

ANALISIS RETAK LENTUR PADA BALOK BETON BERTULANG MUTU TINGGI YANG DIPERBAIKI DENGAN INJEKSI EPOXY

Fiany Fajar Puspita¹, Teuku Budi Aulia², Mochammad Afifuddin³

¹⁾ Mahasiswa Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111,

^{2,3)} Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala

Jl. Tgk. Syeh Abdul Rauf No. 7, Darussalam Banda Aceh 23111,

email: aulia@unsyiah.ac.id², afifuddin64@gmail.com³

Abstract: *High Strength Concrete is an alternative construction material for supporting heavy loads. High strength concrete is a brittle material that susceptible to crack. One of the concrete repairing method is epoxy injection. The aim of this study is to determine the flexural behavior of high strength reinforced concrete beams after cracking and repaired with the Epoxy Injection. This study used 4 (four) high strength reinforced concrete beams (BBMT) with (15 × 30 × 220) cm dimention. One of the beam is for comparison (BBMT Normal) and 3 (three) other beams were tested at the age 7 days (BBMT E-7), 14 days (BBMT E-14) and 28 days (BBMT E-28) after repaired. The beams is designed to have flexural failure by using a compression reinforcement and shear reinforcement of 11.9 mm and 15.8 mm for tensile reinforcement. The water cement ratio for mix design is 0,25 obtained at 28 days is 66,62 MPa. The results shows that all the beams have flexural failure in agreement to the early design. The ultimate load of BBMT Normal is 17,65 ton with deflection equal to 10,36 mm. Based on theoretical calculation the load is 16.04 tons and deflection 14.38 mm. BBMT E-7 after epoxy injection ultimate load is 20,89 tons and deflection is 41.99 mm. BBMT E-14 ultimate load 21,79 tons and deflection equal to 44,27 mm. The ultimate load of BBMT E-28 is 25.52 tons and deflection 13.49 tons. The increase of load are 18.36%, 23.46% and 44.59% when compared with BBMT Normal. Based on the observation on the BBMT after epoxy injection, no cracks evident in most of the injected areas, new cracks appearing around the area of initial crack. It is concluded that epoxy injection is capable to increase the capacity of repaired high strength concrete and th flexural strength of the epoxy repaired concrete beams is increase as the age increased.*

Keywords : *high strength reinforced concrete beam, repaired with epoxy injection, flexural behavior, fracture pattern*

Abstrak: Beton mutu tinggi merupakan salah satu alternatif material konstruksi untuk pembebanan besar. Beton mutu tinggi memiliki sifat yang kaku sehingga rentan terhadap retak. Salah satu metode perbaikan pada retak beton yaitu injeksi *epoxy*. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengamati perilaku lentur pada balok beton bertulang mutu tinggi yang diperbaiki dengan injeksi *epoxy*. Penelitian ini menggunakan 4 (empat) buah benda uji yaitu balok Beton Bertulang Mutu Tinggi (BBMT) dengan ukuran (15 × 30 × 220) cm. Benda uji pertama sebagai pembanding (BBMT Normal) dan 3 (tiga) benda uji lain diuji sesuai dengan umur perbaikan betonnya yaitu BBMT E-7 (7 hari), BBMT E-14 (14 hari) dan BBMT E-28 (28 hari). Balok didesain mengalami gagal lentur dengan menggunakan tulangan tekan dan tulangan geser berdiameter 11,9 mm ulir serta tulangan tarik 15,8 mm ulir. Kuat tekan beton mutu tinggi yang didapat dari benda uji kontrol kubus sebesar 66,62 MPa dengan FAS 0,25. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua benda uji balok mengalami gagal lentur sesuai dengan desain awal. Beban maksimum yang mampu dicapai oleh balok BBMT Normal adalah 17,65 ton dengan lendutan sebesar 10,36 mm. Perhitungan teoritis beban BBMT Normal yaitu 16,04 ton dan lendutan 14,38 mm. BBMT E-7 setelah diinjeksi menghasilkan beban sebesar 20,89 ton dan lendutan 41,99 mm. Pada BBMT E-14 beban yang dicapai 21,79 ton dan lendutan sebesar 44,27 mm. Beban maksimum pada BBMT E-28 yaitu 25,52 ton dan lendutan 13,49 ton. Masing-masing persentase peningkatan beban jika dibandingkan dengan BBMT Normal adalah 18,36%, 23,46% dan 44,59%. Pola retak yang terjadi pada balok BBMT setelah

diinjeksi menunjukkan bahwa tidak terjadi retak pada sebagian besar daerah yang diinjeksi, retak baru muncul di sekitar retak awal. Dapat disimpulkan bahwa injeksi *epoxy* mampu meningkatkan kapasitas beton mutu tinggi dan umur perbaikan beton mempengaruhi nilai beban maksimum yang mampu dicapai oleh beton.

Kata kunci : balok beton bertulang mutu tinggi, perbaikan dengan injeksi *epoxy*, perilaku lentur, pola retak.

Beton merupakan salah satu pilihan sebagai bahan struktur dalam konstruksi bangunan. Beton diminati karena banyak memiliki kelebihan-kelebihan dibandingkan dengan bahan lainnya. Untuk pembebanan besar maka salah satu alternatif yaitu menggunakan beton mutu tinggi. Pada saat pembebanan beton dapat mengalami retak, karena beton lemah terhadap gaya tarik. Salah satu retak yang terjadi yaitu retak lentur yang muncul secara vertikal memanjang mengarah ke atas sumbu balok.

Salah satu metode perbaikan pada retak beton yaitu perbaikan dengan injeksi *epoxy*. *Epoxy* mampu menjangkau celah retakan yang tidak mampu dijangkau oleh semen. Perbaikan struktur pada umumnya bertujuan untuk mengembalikan atau meningkatkan kekuatan elemen struktur agar mampu menahan beban sesuai dengan rencana.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji kapasitas lentur balok beton bertulang mutu tinggi yang telah diperbaiki dengan injeksi *epoxy*. Hasil penelitian ini dibandingkan dengan perilaku lentur pada balok beton bertulang mutu tinggi normal sebagai acuannya dan dibandingkan dengan benda uji sebelum diperbaiki dengan injeksi *epoxy*. Tujuan akhirnya adalah untuk mengetahui kapasitas injeksi *epoxy* untuk

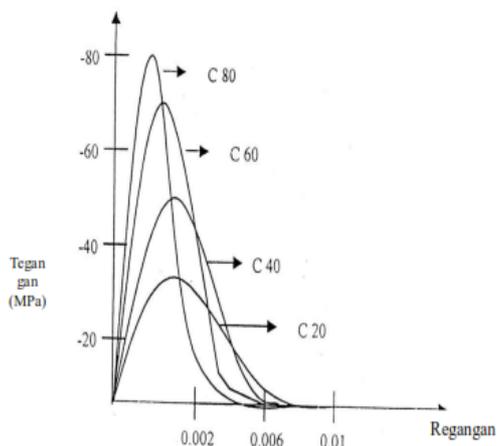
perbaikan struktur balok beton mutu tinggi.

