

TUGAS AKHIR

PERBAIKAN KINERJA BALOK BETON BERTULANG DENGAN TEKNIK INJEKSI DAN GROUTING

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk memenuhi persyaratan
memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu (S1) Teknik Sipil



DISUSUN OLEH :

SHIKHARINI PERWITASARI

07 511 041

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

YOGYAKARTA

2011

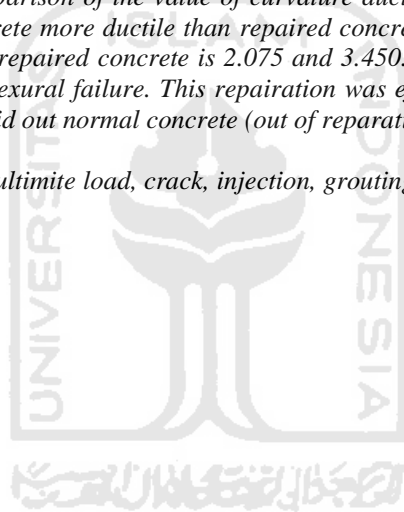
ABSTRACT

Beam is one of the important structural elements but it is often easily damaged. When beam is overloaded, it will be cracked at the tensile zone along the span. Cracks that occur will affect the stiffness, flexibility, and ability of beam to carry out its function as a structural element. Cracks will continue if the loads continuously increase and eventually beam will be collapsed when the loads reached the limit of beam strength. It is essential that the damage building should be repaired as soon as possible.

This research was conducted to repair the beam cracks by injection and grouting methods. Repairation with grouting method is suitable for patching, whereas injection is more suitable for small cracks. The repaired beam are tested with 2 point loads placed at one-third length until collapse to find the ultimate load after repair, load-displacement relation, curvature ductility, displacement ductility and pattern of cracks after repair.

The results show that repairing by injection and grouting methods improve the compressive strength by 0.27%-17.81%. The ultimate loads are 208.5 kN for first beam, 158 kN for second, 151 kN for third and 173.5 kN for fourth beam. Based on hand calculation and program response2000 the difference of curvature ductility range on 2.37%-5%, except on is 84.96%. Comparison of the value of curvature ductility between normal concrete and repaired concrete shows that normal concrete more ductile than repaired concrete. Value of displacement ductility at normal concrete is 4.445 and 5.271 and repaired concrete is 2.075 and 3.450. Cracks pattern shows that at first beam have shear failure, for others has flexural failure. This repairation was effective enough it is shown by the pattern of the crack of repaired concrete laid out normal concrete (out of reparation zone).

Keywords : Reinforcement concrete beam, ultimate load, crack, injection, grouting, curvature ductility, displacement ductility.



ABSTRAK

Balok merupakan salah satu elemen struktur yang penting tetapi sering mengalami kerusakan. Saat beban berlebih balok akan mengalami retak lentur di sepanjang bentang pada daerah serat tarik penampang. Retak yang timbul akan mempengaruhi kekakuan, kelenturan, dan kemampuan balok dalam menjalankan fungsinya sebagai suatu elemen struktur. Retak akan terus bertambah apabila beban terus ditingkatkan, dan pada akhirnya balok akan mengalami keruntuhan pada saat beban mencapai batas kekuatan balok. Dengan adanya kebutuhan bahwa bangunan yang mengalami kerusakan harus dapat secepatnya difungsikan kembali maka perlu adanya penanganan terhadap kerusakan-kerusakan yang terjadi.

Penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki retak pada balok dengan metode injeksi dan grouting. Perbaikan dengan teknik grouting dilakukan pada balok yang mengalami pengelupasan pada permukaan betonnya, sedangkan pada retak yang kecil perbaikan yang sesuai adalah dengan teknik injeksi. Balok yang rusak diuji dengan beban lentur berupa 2 beban terpusat yang dipasang pada jarak sepertiga bentangan (*one-third loading*). Dari pengujian ini dapat diketahui besarnya beban ultimit yang mampu diterima oleh balok setelah dilakukan perbaikan, hubungan beban-lendutan, daktilitas kelengkungan, daktilitas simpangan dan pola keretakan pada balok setelah dilakukan perbaikan.

Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa perbaikan dengan metode injeksi dan grouting meningkatkan kuat tekan betonnya yaitu sebesar 0,27%-17,81%. Besarnya beban ultimit yang mampu diterima oleh benda uji setelah perbaikan yaitu sebesar 208,5 kN pada benda uji 1, 158 kN pada benda uji 2, 151 kN pada benda uji 3 dan pada benda uji 4 sebesar 173,5 kN. Nilai *curvature ductility* didapat dengan dua cara yaitu dengan perhitungan dan program *response2000*. Besarnya nilai daktilitas yang didapat dari program *response2000* memiliki perbedaan dengan hasil perhitungan sebesar 2,37%-84,96%. Perbandingan nilai *curvature ductility* antara benda uji normal dan setelah perbaikan menunjukkan bahwa benda uji normal lebih daktil dari pada benda uji setelah perbaikan. Nilai daktilitas simpangan benda uji normal sebesar 4,445 dan 5,271 lebih besar dari pada benda uji setelah perbaikan, yaitu sebesar 2,075 dan 3,450 sehingga benda uji normal lebih daktil. Pola keretakan yang terjadi menunjukkan bahwa benda uji 1 mengalami kerusakan geser, sedangkan benda uji lainnya mengalami kerusakan lentur. Perbaikan yang dilakukan cukup efektif karena pola retak setelah perbaikan berada diluar daerah yang diperbaiki pada beton normal.

Kata kunci: Balok beton bertulang, beban ultimit, retak, injeksi, grouting, daktilitas kelengkungan, daktilitas simpangan.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Detail Benda Uji,2 Buah Tulangan Pokok Dengan Jarak Sengkang 7,5 cm.....	5
Gambar 1.2 Detail Benda Uji,buah tulangan pokok dan jarak sengkang 10 cm	5
Gambar 1.3 Detail Benda Uji,3 buah tulangan pokok dan jarak sengkang 10 cm	6
Gambar 3.1 Macam-macam Tulangan Geser.....	19
Gambar 3.2 Macam-macam Tulangan Sengkang	21
Gambar 3.3 Kopel Tegangan Desak dan Tarik (Whitney,1930)	27
Gambar 3.4 Distribusi Tegangan Persegi Equivalent	27
Gambar 3.5 Hubungan Momen-Curvature untuk penampang balok	34
Gambar 3.6 Hubungan momen kurvatur untuk bagian balok beton bertulangan tunggal.....	35
Gambar 3.7 Kurva momen-kurvatur ideal untuk bidang beton bertulangan tunggal yang gagal dalam tarik	36
Gambar 3.8 Perilaku defleksi akibat pembebanan	37
Gambar 3.9 Diagram tegangan regangan (a) pada saat leleh pertama (b) pada saat ultimit	38
Gambar 4.1 Mistar dan Kaliper.....	42
Gambar 4.2 Timbangan.....	43
Gambar 4.3 Mesin uji desak tipe <i>ADR 3000</i>	43
Gambar 4.4 Mesin uji tarik <i>Shimatsu type UMH 30</i>	44
Gambar 4.5 Mesin Pengaduk Campuran Beton	44
Gambar 4.6 Cetakan Silinder Beton	45
Gambar 4.7 Gelas Ukur.....	45
Gambar 4.8 <i>Slump test set</i>	46
Gambar 4.9 <i>Loading frame</i>	46
Gambar 4.10 Dudukan sendi Rol	47
Gambar 4.11 <i>Dial Gauge</i>	47

Gambar 4.12 Mesin Injeksi	48
Gambar 4.13 Komputer.....	48
Gambar 4.14 <i>Coredrill</i>	49
Gambar 4.15 Detail Benda Uji Dengan Jarak Sengkang 75mm.....	49
Gambar 4.16 Detail Benda Uji Dengan Jarak Sengkang 100mm.....	50
Gambar 4.17 SikiCim Accelerator	52
Gambar 4.18 Sika Concrete Repair Mortar.....	53
Gambar 4.19 Sikadur 52	53
Gambar 4.20 Acuan Tambahan pada Sisi Benda Uji.....	54
Gambar 4.21 Perkuatan Tambahan pada Sisi-Sisi Benda Uji.....	54
Gambar 4.22 Menuangkan Adukan ke dalam Celah Balok.....	55
Gambar 4.23 Proses Pengerigan	55
Gambar 4.24Lubang pada Balok yang Telah Dipasang Pipa Alumunium	56
Gambar 4.25Celah Retakan Diisi oleh Material Berbahan Dasar Semen	56
Gambar 4.26 Proses Injeksi	57
Gambar 4.27 Gambar Rencana Perletakan Benda Uji Sisi Depan	58
Gambar 4.28 Gambar Rencana Perletakan Benda Uji Sisi Belakang	58
Gambar 4.29 Pembebanan pada Balok	59
Gambar 4.30 Pembacaan <i>dial gauge</i> dan penggambaran pola retak	60
Gambar 4.31 <i>Dial gauge</i> yang Dibaca.....	60
Gambar 4.32 Gambar Pola Retak.....	61
Gambar 4.33 Pengujian <i>Coredrill</i>	61
Gambar 4.34 <i>Flowchart</i> bagan alir penelitian.....	55
Gambar 4.35 <i>Flowchart</i> langkah-langkah pelaksanaan penelitian	56
Gambar 5.1 Perletakan Dial pada Sisi Depan	65
Gambar 5.2 Perletakan Dial pada Sisi Belakang	66
Gambar 5.3 Lokasi pengambilan <i>sample hammer test</i> dan <i>coredrill</i> tampak depan	66
Gambar 5.4 Lokasi pengambilan <i>sample hammer test</i> dan <i>coredrill</i> tampak belakang	67
Gambar 5.5 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan pada Benda Uji 3.....	81
Gambar 5.6 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan pada Benda Uji 4.....	81

Gambar 5.7 Pola Retak Benda Uji 1	89
Gambar 5.8 Pola Retak Benda Uji 2	90
Gambar 5.9 Pola Retak Benda Uji 3 Normal	91
Gambar 5.10 Pola Retak Benda Uji 3 Setelah Perbaikan	92
Gambar 5.11 Pola Retak Benda Uji 4 Normal	93
Gambar 5.12 Pola Retak Benda Uji 4 Setelah Perbaikan	94



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR NOTASI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Lentur Balok Beton Bertulang	7
2.2 Geser Balok Beton Bertulang.....	7
2.3 Pola Kerusakan Balok	8
2.4 Perbaikan Kerusakan Balok	9
2.4.1 Perbaikan Kerusakan Balok	9
2.5 Penelitian Sebelumnya	10
2.6 Keaslian Penelitian	12
BAB III LANDASAN TEORI	14
3.1 Umum.....	14
3.2 Bahan Penyusun Beton	14
3.2.1 <i>Portland Cemen</i>	14

3.2.2	Agregat.....	16
3.2.3	Air	18
3.2.4	Faktor Air Semen	19
3.3	Baja Tulangan	20
3.3.1	Macam-macam Tulangan Geser	21
3.3.2	Rasio Tulangan Geser	22
3.4	Kuat Geser Beton	25
3.5	Kuat Lentur Beton.....	25
3.6	Balok Tegangan Desak Whitney.....	26
3.7	Momen Retak.....	28
3.8	Mekanisme Pembebanan Balok	29
3.9	Jenis-jenis Retak.....	31
3.8.1	Retak Pada Beton	31
3.8.2	Retak Pada Balok Beton Bertulang.....	32
3.10	Perbaikan Balok Beton Bertulang.....	33
3.11	Kelengkungan	33
3.12	Daktilitas	37
3.13	Response2000	40
BAB IV	METODOLOGI PENELITIAN	41
4.1	Bahan dan Benda Uji.....	41
4.1.1	Bahan	41
4.2.2	Benda Uji	41
4.2	Peralatan Penelitian.....	42
4.3	Pelaksanaan Penelitian	49
4.3.1	Benda Uji	49
4.3.2	Kodefikasi Benda Uji.....	50
4.3.3	Dimensi Benda Uji.....	51
4.3.4	Perbaikan Benda Uji	51
4.3.5	Material Perbaikan	52
4.3.6	Teknik Perbaikan	53
4.3.7	Persiapan Peralatan	57
4.3.9	Pelaksanaan Pengujian.....	59

4.3.10	Data Pengujian	62
4.3.11	Bagan Alir Penelitian	63
4.3.12	Langkah-Langkah Pengujian	64
BAB V	PEMBAHASAN	65
5.1	Umum.....	65
5.2	Uji Kuat Tarik Baja Tulangan.....	67
5.3	Uji Juat Tekan Beton.....	67
5.4	Dasar Pembebanan dan Perhitungan.....	73
5.4.1	Momen Kapasitas.....	74
5.4.2	Momen Retak	76
5.5	Klasifikasi Kerusakan Benda Uji dan teknik Perbaikan	78
5.5.2	Pembebanan Benda Uji.....	78
5.5.3	Hubungan Beban dan Lendutan Beton	80
5.5.4	Daktilitas Kelengkungan.....	82
5.5.5	Daktilitas Simpangan	86
5.5.6	Pola Retak Balok Beton	87
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	95
6.1	Kesimpulan	95
6.2	Saran	96
	DAFTAR PUSTAKA	97
	LAMPIRAN	

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel dan Grafik Hasil Pembacaan Dial

Lampiran 2 Tabel Hasil *Hammer Test*

Lampiran 3 Hasil Pembacaan Momen-Kelengkungan Response2000

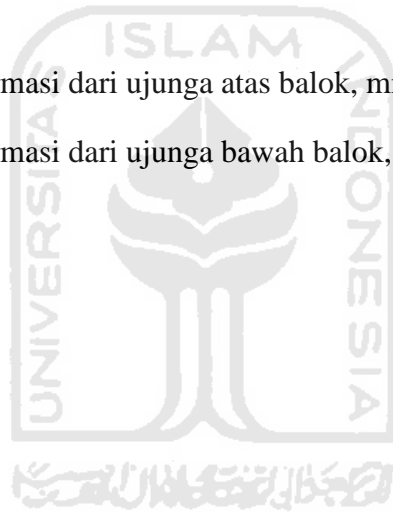
Lampiran 4 Dokumentasi



DAFTAR NOTASI

- a : jarak antara tepi beton desak ke garis netral, mm
- A_s : luas tulangan tarik, mm²
- b : lebar penampang balok, mm
- C : gaya tekan, N
- C_c : gaya tekan beton, N
- C_s : gaya tekan baja, N
- d : tinggi efektif balok, mm
- f'_c : kuat desak beton, MPa
- f_y : kuat leleh baja, MPa
- f_r : tegangan tarik / tegangan retak, MPa
- f_{as} : faktor air semen
- f_s : regangan baja tarik, MPa
- h : tinggi penampang balok, mm
- I_y : inersia momen penampang, mm⁴
- J_d : jarak pusat total gaya tekan ke pusat tulangan tarik, mm
- k_d : jarak garis netral, mm
- L_n : jarak antara 2 garis perletakan/bentang bersih
- M : nilai margin
- M_{cr} : momen saat pertama retak, Nmm
- M_n : momen yang dapat dikerahkan oleh balok, Nmm
- \emptyset : diameter tulangan
- y : jarak dari titik yang ditinjau ke garis netral
- σ : kuat lentur, Mpa
- ε_c : regangan beton

- ε_s : regangan baja tarik
- p_b : selimut beton, mm
- T_s : gaya tarik tulangan, N
- β_1 : konstanta dari fungsi kuat tekan beton
- ϕ : kelengkungan / kurvatur, rad/mm
- ϕ_{rt} : kelengkungan saat retak pertama, rad/mm
- ϕ_y : kelengkungan saat pertama leleh, rad/mm
- ϕ_u : kelengkungan saat ultimit, rad/mm
- ρ : rasio tulangan tarik
- μ : micron
- \tilde{y} : garis pusat transformasi dari ujung atas balok, mm
- \tilde{y}_b : garis pusat transformasi dari ujung bawah balok, mm



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Kandungan Senyawa Utama Semen Portland.....	15
Tabel 3.2 Ukuran Baja Tulangan Beton Polos	20
Tabel 4.1 Kodefikasi benda uji dan pembebanannya.....	50
Tabel 4.2 Dimensi Benda Uji	51
Tabel 5.1 Hasil Kuat Tarik Baja Tulangan.....	67
Tebel 5.2 Hasil Uji Silinder Beton	68
Tabel 5.3 Hasil Uji Kuat desak Beton dengan <i>Hammer Test</i>	68
Tabel 5.4 Hasil Uji Kuat desak Beton dengan <i>Coredrill</i>	70
Tabel 5.5 Perbandingan Hasil Uji Kuat Tekan Beton	71
Tabel 5.6 Nilai rasio Tulangan Lentur dan Geser	76
Tabel 5.7 Hasil Perhitungan Teoritis.....	77
Tabel 5.8 Perbandingan Hasil Pembebanan Benda Uji	79
Tabel 5.9 Perbandingan Hasil Pembacaan Hubungan Beban-Lendutan.....	82
Tabel 5.10 Hasil Perhitungan <i>Curvature Ductility</i>	84
Tabel 5.11 <i>Curvature Ductility</i> Hasil Response2000.....	85
Tabel 5.12 Perbandingan Hasil Perhitungan <i>Curvature Ductility</i>	85
Tabel 5.13 Hasil perhitungan Daktilitas Simpangan.....	86
Tabel 5.14 Perbandingan Hasil Perhitungan Daktilitas Simpangan.....	86

KATA PENGANTAR

مبحرلن محرلنا الله مسبح
هيكربو الله تمحرو مكيدع ملاسنا

Puji syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuni-Nya sehingga dapat diselesaikannya laporan tugas akhir yang berjudul “Perbaikan Balok Beton Bertulang Dengan Teknik Injeksi dan grouting” ini dapat terselesaikan. Shalawat dan salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, atas kerja keras dan kejernihan hati-Nya dalam menyampaikan ajaran Islam.

Tugas akhir ini merupakan syarat untuk mencapai jenjang Strata Satu (S1), pada Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan secara material maupun spiritual sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan, untuk itu pada kesempatan ini disampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada :

1. Prof. Ir. H. Mochammad Teguh, MSCE, Ph.D selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan UII Yogyakarta dan selaku dosen pembimbing I tugas akhir, terima kasih atas bimbingan, nasehat dan dukungan yang diberikan kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir ini dan selama penulis menjalani masa kuliah.
2. Ir. A Kadir Aboe, MT selaku dosen pembimbing II dan Kepala Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil FTSP-UII Yogyakarta, atas bimbingan, dukungan, masukan dan keceriaan yang diberikan kepada penulis selama melakukan penelitian di laboratorium.
3. Ir. Soesastrawan, MS selaku Dosen Penguji atas saran, masukan, dan nasehat yang telah diberikan kepada penulis.

4. Terima kasih yang teramat tulus kepada ayah dan ibu tercinta yang terus berjuang untuk masa depan anak-anaknya dan selalu memberikan doanya, Miyanta, SH dan Niken Prabandari L, SE.
5. Ir. H. Suharyatmo, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil FTSP-UII Yogyakarta.
6. Ir. Tri Fajar Budiyo, MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Sipil FTSP-UII Yogyakarta.
7. Segenap staf dan karyawan Laboratorium Mekanika Rekayasa, Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Jurusan Teknik Sipil FTSP-UII, terutama Bpk. Warno, Bpk. Daru, Bpk. Hari dan, Bpk. Santoro yang telah membantu selama penelitian berlangsung.
8. Seluruh keluarga yang terus memberikan semangat dan perhatian.
9. Terimakasih kepada kakak-kakak Teknik Sipil 2005, Mas Jaka, Mas Beta, Mas Aik, Mas Angga, Mas Denny, Mas Hanif dan Mas Danu yang telah dengan sabar membantu dan memberikan masukan selama berada di laboratorium.
10. Terimakasih kepada Sely Novitasari yang selalu menemani dan memberikan semangat, serta Mas Dimas, Mas Zulfandra, Mas Yupi dan Mas Chandris yang selalu membantu.
11. Terimakasih kepada teman-teman yang telah meluangkan waktu dan tenaga untuk membantu selama proses penelitian.
12. Terimakasih kepada teman-teman seperjuangan Teknik Sipil angkatan 2007.

Semoga penelitian yang telah dilakukan dan disajikan dalam bentuk tugas akhir ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi dunia Teknik Sipil dan dapat bermanfaat untuk pengembangan penelitian-penelitian selanjutnya.

