 1 BA 3060	Benda Uji 2 BM3060	Benda Uji 3 BM4560	Benda Uji 4 BM5060
Memanjang Atas	2 D 10	2 D 13	2 D 13	2 D 13
Memanjang Bawah	2 D 10	2 D 10	2 D 10	2 D 10
Prategang	1-12.5	1-12.5	1-12.5	1-12.5
Senggang	8-125	8-125	8-125	8-125

b. **Pelaksanaan pengujian**, dilakukan dengan menggunakan UTM. Pengaturan pengujian ini dapat dilihat pada Gambar 5 dimana peralatan dipasang untuk mencatat data pembebanan dan defleksi, sedangkan cara pelaksanaan pembebanannya seperti pada gambar 6 tersebut saling berkorelasi dan dicatat secara bersamaan. Pembebanan tekan diberikan secara bertahap. Sistem tahapan pembebanan adalah dengan cara mengatur laju penurunan (*displacement control*). Pengujian dilakukan hingga benda uji tersebut mengalami keruntuhan.

- c. **Pencatatan Data**, pada pengujian ekperimental ini adalah :
- o Beban Pada Benda Uji
 - o Penurunan pada benda uji
 - o Regangan baja tulangan dan tendon pada pengujian balok prategang.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

- 1) **Uji Perilaku Mekanik Beton Berupa Kuat Tekan dan Modulus**, dimaksudkan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik beton (lihat tabel 5). Sifat-sifat ini sangat berguna sebagai dasar dalam perencanaan sruktur beton, yaitu sebagai input data dalam perhitungan sruktur baik perhitungan secara manual atau analitik maupun secara numerik.

Tabel 5. Jenis atau tipe benda Uji yang dibuat pada penelitian

No	Kode Balok	Umur (Hari)	Kuat Tekan (MPa)	Modulus elastis (Ec) MPa
1	BA3060	50	36.18	21815
2	BM3060	28	41.41	21737
3	BM4560	33	46.69	25534
4	BM5060	33	48.06	26798

- 2) **Pengujian balok prategang**, dapat dilihat pada kurva hubungan antara beban dan defleksi yang menggambarkan perilaku balok beton prategang. Pada penelitian ini kurva hubungan beban-defleksi yang digambarkan adalah balok original dan balok yang telah diperbaikim sehingga dapat diketahui perbedaan kurva dan kinerja balok yang telah diperbaiki.

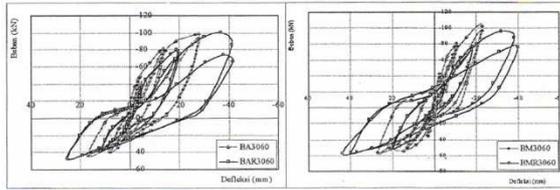
Pengujian terhadap balok beton prategang menghasilkan kurva beban-defleksi, dimana kurva tersebut menggambarkan perilaku balok prategang yang di uji. Kurva-kurva tersebut digambarkan pada Gambar 11 dan 12. Kurva tersebut juga membandingkan antara balok original dan balok retrofit. Gambar tersebut menunjukkan bahwa pada setiap benda uji terjadi pengurangan lekatan antara beton dan baja tulangan serta kabel prategang, dan terjadi slip antara beton dan baja tulangan serta kabel prategang (*pinching effect*). Sehingga beton semakin melemah pada pembebanan siklus berikutnya. Disamping itu, gambar tersebut juga menunjukkan semua