KAJIAN PUSTAKA

Konsep Beton Mutu Tinggi

Beton mutu tinggi merupakan alternatif untuk digunakan pada komponen struktur yang mengalami pembebanan besar. Perbedaan yang jelas antara beton mutu tinggi dengan beton normal adalah faktor air semen yang digunakan. Pada beton mutu tinggi faktor air semen yang digunakan rendah sehingga proses pengeringannya lebih cepat. Selain berbagai keuntungan yang dimiliki oleh beton mutu tinggi terdapat juga permasalahan yang ditimbulkan dengan pemakaian beton mutu tinggi ini. Pada beton mutu tinggi pola keruntuhan yang dihasilkan bersifat getas sehingga daktilitasnya lebih rendah (Iaintarawan dkk, 2009 : 50).

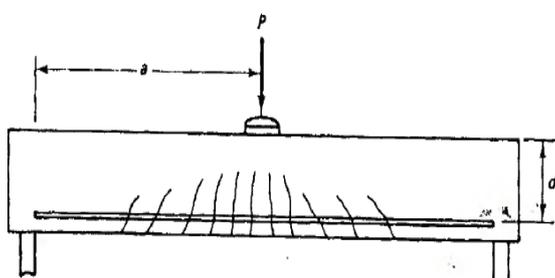
Dari Gambar 1 diagram tegangan dan regangan berbagai mutu beton terlihat bahwa apabila kadar spesinya sangat dominan maka modulus elastisitasnya dapat menurun cukup berarti dan semakin tinggi mutu beton semakin rendah regangan yang terjadi sehingga hal ini menyebabkan perilaku keruntuhan lebih getas dibandingkan dengan beton normal.



Gambar 1 Diagram Tegangan-Regangan Berbagai Mutu Beton
Sumber : Iaintarawan dkk (2009 : 50)

Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang

Beton dapat retak pada awal pembebanan karena material ini lemah terhadap tarik. Tegangan lekatan antara baja tulangan dengan beton di sekitarnya (*bond strength*) merupakan parameter utama yang mempengaruhi retak dan lebar retak.



Gambar 2 Keruntuhan Lentur pada Balok
Sumber : Nawy (1998 : 154)

Menurut Amri (2005 : 252) retakan dapat terjadi oleh berbagai sebab. Pada stadium awal kerusakan komponen struktur diawali dengan lendutan. Bila batas lendutan ijin terlampaui maka stadium kerusakan akan berlanjut pada retakan lentur. Bila kemampuan lentur dilampaui maka kerusakan akan berlanjut pada stadium yang lebih tinggi yaitu berupa retak geser. Menurut McCormac (2001 : 175)

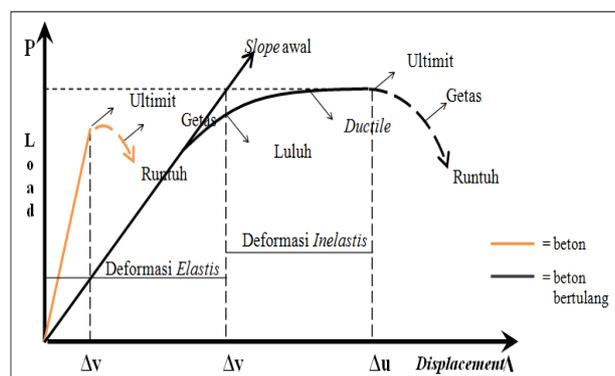
retak lentur adalah retak vertikal yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya seperti pada Gambar 2.

Daktilitas

Menurut Amri (2005 : 241), untuk beton tanpa tulangan peningkatan daktilitas dapat juga dihitung dengan menentukan luasan daerah di bawah kurva tegangan-regangan atau berdasarkan perilaku kurva beban-defleksi. Daktilitas sebuah struktur dapat dihitung dari persamaan 1 berikut :

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y}$$

Gambar perilaku daktail dan getas pada beton dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Perilaku daktail dan getas pada beton
Sumber : Punmia, B.C, at al (2007)

Metode Perbaikan

Metode perbaikan pada beton dapat dilakukan dengan berbagai cara, yaitu (Yunita, 2009 : 117) :

- Perbaikan dengan cara *grouting*, dilakukan pada beton yang mengalami retak dengan kedalaman yang cukup dalam dan lebar retakan lebih dari 20 mm.
- Perbaikan dengan cara *patching/rendering*

(penambalan beton), yaitu pada struktur yang mengalami kerusakan retakan dengan kedalaman kurang dari 20 mm atau kerusakan terjadi pada selimut beton.

- c. Perbaikan dengan cara *patchrock* (penambalan beton dengan *setting time* tiga jam), yaitu dilakukan pada pelat yang membutuhkan kekuatan tinggi dan membutuhkan *setting time* yang cepat.
- d. Perbaikan dengan injeksi *epoxy*, yaitu dilakukan terhadap permukaan beton yang mengalami retak rambut atau retak dengan lebar kurang dari 5 mm.

Injeksi *Epoxy*

Epoxy merupakan material yang sangat menjanjikan untuk digunakan dalam perkuatan struktur beton bertulang. Bahan *epoxy* untuk injeksi berbentuk cair dan mempunyai sifat cepat mengeras dan mampu melakukan penetrasi ke dalam celah-celah retakan yang tidak mampu dijangkau oleh semen. Bahan ini sangat membantu untuk mengikat beton yang mengalami retakan dan menghindarkan tulangan beton dari ancaman korosi (Amri, 2006 : 209).

Menurut ACI 224.1R-07 retak selebar 0,002 inci (0,05 mm) dapat direkatkan oleh injeksi *epoxy*. Sebelum perbaikan beton dilakukan, penyebab kerusakan harus dikaji. Material *epoxy* digunakan pada perbaikan struktural harus sesuai dengan ASTM C 881.

Menurut Ahmad, et al (2010) injeksi pada retak dibutuhkan untuk merekatkan kembali beton dan menghasilkan keadaan

struktur beton yang lebih kuat. Injeksi *epoxy* adalah prosedur yang banyak digunakan dan direkomendasikan untuk perkuatan struktural.