Wabillahittaufig wal hidayah

ملاسلوا بهيكربو الله اتمحرو مكياء

Yogyakarta, Agustus 2011

Hormat Penulis

LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR
PERBAIKAN KINERJA BALOK BETON BERTULANG
DENGAN TEKNIK INJEKSI DAN GROUTING

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk memenuhi persyaratan memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu (S1) Teknik Sipil



Disusun Oleh:

SHIKHARINI PERWITASARI

07 511 041

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Mengetahui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Ketua Jurusan teknik Sipil

Prof. Ir. H. M. Teguh, MSCE, Ph.D

Ir. H. A. Kadir Aboe, MT

Ir. H. Suharyatmo, MT

Tanggal:

Tanggal:

Tanggal:

TUGAS AKHIR
PERBAIKAN KINERJA BALOK BETON BERTULANG
DENGAN TEKNIK INJEKSI DAN GROUTING

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk memenuhi
persyaratan memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu (S1) Teknik Sipil



Disusun Oleh:

SHIKHARINI PERWITASARI

07 511 041

Disetujui Oleh :

Pembimbing I/Penguji:

(Prof. Ir. H. Mochammad Teguh, MSCE, Ph.D)

Pembimbing II/Penguji:

(Ir. H. A. Kadir Aboe, MT)

Penguji:

(Ir. Soesastrawan, MS)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Beton merupakan bahan bangunan yang sering dipakai misalnya pada jembatan, bendungan, jalan, dinding penahan tanah dan bangunan gedung karena bahan material pembuat beton mudah didapat, lebih murah dan lebih mudah dalam pengerjaannya. Selain itu beton memiliki usia layan yang relatif lama dan mampu memikul beban yang cukup besar.

Beton memiliki kuat desak yang lebih besar dari pada kuat tariknya. Kuat desak beton sangat tinggi, tetapi kuat tarik beton sangat rendah. Sedangkan pada baja tulangan kuat tariknya sangat tinggi, sehingga kombinasi antara beton dengan baja tulangan akan menghasilkan komponen yang bekerja secara maksimal. Kombinasi antara beton dan baja tulangan ini disebut sebagai beton bertulang.

Salah satu elemen struktur utama dari bangunan gedung dan memiliki peranan yang sangat penting dalam menahan gaya-gaya/beban-beban yang bekerja pada struktur adalah balok. Gaya-gaya/beban-beban yang bekerja pada suatu struktur antara lain beban gravitasi (berarah vertikal) yang terdiri dari beban tembok, beban pelat dan berat balok sendiri. Beban-beban lain yang bekerja pada suatu struktur yaitu beban angin (berarah horizontal), beban susut dan beban karena perubahan suhu/temperatur. Selain itu beban yang saat ini sering terjadi di dunia yaitu gempa bumi khususnya Indonesia yang wilayahnya berada pada zona pertemuan antara dua jalur gempa dunia Sabuk Gempa Circum Pasifik (*Circum Pacific Earthquake Belt*) dan *Trans Asiatic Earthquake Belt*.

Salah satu elemen bangunan gedung yang sering mengalami kerusakan adalah balok. Terdapat beberapa gaya dalam (*internal forces*) yang mungkin terjadi pada balok, yaitu gaya lentur (*flexure*) yang mengakibatkan balok melengkung/melentur, gaya geser atau gaya lintang (*shear*), gaya aksial atau gaya yang sejajar dengan sumbu batang dan gaya puntir atau gaya yang memuntir suatu elemen.

Pola kerusakan pada balok baik rusak lentur maupun rusak geser/*shear* selain dipengaruhi oleh beban juga dipengaruhi oleh kelangsingan/dimensi suatu balok. Pada balok yang langsing yaitu rasio bentang bersih (L) dan tinggi balok (h) relatif besar kerusakan yang terjadi adalah rusak lentur yang diakibatkan oleh tegangan lentur yang besar. Pada balok tinggi (*deep beam*) yaitu bentang L relatif pendek daripada h tegangan geser dan gaya geser besar sehingga menyebabkan retak miring. Akibat dari gaya lentur, elemen akan terlihat melentur atau melengkung. Berbeda dengan lentur, deformasi akibat gaya geser tidak begitu kelihatan sehingga rusak akibat gaya geser biasanya terjadi secara tiba-tiba tanpa adanya tanda-tanda atau peringatan dini terlebih dahulu.

Saat balok mengalami kerusakan, kekuatan pada balok mengalami penurunan. Karena adanya tuntutan bahwa suatu bangunan akan segera difungsikan kembali, maka perlu segera dilakukan perbaikan maupun perkuatan pada kerusakan-kerusakan yang terjadi untuk mengembalikan kekuatan balok. Teknik injeksi dan grouting merupakan salah satu usaha untuk memperbaiki kerusakan pada balok beton. Apabila beton mengalami retak maka injeksi merupakan metode perbaikan yang tepat, tetapi apabila beton sudah mengalami pecah maupun pengelupasan maka metode perbaikan yang tepat adalah dengan grouting. Dari berbagai kerusakan yang terjadi dan perbaikan yang dilakukan, perlu adanya penelitian serta simulasi keruntuhan yang nyata pada balok yang mengalami perbaikan sehingga dapat diketahui dengan jelas kekuatan balok dan daktilitas yang terjadi pada beton.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang permasalahan tersebut dan dengan mempertimbangkan metodologi penelitian, permasalahan dapat diuraikan sebagai berikut :

1. bagaimana menentukan klasifikasi kerusakan balok beton,
2. bagaimana cara memperbaiki balok yang sesuai dengan klasifikasi kerusakan,
3. dapatkah diketahui kekuatan balok beton setelah perbaikan,
4. dapatkah diketahui daktilitas kelengkungan pada balok beton,
5. bagaimana pola retak yang terjadi pada balok setelah mengalami perbaikan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian yang diharapkan didapat dalam tugas akhir ini sebagai berikut :

1. memperbaiki kerusakan komponen struktur sesuai dengan klasifikasi kerusakan,
2. mengetahui beban ultimit yang dapat diterima oleh balok setelah perbaikan,
3. mengetahui pola retak pada balok setelah perbaikan,
4. mengetahui daktilitas kelengkungan pada balok beton.

1.4 Manfaat Penelitian

Beberapa hal yang diharapkan dapat memberi manfaat setelah diadakannya penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. memberikan suatu wawasan tentang teknik perbaikan kerusakan pada balok beton bertulang,
2. memberikan simulasi pembebanan statik agar dapat mengetahui perilaku struktur yang telah mengalami perbaikan,
3. menambah pengetahuan tentang perilaku keruntuhan setelah struktur mengalami perbaikan,

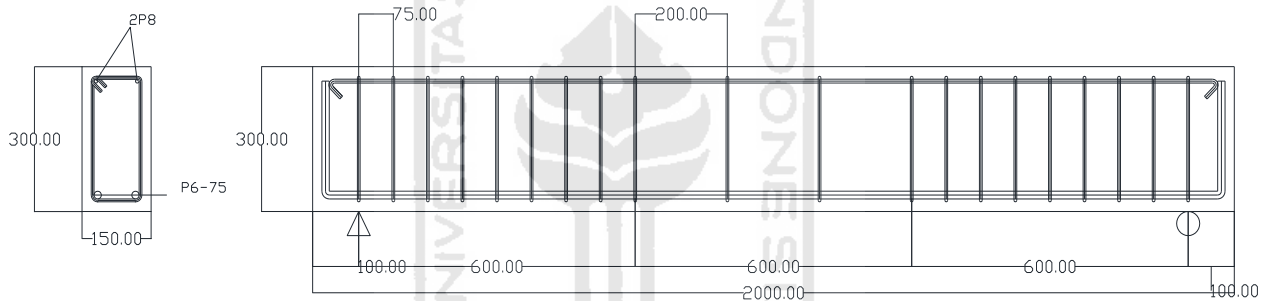
4. menambah pengetahuan tentang daktilitas kelengkungan balok beton bertulang.

1.5 Batasan Masalah

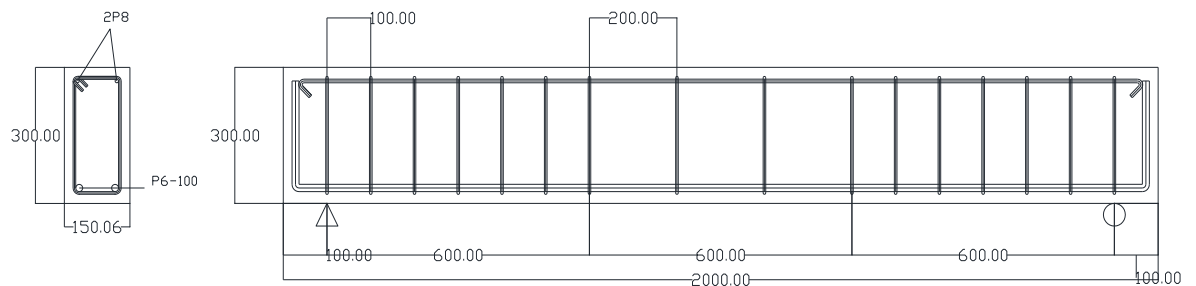
Melihat dari kompleksnya permasalahan pada penelitian ini, maka diberikan beberapa lingkup batasan masalah sebagai berikut :

1. Beton yang digunakan adalah beton normal dengan kuat desak ($f'c$) = 25 MPa.
2. Baja yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja polos dengan $f_y = 240$ MPa, diameter 16 mm dan 8 mm untuk tulangan pokok, diameter 6 mm untuk tulangan geser/sengkang.
3. Metode campuran (*mix design*) yang digunakan menggunakan standar Departement of Environment (DoE).
4. Bahan ikat semen PC merk Tiga Roda Tipe I.
5. Agregat yang digunakan berasal dari sungai Boyong, Yogyakarta, baik itu agregat halus maupun kasar dan air yang digunakan berasal dari laboratorium Bahan Kontruksi Teknik (BKT) Universitas Islam Indonesia.
6. Pengujian kuat tekan dilakukan di laboratorium BKT menggunakan sampel silinder \emptyset 15 cm dan tinggi 30 cm sebanyak 12 sampel dan dilakukan saat umur beton 28 hari.
7. Benda uji yang diperbaiki dalam penelitian ini berasal dari penelitian yang sebelumnya, yaitu 4 buah balok berdimensi $b=150$ mm $h=300$ mm $L=2000$ mm dengan 2 buah balok dengan 2 buah tulangan pokok diameter 16 mm dan 2 buah diameter 8 mm dengan jarak sengkang 7,5 cm dan 1 buah balok dengan 2 buah tulangan pokok 16 mm dan 2 buah diameter 8 mm dengan jarak sengkang 10 cm serta 1 buah balok dengan 3 buah tulangan pokok 16 mm dan 2 buah diameter 8 mm dengan jarak sengkang 10 cm.
8. Metode perbaikan yang dipakai adalah dengan injeksi dan grout.

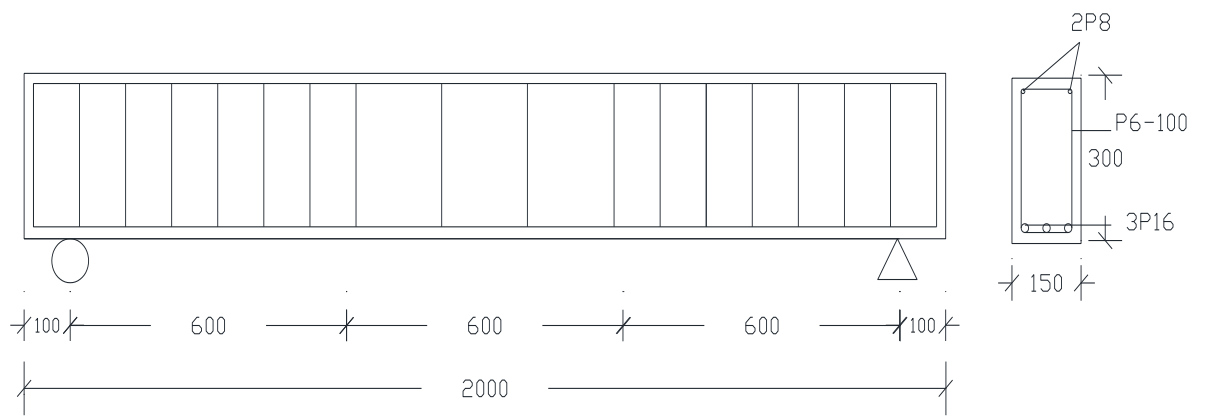
9. Bahan untuk injeksi yang digunakan adalah *epoxy* dengan merk dagang “sikadur 52 ID”.
10. Bahan grout yang digunakan menggunakan sikagrout minipack.
11. Pengujian kuat lentur dilakukan menggunakan sampel balok sebanyak 4 sampel dari percobaan sebelumnya.
12. Perhitungan daktilitas beton menggunakan response 2000.
13. Pengujian kekuatan geser pada uji dilakukan di laboratorium Mekanika Rekayasa Jurusan Teknik Sipil, FTSP, UII.
14. Detail benda uji



Gambar 1.1 Detail benda uji, 2 buah tulangan pokok dan jarak sengkang 7,5 cm



Gambar 1.2 Detail benda uji, 2 buah tulangan pokok dan jarak sengkang 10 cm



Gambar 1.3 Detail benda uji, 3 buah tulangan pokok dan jarak sengkang 10 cm



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Lentur Balok Beton Bertulang

Menurut Nawy (1990) lentur pada balok diakibatkan oleh regangan yang timbul karena adanya beban luar. Apabila beban bertambah, maka balok akan terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan retak lentur di sepanjang bentangan balok. Bila beban semakin bertambah, pada akhirnya terjadi keruntuhan elemen struktur. Taraf pembebanan yang demikian disebut keadaan limit dari keruntuhan pada lentur.

Beban yang diberikan pada balok beton yang dikombinasikan dengan tulangan tarik dan beban tersebut ditingkatkan secara bertahap hingga balok beton mengalami keruntuhan. Tiga tahapan yang terjadi sebelum balok tersebut mengalami keruntuhan adalah tahap beton tanpa retak (elastic penuh), tahap beton mulai retak, dan tahap baja mulai leleh/beton mulai pecah (tahap plastis). Geser yang terjadi pada balok yang relative panjang tidak akan memberi pengaruh besar kepada perilaku beton (McCormac, 2000).

2.2 Geser Balok Beton Bertulang

Perilaku balok beton bertulang pada keadaan runtuh karena geser sangat berbeda dengan pada keruntuhan karena lentur. Balok tersebut langsung hancur tanpa adanya peringatan terlebih dahulu. Juga retak diagonalnya jauh lebih lebar dibandingkan dengan retak lentur. Karena perilaku kegagalan getas (*brittle*) ini, perencana harus merancang penampang yang cukup kuat untuk memikul beban geser luar rencana tanpa mencapai kapasitas gesernya (Nawy, 1990).

Beton ditujukan untuk menahan tekan dan baja tulangan untuk menahan tarik, sedangkan kuat tarik beton diabaikan. Kekuatan geser dapat terdiri dari beton dan baja tulangan atau baja tulangan saja. Dalam perencanaan bangunan tahan gempa direncanakan agar terjadi sendi plastis pada daerah tertentu. Pada

daerah yang dimungkinkan terjadi sendi plastis, maka kuat geser beton diabaikan dan hanya baja tulangan saja yang diperhitungkan untuk menahan geser (Park dan Pauly, 1974).

2.3 Pola Kerusakan Pada Balok

Kelangsingan balok, yaitu perbandingan antara bentang bersih dengan tinggi balok menentukan ragam keruntuhan balok. Pada dasarnya dapat terjadi tiga ragam keruntuhan (kombinasinya), yaitu keruntuhan lentur, keruntuhan tarik diagonal dan keruntuhan tekan akibat geser. Pada daerah yang mengalami keruntuhan lentur, retak utama terjadi pada sepertiga tengah bentang, dan tegak lurus terhadap arah tegangan utama. Retak-retak ini diakibatkan oleh tegangan geser yang sangat kecil dan tegangan lentur yang sangat dominan yang besarnya hampir mendekati tegangan utama horizontal. Keruntuhan tarik diagonal terjadi apabila kekuatan balok dalam diagonal tarik lebih kecil daripada kekuatan lenturnya. Retak-retak mulai terjadi di tengah bentang, berarah vertikal, yang berupa retak halus, dan diakibatkan oleh lentur. Keruntuhan tekan geser terjadi dimulai dengan timbulnya retak lentur halus vertikal di tengah bentang, setelah itu diikuti dengan retak miring yang lebih curam daripada retak diagonal tarik, secara tiba-tiba dan menjalar terus menuju sumbu netral. Keruntuhan yang terjadi secara tiba-tiba pada saat retak miring bertemu dengan tepi beton yang tertekan (Nawy, 1990).

Keretakan geser menyebabkan terbelahnya balok menjadi dua bagian yang dipisahkan oleh garis keretakan geser tersebut. Keretakan ini semakin lama semakin besar, sehingga kedua bagian balok akan terbelah. Berdasarkan kejadian ini, bagian tulangan sengkang pada arah vertikal adalah tulangan yang berhubungan langsung dengan keretakan geser tersebut. Tulangan ini mencegah terbelahnya balok akibat adanya keretakan geser, karena berfungsi untuk mengikat antara bagian balok di bawah retak geser dan bagian balok di atas retak geser. Retak geser pada balok tidak akan terjadi jika direncanakan dengan tepat agar mampu menahan gaya geser tersebut (Kennet, 1997).

2.4 Perbaikan Kerusakan Balok

Dalam pemilihan metode perbaikan, harus diperhatikan beberapa hal yaitu kapasitas struktur, lingkungan struktur berada, peralatan yang tersedia, kemampuan tenaga pelaksana serta batasan-batasan dari pemilik seperti keterbatasan ruang kerja, kemudahan pelaksanaan, waktu pelaksanaan dan biaya perkuatan (Hartono dkk, 2008).

Pada penelitian ini dilakukan klasifikasi terlebih dahulu terhadap kerusakan pada balok uji. Diidentifikasi apakah balok tersebut mengalami kerusakan ringan yaitu terjadi keretakan awal pada balok uji, kerusakan sedang yaitu retak dan mulai terjadi pengelupasan pada beton (*spalling*) atau kerusakan ultimit yaitu akibat dari balok telah mengalami pembebanan sampai pada beban maksimum yang dapat diterima.

Dari berbagai klasifikasi kerusakan yang telah dilakukan diputuskan untuk melakukan perbaikan dengan metode injeksi dan grouting. Kedua metode tersebut digunakan dengan mempertimbangkan bahwa bila kedalaman retak telah lebih dari 2 cm maka metode perbaikan yang tepat adalah injeksi bertekanan (*injection with pressure*), tetapi jika beton tarik telah terjadi pengelupasan (*spalling*) yang parah, maka metode “grout” akan lebih efektif diterapkan (Tumatar, 2009).

2.4.1 Perbaikan Beton dengan Teknik Injeksi dan Grouting

Metode perbaikan yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan teknik injeksi dan grouting. Injeksi digunakan untuk memperbaiki rusak karena retak pada balok uji, injeksi bisa dilakukan secara manual maupun dengan mesin bertekanan tergantung dengan lebar dan kedalaman retak. Sedangkan *grouting* digunakan pada balok uji yang mengalami pengelupasan atau pecah pada permukaan beton, *grouting* dilakukan dengan pengecoran menggunakan bahan *non shrink mortar*.

Epoxy merupakan salah satu material yang biasa digunakan untuk injeksi karena memiliki viscositas yang rendah sehingga dapat mengisi sekaligus melekatkan kembali bagian beton yang terpisah, selain itu *epoxy* mempunyai sifat keras namun tidak getas dan dapat digunakan dalam keadaan kering maupun lembab.

2.5 Penelitian Sebelumnya

Berikut ini dicantumkan hasil penelitian terdahulu yang dirasakan mempunyai keterkaitan dan dapat digunakan sebagai tinjauan pustaka, antara lain:

1. Kinerja Balok Lentur Beton Bertulang Dengan Teknik Injeksi Dan Grouting (Alfan Septian, 2010).

Tujuan penelitian :

- 1) memperbaiki kerusakan struktur sesuai dengan klasifikasi kerusakan,
- 2) mengetahui efektifitas dari perbaikan yang telah dilaksanakan,
- 3) mengetahui tentang respon beban-lendutan yang terjadi pada struktur yang telah mengalami perbaikan,
- 4) mengetahui perilaku retak pada penampang setelah perbaikan,
- 5) mendeteksi perilaku keruntuhan setelah perbaikan dengan menggunakan sensor elektrik dan mekanis berupa *strain gauge*, LVDT, dan *load cell*, serta *dial gauge*.