jenis balok beton prategang yang telah diperbaiki (balok retrofit). Disamping itu, gambar tersebut juga menunjukkan semua jenis balok beton prategang yang telah diperbaiki (balok retrofit) juga mengalami defleksi yang lebih besar dari balok beton prategang original yang diakibatkan oleh pengurangan daya prategang pada kabel prategang. Dimana pada saat pembongkaran bagian benton yang rusak, kabel prategang mengalami penurunan gaya prategang awal. Selain itu juga baja tulangan dan kabel prategang mengalami sedikit leleh. Tetapi kekuatan daya layan balok prategang tersebut masih relatif sama pada siklus. Hanya pada siklus terakhir dimana daklitasnya adalah lebih dari 4 ($\mu = 4$) terjadi penurunan daya layan beban yang bekerja yaitu rata-rata kurang lebih sebesar 10% yang diakibatkan oleh penurunan gaya prategang awal, sehingga balok beton retrofit masih memiliki kinerja yang cukup baik untuk menerima beban layan. Namun apabila tidak terjadi pengurangan atau degradasi baja tulangan dan kabel prategang, maka kinerja antara balok original dan retrofit relatif sama.

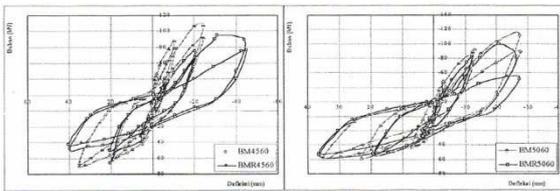
Kinerja beton juga ditinjau dari penurunan atau degradasi kekuatan (P_u/P_y) dan kekakuan (K_u/K_y) (Gambar 13). Penurunan ini dimaksudkan untuk mengetahui besarnya nilai penurunan kekuatan dan kekakuan. Nilai tersebut rata-rata adalah 17 % untuk kekuatan dan 7 % untuk kekakuan, sehingga penurunan kuat dan kekakuan balok beton prategang dianggap masih terlalu kecil. Kinerja balok beton retrofit pada dasarnya masih mampu dan layak untuk digunakan, dan apabila balok originalnya pada saat awal masih dalam kondisi elastik serta gaya prategang awal tidak berkurang, maka balok tersebut mungkin masih memiliki kinerja yang sama dengan balok originalnya.

Pola retak yang terjadi antara balok relatif sama yaitu retak lentur (lihat gambar 14). Namun retak yang terjadi pada balok beton prategang yang telah diperbaiki (balok beton retrofit) terjadi di sebelah retak yang lama. Hal ini disebabkan retak lama yang telah di grouting lebih kuat akibat lekatan (*bond*) dari bahan gouting yang kuat. Sedangkan retak bagian beton yang di-prepack relatif sama dengan beton awal (*Original*) yaitu retak pada bagian beton prepack-nya. Hal ini menunjukkan kinerja

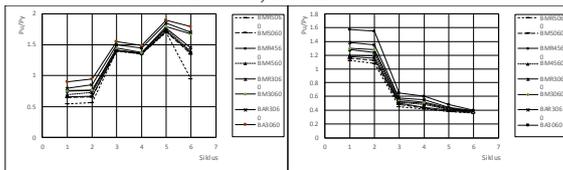
bahan prepack juga sama dengan beton awal. Dengan demikian, Kinerja beton yang telah diperbaiki (beton retrofit) sama dengan beton awalnya (Original) apabila di tinjau dari segi material betonnya.



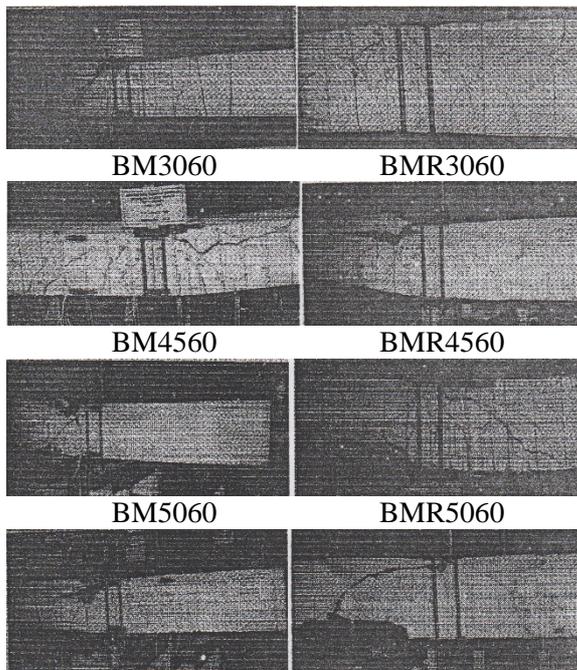
Gambar 11. Kurva histerik pembebanan siklik untuk benda uji BA3060, BAR3060, BM 3060 & BMR3060.