Injeksi *epoxy* terdiri dari dua komponen :

- a. Zat *epoxy* untuk menutup retak, material yang digunakan harus viskositas rendah dengan kekuatan tekan yang cukup, bahkan yang lebih dari beton. Material harus dengan daya lekat yang baik dan kuat sehingga perbaikan pada retak tidak muncul kembali.
- b. *Epoxy* dengan kekuatan tinggi untuk menutupi retak pada permukaan beton, juga digunakan untuk injeksi pada *nozzle* (katup untuk memasukkan bahan injeksi), sehingga dapat bertahan dibawah tekanan pompa injeksi *epoxy*.

Injeksi *epoxy* merupakan pekerjaan dengan teknik tinggi, membutuhkan keterampilan yang tinggi untuk mendapatkan hasil yang baik, dan teknik penggunaannya dibatasi oleh suhu lingkungan, serta membutuhkan perhatian dengan tingkat tertinggi dalam pelaksanaannya, walaupun berdasarkan pada prosedur yang sederhana. Semua retak yang terlihat dengan mata harus dicatat dengan baik dan ditandai panjang, lebar dan lokasinya dengan teliti.

Produk injeksi *epoxy* yang terdiri dari dua komponen yaitu *resin* dan *hardener* ini dapat mengisi celah dan keretakan dengan lebar 2-5 mm. Keunggulan dari material ini antara lain :

- a. Viskositas super rendah (super encer);
- b. Dapat diaplikasikan dalam kondisi lembab atau kering;

- c. Kekuatan mekanis dan daya lekat tinggi;
- d. Keras, tapi tidak getas (*brittle*); dan
- e. Tidak menyusut dan stabil untuk jangka waktu yang panjang.

Material *epoxy* untuk injeksi keretakan beton yang diperdagangkan secara umum oleh PT. Sika Indonesia adalah Sikadur 752. Data teknis Sikadur 752 ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Teknis Sikadur 752

Parameter	Karakteristik
Warna	Kekuningan
Bentuk	Cairan
Berat jenis	$\pm 1,08$ kg/Lt

Sumber : PT. Sika Indonesia (Anonim, 2012)

METODOLOGI PENELITIAN

Pekerjaan Persiapan

Dalam pekerjaan persiapan ini yang dilakukan adalah mempersiapkan material yang digunakan dalam pembuatan campuran adukan beton seperti pasir, kerikil, semen, baja tulangan, *epoxy*. Pengujian pada agregat berupa pemeriksaan sifat-sifat fisis meliputi pemeriksaan berat jenis, absorpsi, berat volume, susunan butiran agregat, dan pemeriksaan kandungan bahan organik. Kemudian persiapan cetakan dan peralatan lainnya untuk keperluan penelitian. Cetakan benda uji yang digunakan adalah cetakan balok ukuran (15 × 30 × 220) cm untuk pengujian lentur, untuk benda uji kontrol cetakan benda uji silinder ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk pengujian kuat tekan dan cetakan balok ukuran (15 × 15 × 60) cm untuk pengujian lentur balok. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Konstruksi dan Bahan Bangunan Fakultas Teknik Jurusan

Teknik Sipil Universitas Syiah Kuala Banda Aceh.

Epoxy yang digunakan yaitu *Epoxy Resin Sikadur 752* produk dari PT. Sika Indonesia. *Admixture* menggunakan *Viscocrete 10* dan *additive* berupa *silica fume* yaitu *SikaFume* dari PT. Sika Indonesia.

Perencanaan Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi (BBMT)

Perhitungan awal mengenai kapasitas momen lentur dilakukan guna mendapatkan gambaran apakah benda uji balok yang direncanakan akan terjadi gagal lentur, yaitu dengan memperkuat kapasitas gesernya. Berdasarkan analisis yang dilakukan untuk mendapatkan benda uji gagal menahan kapasitas lentur maka didapat ukuran dan jumlah tulangan seperti terlihat pada Tabel 3.1.

Tabel 1. Ukuran dan Jumlah Tulangan Benda Uji Balok Bertulang

Nama Benda Uji Balok	Dimensi Balok	Tulangan Pokok		Tul. Sengkang	Jlh. (buah)
		Tekan	Tarik		
BBMT Normal	(15 × 30 × 220) cm	2Ø11,9	4Ø15,8	Ø11,9-100	1
BBMT E-7	(15 × 30 × 220) cm	2Ø11,9	4Ø15,8	Ø11,9-100	1
BBMT E-14	(15 × 30 × 220) cm	2Ø11,9	4Ø15,8	Ø11,9-100	1
BBMT E-28	(15 × 30 × 220) cm	2Ø11,9	4Ø15,8	Ø11,9-100	1
Total Benda Uji Balok BBMT					4

Pengujian Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi Sebelum Injeksi Epoxy

Pengujian pembebanan benda uji balok ukuran (15 × 30 × 220) cm dilakukan pada umur 28 hari. Setelah ditimbang, benda uji balok diletakkan di atas tumpuan dengan

panjang teoritis 200 cm. Pembebanan dilakukan dengan memberikan dua beban terpusat yang sama besar.

Lendutan dan regangan dimonitor setiap kenaikan beban 100 kg dengan menggunakan *transducer* dan *strain gauge*. *Transducer* ditempatkan pada 5 lokasi, sedangkan *strain gauge* baja ditempatkan pada tulangan tekan dan tulangan tarik. Beban diberikan secara bertahap sampai $\pm 75\%$ dari beban puncak atau hingga benda uji mengalami retak dengan lebar kurang dari 1 mm. Adapun perilaku yang diamati adalah retak yang terjadi pada beton yaitu retak awal dan jumlah retak awal.

Perbaikan Beton dengan Injeksi *Epoxy*

Metode perbaikan dilakukan dengan menyuntikkan *epoxy* resin pada retakan-retakan yang terjadi pada retakan beton dengan lebar retak maksimum 1 mm. Dengan terisinya celah-celah tersebut diharapkan daya lekat tulangan dan beton dapat diperbaiki seperti kondisi semula.

Injeksi *epoxy* membutuhkan keterampilan tinggi untuk hasil yang memuaskan, dan teknik penggunaannya terbatas oleh suhu lingkungan. Prosedur umum yang dilakukan dalam proses injeksi *epoxy* adalah sebagai berikut :

a. Pembersihan retakan dari kontaminasi seperti minyak, oli, kotoran atau partikel halus dari beton yang dapat mencegah penetrasi dan lekatan *epoxy*, serta yang dapat mengurangi efektivitas perlekatan. Sebaiknya kontaminasi harus dibersihkan

dengan disemprot atau disiram dengan air atau solusi pembersihan lainnya yang efektif. Kemudian disemprot menggunakan kompresor udara. Hal ini penting dilakukan untuk proses penyempurnaan pembersihan retakan.