Kesimpulan :

Pada penelitian ini menunjukkan bahwa efektifitas perbaikan yang paling optimal terjadi pada balok yang mengalami kerusakan menengah, selain itu retak setelah perbaikan jika dibandingkan dengan sebelum perbaikan menunjukkan pengurangan panjang dan lebar retak. Perbaikan dengan metode injeksi tidak menambah kontribusi kuat tarik, akan tetapi mampu mengembalikan kuat tarik yang telah rusak akibat kerusakan struktur sedang dan ringan. Pada grafik beban-lendutan menunjukkan pengurangan lendutan setelah dilakukan perbaikan, hal ini menunjukkan adanya efektifitas dari perbaikan yang telah dilakukan. Pada lendutan normal besarnya adalah 1,84 mm, 5,27 mm, dan 2,81 mm, namun setelah perbaikan menjadi 3,63 mm, 4,15 mm dan 2,9 mm. Dilihat dari grafik tegangan-regangan baja dan beton menunjukkan bahwa terjadi perbaikan tegangan-regangan pada benda uji hasil perbaikan.

2. Karakteristik Kuat Geser Terhadap Rasio Tulangan Yang Terjadi Pada Balok Beton Bertulang (Eta Nuraini, 2011).

Tujuan penelitian :

- 1) mengetahui respon beban lendutan terhadap balok terdukung sederhana dengan pembebanan geser,
- 2) mengetahui pola retak geser pada waktu pembebanan balok bertulang,
- 3) mengetahui hubungan tegangan-regangan pada beton dan tulangan baja pada waktu pembebanan,
- 4) mengidentifikasi kerusakan balok akibat beban geser.

Kesimpulan :

Dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa perbedaan rasio tulangan geser pada benda uji mampu meningkatkan kemampuan benda uji dalam menerima beban geser, kenaikan tersebut mencapai 25,44% yaitu pada nilai $\rho = 0,0028$ mampu menerima beban geser sebesar 110,5 kN sedangkan untuk $\rho = 0,0021$ beban yang dapat diterima sebesar 82,39 kN. Besarnya pembebanan mempengaruhi besarnya lendutan yang terjadi, semakin besar pembebanan maka lendutan yang terjadi juga semakin besar. Nilai regangan beton pada daerah desak belum mencapai regangan batas yaitu $0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,003$. Kerusakan yang terjadi pada ketiga benda uji adalah rusak geser, yaitu pada jarak sengkang 75 mm dan 100 mm, sedangkan pada salah satu benda uji yang mempunyai jarak sengkang 100 mm mengalami rusak lentur.

3. Perilaku Retak dan keruntuhan Geser Pada Balok beton Bertulang Dengan Memakai Rasio Sengkang Bervariasi (Suliantoro Sulaiman, 2011)

Tujuan Penelitian :

- 1) Mengetahui perilaku dari balok beton bertulang yang mempunyai dukungan sendi-rol terhadap pembebanan.
- 2) Mengetahui pola retakan lentur dan geser pada saat diberikan beban maksimum.
- 3) Mengetahui hubungan tegangan regangan riil pada material beton dan baja ketika diberikan beban bertahap sampai ke beban maksimumnya.

- 4) Mengidentifikasi kerusakan-kerusakan yang terjadi pada material-material penyusun balok.
- 5) Mengetahui perilaku balok keseluruhan terhadap variasi jarak antar sengkang.

Kesimpulan :

Kesimpulan dari penelitian ini adalah balok uji mempunyai beban riil lebih besar dari beban teoritisnya dan dari grafik hubungan beban-lendutan dapat diketahui bahwa balok adalah tipe balok daktail. Dari grafik hubungan pembebanan-regangan beton dibandingkan dengan grafik hubungan pembebanan-regangan baja dapat disimpulkan bahwa balok memiliki ikatan yang baik. Pada grafik tegangan-regangan beton dapat diketahui bahwa balok mengalami fase elastis pada saat balok BU-T2-75 melebihi $\epsilon_c=0,001122025$ dan balok BU-T2-100 melebihi $\epsilon_c=0,001124443$. Pola retak dan keruntuhan balok didominasi oleh retak lentur walaupun ada indikasi balok juga mengalami transisi dari retak lentur ke retak geser.

2.6 Keaslian Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengacu dari hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan pola retak balok, beban ultimit yang mampu diterima oleh balok serta perbaikan dengan teknik injeksi dan grouting terhadap kemampuan balok dalam menerima beban, sehingga menjadi bahan pertimbangan dan masukan dalam penelitian ini. Dari penelitian-penelitian diatas akan dapat memberikan gambaran dan pengetahuan dalam penelitian ini.

Pada penelitian ini akan dicari teknik perbaikan yang sesuai dengan kerusakan pada balok yaitu dengan teknik injeksi dan grouting kemudian dicari pengaruhnya terhadap kuat tekan beton sebelum perbaikan dengan setelah perbaikan. Dari perbaikan tersebut dapat dicari besarnya beban yang dapat ditahan oleh benda uji setelah perbaikan dan besarnya daktilitas pada benda uji tersebut. Pola keretakan pada benda uji setelah perbaikan juga diteliti serta pengaruh kuat tekan dan perbaikan terhadap pola keretakan tersebut, apakah berada pada tempat yang sama atau berada diluar daerah perbaikan. Kuat tekan beton dicari dengan menggunakan 3 cara yaitu uji silinder, *hammer test* dan *coredrill*, dari ketiga cara

tersebut dapat dibandingkan dan dicari pengaruhnya terhadap beban yang dapat diterima.



BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Umum

Salah satu material yang paling sering digunakan dalam dunia konstruksi adalah beton, beton adalah suatu campuran yang terdiri dari pasir, kerikil, batu pecah, atau agregat-agregat lain yang dicampur menjadi satu dengan suatu pasta yang dibuat dari campuran semen dan air membentuk suatu massa mirip batuan (Mc Cormac 2001).

Beton memiliki kuat tekan yang tinggi dan kuat tarik yang rendah. Beton bertulang merupakan suatu kombinasi antara beton dan baja dimana tulangan baja berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton.

3.2 Bahan Penyusun Beton

3.2.1 *Portland Cement*

Tahun 1824, Joseph Aspdin dari Leeds mendaftarkan hak paten semen hasil temuannya dengan nama *Portland Cement*, dan pada tahun 1875 untuk pertama kalinya semen tersebut diproduksi secara industrial di Coplay, Pennsylvania oleh David Saylor. *Portland Cement* dihasilkan dengan cara membakar campuran tanah liat halus dan batu kapur pada suhu tinggi tertentu yang bertujuan untuk membuang seluruh kandungan karbon dioksidanya. Nama *Portland Cement* sendiri diusulkan oleh Joseph Aspdin karena beton yang dihasilkan menyerupai batuan yang ada di Portland Inggris.

Menurut PUBI-1982 semen Portland mempunyai arti “Semen Portland: semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang terutama terdiri dari silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan”

Menurut Slamon (1994), semen adalah suatu jenis bahan yang memiliki sifat *adhesive* dan kohesif yang memungkinkan melekatnya fragmen-fragmen mineral menjadi suatu massa yang padat (Salmon, 1994). Dalam The Oxford

Word Encyclopedia (2003), dijelaskan bahwa segmen bubuk yang terdiri dari campuran *calcium silicates* dan *aluminates* yang dibuat dalam keadaan halus pada permukaan bentuknya, agar melekat satu sama lain.

Karena butiran semen yang halus maka semen berfungsi sebagai pengisi (*filler*) ruang/rongga/pori yang terbentuk di antara butir agregat dalam beton. Umumnya dalam campuran beton yang normal semen digunakan $\pm 10\%$ dari volume beton. Selain berfungsi sebagai pengisi rongga, semen portland juga berfungsi sebagai bahan perekat/pengikat. Semen disebut sebagai bahan ikat hidrolis karena baru akan berfungsi saat bercampur dengan air karena adanya reaksi kimiawi antara keduanya.

Semen mempunyai sifat fisik berupa serbuk (bubuk halus, $\pm 1/200$ inci atau $\pm 0,127$ mm), mempunyai daya kohesif dan adesif dan mempunyai berat jenis $\pm 3,15$. Selain sifat fisik semen yang disebutkan tadi, semen juga mempunyai sifat kimiawi. Semen diketahui mempunyai 4 senyawa utama yang dominan, yaitu 2 buah berbentuk senyawa silika dan 2 lainnya bentuk senyawa alumina, seperti yang terlihat dalam tabel berikut ini.

Tabel 3.1 Kandungan Senyawa Utama Semen Portland

Senyawa	Rumus Kimia	Symbol	% kandungan
Trikalsium Silikat	3CaOSiO_2	C3S	30-60
Dikalsium Silikat	2CaOSiO_2	C2S	20-45
Trikalsium Aluminat	$3\text{CaOA}_2\text{O}_3$	C3A	8-12
Tetrakalsium Aluminoferrat	$4\text{CaOA}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	6-10

Waktu ikat semen adalah waktu yang dibutuhkan oleh semen dan air (dalam bentuk bubuk) mulai secara bertahap berkurang keplastisannya, kemudian mengeras dan cukup tegar (*rigid*) untuk menahan suatu tekanan tertentu, dihitung dari saat diberikannya air. Waktu ikat semen dibagi menjadi 2 fase, yaitu waktu ikat awal, waktu saat mulai diberikannya air sampai saat pasta mulai hilang keplastisannya dan waktu waktu ikat akhir, waktu saat mulai dari selesainya ikatan awal sampai pasta mulai mengeras.

Menurut PUBLI, di Indonesia diproduksi 5 jenis semen portland, yaitu :

1. Jenis I : Semen jenis ini digunakan untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan syarat khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
2. Jenis II : Semen jenis ini dalam penggunaannya memerlukan ketahanan sulfat dan panas hidrasi sedang. Kadar C_3S sedang, sama besar dengan kadar C_3A , yaitu maksimal 8% alkali rendah.
3. Jenis III : Semen jenis ini dalam penggunaannya memerlukan kekuatan yang tinggi pada fase permulaan setelah terjadi pengikatan. Kadar C_3S -nya sangat tinggi dan butirannya sangat halus.
4. Jenis IV : Semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan panas hidrasi rendah, sehingga kadar C_3S dan C_3A rendah.
5. Jenis V : Semen portland yang dalam penggunaannya hanya memerlukan ketahanan yang tinggi terhadap sulfat.

3.2.2 Agregat

Menurut Tjokromuljo (2007), agregat adalah butiran mineral alami yang berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Agregat ini kira-kira menempati sebanyak 70% volume mortar atau beton. Walaupun namanya hanya sebagai bahan pengisi, akan tetapi agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat mortar/beton, sehingga pemilihan agregat merupakan suatu bagian penting dalam pembuatan mortar/beton.

Berdasarkan proses terbentuknya jenis agregat dibedakan menjadi, agregat alami dan agregat buatan. Agregat alami adalah agregat yang diperoleh dari batuan-batuan yang terbentuk secara alamiah, dapat berasal dari permukaan tanah atau galian, sungai dan pantai atau laut. Sedangkan agregat buatan adalah butiran-butiran yang sengaja dibuat menyerupai atau memiliki sifat yang sama atau difungsikan sama dengan agregat alami. Contoh dari agregat buatan adalah pecahan genteng, pecahan keramik dan bata, selain itu dapat juga merupakan hasil dari daur ulang limbah-limbah mineral.

Klasifikasi agregat berdasarkan bentuk dapat dikategorikan menjadi 3, yaitu agregat bulat, agregat pipih dan tak beraturan. Agregat bulat adalah butiran batuan yang tidak mempunyai sudut dan mempunyai perbandingan ukuran tiga

dimensi yang sama. Agregat pipih adalah butiran batuan yang mempunyai ukuran salah satu sisi lebih kecil daripada sisi lainnya. Tak beraturan adalah butiran batuan yang mempunyai bentuk permukaan dan perbandingan ukuran sisi-sisinya tidak beraturan dan mempunyai sudut-sudut runcing.

Berdasarkan berat jenis, agregat dikategorikan dalam :

- a. Agregat ringan : butiran mineral dengan berat jenis $< 2,0$
- b. Agregat normal : butiran mineral yang mempunyai berat jenis antara 2,5-2,7
- c. Agregat berat : butiran mineral dengan berat jenis $> 2,8$

Klasifikasi berdasarkan ukuran, jenis agregat terbagi dalam :

- a. Agregat halus

Menurut Nawy (1990), agregat halus adalah butiran alami yang mempunyai ukuran butir-butir kecil kurang dari 4,80 mm atau lolos dari lubang ayakan standart no.4.

Secara umum agregat halus sering disebut dengan pasir, baik itu pasir alami yang diperoleh langsung dari sungai atau tanah galian, atau hasil pecahan batu. Pasir alam terbentuk dari pecahan batu dan dapat diperoleh dari dalam tanah, pada dasar sungai, atau dari tepi laut. (Tjikrodimuljo, 2007)

- b. Agregat kasar

Yang disebut dengan agregat kasar adalah batuan yang mempunyai ukuran butiran diatas 5 mm. Batuan yang memiliki ukuran antara 5 mm sampai 40 mm biasanya disebut dengan kerikil, sedangkan batu mempunyai ukuran lebih besar dari 40 mm.

Dalam aplikasi pelaksanaan, agregat harus kuat, tahan lama, dan bersih. Jika terdapat debu atau partikel-partikel lain, debu dan partikel tersebut akan mengurangi ikatan antara pasta semen dengan agregatnya. Kekuatan agregat memberikan pengaruh penting pada kekuatan beton dan sifat-sifat agregat sangat mempengaruhi daya tahan beton (McCormac, 2001).

Syarat kadar tanah atau kotoran lain pada agregat halus jumlah kandungan lumpur tidak boleh lebih dari 5% dan pada agregat kasar kandungan kotoran ini dibatasi sampai maksimum 1% (Tjikrodimuljo, 1992).

3.2.3 Air

Air mempunyai peranan yang penting dalam pembuatan beton, salah satunya adalah tanpa air semen tidak bisa menjadi pasta. Air merupakan alat untuk mendapatkan kelecakan yang perlu untuk penuangan beton. Jumlah air yang diperlukan untuk kelecakan tertentu tergantung pada sifat material yang digunakan. Hukum kadar air konstan mengatakan: “Kadar air yang diperlukan untuk kelecakan tertentu *hampir konstan* tanpa tergantung pada jumlah semen, untuk kombinasi agregat halus dan kasar tertentu”. Hukum ini tidak selalu berlaku untuk seluruh kisaran (*range*), namun cukup praktis untuk penyesuaian perencanaan dan koreksi. Jumlah air yang diperlukan dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu :

- 1) Ukuran agregat maksimum : diameter yang semakin membesar akan menyebabkan kebutuhan air menurun, begitu pula jumlah mortar yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit.
- 2) Bentuk butir : Bentuk agregat yang bulat akan menyebabkan kebutuhan air menurun, sedangkan untuk batu pecah perlu lebih banyak air.
- 3) Gradasi agregat : Gradasi yang baik akan menyebabkan menurunnya kebutuhan air untuk kelecakan yang sama.
- 4) Kotoran dalam agregat : makin banyak silt, tanah liat dan lumpur menyebabkan kebutuhan air meningkat.
- 5) Jumlah agregat halus (dibandingkan agregat kasar, atau h/k): Jumlah agregat halus yang lebih sedikit maka kebutuhan air akan menurun.

Air yang mengandung kotoran yang cukup banyak akan mengganggu proses pengerasan atau ketahanan beton. Kotoran dalam air secara umum dapat menyebabkan :

- 1) Gangguan pada hidrasi dan pengikatan
- 2) Gangguan pada kekuatan dan ketahanan
- 3) Perubahan volume yang dapat menyebabkan keretakan
- 4) Korosi pada tulangan baja maupun kehancuran beton
- 5) Bercak-bercak pada permukaan beton

Air yang digunakan harus memenuhi persyaratan yang telah ditentukan dalam SK-SNI No S-04-1989-F, yaitu :

1. Air harus bersih
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda-benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual
3. Tidak mengandung bahan-bahan tersuspensi lebih dari 2 g/l
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dsb) lebih dari 15 g/l. kandungan klorida (Cl) tidak lebih dari 500 ppm dan senyawa sulfat tidak lebih dari 100 ppm sebagai SO₃.

3.2.4 Faktor Air semen

Faktor air semen merupakan perbandingan antara berat air dengan berat semen. Faktor air semen berpengaruh terhadap sifat-sifat seperti permeabilitas, ketahanan terhadap gaya dan cuaca, kuat tarik, kuat geser, kuat lentur, dan kuat desak. Hubungan antara faktor air semen (fas) dan kuat tekan beton secara umum dapat ditulis dengan rumus yang diusulkan Duff Abrams pada tahun 1919 sebagai berikut :

$$f'_c = \frac{A}{B^{1,5X}} \dots\dots\dots (3.1)$$

- dengan :
- f'_c = Kuat tekan beton
 - X = fas (Semula dalam proporsi volume)
 - A,B = Konstanta

Semakin besar faktor air semennya semakin rendah kuat tekan betonnya. Walaupun menurut rumus tersebut semakin rendah faktor air semen semakin tinggi kekuatan betonnya tetapi karena kesulitan pemadatan maka dibawah faktor air semen tertentu (yaitu sekitar 0,40) kekuatan beton akan lebih rendah, dikarenakan beton yang kurang padat akibat dari sulitnya pemadatan. Dengan demikian ada suatu nilai faktor air semen optimum yang menghasilkan kuat tekan beton maksimum.

3.3 Baja Tulangan

Baja tulangan beton adalah baja berbentuk batang berpenampang bundar yang digunakan untuk penulangan beton, yang diproduksi dari bahan baku billet dengan cara canai panas (SNI 07-2052-2002).

Tulangan yang digunakan pada struktur beton terdapat dalam bentuk batang atau anyaman kawat yang dilas (*welde wire fabric*). Batang tulangan mengacu kepada tulangan polos (*plain bar*) atau tulangan ulir (*deformed bar*). Tulangan ulir, yang diberi ulir melalui proses rol pada permukaannya (polanya berbeda tergantung dari pabrik pembuatnya) untuk mendapatkan ikatan yang lebih baik antara beton dan baja, digunakan untuk hamper semua aplikasi. Berbeda dengan tulangan ulir, kawat ulir diberi gerigi yang dicetak padanya. Tulangan polos jarang digunakan kecuali untuk membungkus tulangan longitudinal, terutama pada kolom (McCormac, 2001).