Gambar 12. Kurva histerik pembebanan siklik untuk benda uji BM4560, BMR 4560, BM5060, BMR5060



Gambar 13. Kurva penurunan kekuatan untuk setiap jenis balok beton prategang untuk setiap jenis balok beton prategang BA3060, BAR3060



Gambar 14. Pola Retak dan keruntuhan benda uji

V. KESIMPULAN

Dari data hasil pengujian beberapa benda uji berupa balok beton prategang yang masih utuh (original) dan balok yang telah diperbaiki (balok retrofit), seperti dalam pembahasan sebelumnya, maka kesimpulan yang dapat diambil adalah :

1. Pada setiap benda uji terjadi penurunan kekuatan dan daya layan akibat pengurangan lekatan antara beton dan baja tulangan serta kabel prategang, dan terjadi slip antara beton dan baja tulangan serta kabel prategang (*pinching effect*).
2. Semua jenis balok beton prategang yang telah diperbaiki (balok retrofit) mengalami defleksi yang lebih besar dari balok beton prategang original akibat pengurangan daya prategang awal pada kabel prategang, baja tulangan dan kabel prategang sudah mengalami sedikit leleh.
3. Kekuatan daya layan balok prategang masih relatif kecil pada setiap siklus, kecuali pada siklus terakhir terjadi sedikit penurunan daya layan beban yaitu sebesar 10%.
4. Besarnya nilai penurunan rata-rata adalah 17% untuk kekuatan dan 7% untuk kekakuan.
5. Pola retak yang terjadi seluruh balok relatif sama yaitu retak lentur, sehingga kinerja beton yang telah diperbaiki (beton retrofit) sama dengan beton awalnya (original).

DAFTAR PUSTAKA

1. ACI Committee 211.1-91 (1995) "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete, American Concrete Institute, Detroit.
2. ACI Committee 211.4R-95 (1995) "Guide for Selecting Proportional for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash", American Concrete Institute, Detroit.
3. ASTM Volume 04.02 (1995), "Concrete and Aggregates".
4. Blakeley, Roger, W.G., Park, R. (1973), "Prestressed Concrete Section with Cyclic Flexure" Journal of Structural Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, August,
5. Budiono, B., Gilbert, Rl, and Forter, S.J., (1994), "Hysteric Behaviour of Partially Prestressed Concrete Beam Column

- Connection", Australian Structural Engineering Conference, Sydney.
6. Departemen Pekerjaan Umum (1991), "Tata Cara Perhitungan Struktur beton untuk Bangunan gedung (SNI T-15 - 1991-03)", Yayasan Lembaga Penyelidikan Masalah Bangunan, Bandung.
 7. Fang, I.K., Wang, C.S., and Hong, K.L. (1994), "Cyclic Behaviour of High Strength Concrete Short Beam with Lower Amount of Flexure Reinforcement", ACI Structural Journal, V. 91, No. 1, January- February.
 8. Gilbert, R.I., Mickleborough, N.C. (1990), "Design of Prestressed Concrete", Unwin Hyman, London.
 9. Harajli, M.H. (1988) "Behaviour of Partially Prestressed Concrete Joint under Cyclic Loading", Journal of Structural Engineering, V. 114, No. 11, November.
 10. Naaman, Antonic, E. (1982), "Prestressed Concrete Analysis and Design", McGraw Hill Book Company.
 11. Park, R., Paulay, T. (1975). "Reinforced Concrete Structures", John Wiley & Sons.
 12. Suraatmadja, D Munaf, D.R., Lationo, B. (1998), "The Investigation of Mechanical Properties of Polymer Concrete", Laporan Penelitian, Jurusan Teknik Sipil, ITB, Bandung.