- b. Permukaan retakan harus ditutupi untuk mencegah bocornya *epoxy*. Permukaan dapat ditutupi dengan mengaplikasikan polyester atau bahan penutup lain yang sesuai untuk permukaan retak dan memungkinkan untuk mengeras.
- c. Pemasangan *nipple* pada daerah/bidang retak dengan jarak 15-20 cm. *Nipple* terbuat dari plastik yang dicetak khusus yang fungsinya untuk mengarahkan aliran cairan kimia untuk masuk ke dalam retak-retak yang akan diperbaiki.
- d. Pencampuran komponen *epoxy* sesuai petunjuk pabrik dengan penggunaan pengaduk. Proses pengadukan hanya dapat digunakan sebelum material berubah menjadi gel. Ketika material perekat mulai menjadi gel, karakteristik alirannya mulai berubah dan tekanan injeksi menjadi semakin sulit.
- e. Penginjeksian *epoxy* dilakukan dengan menggunakan pompa hidrolik. Tekanan yang digunakan untuk injeksi harus dipilih dengan hati-hati karena penggunaan tekanan yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan tambahan pada retak beton. Jika celah retak pada posisi vertikal atau miring maka proses injeksi harus dimulai dengan memompa *epoxy*

dari *nipple* pada elevasi terendah sampai mencapai *nipple* yang di atas. *nipple* yang rendah kemudian ditutup, dan proses ini diulang sampai retak telah terisi penuh dan semua *nipple* telah ditutup. Pada posisi retakan horizontal, suntikan harus dilanjutkan dari satu ujung celah ke yang lain dengan cara dan tekanan yang sama.

- f. Setelah penginjeksian *epoxy* selesai maka permukaan yang ditutupi harus dibersihkan dengan cara digerenda.

Pengujian Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi setelah Diperbaiki dengan Injeksi Epoxy

Benda uji yang telah diperbaiki dengan injeksi *epoxy* diuji kembali. Benda uji pertama diuji setelah berumur 7 hari, benda uji kedua diuji setelah berumur 14 hari dan benda uji ketiga diuji setelah berumur 28 hari. Pengujian dilakukan dengan cara yang sama dengan pembebanan awal namun beban diberikan hingga benda uji mengalami kehancuran.

Perilaku yang diamati pada pengujian akhir yaitu :

1. Retak yang terjadi dibandingkan dengan retak awal :
 - a. Posisi retak
 - b. Jumlah retak
 - c. Lebar retak
2. Lendutan yang terjadi dibandingkan dengan lendutan sebelumnya.
3. Beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok setelah dilakukan perkuatan.
4. Pola kehancuran.

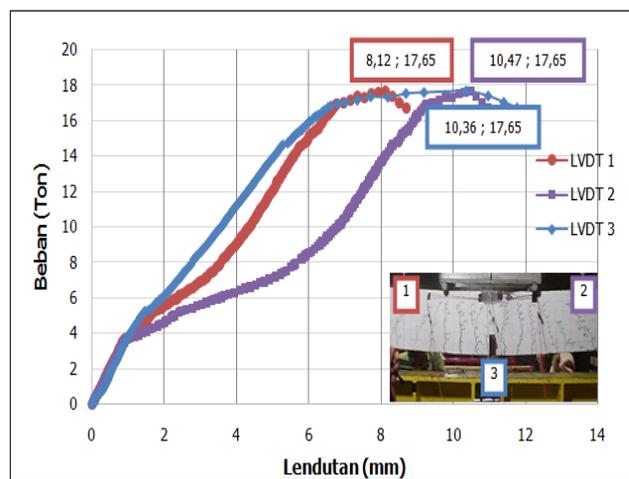
Analisis Data

Analisis data yang ditampilkan yaitu grafik hubungan beban dan lendutan, grafik hubungan beban dan regangan baja, grafik hubungan beban dan regangan beton, daktilitas dibandingkan dengan beton normal serta kapasitas *epoxy* sebagai perbaikan terhadap kuat lentur balok beton mutu tinggi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

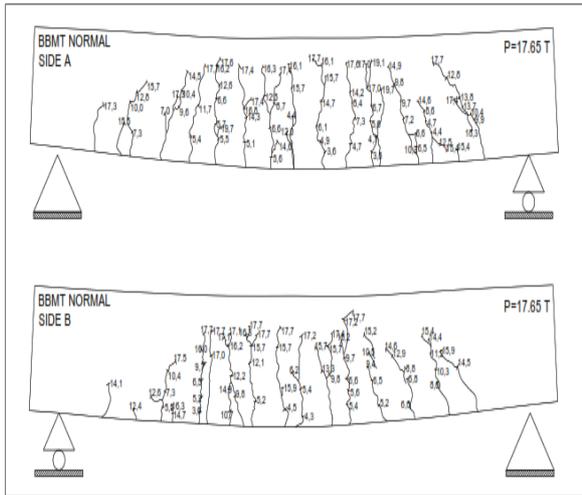
Pengujian BBMT Normal

Berikut grafik beban dan lendutan pada balok BBMT Normal.



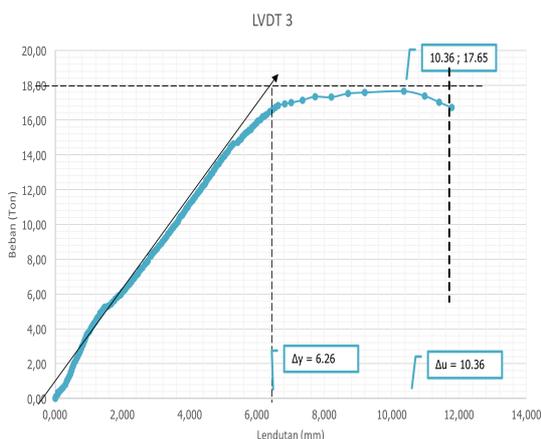
Gambar 4. Grafik Beban-Lendutan BBMT Normal

Retak pertama terjadi pada beban 3,62 ton dengan lendutan 0,91 mm. Sejalan dengan penambahan beban yang diberikan muncul sejumlah retak baru pada daerah lentur dan geser, jumlah retak tembus yang terjadi sebanyak 13 buah. Retak dan pola kehancuran BBMT normal benda uji mengalami gagal lentur. Hal ini sesuai dengan perencanaan awal balok. Retak dan pola kehancuran yang terjadi pada balok ini diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 5. Pola Retak BBMT Normal (Side A dan B)

Daktilitas pada balok BBMT Normal diperoleh dari Gambar 6. dan dihitung menggunakan Persamaan 1. Berdasarkan Gambar 6 grafik perbandingan beban terhadap lendutan didapat lendutan luluh (Δy) sebesar 6,28 mm dan lendutan ultimit (Δu) sebesar 10,36 mm sehingga didapat daktilitas BBMT normal sebesar 1,655.