Tulangan polos biasanya mempunyai tegangan leleh minimum sebesar 240 MPa, sedangkan tulangan ulir umumnya mempunyai tegangan leleh sebesar 400 MPa. Diameter dan berat per meter baja tulangan beton polos dapat dilihat pada Tabel 3.2, sedangkan diameter, ukuran sirip dan berat per meter baja tulangan beton sirip seperti tercantum pada Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Ukuran baja tulangan beton polos (SNI 07-2052-2002)

No	Penamaan	Diameter nominal (d) (mm)	Luas penampang nominal (L) (cm ²)	Berat nominal per meter (kg/m)
1	P.6	6	0,2827	0,222
2	P.8	8	0,5027	0,395
3	P.10	10	0,7854	0,617
4	P.12	12	1,131	0,888
5	P.14	14	1,539	1,12
6	P.16	16	2,011	1,58
7	P.19	19	2,835	2,23
8	P.22	22	3,801	2,98

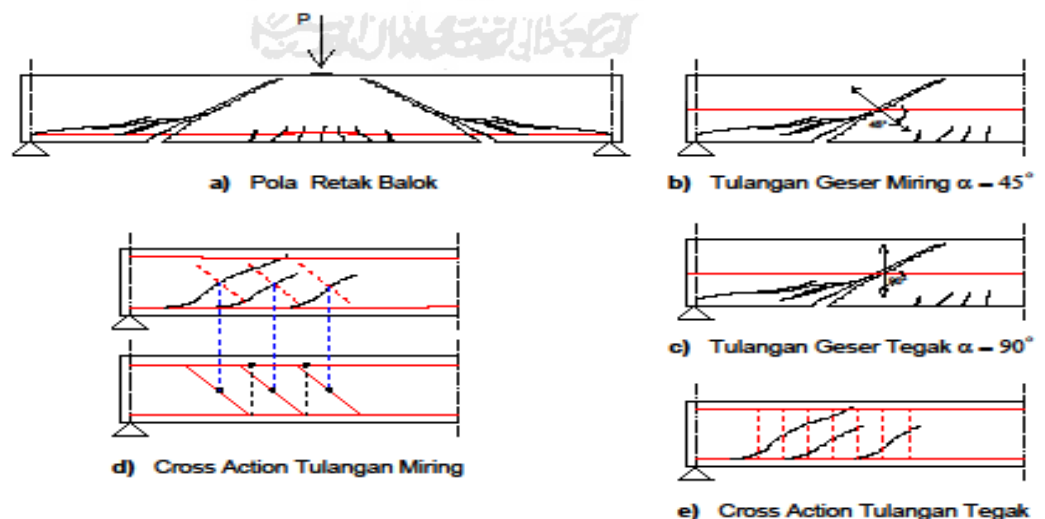
Tabel 3.2 (Lanjutan)

9	P.25	25	4,909	3,85
10	P.28	28	6,158	4,83
11	P.32	32	8,042	6,31

3.3.1 Macam-macam Tulangan Geser

Sebetulnya balok beton dan tulangan lentur sudah mampu mengarahkan kekuatan geser sebesar V_c tanpa adanya tulangan geser tambahan. Apabila gaya geser yang terjadi $\frac{V_u}{\phi} < V_c$, maka secara teoritik balok tidak memerlukan tulangan geser. Tetapi gaya geser yang terjadi biasanya cukup besar, terutama pada balok tinggi, oleh karena itu tambahan gaya geser dari baja tulangan tetap dibutuhkan.

Pada gambar 3.1.a) pola retak balok kemudian diperbesar menjadi gambar 3.1.b) dan gambar 3.1.c). Gambar 3.1.b) adalah jenis tulangan geser miring, sedangkan gambar 3.1.c) adalah jenis tulangan geser tersebut adalah dalam rangka melawan memotong tegangan tarik yang mengakibatkan *crack* sebagaimana tampak pada gambar 3.1.d) dan gambar 3.1.e).



Gambar 3.1 Macam-macam Tulangan Geser

Jenis umum penulangan geser seperti yang terlihat pada gambar diatas adalah sengkang yang tegak lurus dengan tulangan memanjang, sengkang yang membuat sudut 45^0 atau lebih dengan tulangan memanjang, pembengkokan dari tulangan memanjang sehingga as dari bagian yang dibengkokkan membuat sudut 30^0 atau lebih dengan as memanjang dan kombinasi dari beberapa penulangan yang telah disebutkan.

Penulangan geser yang terlalu sedikit jumlahnya akan meleleh segera setelah retak miring, dan kemudian balok runtuh. Jika penulangan geser terlalu tinggi jumlahnya, akan terjadi keruntuhan geser-tekan sebelum melelehnya tulangan web. Jumlah penulangan geser yang optimal harus sedemikian hingga tulangan geser dan daerah beton tekan kedua-duanya terus memikul geser setelah pembentukan dari retak miring sampai melelehnya tulangan geser, dengan demikian menjamin suatu keruntuhan yang daktail (Wang dan Salmon, 1993).

Nawy (1996) menyampaikan bahwa fungsi utama tulangan geser adalah :

1. Menahan sebagian besar gaya geser atas gaya geser eksternal ($\frac{Vu}{\phi}$),
2. Menahan berlanjutnya *crack*,
3. Memegang tulangan pokok (tulangan desak dan tarik) agar tetap pada tempatnya,
4. Membentuk sistim pengekanan *confinement* pada beton agar tidak terjadi retak-retak,
5. Menahan tulangan pokok desak agar tidak *buckling*,
6. Meningkatkan/memelihara daktilitas potongan.

3.3.2 Rasio Tulangan Geser

Tulangan geser miring umumnya dipasang dengan cara membelokkan tulangan tarik positif keatas. Dalam hal ini luas potongan tulangan cukup besar, tetapi tulangan geser miring ini dirasa kurang atau tidak praktis sehingga sekarang ini jarang dipakai. Apabila demikian maka tulangan geser yang dipakai adalah sengkang (*stirrups*) vertikal. Diameter sengkang yang akan dipakai bergantung pada ukuran balok yang dipakai atau gaya lintang yang ada umumnya P8, P10, dan kalau balok besar dapat digunakan D10, D13 bahkan D16 .

Sebagaimana pada tulangan lentur, sengkang vertikal juga mempunyai batasan jarak, terutama adalah jarak maksimum. Batasan tentang jarak maksimum sengkang tersebut diatur secara jelas di *Codes* atau peraturan-peraturan. Jarak sengkang maksimum pada kolom berbeda dengan balok, sehubungan dengan adanya kemungkinan tekuk/*buckling* terhadap tulangan pokok akibat adanya gaya aksial pada kolom.

Dihindarinya *buckling* terhadap tulangan pokok juga harus diperhatikan pada daerah-daerah sendi plastis (*plastic hinges*) pada balok. Hal ini terjadi karena tulangan yang *buckle* akan menurunkan daktilitas potongan. Untuk itu perlu ada jarak maksimum sengkang.

1. Jarak maksimum sengkang pada balok

a. Daerah sendi plastis

Menurut pasal 3.14.3.3).(2) SK-SNI 1991, jarak sengkang (s) adalah :

$$s \leq h/4$$

h = tinggi efektif balok

$$s \leq 8 d_1$$

d_1 = diameter tulangan lentur

$$s \leq 24 d_s$$

d_s = diameter tulangan sengkang

$$s \leq 20 \text{ cm}$$

b. Daerah luar sendi plastis

$$s \leq h/2$$

2. Jarak maksimum sengkang pada kolom

a. Daerah sendi plastis

Menurut pasal 3.14.4.4).(2) SK-SNI 1991, jarak sengkang (s) adalah :

$$s \leq b_c/4$$

b_c : lebar/ukuran terkecil kolom

$$s \leq 8 d_1$$

$$s \leq 10 \text{ cm}$$

b. Daerah luar sendi plastis

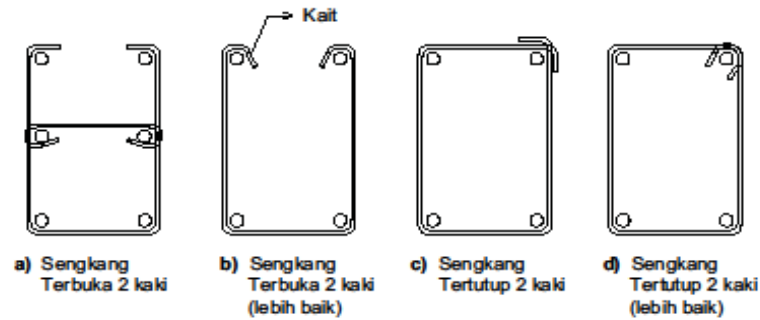
Menurut pasal 3.16.10.5).(2) SK-SNI 1991

$$s \leq 16 d_1$$

$$s \leq 48 d_s$$

$$s \leq \text{ukuran terkecil komponen struktur tersebut}$$

Selain itu secara teoritis terdapat bermacam-macam kemungkinan bentuk sengkang vertikal. Bentuk-bentuk itu mulai dari sengkang pengikat (1 kaki), sengkang terbuka 2 kaki dan sengkang tertutup 2 kaki. Sengkang tertutup akan berfungsi lebih baik daripada sengkang-sengkang yang lain.



Gambar 3. 2 Macam-macam tulangan sengkang

Menurut SK SNI T-15-1991-03 pembengkokan tulangan harus memenuhi ketentuan berikut :

1. Bengkokan 180-derajat ditambah bagian yang lurus sepanjang 4db dengan minimum 60 mm pada ujung batang bebas,
2. Bengkokan 90-derajat ditambah bagian yang lurus sepanjang 12db pada ujung batang bebas,
3. Untuk sengkang dan kait pengikat :
 - a. Batang D-16 dan yang lebih kecil, bengkokan 90-derajat ditambah bagian yang lurus 6db pada ujung batang bebas, atau
 - b. Batang D-19 dan D-25, bengkokan 90-derajat ditambah bagian yang lurus sepanjang 12db pada ujung batang bebas, atau
 - c. Batang D-25 dan yang lebih kecil, bengkokan 135-derajat ditambah bagian yang lurus sepanjang 6db pada ujung batang bebas.
 - d. Untuk kait pengikat tertutup yang didefinisikan sebagai sengkang ikat tertutup, suatu bengkokan 135-derajat ditambah dengan suatu perpanjangan paling sedikit 10db, kurang daripada 4db untuk kawat deform yang lebih besar daripada D6 dan 2db untuk kawat lainnya.

Bengkokan dengan diameter dalam kurang daripada 8db tidak boleh mempunyai jarak kurang dari 4db dari persilangan las terdekat.

3.4 Kuat Geser oleh Beton (Vc)

Balok beton dan tulangan tarik balok mampu mengerahkan kekuatan geser sebesar Vc yang diperoleh dari uji laboratorium balok beton dan kemudian dirumuskan secara empiris. Nilai Vc dapat ditentukan secara konstan, namun agar lebih teliti dapat dihitung dengan memperhatikan rasio $\frac{Vu}{Mu}$.

Menurut SK-SNI 1991, kuat geser Vc yang dianggap konstan dapat dihitung dengan,

1. Untuk komponen yang dibebani oleh lentur dan geser (pasal 3.4.3.1)(1)

$$Vc = \frac{1}{6} \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot h \dots\dots\dots(3.2)$$

2. Untuk komponen yang dibebani oleh gaya aksial desak (pasal 3.4.3.1)(2)

$$Vc = 2 \left(1 + \frac{Nu}{14Ag} \right) \frac{1}{6} \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot h \dots\dots\dots(3.3)$$

Setelah nilai Vc ditentukan, maka langkah selanjutnya adalah menghitung Vs. Apabila gaya geser oleh sengkang Vs telah diperoleh, maka langkah selanjutnya adalah menentukan jarak sengkang (s).

3.5 Kuat Lentur

Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di daerah $\frac{1}{3}$ jarak titik perletakan pada bagian tarik dari beton, maka kuat lentur beton dihitung dengan persamaan :

$$\sigma_1 = \frac{P \cdot L}{b \cdot h^2} \dots\dots\dots(3.4)$$

Untuk pengujian dimana patahnya benda uji di luar pusat (di luar daerah $\frac{1}{3}$ jarak titik perletakan) dibagian tarik beton, dan jarak antara titik pusat dan titik patah kurang dari 5% dari panjang titik perletakan, maka kuat lentur beton dihitung dengan persamaan :

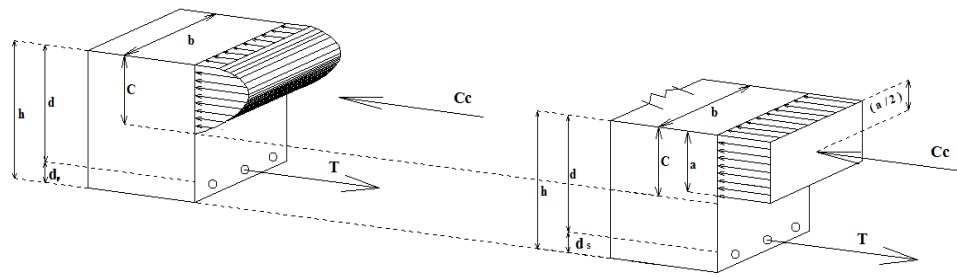
$$\sigma_1 = \frac{3 \cdot P \cdot A}{b \cdot h^2} \dots\dots\dots(3.5)$$

dengan,

- σ_1 = Kuat Lentur benda uji (MPa)
- P = beban tertinggi yang ditunjukkan mesin penguji
- L = jarak antara dua garis perletakan (mm)
- b = lebar tampang lintang patah arah horizontal (mm)
- h = lebar tampang lintang patah arah vertikal (mm)
- A = jarak rata-rata antara tampang lintang patah dengan tumpuan luar yang terdekat, diukur pada empat tempat sisi tarik bentangan (mm).

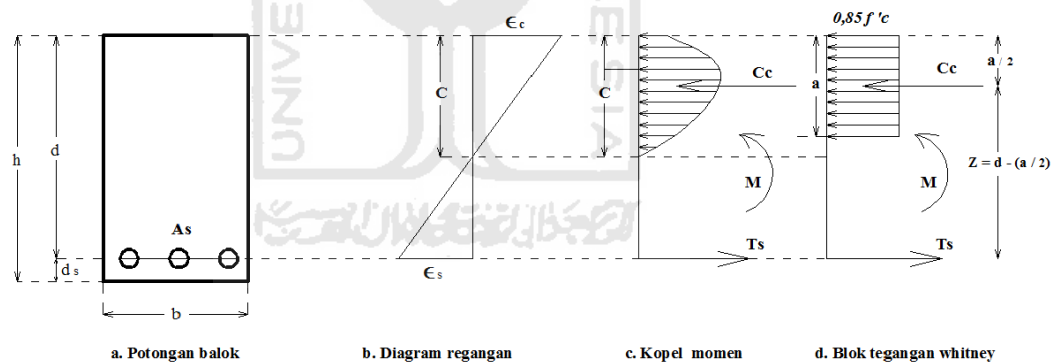
3.6 Blok Tegangan Desak Whitney

Apabila suatu balok dibebani oleh beban gravitasi maka balok akan melentur, hal tersebut berarti bahwa proses lentur (*flexure*) telah terjadi pada balok tersebut. Akibat lentur (*flexure*) maka akan terjadi perlawanan oleh kekuatan bahan yang ditunjukkan oleh kopel gaya desak C dan gaya tarik T sebagai mana tampak pada gambar 3.3 pada dasarnya distribusi tegangan desak beton adalah non-linier. Kesulitan pertama adalah dalam menentukan besarnya gaya desak beton C_c , karena tegangan desak beton bervariasi mulai dari nol di garis netral sampai tegangan desak maksimum. Oleh karena itu, untuk mempermudah hitungan Whitney pada tahun 1930 melakukan penyederhanaan blok tegangan desak beton non-linier menjadi balok tegangan desak terbagi rata atau sama berupa blok persegi yang seterusnya dinamakan “*equivalent concrete stress block Whitney*” seperti tampak pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Kopel tegangan desak dan tarik (Whitney, 1930)

Notasi-notasi yang tampak pada gambar tersebut adalah notasi standar yang kebanyakan dipakai. C_c adalah gaya desak beton (concrete compressive strength), T_s adalah gaya tarik baja (tensile steel), A_s adalah luas potongan (total) baja tulangan (area steel), sedangkan h_b , h , dan b masing-masing adalah tinggi total balok, tinggi balok efektif, dan lebar balok, sedangkan d adalah jarak dari as tulangan sampai tepi lebar balok, ϵ_s adalah regangan tarik baja, c adalah tebal beton desak dan a adalah tebal ekivalen blok tegangan desak whitney.



Gambar 3.4 Distribusi tegangan persegi *equivalent*

Gambar 3.4 (a) adalah gambar potongan balok persegi dengan tulangan sebelah, dengan luas tulangan A_s . Gambar 3.4 (b) adalah diagram regangan, dengan regangan desak ultimit beton ϵ_c dan regangan baja tarik ϵ_s . Distribusi tegangan desak beton yang terbangun parabolik kemudian disederhanakan menjadi ekivalent blok tegangan dengan tegangan maksimum sebesar $0,85.f'_c$ dan dengan tinggi blok sebesar a , seperti tampak pada Gambar 3.4 (d).

Keseimbangan gaya-gaya pada potongan balok

$$C_c = T_s \dots \dots \dots (3.6)$$

gaya desak beton C_c adalah volume tegangan desak sehingga persamaan untuk gaya desak beton adalah

$$C_c = (0,85f'_c \cdot a) \cdot b \dots \dots \dots (3.7)$$

gaya tarik tulangan adalah perkalian antara luasan tulangan dengan tegangan leleh baja sehingga

$$T_s = A_s f_y \dots \dots \dots (3.8)$$

tebal beton desak a , didapat dengan mensubstitusikan persamaan 3.11 dan 3.12 kedalam persamaan 3.10 sehingga

$$0,85f'_c \cdot a \cdot b = A_s f_y$$

$$a = \frac{A_s \cdot f_y}{0,85 \cdot f'_c \cdot c \cdot b} \dots \dots \dots (3.9)$$

hubungan antara tebal beton desak, dengan jarak antara tepi beton desak ke garis netral C , adalah

$$a = \beta_1 \cdot C$$

$$C = a / \beta_1 \dots \dots \dots (3.10)$$

nilai β_1 adalah konstanta yang merupakan fungsi dari kuat tekan beton. Menurut SNI 03-2847-2002 pasal 12.2.7 dijelaskan bahwa :

$$f'_c < 30 \text{ MPa dipakai } \beta_1 = 0,85$$

$$30 \text{ MPa} < f'_c < 55 \text{ MPa dipakai } \beta_1 = 0,85 - 0,008 (f'_c - 30)$$

$$f'_c > 55 \text{ MPa dipakai } \beta_1 = 0,65$$

setelah nilai a diperoleh, maka momen yang dapat dikerahkan oleh potongan balok adalah

$$M_n = C_c (d - a/2)$$

$$= 0,85f'_c \cdot a \cdot b (d - a/2) \dots \dots \dots (3.11)$$

3.7 Momen Retak

Peraturan ACI menyatakan bahwa momen retak suatu penampang dapat ditentukan pada rumus 3.25, dimana f_r adalah modulus keruntuhan beton, dan y jarak dari garis netral penampang ke serat bawah penampang beton. Besarnya nilai f_r dapat diambil sebesar $7,5\sqrt{f'_c}$ untuk beton dengan berta normal dengan

f'_c dalam psi, sedangkan dalam satuan SI dengan f'_c dalam satuan MPA besarnya nilai $f_r = 0.7\sqrt{f'_c}$.

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_y}{y} \dots\dots\dots (3.12)$$

dengan : I_y = inersia momen penampang,

y = jarak dari garis netral penampang ke serat bawah penampang beton.

Ketika balok retak, penampang menjadi tidak utuh lagi. Balok yang semula mempunyai ukuran tinggi (h) dan lebar (b) tertentu, menjadi tidak efektif lagi hal ini dikarenakan tinggi balok yang utuh menjadi berkurang akibat adanya retak. Oleh karena itu momen inersia yang dipakai bukan lagi $(1/12) \cdot b \cdot h^3$ melainkan lebih kecil lagi, sehingga dengan bertambah kecilnya momen inersia dari penampang balok maka lendutan yang terjadi tentunya akan bertambah besar.

3.8 Mekanisme Pembebanan Balok

Kemampuan suatu balok dalam memikul tambahan beban setelah terbentuknya retak miring tergantung dari dapat tidaknya sebagian geser yang sebelumnya dipikul oleh beton yang tidak retak, didistribusikan kembali melalui retak miring. Mulainya retak miring dan pertumbuhannya tergantung dari besar relatif dari tegangan geser v dan tegangan lentur f_t , tegangan penentu ini dapat dinyatakan sebagai

$$v = k_1 \frac{V}{bd} \dots\dots\dots (3.13)$$

$$f_t = k_2 \frac{M}{bd^2} \dots\dots\dots (3.14)$$

dimana k_1 dan k_2 adalah tetapan perbandingan.

Dapat dicatat bahwa tegangan tarik prinsipal adalah fungsi dari perbandingan f_t/v . Rumus lain untuk f_t/v dapat diperoleh dari persamaan 3.13 dan 3.14;

$$\frac{ft}{v} = \frac{k2}{k1} = \frac{M}{Vd} = k2 \frac{M}{Vd} \dots\dots\dots(3.15)$$

Untuk balok sederhana yang dibebani dengan dua beban terpusat yang simetris, harga perbandingan M/V dapat dianggap sebagai daerah sejarak a yang mempunyai geser yang konstan. Jarak a ini dikenal sebagai bentang geser (*shear span*). Untuk hal yang umum dimana geser secara menerus berubah, bentang geser dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$a = \frac{M}{V} \dots\dots\dots(3.16)$$

yang mempunyai harga pada setiap titik di sepanjang balok.