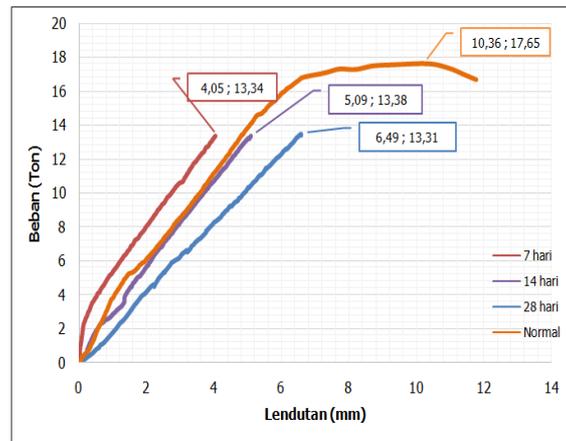


Gambar 6. Grafik Perhitungan Daktilitas

Pengujian balok beton bertulang mutu tinggi sebelum di injeksi epoxy

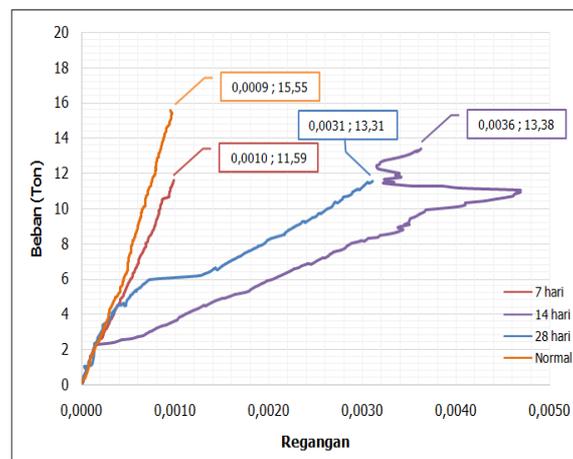
Beban dan lendutan BBMT E-7, E-14 dan E-28 dapat dilihat pada Gambar 7.

lendutan yang paling maksimum yaitu pada BBMT E-28 sebesar 6,49 mm beban sebesar 13,31 ton.



Gambar 7. Grafik Beban-Lendutan Balok BBMT Sebelum Injeksi Epoxy

Gambar 8 memperlihatkan grafik hubungan antara beban dan regangan baja tekan pada balok BBMT sebelum diinjeksi epoxy.

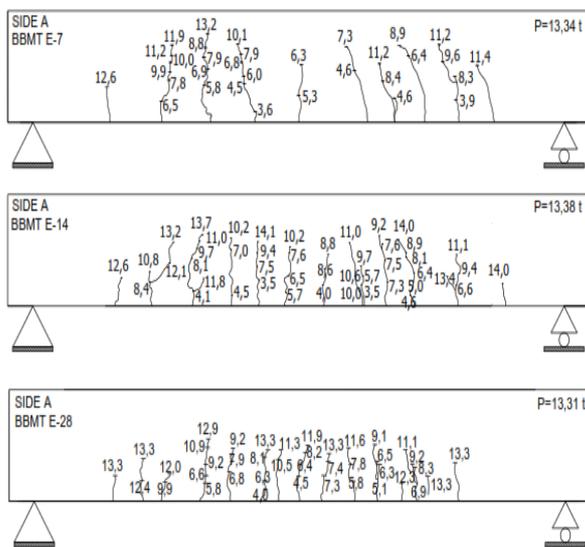


Gambar 8. Grafik Hubungan Beban-Regangan Baja Balok BBMT Sebelum Injeksi Epoxy

Dari gambar dapat dilihat bahwa semua regangan baja tekan balok BBMT nilainya lebih besar dibandingkan dengan balok BBMT normal. Pada BBMT E-14 dan BBMT E-28 nilai regangan baja dihentikan pada

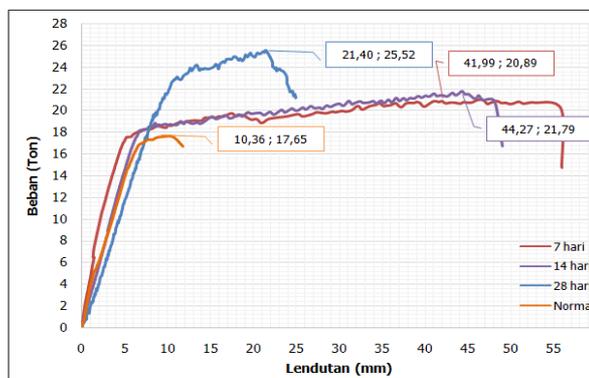
0,0036 dan 0,0031. Sedangkan pada BBMT E-7 *strain gauge* putus sehingga regangan tidak lagi tercatat yaitu pada nilai 0,001.

Retak awal yang timbul pada balok BBMT E-7 adalah pada saat pembebanan 3,48 ton. Pada balok BBMT E-14 pada saat beban 3,52 ton sedangkan pada balok BBMT E-28 pada pembebanan 3,4 ton. Retak yang timbul pada balok diperlihatkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Pola Retak BBMT E-7, E-14 dan E-28
Pengujian balok beton bertulang mutu tinggi setelah di injeksi epoxy

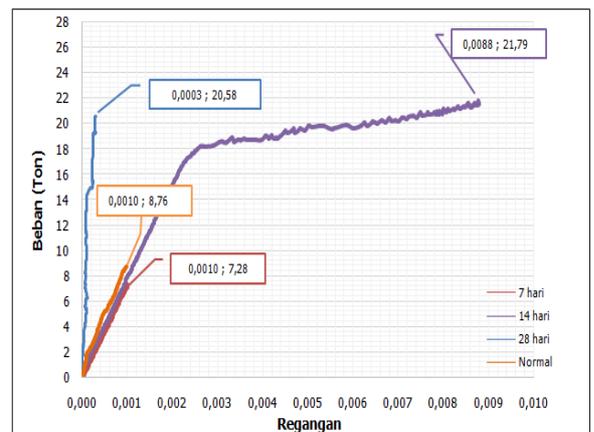
Gambar 10 memperlihatkan grafik hubungan antara beban dan lendutan pada balok BBMT setelah diinjeksi epoxy.



Gambar 10. Grafik Beban-Lendutan Balok BBMT Sesudah Injeksi Epoxy

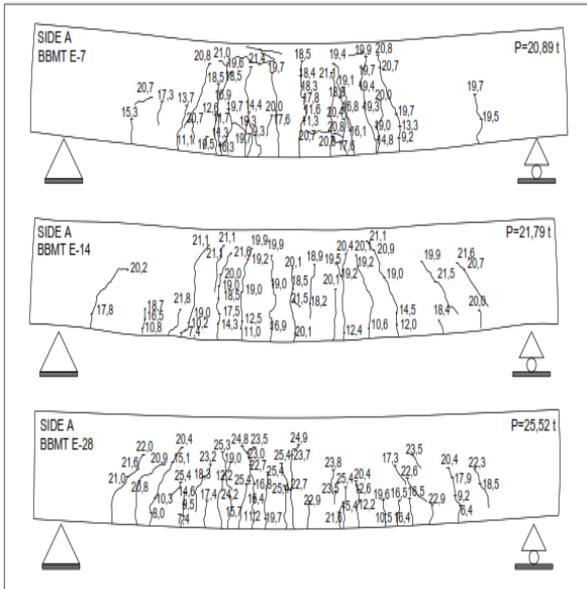
Dari gambar dapat dilihat bahwa lendutan yang paling besar terjadi pada BBMT E-14 sebesar 44,27 ton dengan beban maksimum sebesar 21,79 ton. Lendutan pada BBMT E-7 sebesar 41,99 ton beban 20,89 ton dan pada BBMT E-28 lendutan 13,49 dengan beban paling tinggi yaitu 25,52 ton.

Gambar 11 memperlihatkan grafik hubungan antara beban dan regangan *strain gauge* Beton 1 pada balok BBMT sesudah diinjeksi epoxy. Dari gambar dapat dilihat bahwa regangan tertinggi pada BBMT E-14 yaitu sebesar 0,0088 pada beban puncak 21,79 ton. Pada BBMT E-7 regangan putus dinilai 0,0010 dengan beban 7,28 ton, dan pada BBMT E-28 regangannya sebesar 0,0003 dengan beban 20,58 ton.



Gambar 11. Grafik Beban-Regangan Strain Gauge Beton 1 BBMT Sesudah Injeksi Epoxy

Akibat beban yang diberikan, retak awal yang terjadi pada balok BBMT E-7 adalah pada saat pembebanan 9,25 ton. Pada balok BBMT E-14 pada saat beban 5,0 ton sedangkan pada balok BBMT E-28 pada pembebanan 7,4 ton. Retak yang timbul pada balok diperlihatkan pada Gambar 12.

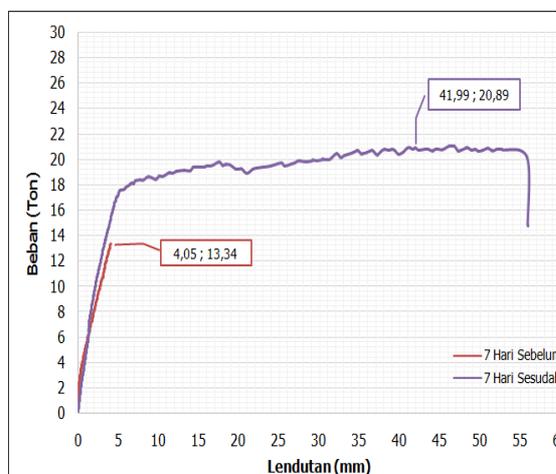


Gambar 12. Pola Retak BBMT E-7, E-14 dan E-28 sesudah Injeksi Epoxy

Pembahasan

Beban dan lendutan BBMT E-7

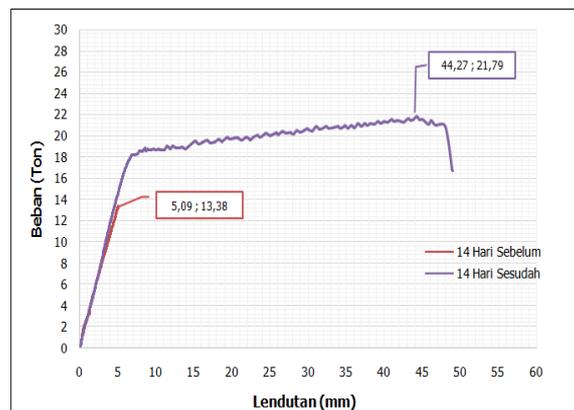
Pada BBMT E-7 sebelum diinjeksi epoxy lendutannya sebesar 4,05 pada beban 13,3 ton. Setelah diinjeksi epoxy pada beban yang sama lendutan yang terjadi sebesar 3,3. Hal ini memperlihatkan bahwa setelah diinjeksi beton menjadi semakin kaku sehingga nilai lendutan yang terjadi lebih kecil. Grafik perbandingan dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik Perbandingan Beban-Lendutan BBMT E-7

Beban dan lendutan BBMT E-14

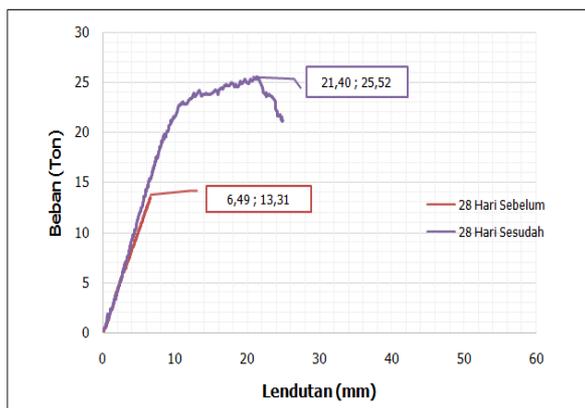
Gambar 14 memperlihatkan kurva sebelum dan sesudah berada di garis yang sama di titik-titik awalnya. Hal ini menunjukkan bahwa beton sebelum dan setelah diinjeksi nilainya tidak jauh berbeda. Pada BBMT E-14 setelah diinjeksi epoxy pada beban 13,38 ton lendutan yang terjadi sebesar 4,56, hanya berbeda sedikit dari nilai lendutan sebelum diinjeksi yaitu sebesar 5,09. Tidak jauh berbeda juga bila dibandingkan dengan beton normal yang pada beban 13,3 ton lendutan yang terjadi sebesar 4,78.