Dengan menggunakan persamaan 3.16 ke dalam persamaan 3.15, perbandingan ft/v menjadi

$$\frac{ft}{v} = k3 \left(\frac{a}{d} \right) \dots\dots\dots(3.17)$$

Perbandingan bentang geser terhadap tinggi balok a/d, juga secara eksperimen telah dibuktikan sebagai suatu faktor yang berpengaruh didalam menetapkan kekuatan geser. Dapat ditetapkan empat kategori umum dari keruntuhan, yaitu:

1. Balok tinggi

a/d ≤ 1, untuk suatu balok tinggi, tegangan geser mempunyai pengaruh yang besar. Pola keruntuhan yang mungkin terjadi yaitu keruntuhan angker, yakni lepasnya tulangan tarik dari perletakan, kehancuran yang terjadi di daerah perletakan, keruntuhan lentur (*flexure failure*), yang timbul akibat hancurnya beton di bagian atas dari pelengkung atau akibat melelehnya tulangan tarik, dan keruntuhan dari rib pelengkung akibat eksentrisitas dari tekanan di dalam pelengkung, yang mengakibatkan retak tarik diatas perletakan atau kehancuran beton pada bagian bawah rib.

2. Balok pendek

1 < a/d ≤ 2,5, balok pendek memiliki kekuatan geser yang melebihi kekuatan retak miring. Setelah retak lentur terjadi, retak merambat lebih jauh ke dalam daerah tekan seiring dengan naiknya beban. Retak ini juga merambat sebagai retak sekunder menuju tulangan tarik dan kemudian menerus secara horisontal sepanjang penulangan. Keruntuhan yang mungkin terjadi adalah

keruntuhan angker pada tulangan tarik yang disebut dengan keruntuhan geser-tarik (*shear-tension*) dan keruntuhan geser-tekan (*shear-compression*).

3. Balok biasa dengan panjang sedang

$2,5 < a/d \leq 6$, retak yang pertama terbentuk pada balok ini adalah retak lentur vertikal kemudian disusul oleh retak lentur-geser miring. Pembentukan dari retak miring mencerminkan kekuatan geser dari balok dari kategori ini yang telah diberikan istilah keruntuhan tarik diagonal, kategori ini yang umum di dalam perencanaan balok.

4. Balok panjang

$a/d > 6$, pada kondisi ini, keruntuhan sepenuhnya ditentukan oleh ragam lentur.

3.9 Jenis-Jenis Retak

3.9.1 Retak Pada Beton

Retak pada beton terjadi karena pada saat beton mengering dengan cepat permukaan beton mengalami tegangan tarik yang lebih besar daripada kekuatan tariknya. Selain itu retak dapat juga terjadi karena adanya perbedaan temperatur yang tinggi (sampai 20^0 C) antara bagian dalam dengan bagian luar beton akibat adanya perbedaan muai. Beton merupakan struktur yang mudah retak karena mempunyai kuat tarik yang kecil. Macam-macam retak pada beton adalah :

1. Retak akibat penurunan plastis

Retak akibat penuruna plastis terjadi karena adanya perbedaan penurunan akibat dari bleeding. Bleeding mungkin tidak tampak karena penguapan terjadi lebih cepat dari naiknya air ke permukaan. Retak mengurangi penutup beton bahkan kadang-kadang dapat sampai ke tulangan sehingga mengakibatkan korosi.

2. Retak akibat susut plastis (*Plastic Shrinkage Cracks*)

Retak ini disebabkan oleh susut akibat menguapnya air. Penguapan yang cepat dari kelembapan permukaan yang terekspos dari beton segar bias terjadi setelah penyelesaian (*finishing*) selesai tetapi sebelum dimulainya perawatan (*curing*). Jika pada tahap ini bleeding telah berhenti namun kekuatan tarik beton masih sangat minim, maka kondisi ini sangat kondusif untuk terjadinya retak penyusutan plastis.

Resiko retak plastis tinggi apabila kecepatan penguapan lebih dari 1 kg/m²/jam. Pada daerah beriklim tropis kondisi seperti ini sudah umum, apalagi bila temperature betonnya sendiri sudah tinggi.

3. Retak Rambut (*Microcracking*)

Dari penelitian yang cukup lama telah terbukti bahwa retak rambut (lebar maksimum 0,25 mm) tidak mempengaruhi ketahan beton apabila penutup beton cukup tebal dan beton dipadatkan dengan baik).

3.9.2 Retak Pada Balok Beton Bertulang

Menurut McCormac(2001), beberapa jenis retak pada beton bertulang antara lain adalah :

1. Retak lentur

Retak lentur adalah retak vertical yang memanjang dari sisi tarik balok dan mengarah ke atas sampai daerah sumbu netralnya. Jika balok mempunyai web yang sangat tinggi (lebih dari 3 atau 4 ft), jarak retak akan sangat dekat, dengan sebagian retak terjadi bersamaan sampai diatas tulangan, dan sebagian lagi tidak sampai ke tulangan. Retak ini akan lebih lebar di pertengahan balok daripada di bagian dasarnya.

2. Retak geser

Retak miring karena geser dapat terjadi pada bagian web balok beton bertulang baik sebagai retak bebas atau perpanjangan retak lentur. Kadang-kadang, retak miring akan berkembang secara bebas pada balok meskipun tidak ada retak lentur pada daerah tersebut. Retak ini disebut dengan *retak geser web*, kadang-kadang terjadi pada web-web penampang prategang, terutama penampang dengan flens yang besar dan web yang tipis. Jenis retak geser yang paling umum adalah *retak geser-lentur*, yang umumnya terjadi pada balok prategang dan non prategang.

3. Retak puntir (*torsion crack*)

Retak ini cukup mirip dengan retak geser terkecuali retak puntir ini melingkar di sekeliling balok. Jika sebuah batang balok tanpa tulangan menerima torsi murni, batang tersebut akan retak dan runtuh di sepanjang garis spiral 45⁰ karena tarik diagonal yang disebabkan tegangan puntir. Meskipun tegangan puntir

sangat mirip dengan tegangan, namun tegangan puntir terjadi di seluruh permukaan batang. Akibatnya, tegangan puntir ini menambah tegangan geser pada satu sisi dan mengurangi tegangan geser pada sisi yang lain.

3.10 Perbaikan Balok Beton Bertulang

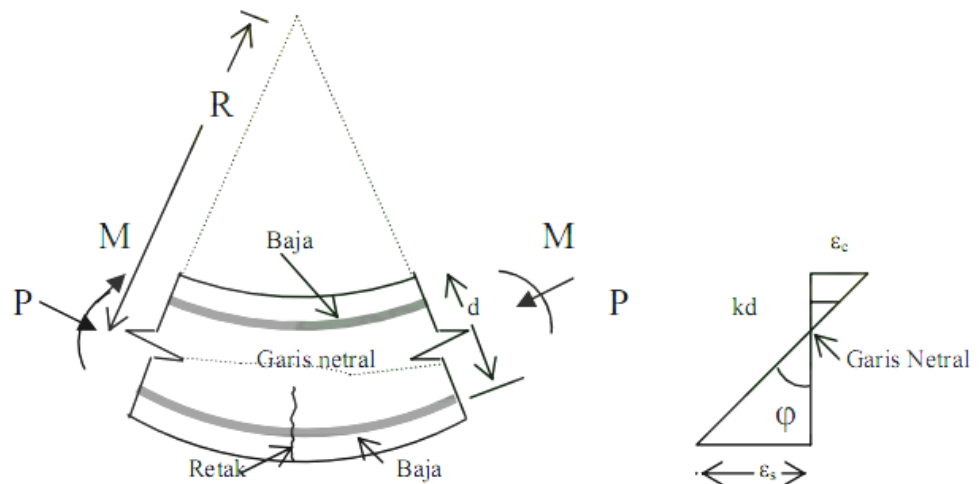
Perbaikan pada balok beton bertulang bertujuan untuk mengembalikan fungsi dan kinerja dari struktur yang rusak agar dapat kembali seperti semula. Perbaikan dilakukan apabila kerusakan yang terjadi menyebabkan degradasi kekuatan, kekakuan, stabilitas, ketahanan terhadap kinerja tertentu dari fungsi bangunan.

Ada beberapa teknik untuk menyelesaikan masalah-masalah yang dikarenakan oleh retak pada beton. Metode yang umumnya dipakai untuk memperbaiki retak agar beton bertulang kembali ke fungsinya semula adalah dengan menempatkan material polymer ke bagian retakan/patahan. *Liquid adhesive* seperti epoxy, polyester dan acrylic adalah bahan-bahan yang umumnya digunakan untuk mengembalikan kemampuan beton mentransfer beban. Bahan *adhesive* ini menjadi kuat dan penempatannya pada area yang retak mungkin mengubah kebiasaan dari struktur. Penggunaan *polymer adhesive* akan merekatkan retakan dan mencegah terjadinya pergerakan/pelebaran retak.

Injeksi grouting pada beton yang retak untuk mengembalikan beton agar kembali monolit merupakan perkembangan yang bagus pada teknik perbaikan ini. Epoxy dan *methacrylate resins* adalah bahan *adhesive* yang biasa digunakan untuk perbaikan dengan teknik injeksi.

3.11 Kelengkungan

Sebuah beton bertulang yang pada mulanya lurus, akibat adanya momen ujung dan gaya aksial maka balok menjadi lengkung seperti diperlihatkan pada gambar 3.8



Gambar 3.5 Hubungan momen-*curvature* untuk penampang balok

Adapun jari-jari kurvatur (R), tinggi sumbu netral (kd), regangan beton pada serat terluar (ϵ_c) dan tegangan-regangan baja (ϵ_s) akan berubah-ubah sepanjang bentang karena adanya retak pada beton yang memberikan tegangan. Dengan pertimbangan hanya satu elemen panjang dx dan penggunaan notasi pada gambar diatas maka notasi antara ujung-ujung elemen diberikan oleh :

$$\frac{dx}{R} = \frac{\epsilon_c dx}{kd} = \frac{\epsilon_s dx}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.18)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} \dots\dots\dots(3.19)$$

$1/R$ adalah kelengkungan pada elemen (rotasi perpanjang satuan) dan diberi simbol ϕ .

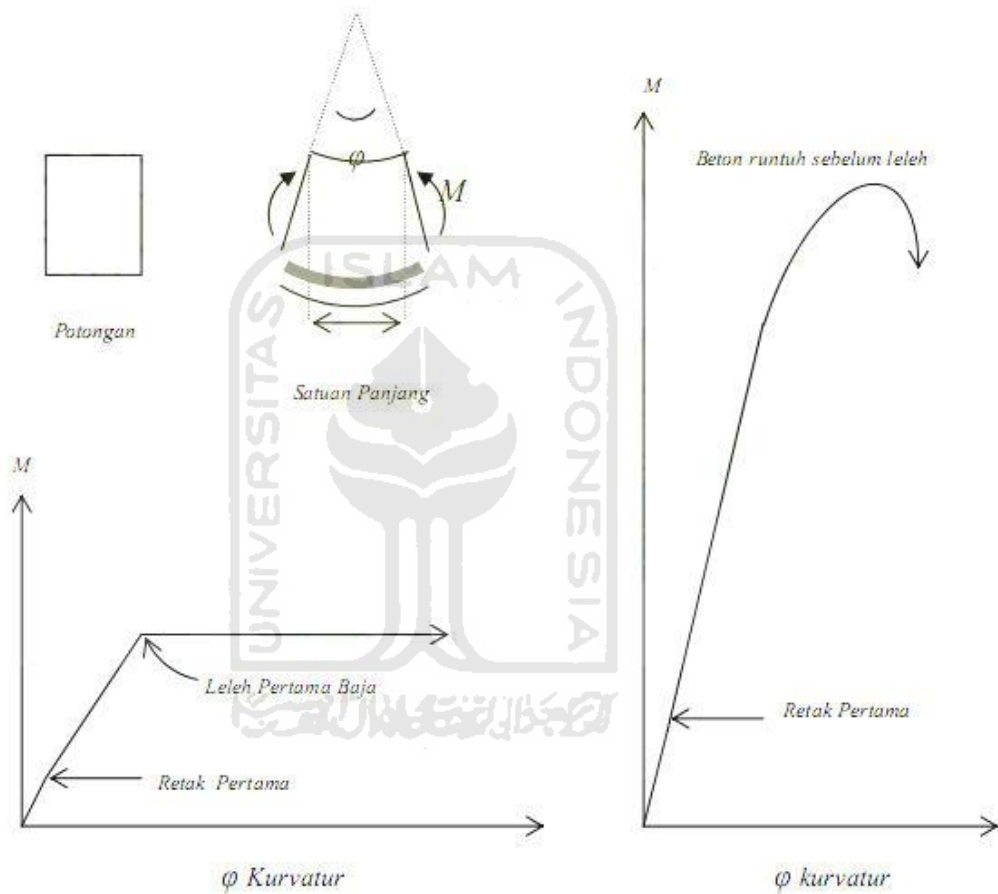
$$\phi = \frac{\epsilon_c}{kd} = \frac{\epsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d} \dots\dots\dots(3.20)$$

Kurvatur selalu berubah-ubah sepanjang bentang karena adanya fluktuasi ketinggian sumbu netral dan regangan antara setiap retak. Jika panjang elemen memiliki retak, kurvatur didapat dari persamaan 3.20, dengan ϵ_c dan ϵ_s sebagai regangan pada bagian retak.

Jika regangan pada bagian krisis balok beton bertulang yang diukur atas jarak ukur pendek sebagai momen lentur ditingkatkan untuk mencapai

keruntuhan, dihitung dari persamaan 3.23, maka hubungan momen-kurvatur untuk bagian tersebut dapat diperoleh. Kedua kurva diperoleh pada perhitungan balok bertulang tunggal saat gagal tarik dan tekan seperti pada gambar 3.9 dan kedua kurva pada mulanya linier. Hubungan antara momen (M) dan kelengkungan (ϕ) diberi oleh persamaan elastis berikut ini :

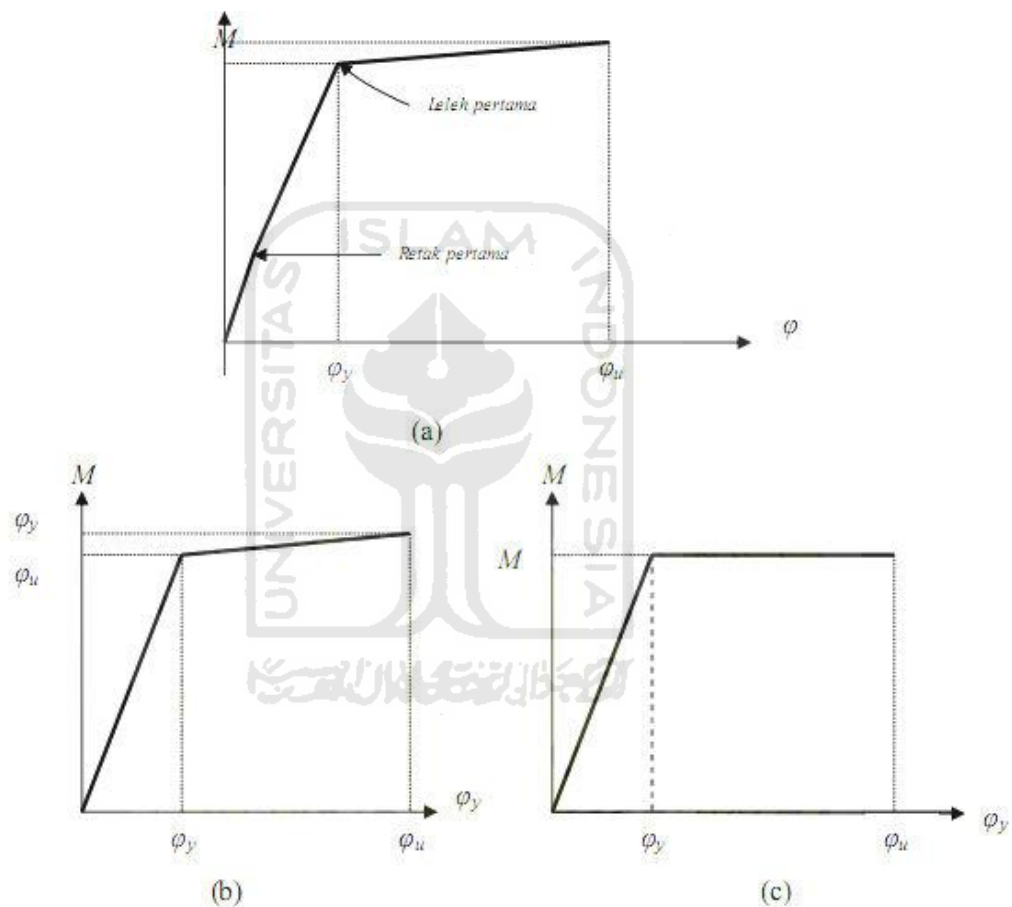
$$EI = MR = \frac{M}{\phi} \dots\dots\dots(3.21)$$



Gambar 3.6 Hubungan momen kurvatur untuk bagian balok beton bertulangan tunggal

Dengan meningkatnya momen maka retak yang timbul pada beton mengurangi kekuatan lentur. Pengurangan kekuatan untuk potongan beton dengan tulangan kecil lebih besar dibanding beton dengan tulangan besar. Perilaku potongan setelah retak sangat bergantung pada mutu baja. Potongan beton dengan tulangan kecil (Gambar 3.6 kiri) menghasilkan kurva linier $M-\phi$ menjadi membengkok sampai ke titik leleh baja. Saat baja leleh, kurvatur meningkat

dengan pesat sedangkan momen lentur hampir konstan, momen meningkat secara perlahan-lahan menuju maksimum dan kemudian menurun. Pada potongan beton dengan tulangan besar (Gambar 3.6 kana), kurva $M-\phi$ menjadi tidak linier ketika beton memasuki bagian inelastik hubungan tegangan-regangan dan keruntuhan dapat menjadi getas kecuali jika beton dikekang oleh sengkang tertutup. Jika beton tidak dikekang, maka beton akan hancur pada kurvatur yang relatif kecil walaupun baja saat itu belum meleleh, dan ini menyebabkan kapasitas daya dukung momen turun dengan cepat.



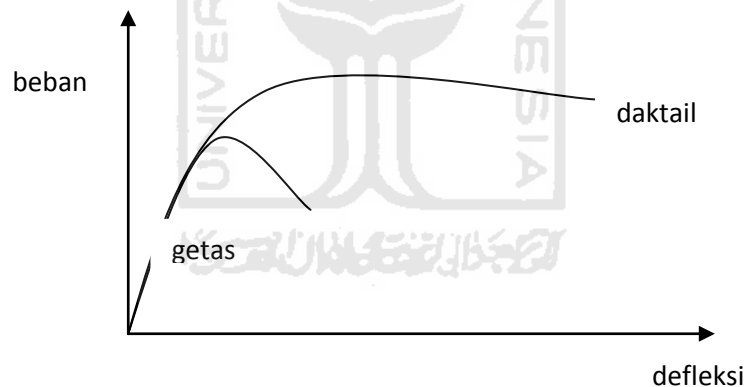
Gambar 3.7 Kurva momen-kurvatur ideal untuk bidang beton bertulangan tunggal yang gagal dalam tarik

Hubungan momen-kurvatur untuk balok praktis yang mana tegangan baja leleh dapat diidealkan dengan hubungan trilinear yang diperlihatkan dalam gambar 3.7a. Pertama munculnya retakan, kedua tegangan baja meleleh dan ketiga batas kemampuan regangan beton tercapai. Dalam banyak kasus kurva tersebut cukup

teliti untuk diidealkan sebagai kelanjutan hubungan dua bilinear seperti diperlihatkan dalam gambar 3.7b dan 3.7c yang memberikan kebenaran asumsi. Gambar 3.7a adalah kurva murni ideal untuk menampilkan perilaku pada pembebanan pertama. Ketika retak berkembang, seperti kebanyakan kasus balok yang mengalami pembebanan, hubungan $M-\phi$ tanpa beban hampir linier untuk leleh awal. Oleh karena itu, kurva bilinear dari gambar 3.7b dan 3.7c adalah perkiraan-perkiraan akurat untuk balok retak.

3.12 Daktilitas

Daktilitas adalah kemampuan suatu elemen struktur untuk berdeformasi secara inelastik secara berkelanjutan akibat beban siklik tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti. Park dan Paulay (1975) mengemukakan perilaku defleksi akibat pembebanan pada beton bertulang dengan pembebanan melebihi beban ultimate dapat diilustrasikan seperti yang terlihat pada Gambar 3.8. Perbedaan perilaku *brittle* (getas) dan *ductile* (liat) dapat terlihat dengan jelas pada gambar ini.



Gambar 3.8 Perilaku defleksi akibat pembebanan

Struktur yang daktail mampu berdeformasi inelastik secara berkelanjutan tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti, sedangkan pada struktur yang getas/*brittle* kekuatannya segera menurun secara tajam setelah kekuatan puncak.

Daktilitas simpangan adalah rasio antara simpangan ultimit Δu dengan simpangan leleh Δy , atau dapat ditulis sebagai berikut

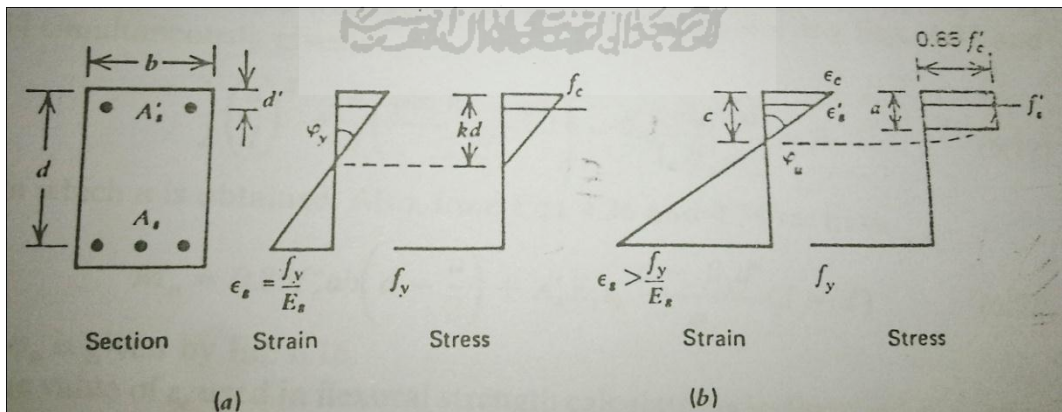
$$\text{Daktilitas simpangan} = \frac{\Delta u}{\Delta y} \dots\dots\dots(3.22)$$

Secara teoritik semakin tinggi tingkat daktilitas maka akan semakin baik, baik dalam berkelanjutannya dalam menahan beban maupun berkelanjutannya dalam disipasi energi.

Daktilitas lengkung (*curvature ductility*) adalah rasio antara sudut rotasi per unit panjang (kelengkungan) ϕu pada kondisi ultimit dan ϕy pada kondisi luluh pertama. Dengan demikian nilai dari *curvature ductility* adalah

$$\text{curvature ductility} = \frac{\phi u}{\phi y} \dots\dots\dots(3.23)$$

Untuk memperoleh nilai *curvature ductility* maka yang harus dibahas atau dihitung terlebih dahulu adalah *yield curvature* (ϕy). Menurut Park dan Paulay (1975) diagram tegangan regangan desak beton masih dalam keadaan elastik apabila tegangan desak beton kurang dari $0,7f'_c$ pada saat baja tulangan mulai leleh pertama. Pada keadaan tersebut letak garis netral dapat dicari dengan prinsip elastik, seperti yang terlihat pada gambar 3.9 berikut



Gambar 3.9 Diagram tegangan regangan (a) pada saat leleh pertama (b) pada saat ultimit

Nilai k dapat dicari menurut prinsip analisis tampang balok beton secara elastik, nilai k tersebut adalah

$$k = \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n \quad \dots\dots\dots(3.24)$$

$$\rho = \frac{As}{bxd} \quad \dots\dots\dots(3.25)$$

$$\rho' = \frac{As'}{bxd} \quad \dots\dots\dots(3.26)$$

$$n = \frac{Es'}{Ec} \quad \dots\dots\dots(3.27)$$

dengan :

ρ = tension reinforcement ratio

ρ' = compression reinforcement ratio

n = angka ekivalensi

b = lebar balok

d = tinggi efektif balok

d' = tebal selimut beton desak

dengan demikian nilai dari *yield curvature* adalah

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{d - kd} \quad \dots\dots\dots(3.28)$$

Apabila tegangan desak beton melampaui $0,7f_c$ maka garis netral bergerak keatas akibat dari lelehnya baja tulangan yang berlanjut, tegangan desak beton akan mencapai tegangan desak ultimit. Nila dari *ultimate curvature* (φ_u) adalah

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} \quad \dots\dots\dots(3.29)$$

dimana ε_{cu} adalah regangan desak beton.

3.13 Response2000

Program response2000 merupakan sebuah program yang mampu menganalisis kekuatan dan daktilitas dari potongan beton bertulang yang berkaitan dengan gaya geser, momen dan beban axial. Ketiga komponen tersebut didasarkan pada teori tegangan-regangan. Program ini dikembangkan di Universitas Toronto oleh Evan Bentz sebagai proyeknya dari Professor Michael P. Collins. Response2000 memungkinkan untuk menghitung kekuatan balok dan kolom sama baiknya atau bahkan lebih baik daripada program-program yang telah ada, dan yang lebih penting adalah dapat membuat prediksi gaya geser pada potongan yang pada saat ini tidak mudah dilakukan.



BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Bahan dan Benda Uji

4.1.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam pembuatan benda uji penelitian ini adalah :

- a. Semen portland jenis I merek Tiga Roda yang ada di pasaran Daerah Istimewa Yogyakarta.
- b. Agregat kasar (split) berasal dari Kulon Progo Yogyakarta dengan diameter maksimum 20 mm.
- c. Agregat halus (pasir) berasal dari Sungai Krasak.
- d. Baja tulangan polos dengan diameter 16 mm untuk tulangan tarik dan baja dengan diameter 6 mm digunakan untuk sengkang. Baja tulangan diperoleh dari baja-baja tulangan yang ada di pasaran Daerah Istimewa Yogyakarta.
- e. Air bersih dari instalasi air di Laboratorium BKT-FTSP Universitas Islam Indonesia.

4.1.2 Benda Uji

Benda uji berupa balok beton bertulang dengan luas tampang 45000 mm^2 dengan luas tulangan sama $A_s = 201,062 \text{ mm}^2$, $f_y = 240 \text{ Mpa}$ dan $f'_c = 25 \text{ Mpa}$. Panjang balok 2 meter, dengan variasi jarak sengkang yang berbeda dibuat sebanyak 4 balok, yaitu :

1. Dua buah sampel dengan jarak sengkang 75 mm.
2. Dua buah sampel dengan jarak sengkang 100 mm.

Pada setiap pembuatan satu benda uji balok dibuat juga 3 buah benda uji silinder beton, sehingga diperoleh 12 benda uji untuk mengetahui kuat tekan dan berat satuan beton yang telah dibuat, sedangkan semua ukuran baja yang digunakan diperiksa dan dilakukan uji tarik agar diketahui tegangan leleh dan tegangan maksimumnya.

Pembuatan adukan beton dalam penelitian dilakukan dengan menggunakan metode DoE (*Department of Environment*), dengan mencapai mutu beton rencana adalah 25 Mpa, dan setelahnya dilakukan perawatan beton dengan menjaga permukaan beton selalu lembab. Hal ini dimaksudkan agar proses hidrasi semen berlangsung sempurna, rawatan dilakukan dengan menutupi sampel-sampel yang dibuat dengan karung goni basah dan menjaga kelembabannya dengan cara membasahinya secara berkala. Rawatan dilakukan selama 28 hari.

4.2 Peralatan Penelitian

Untuk kelancaran peneliian diperlukan beberapa peralatan yang akan digunakan sebagai sarana mencapai tujuan penelitian. Peralatan-peralatan yang akan digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut :

1. Mistar dan kaliper

Mistar digunakan untuk mengukur dimensi cetakan benda uji, sedang caliper berfungsi sebagai pengukur tulangan seperti pada Gambar 4.1.



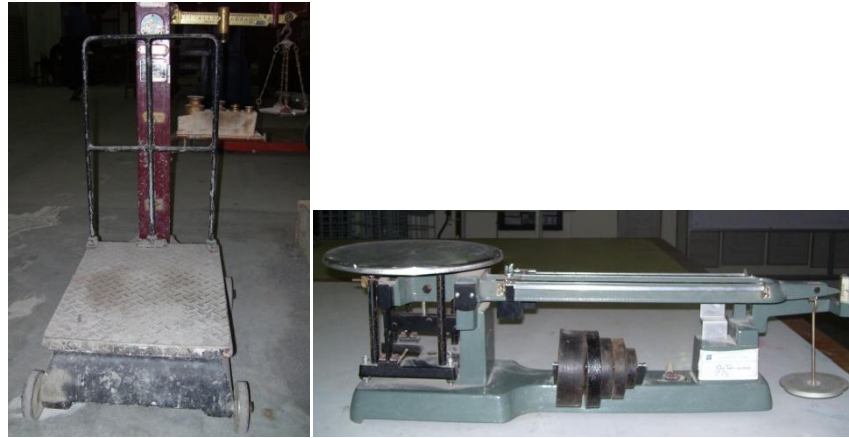
Gambar 4.1 Mistar dan caliper

2. Timbangan

Timbangan yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah:

- a. Timbangan merk “OHAUS” dengan kapasitas 20 kg,
- b. Timbangan merk “FAGANI” dengan kapasitas 100 kg.

Timbangan ini digunakan untuk mengukur berat bahan penyusun beton yaitu semen, kerikil, air, pasir dan bahan penyusun yang lain seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Timbangan

3. Mesin uji desak

Mesin uji desak digunakan untuk mengetahui kuat desak silinder beton yang telah dibuat. Dalam penelitian kali ini digunakan mesin uji desak tipe *ADR* 3000 dengan kapasitas 3000 kN seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Mesin uji desak tipe *ADR* 3000

4. Mesin uji kuat tarik

Mesin uji kuat tarik digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum dan kuat leleh baja tulangan. Dalam penelitian ini digunakan *Universal Testing Machine* (UTM) merek *Shimatsu* type *UMH* 30 dengan kapasitas 30 ton seperti pada Gambar 4.4.



Gambar 4.4 Mesin uji tarik *Shimadzu type UMH 30*

5. *Mixer*/Mesin pengaduk campuran beton

Mesin yang digunakan untuk mencampur adukan beton seperti pada Gambar 4.5.



Gambar 4.5 Mesin pengaduk campuran beton

6. Cetakan silinder beton

Cetakan silinder beton digunakan untuk mencetak benda uji beton yang berbentuk silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm seperti pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Cetakan silinder beton

7. Gelas ukur

Gelas ukur digunakan untuk menakar jumlah air yang diperlukan dalam pembuatan adukan beton atau pasta semen. Kapasitas gelas ukur yang dipakai adalah 2000 ml seperti pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Gelas ukur

8. Kerucut Abrams

Kerucut yang digunakan saat melakukan pengujian slump, benda ini memiliki 2 lubang dengan diameter 10 cm dan 20 cm di bagian atas dan bawah dengan tinggi 30 cm. Alat ini dilengkapi dengan tongkat pemadat yang terbuat dari baja dengan panjang 600 mm dan berdiameter 16 mm dengan ujung yang bulat seperti pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 *Slump tes set*

9. *Loading Frame*

Loading Frame digunakan untuk menempatkan benda uji pada saat pembebanan seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 *Loading frame*

10. Dukungan sendi dan rol

Merupakan perletakan bagi benda uji balok yang akan di uji seperti pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Dukungan sendi dan rol

11. *Dial Gauge*

Alat ini digunakan untuk mengukur besar lendutan yang terjadi. Pada pengujian ini dipakai dial gauge dengan kapasitas lendutan maksimum 30 mm ketelitian 0,01 seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 *Dial Gauge*

12. Mesin injeksi

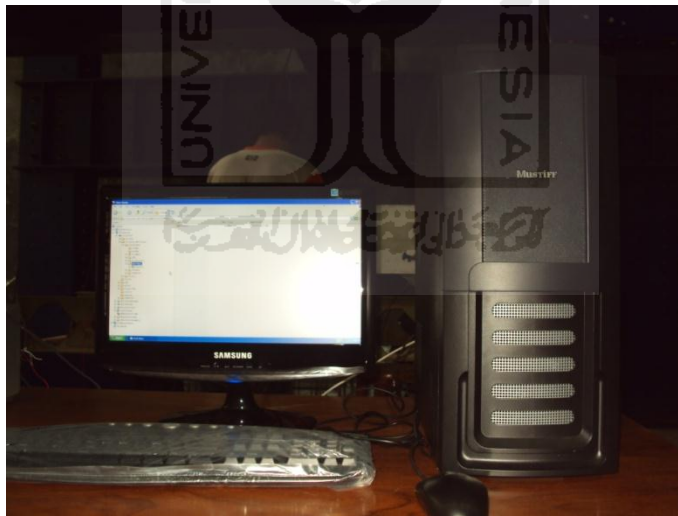
Mesin injeksi adalah mesin yang berfungsi untuk memasukkan cairan injeksi kedalam struktur yang telah dipersiapkan untuk proses injeksi. Berikut adalah gambar dari mesin injeksi, seperti yang ditunjukkan Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Mesin injeksi

13. Komputer

Komputer digunakan untuk mengolah dan menyimpan data yang terbaca oleh *Data logger*. Komputer yang digunakan harus memiliki prosesor minimal 3,0 GHz seperti pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Komputer

14. Mesin *coredrill*

Coredrill merupakan salah satu alat yang digunakan untuk mencari nilai kuat tekan beton pada balok seperti pada gambar 4.14

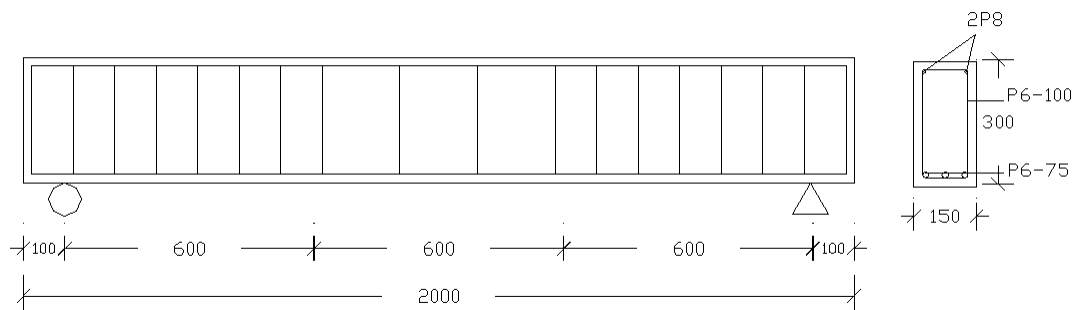


Gambar 4.14 *coredrill*

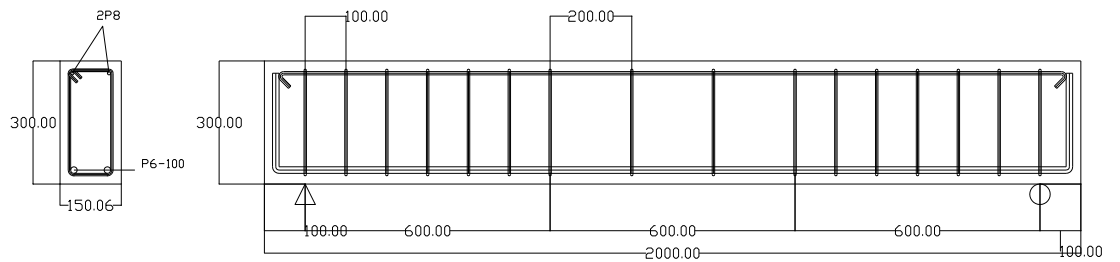
4.3 Pelaksanaan Penelitian

4.3.1 Benda Uji

Empat buah benda uji dengan dimensi, panjang dan lebar 150 mm × 300 mm serta panjang 2000 mm dengan jarak sengkang 75mm dan 100mm. Berikut adalah detail penampang dari benda uji, seperti yang ditunjukkan gambar 4.19 dan gambar 4.20.



Gambar 4.15 Detail benda uji dengan jarak sengkang 75 mm



Gambar 4.16 Detail benda uji dengan jarak sengkang 100 mm

4.3.2 Kodefikasi Benda Uji

Kodefikasi benda uji ini bertujuan untuk membedakan keempat balok beton bertulang yang akan diuji. Kodefikasi sesuai dengan jarak sengkang dan untuk pembebanan keempat balok semuanya sama yaitu sampai beban ultimit.

Pembebanan yang dilakukan dalam penelitian ini berupa dua beban terpusat yang dipasang pada sepertiga bentangan. Uraian untuk keempat balok yang diuji sebagai berikut.

1. Dua benda uji dengan jarak sengkang 7,5 cm
2. Dua benda uji dengan jarak sengkang 10 cm.

Tabel 4.1 di bawah ini merupakan kodefikasi pada benda uji yang diberikan.

Tabel 4.1 Kodefikasi benda uji dan pembebanannya

Pengujian	BENDA UJI			
	BU-1-10	BU-2-7,5	BU-3-7.5	BU-4-10
Retak pertama (kN)	√	√	√	√
Beban ultimit (kN)	√	√	√	√
Lendutan (mm)	√	√	√	√
Pola retak	√	√	√	√

Kodefikasi benda uji sesuai dengan kodefikasi benda uji pada saat sebelum perbaikan, hal ini untuk menjaga agar benda uji tidak tertukar atau tidak

teridentifikasi karena proses perbaikan menjadikan benda uji seperti kondisi beton normal.

4.3.3 Dimensi Benda Uji

Perencanaan dimensi benda uji yang akan digunakan disesuaikan dengan kapasitas peralatan yang tersedia di Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik dan Laboratorium Mekanika Rekayasa Jurusan Teknik Sipil FTSP UII. Adapun dimensi ketiga benda uji tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Dimensi benda uji

Benda Uji (BU)	Elemen Struktur	Lebar (b) (mm)	Tinggi (h) (mm)	Selimit Beton (mm)	Mutu Beton Rencana (Mpa)	Panjang (mm)
BU-1-10	Balok	150	300	20	25	2000
BU-2-7,5	Balok	150	300	20	25	2000
BU-3-7,5	Balok	150	300	20	25	2000
BU-4-10	Balok	150	300	20	25	2000

4.3.4 Perbaikan Benda Uji

Dari seluruh kerusakan pada struktur terdapat 4 (empat) metode perbaikan, yaitu :

1. plester (*patching*),
2. menambah dengan bahan *cement grout* (*grouting*),
3. suntik dengan bahan *epoxy resin* (*injection*),
4. beton tembak/semprot (*shotcrete*).

Tipe kerusakan pada struktur umumnya dibagi menjadi 2 yaitu kerusakan yang tulangnya belum luluh dan kerusakan yang tulangnya telah luluh. Lebar dan kedalaman juga harus diperhatikan untuk menentukan metode perbaikan yang tepat.

Bila kedalaman retak kurang dari 2 cm, maka perbaikan dapat menggunakan metode *patching* saja atau bisa juga *injection without pressure* (sistem gaya grafitasi). Keretakan pada selimit beton (*non structural cracking*)

bisa diatasi metode *patching*, yaitu dengan menambal bagian yang rusak menggunakan bahan material perbaikan struktur berbahan dasar semen dengan campuran *accelerator*, dalam penelitian ini digunakan produk Sikaset Accelerator. Sedangkan *injection with pressure*, yaitu injeksi dengan tekanan menggunakan material *epoxy resin polimer* dengan merk dagang “SikaDur 52 ID” yang mempunyai tingkat keenceran atau “*viscositas*” rendah sehingga memudahkan material perbaikan memasuki celah yang terdapat pada struktur.

4.3.5 Material Perbaikan

Material yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah material yang dengan mudah dijumpai dipasaran, produk yang digunakan dalam penelitian ini tidak memberikan kontribusi apapun dalam penelitian, sehingga peneliti menjamin kebebasan hasil dari penelitian ini.

Material yang dipergunakan dalam penelitian ini yaitu :

1. SikaCim Accelerator, sebagai campuran aditif untuk mortar cepat kering dan penyumbat kebocoran seketika.



Gambar 4.17 SikaCim Accelerator

2. Sika Concrete repair Mortar, adalah komponen semen grouting yang digunakan khusus untuk memperbaiki beton yang keropos.