Gambar 14. Grafik Perbandingan Beban-Lendutan BBMT E-14

Beban dan lendutan BBMT E-28

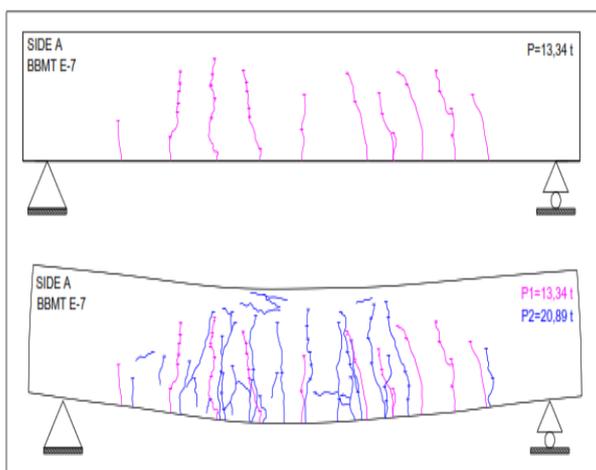
Pada Gambar 15 dapat dilihat bahwa di titik-titik awal lendutan yang terjadi pada beton sebelum maupun sesudah diinjeksi tidaklah jauh berbeda. Seiring dengan bertambahnya beban nilai lendutan semakin besar dan pada beban maksimum 25,5 ton didapat pula lendutan maksimumnya sebesar 13,49. Beban pada BBMT E-28 adalah beban yang paling tinggi dibandingkan dengan BBMT epoxy lain dan BBMT Normal.



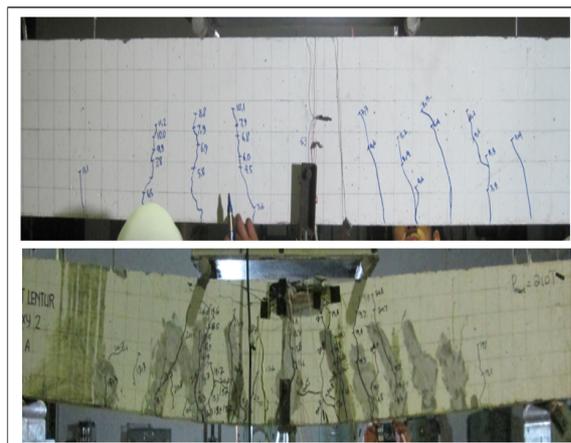
Gambar 15. Grafik Perbandingan Beban-Lendutan BBMT E-28

Pola Retak BBMT E-7

Gambar 16 memperlihatkan bahwa balok mengalami retak lentur. Jumlah retak semakin banyak seiring dengan penambahan beban. Pada saat pengujian awal retak pertama timbul pada beban 3,48 ton, setelah diinjeksi retak awal yang timbul pada saat pembebanan 9,25 ton. Hal ini membuktikan bahwa balok setelah diinjeksi lebih kuat dibandingkan sebelum diinjeksi. Pada balok BBMT E-7 sebagian retak muncul di posisi awal retak dan sebagian retak baru terjadi bersebelahan dengan retak awal. Berikut gambar dan foto dari pola retak BBMT E-7.



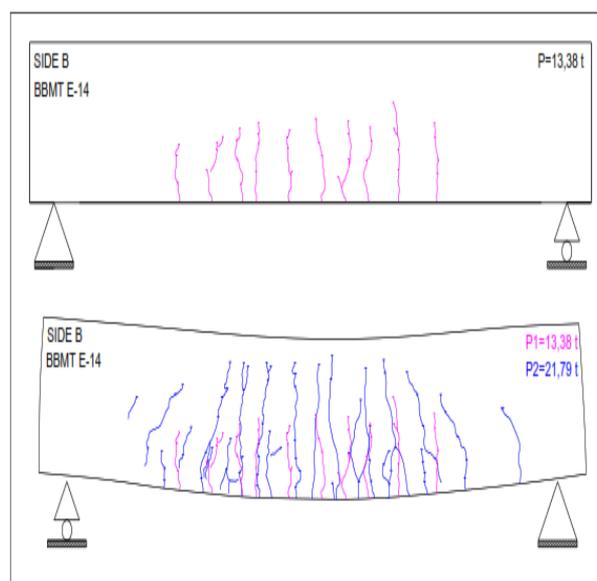
Gambar 16. Pola Retak BBMT E-7 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy



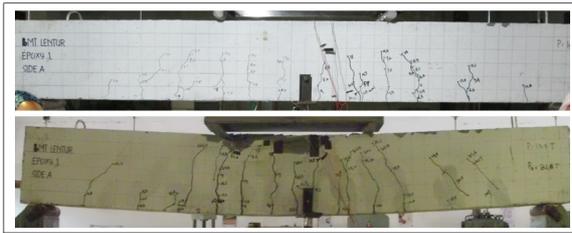
Gambar 17. Foto Pola Retak BBMT E-7 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy

Pola Retak BBMT E-14

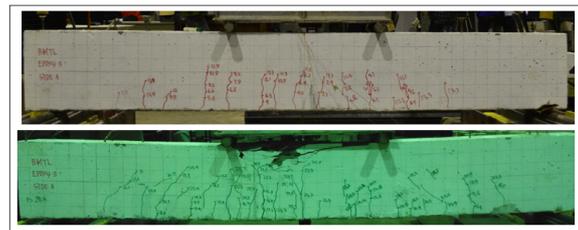
Pada Gambar 18 dapat kita lihat bahwa sebagian besar retak baru muncul di posisi yang berbeda dengan retak awal. Foto pola retak balok BBMT E-14 dapat dilihat pada Gambar 19. Pada pengujian awal retak pertama timbul pada saat pembebanan 3,52 ton. Retak awal yang timbul setelah balok diinjeksi pada beban 5,03 ton. Dari pola retak dapat kita lihat bahwa balok mengalami gagal lentur.



Gambar 18. Pola Retak BBMT E-14 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy



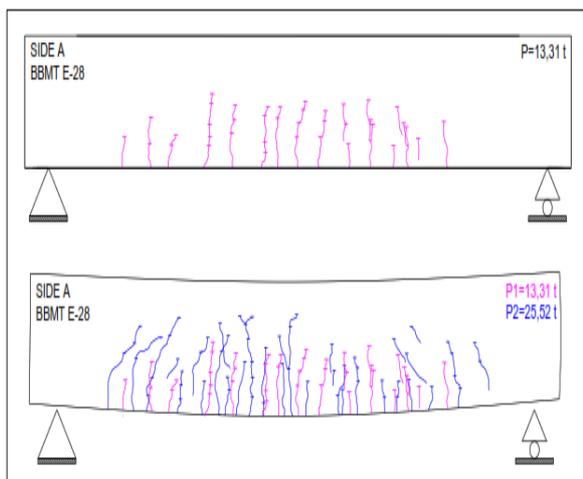
Gambar 19. Foto Pola Retak BBMT E-14 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy



Gambar 21. Foto Pola Retak BBMT E-28 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy

Pola Retak BBMT E-28

Gambar 20 memperlihatkan bahwa balok mengalami retak lentur. Pada saat pengujian awal retak pertama timbul pada beban 3,4 ton, sedangkan setelah diinjeksi retak awal yang timbul pada saat pembebanan 7,38 ton. Dapat kita simpulkan bahwa balok setelah diinjeksi lebih kuat dibandingkan sebelum diinjeksi. Pada balok BBMT E-28 sebagian retak muncul di posisi awal retak dan sebagian retak baru terjadi bersebelahan dengan retak awal. Pada balok BBMT E-28 ini beban maksimum tercapai sebesar 25,52 ton. Beban yang dihasilkan jauh melebihi dari beban maksimum beton normal yaitu 17,65 ton. Foto pola retak balok BBMT E-28 dapat dilihat pada Gambar 21.