Gambar 4.18 Sika Concrete Repair Mortar

3. Sikadur 52, adalah dua komponen epoxy dengan konsistensi cair untuk keperluan injeksi pada keretakan beton.



Gambar 4.19 Sikadur 52

4.3.6 Teknik Perbaikan

Rencana dari teknik perbaikan yang akan diterapkan pada benda uji adalah sebagai berikut

Proses pekerjaan *grout* yaitu :

1. memperlebar retak sampai pada bagian beton yang cukup kuat,
2. lapiasi bagian bawah benda uji dengan papan, hal ini dilakukan untuk mencegah kebocoran terjadi,

3. membuat acuan tambahan untuk sisi benda uji sesuai dimensi balok, hal ini untuk membuat hasil *grout* menjadi baik dan benda uji kembali seperti bentuk semula, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20,



Gambar 4.20 Acuan tambahan pada sisi-sisi benda uji

4. setelah acuan terpasang dengan sempurna, maka perkuatan tambahan diperlukan agar hasil dari proses *grout* menjadi sempurna, seperti pada gambar 4.21 berikut,



Gambar 4.21 Perkuatan tambahan pada sisi-sisi benda uji

5. mencampur bahan *grout* dengan komposisi yang sesuai dengan peraturan penggunaan kemudian mengaduknya,
6. setelah campuran merata dengan sempurna, adukan dituang langsung ke dalam celah balok yang telah dibuat acuannya, seperti pada gambar 4.22,



Gambar 4.22 Menuangkan adukan ke dalam celah balok

7. setelah adukan dituangkan maka ditunggu sampai campuran tersebut kering, seperti pada gambar 4.23,



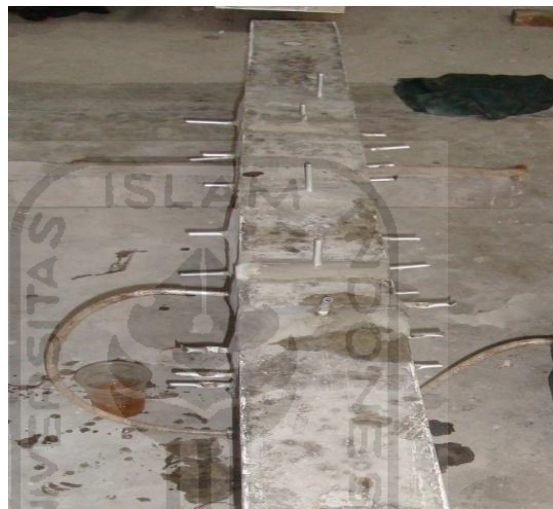
Gambar 4.23 Proses pengeringan

8. cetakan dapat dibuka setelah bahan campuran mengering,
9. benda uji dibersihkan dan dilanjutkan dengan injeksi.

Proses pekerjaan *Injection with pressure* adalah :

1. membuat lubang pada retak yang telah ditandai dengan jarak ± 10 cm, lubang ini akan dipasang pipa aluminium tempat cairan injeksi dipompakan masuk pada celah/retak pada benda uji,

2. memperlebar retak sampai berbentuk V dengan kedalaman ± 3 cm, proses memperlebar retak dilakukan dengan teliti dan hati-hati, karena proses memperlebar retak tidak boleh terlalu jauh dari pola retak yang telah digambar, hal ini untuk mengantisipasi retak dan pelebaran retak yang tidak saling berhubungan,
3. retak yang telah diperlebar dan lubang yang telah jadi kemudian diisi dengan pipa alumunium yang berguna mempermudah proses injeksi. Seperti yang terlihat pada Gambar 4.24,



Gambar 4.24 Lubang pada balok yang telah dipasang pipa alumunium

4. celah retakan diisi dengan material perbaikan struktur berbahan dasar semen, dalam penelitian ini digunakan produk Sikacim Accelerator, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.25,



Gambar 4.25 Celah retakan diisi oleh material berbahan dasar semen

5. mencampur bahan injeksi dengan teliti kemudian mengaduknya secara manual dengan kecepatan sedang sampai rata,
6. material injeksi dipompa sampai keluar pada pipa lainnya, kemudian ditutup, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26,



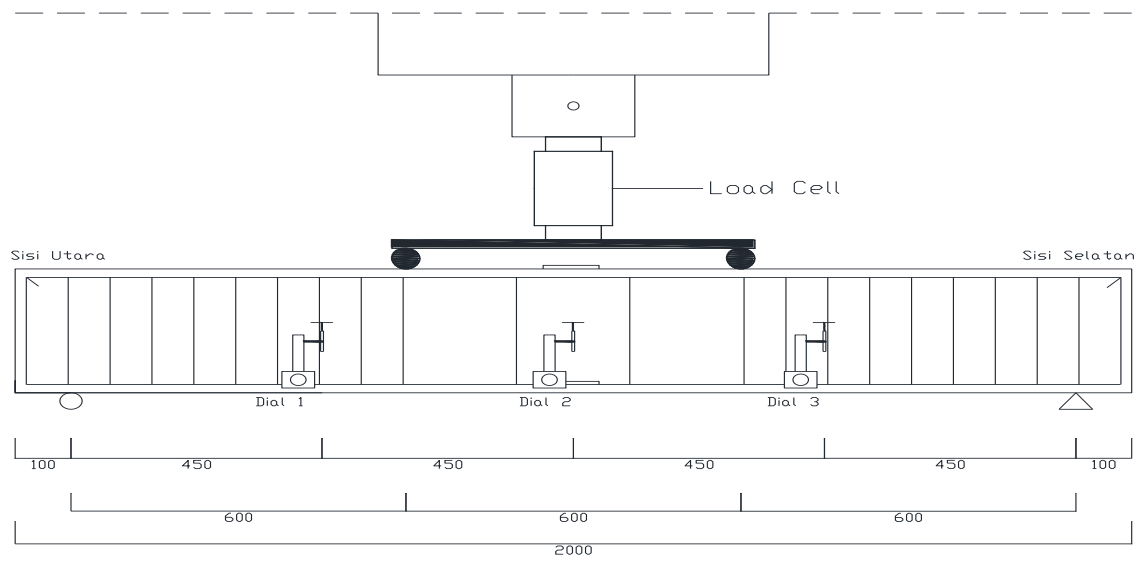
Gambar 4.26 Proses injeksi

7. pipa injeksi dapat dipotong setelah proses pengeringan terjadi,
8. pekerjaan terakhir adalah membersihkan dan mengecat benda uji.

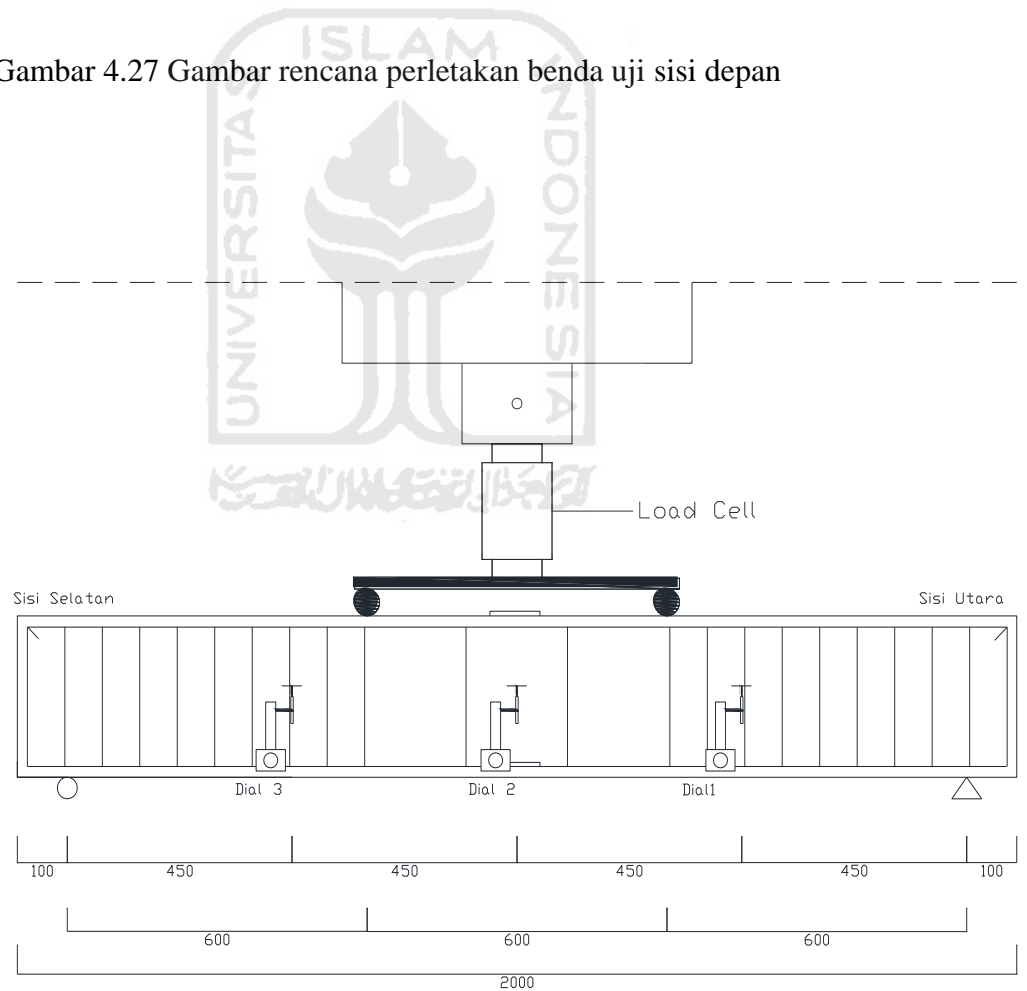
4.3.7 Persiapan peralatan

Dalam mempersiapkan peralatan untuk pelaksanaan pengujian, beberapa hal yang penting untuk diperhatikan adalah kesesuaian antara rencana dan pelaksanaan. Berikut adalah persiapan dalam penelitian ini :

1. Mempersiapkan perletakan untuk benda uji, berupa dukungan sendi dan rol.
2. Memposisikan benda uji tepat pada daerah perletakan sesuai gambar rencana pengujian.
3. Posisi benda uji dipastikan horizontal dengan penggunaan *waterpass*, dan jarak diteliti kembali agar tetap sesuai dengan gambar rencana.
4. Pemasangan *dial gauge* sesuai gambar rencana.
5. Pemasangan balok penerus beban dengan posisi pembebanan yang sesuai,
6. Pemasangan *load cell* pada tengah bentang balok penerus beban
7. Proses persiapan pengujian selesai.



Gambar 4.27 Gambar rencana perletakan benda uji sisi depan



Gambar 4.28 Gambar rencana perletakan benda uji sisi belakang

4.3.9 Pelaksanaan pengujian

Pelaksanaan pengujian didampingi oleh tenaga ahli laboratorium dan pembimbing penelitian. Berikut adalah tahapan pelaksanaan pengujian :

1. Pemberian beban pada benda uji dimulai.
2. Benda uji diberi pembebanan sampai mengalami keruntuhan (*failure condition*), kemudian pembebanan dihentikan.



Gambar 4.29 Pembebanan pada balok

3. Selama berlangsungnya pengujian, dilakukan pembacaan *dial gauge* dan pengamatan, pencatatan serta penggambaran pola retak yang terjadi secara manual.



Gambar 4.30 Pembacaan *dial gauge* dan penggambaran pola retak



Gambar 4.31 *Dial gauge* yang dibaca



Gambar 4.32 Gambar pola retak

4. Setelah pengujian selesai maka dilakukan *hammer test* dan *coredrill* pada benda uji untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton.



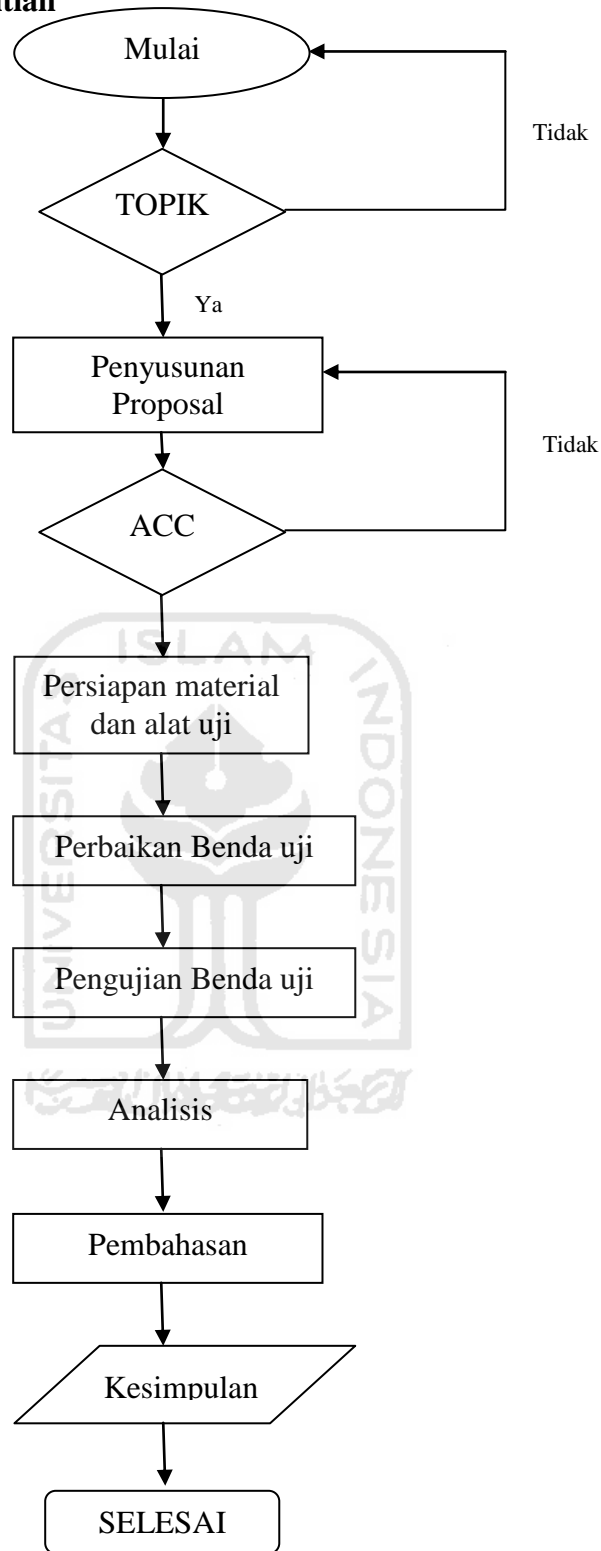
Gambar 4.33 Pengujian *coredrill*

4.3.10 Data pengujian

Hasil dari sebuah penelitian pengujian adalah data, dan data dari pengujian ini adalah berupa hasil dari pembacaan *dial gauge* dan beban ultimit. Data yang diperoleh dari pengujian ini berupa deretan angka berbentuk kolom yang tersusun secara teratur sesuai dengan hasil pembacaan dial gauge yang dilakukan oleh beberapa orang. Nilai yang tercantum dalam kolom tersebut adalah susunan nilai hasil dari penurunan atau lendutan yang terjadi pada balok akibat

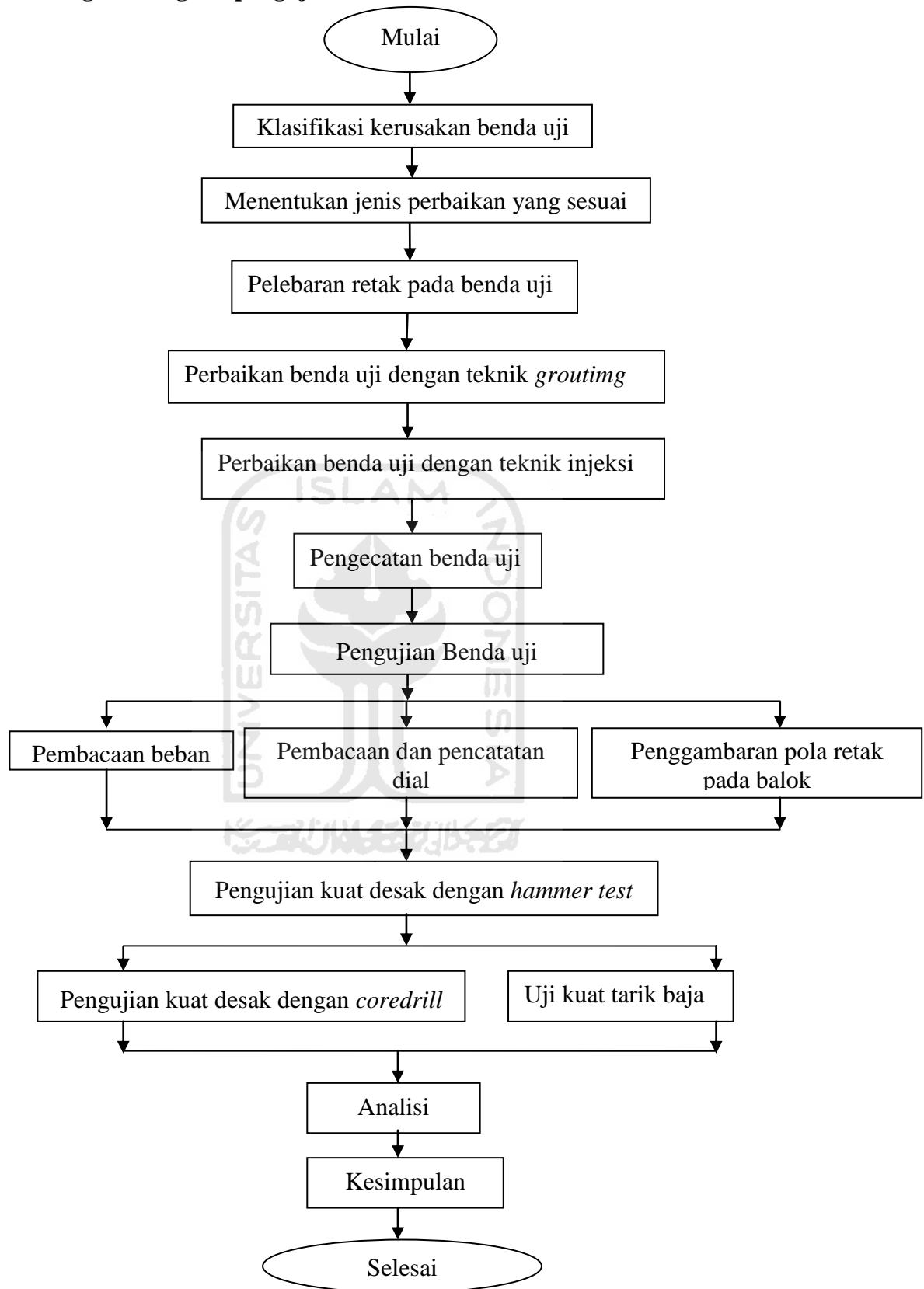


4.3.11 Bagan alir penelitian



Gambar 4.34 *Flowchart* bagan alir penelitian

4.3.12 Langkah-langkah pengujian



Gambar 4.35 Flowchart langkah-langkah pelaksanaan pengujian





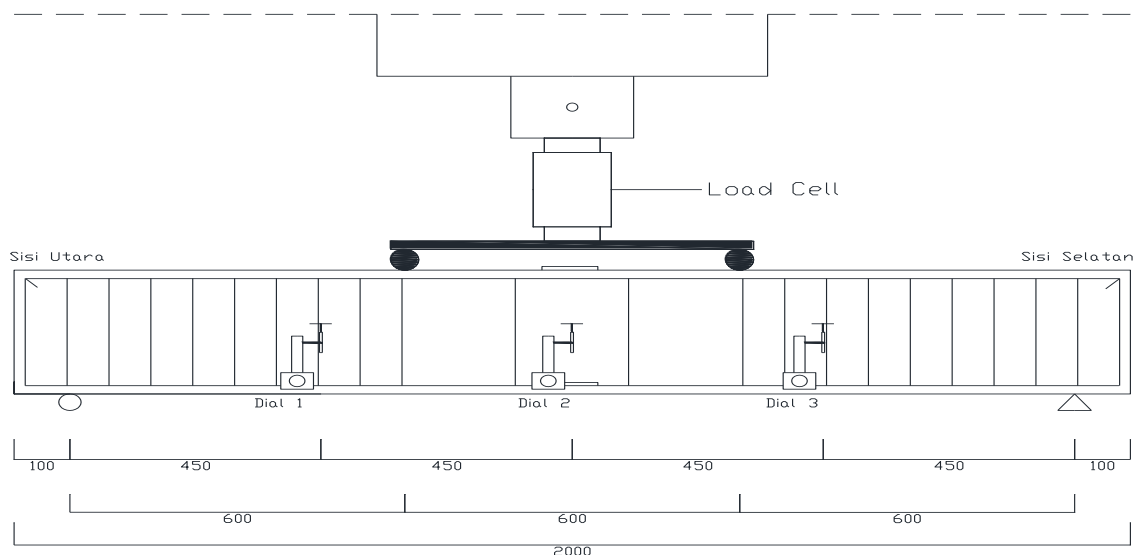
BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