Gambar 20. Pola Retak BBMT E-28 Sebelum dan Sesudah Injeksi Epoxy

Berikut rekapitulasi data beban dan retak pada balok BBMT ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Perbandingan Beban dan Retak pada Balok BBMT

Benda Uji	Beban (Ton)			
	Sebelum Epoxy		Setelah Epoxy	
	Retak Awal	Maks	Retak Awal	Maks
BBMT Normal	-	-	3,62	17,65
BBMT E-7	3,48	13,34	9,25	20,89
BBMT E-14	3,52	13,38	5,03	21,79
BBMT E-28	3,40	13,31	7,38	25,52

Daktilitas

Berdasarkan Tabel 3 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan daktilitas terhadap balok BBMT E-7 sebesar 434,358%. BBMT E-14 meningkat sebesar 355,908% dan BBMT E-28 menurun sebesar 73,936%. Dapat disimpulkan bahwa BBMT epoxy memiliki nilai yang baik untuk meningkatkan daktilitas beton.

Tabel 3. Data Perhitungan Daktilitas Balok BBMT

No	Benda Uji	Kondisi Luluh		Kondisi Ulitimit		Daktilitas $\mu = \Delta u / \Delta y$	Banding BBMT Normal (%)
		Beban ton	(Δy) mm	Beban ton	(Δu) mm		
1	BBMT Normal	16,31	6,280	17,65	10,360	1,650	-
2	BBMT E-7	17,70	5,860	20,89	41,990	7,166	434,358
3	BBMT E-14	18,28	7,540	21,79	44,270	5,871	355,908
4	BBMT E-28	22,17	11,200	25,52	21,400	1,911	115,823

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Balok BBMT mengalami gagal lentur, dimana sesuai dengan perbandingan rasio lentur dan geser serta dilihat dari pola retak yang terjadi yaitu retak lentur.
2. Balok BBMT setelah diinjeksi *epoxy* memberikan kekuatan yang lebih baik dibandingkan dengan balok BBMT Normal. Hasil pengujian menunjukkan terjadi peningkatan kapasitas beban maksimumnya yaitu BBMT E-7 sebesar 20,89 ton, BBMT E-14 sebesar 21,79 ton dan BBMT E-28 sebesar 25,52 ton dibandingkan dengan balok BBMT Normal yaitu sebesar 17,65 ton. Kenaikan beban yang terjadi pada masing-masing balok dibandingkan dengan BBMT Normal yaitu sebesar 18,36%, 23,46% dan 44,59%. Dapat disimpulkan bahwa semakin lama umur perbaikan beton setelah diinjeksi *epoxy* maka semakin besar beban maksimum yang dapat dipikul oleh balok BBMT.
3. *Epoxy* mampu mencegah timbulnya retak pada tempat yang telah diinjeksi, sehingga retak yang baru muncul disekitar retak yang lama pada balok BBMT.
4. *Epoxy* mempengaruhi perilaku lentur balok BBMT yaitu balok menjadi lebih daktail dibandingkan dengan balok BBMT Normal, yaitu pada balok BBMT E-7 sebesar 434,358%, BBMT E-14 sebesar

355,908 dan pada BBMT E-28 sebesar 115,823%.

Saran

Berikut saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil penelitian, yaitu :

1. Penelitian lebih lanjut sebaiknya memperhatikan variasi umur perbaikan beton, agar dapat menghasilkan kapasitas beton yang lebih baik.
2. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut tentang balok beton bertulang mutu tinggi dengan menggunakan bahan lain dari PT. Sika Indonesia.

DAFTAR KEPUSTAKAAN

- ACI Committee 224. **Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures**. American Concrete Institute, 1993, 22 pp.
- Ahmad, S., Ayub Elahi, M. Yaqoob Farooqi. 2010. **Control of Flexural Cracks in A Simply Supported Beam by Epoxy Injection Technique**. 35th Conference on Our World In Concrete & Structures : 25-27 August 2010, Singapore.
- Amri, S. 2005. **Teknologi Beton A-Z**. Jakarta : Yayasan John Hi-Tech Ideatama.
- Amri, S. 2006. **Teknologi Audit Forensik, Repair dan Retrofit untuk Rumah dan Bangunan Gedung**. Jakarta : Yayasan John Hi-Tech Ideatama.
- Anonim. 2004. **Annual Book of American Society for Testing and**

- Materials Standard (ASTM Standard)**. New York, USA.
- Anonim, 2011, **Data Teknis**, Jakarta : PT. Sika Indonesia.
- Aulia, T.B. 1999. **Effect of Mechanical Properties of Aggregate on The Ductility of High Performance Concrete**. Karsten Deutschman, Lacer No. 4, University of Leipzig, 133 – 147.
- Dipohosodo, I. 1994. **Struktur Beton Bertulang Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03**. Jakarta : PT. Gramedia Pustaka Utama.
- Hines, W.W., dan D.C. Montgomery. 1990. **Probabilitas Statistik dalam Ilmu Rekayasa dan Manajemen**. Edisi Kedua Terjemahan Rudiansyah dan A.H. Manurung. Jakarta : UI Press.
- Iaintarawan, I.P., I.N.S. Widnyana, I.W. Artana. 2009. **Buku Ajar Konstruksi Beton I**. Fakultas Teknik Universitas Hindu Indonesia, Denpasar.
- MacGregor, J.G. 1988. **Reinforced Concrete : Mechanics and Design**. New Jersey: Prentice Hall.
- McCormac, J.C. 2001. **Desain Beton Bertulang**. Edisi Kelima. Jakarta : Erlangga.
- Mulyono, T. 2004. **Teknologi Beton**. Yogyakarta : Andi.
- Nawy, E.G. 1998. **Beton Bertulang suatu Pendekatan Dasar**. Cetakan II. Bandung : PT Refika Aditama.