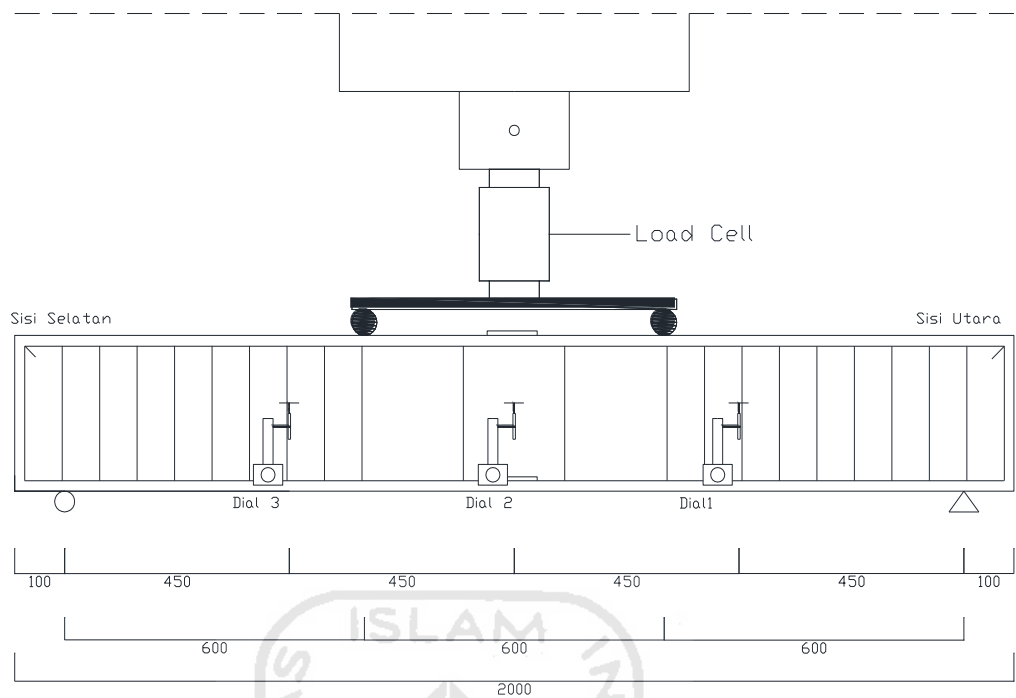
5.1 Umum

Dari pengujian yang telah dilakukan maka didapat hasil penelitian berupa data yang telah dianalisis yang akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Pengujian-pengujian yang telah dilakukan dimaksudkan untuk mendapatkan hasil berupa kuat tekan beton (f'_c) yang didapat dari uji silinder, *hammer test* dan *coredrill*, kuat tarik baja (f_y), beban ultimit yang mampu ditahan oleh masing-masing balok beton, grafik beban-lendutan, *curvature ductility* dan gambar pola keretakan yang terjadi pada balok. Data yang diperoleh tersebut kemudian dianalisa sehingga didapat kesimpulan dari pengujian yang telah dilaksanakan.

Bab ini menguraikan prosedur analisis pengujian kuat lentur pada 4 buah balok beton bertulang dengan 2 (dua) titik pusat pembebanan yang diletakkan pada 1/3 bentang balok karena pada daerah tersebut merupakan daerah lentur murni, dan setiap benda uji mendapatkan pembebanan *ultimit* yang besarnya berbeda-beda. Pada masing-masing benda uji terdapat 3 buah dial yang ditempatkan pada 3 tempat berbeda yaitu pada sisi utara, sisi tengah dan sisi selatan. Penempatan posisi dial pada masing-masing benda uji ditunjukkan pada gambar 5.1 dan 5.2 berikut

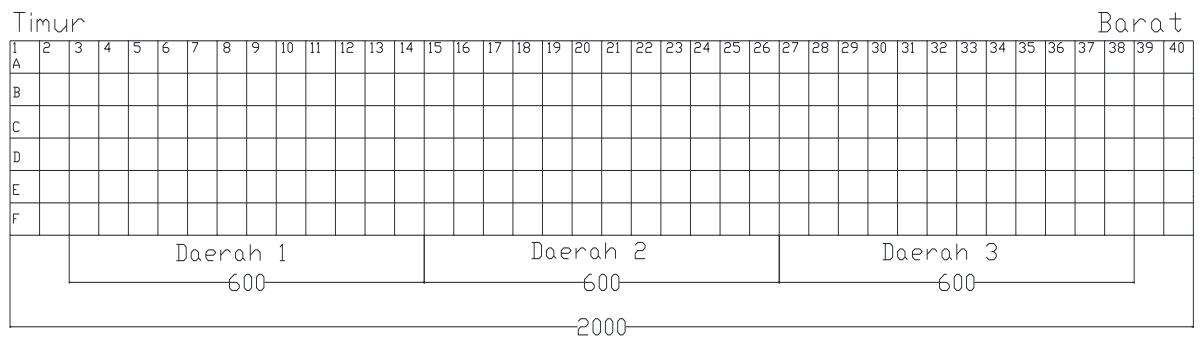


Gambar 5.1 Perletakan dial pada sisi depan

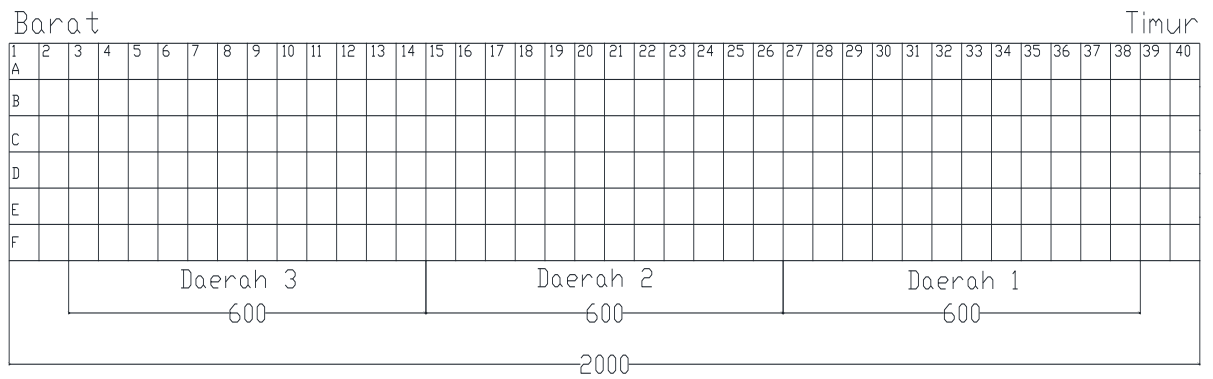


Gambar 5.2 Perletakan dial pada sisi belakang

Pada *hammer test* dan *coredrill* pengambilan *sample* pada masing-masing benda uji dibagi menjadi 3 bagian yaitu pada sisi timur, sisi tengah dan sisi barat. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 5.3 dan 5.4 berikut



Gambar 5.3 Lokasi pengambilan *sample hammer test* dan *coredrill* tampak depan



Gambar 5.4 Lokasi pengambilan *sample hammer test* dan *coredrill* tampak belakang

5.2 Uji Kuat Tarik Baja Tulangan

Uji kuat tarik dilakukan untuk mengetahui kualitas baja tulangan yang terpasang dalam balok uji. Pada pengujian ini diameter baja tulangan yang dipakai adalah 16 mm. Kualitas baja tulangan akan mempengaruhi hasil perhitungan untuk setiap pembebanan balok uji. Hasil dari pengujian kuat tarik baja tulangan dapat di lihat pada tabel 5.1

Tabel 5.1 Hasil uji kuat tarik baja tulangan

Benda uji	1	2	rata-rata
Ø (cm)	1.6	1.6	1.6
A (cm ²)	2.0096	2.0096	2.0096
P leleh (kg)	9250	9350	9300
P putus (kg)	10350	10500	10425
P ultimit (kg)	12175	12475	12325
f _y (MPa)	451.265	456.144	453.705
f _u (MPa)	605.842	620.770	613.306

dari table 5.1 dapat diketahui bahwa kuat tarik baja tulangan (f_y) dengan diameter 16 mm yang terpasang dan digunakan untuk benda uji mempunyai kekuatan rata-rata sebesar 453,705 MPa.

5.3 Kuat Desak Beton

Pengujian kuat desak beton bertujuan untuk mendapatkan kuat tekan beton (f'_c) pada benda uji. Uji kuat tekan beton dilakukan tiga cara yaitu dengan menguji 12 buah silinder beton, *hammer test* dan *coredrill*. Pada pengujian

silinder beton data didapat dari percobaan balok sebelumnya karena balok rusak yang digunakan untuk diperbaiki merupakan balok dari percobaan sebelumnya. Pada *hammer test* dilakukan pada 3 sisi yang berbeda yaitu pada daerah 1, daerah 2 dan daerah 3 balok dengan masing-masing sisi sebanyak 20 kali pukulan. Sedangkan untuk *coredrill* dilakukan pada sisi-sisi yang sama dengan *hammer test* dengan masing-masing sisi didapat 1 buah silinder beton berdiameter 5 cm dengan tinggi yang berbeda sehingga untuk 4 buah balok terdapat 12 buah silinder beton.

Hasil dari pengujian kuat desak beton dengan menguji 12 buah silinder beton dapat dilihat pada table 5.2 berikut ini

Tabel 5.2 Hasil uji silinder beton

Benda uji	f'c rata-rata (MPa)
1	26.68
2	30.74
3	27.81
4	27.93

Hasil dari pengujian kuat desak beton dengan *hammer test* dapat dilihat pada tabel 5.3 berikut ini

Tabel 5.3 Hasil uji kuat desak beton dengan *hammer test*

Benda Uji		f'c (Mpa)	f'c rata-rata (MPa)
1	Daerah 1	30.459	30.321
	Daerah 2	31.348	
	Daerah 3	29.156	
2	Daerah 1	28.800	28.365
	Daerah 2	28.267	
	Daerah 3	28.030	
3	Daerah 1	29.333	28.622
	Daerah 2	28.504	
	Daerah 3	28.030	
4	Daerah 1	27.970	28.346
	Daerah 2	27.733	
	Daerah 3	29.333	

Besarnya nilai kuat tekan beton hasil pengujian *hammer test* pada masing-masing titik setiap balok uji dan besarnya kuat tekan beton rata-rata masing-masing balok dapat dilihat pada tabel 5.3. Pada benda uji 1 memiliki kuat tekan beton rata-rata yang paling tinggi jika dibanding dengan kuat tekan benda uji lainnya yaitu sebesar 30,321 MPa. Pada benda uji 1 kuat tekan beton yang paling rendah ada pada daerah 3 yaitu sebesar 29,156 MPa. Pada benda uji 2 dan benda uji 3 juga memiliki kuat tekan beton yang paling rendah pada daerah dengan nilai yang sama yaitu sebesar 28,030 MPa. Sedangkan pada benda uji 4 nilai kuat tekan beton yang paling rendah ada pada daerah 2 yaitu sebesar 27,733 MPa. Besarnya nilai kuat tekan beton yang berbeda pada masing-masing sisi setiap benda uji dapat mempengaruhi kerusakan yang terjadi pada tiap-tiap benda uji yang akan dibahas pada pembahasan selanjutnya. Selain pada daerah beton asli, *hammer test* juga dilakukan pada daerah yang mengalami perbaikan dengan menggunakan teknik *grouting*, sehingga dapat diketahui besarnya kuat tekan material *grouting* yaitu sebesar 38,519 MPa. Dapat dilihat bahwa kuat tekan material *grouting* lebih tinggi dari pada kuat tekan beton asli. Nilai kuat tekan material *grouting* yang lebih tinggi juga akan mempengaruhi tempat terjadinya retak pada masing-masing benda uji.

Pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan nilai kuat tekan beton yang ketiga adalah dengan *coredrill*. Lokasi pengambilan *sample* pada pengujian *coredrill* sama dengan *hammer test*. Hasil dari pengujian kuat desak beton dengan *coredrill* dapat dilihat pada tabel 5.4 berikut ini

Tabel 5.4 Hasil uji kuat desak beton dengan *coredrill*

Benda Uji	1			2			3			4		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
h (cm)	8.3	9.9	10	7.7	9.4	8.3	7.9	9.3	9	8.6	9.5	8.8
d (cm)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
A (cm ²)	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625	19.625
h/d	1.66	1.98	2	1.54	1.88	1.66	1.58	1.86	1.8	1.72	1.9	1.76
berat (gr)	442	452.4	378.2	347	432.8	369	348.3	420	408.5	378.4	432.8	395
Beban (kg)	6400	6900	5750	5000	5300	6225	7025	5450	5250	7250	4500	5350
Konversi	0.9728	1	1	0.9632	0.9937	0.9728	0.9664	0.9916	0.9853	0.9776	0.9958	0.9811
Beban konversi (kg)	6225.92	6900	5750	4816	5266.61	6055.68	6788.96	5404.22	5172.825	7087.6	4481.1	5248.885
f'c (MPa)	31.102	34.470	28.725	24.059	26.310	30.252	33.915	26.997	25.842	35.407	22.386	26.221
f'c rata-rata (MPa)	31.432			26.874			28.918			28.005		

Hasil dari pengujian *coredrill* pada masing-masing benda uji didapat kuat tekan pada tiga sisi berbeda yaitu sisi timur, sisi tengah dan sisi barat. Dari ketiga nilai kuat tekan beton pada masing-masing sisi tersebut dicari rata-ratanya sehingga didapat nilai kuat tekan beton rata-rata pada masing-masing benda uji. Pada benda uji 1 sisi yang mempunyai kuat tekan beton terendah adalah daerah 3 yaitu sebesar 28,725 MPa. Sedangkan pada benda uji 2 nilai kuat tekan beton pada daerah 1 yang terendah yaitu sebesar 24,059 MPa. Nilai kuat tekan beton yang terendah pada benda uji 3 terdapat pada daerah 3 yaitu sebesar 25,842 Mpa. Untuk benda uji 4 nilai kuat tekan beton yang terendah ada pada daerah 2 yaitu sebesar 22,386 MPa. Sedangkan kuat tekan beton rata-rata yang tertinggi terdapat pada benda uji 1 yaitu sebesar 31,432 MPa. Seperti pada *hammer test* besarnya nilai kuat tekan beton pada masing-masing sisi setiap benda uji dapat mempengaruhi kerusakan yang terjadi pada tiap-tiap benda uji yang akan dibahas pada pembahasan selanjutnya.

Dari ketiga pengujian yang dilakukan untuk mendapatkan kuat tekan beton ($f'c$) maka dapat dibandingkan besarnya kuat tekan beton rata-rata ($f'c$ rata-rata) dari pengujian 12 buah silinder beton, *hammer test* dan, *coredrill*. Hasil dari perbandingan ketiga pengujian tersebut dapat dilihat pada tabel 5.5 berikut ini

Tabel 5.5 Perbandingan hasil uji kuat tekan beton

Benda Uji	$f'c$ rata-rata (MPa)		
	Uji silinder	<i>Hammer Test</i>	<i>Coredrill</i>
1	26.68	30.321	31.432
2	30.74	28.365	26.874
3	27.81	28.622	28.918
4	27.93	28.346	28.005

Dibandingkan dengan kuat tekan beton rencana yaitu 25 MPa, kuat tekan beton hasil ketiga pengujian yaitu uji silinder, *hammer test* dan *coredrill* mempunyai nilai yang lebih besar. Besarnya nilai kuat tekan beton dari hasil uji *hammer* dan *coredrill* dari semua balok mengalami peningkatan atau lebih besar dari pada saat pengujian silinder kecuali pada benda uji 2.

Kuat tekan beton hasil uji *hammer* jika dibandingkan uji silinder pada benda uji 1 mengalami kenaikan sebesar 13,65% yaitu dari 26,68 MPa meningkat menjadi 30,321 MPa. Pada benda uji 2 terjadi penurunan kuat tekan beton yaitu sebesar 7,73%, pada uji silinder nilai kuat tekan beton sebesar 30,74 MPa namun pada *hammer test* hanya sebesar 28,365 MPa. Kenaikan kuat tekan beton pada benda uji 3 sebesar 2,92% yaitu pada uji silinder sebesar 27,81 MPa sedangkan pada *hammer test* naik sebesar 28,622 MPa. Uji silinder pada benda uji 4 sebesar 27,93 MPa juga mengalami kenaikan pada *hammer test* sebesar 1,49% menjadi 28,346 MPa.

Seperti pada *hammer test*, pada uji kuat tekan beton hasil *coredrill* juga mengalami peningkatan pada benda uji 1, 3 dan 4. Penurunan kuat tekan beton terjadi pada benda uji 2 yaitu sebesar 12,58%. Pada benda uji 1 kenaikannya sebesar 17,81% yang merupakan kenaikan terbesar jika dibandingkan dengan ketiga benda uji lainnya. Kenaikan kuat tekan beton sebesar 3,98% terjadi benda uji 3, sedangkan pada benda uji 4 kenaikan yang terjadi sangat kecil yaitu hanya sebesar 0,27%.

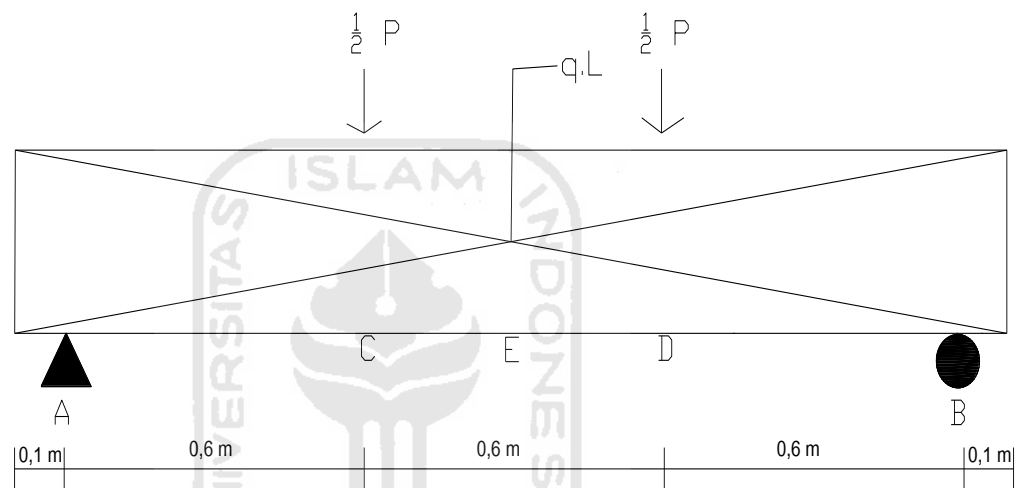
Hasil kuat tekan beton yang lebih tinggi tersebut dikarenakan pada saat balok diuji dengan *hammer test* dan *coredrill* balok telah mengalami perbaikan dengan injeksi dan *grouting*. Kuat tekan material *grouting* yang lebih besar dari kuat tekan beton menjadi faktor penyebab naiknya nilai kuat tekan beton hasil dari *hammer test* dan *coredrill*. Kuat tekan dari *grouting* yang lebih besar dari kuat tekan balok beton telah diuji dengan *hammer test* dan didapat hasilnya yaitu sebesar 38,519 MPa. Hasil tersebut cukup membuktikan bahwa kenaikan nilai kuat tekan beton dipengaruhi oleh material perbaikan berupa *grouting*. Selain dipengaruhi oleh material perbaikan, kenaikan kuat tekan juga dipengaruhi oleh umur beton pada saat pengujian dengan *hammer test* dan *coredrill* yang pada saat pengujian tersebut umur beton sudah lebih dari 28 hari. Kalau dilihat dari metode pengujiannya diantara *hammer test* dan *coredrill* hasil yang lebih akurat adalah dari *coredrill*, karena pengujian tersebut dengan cara mengebor benda uji sampai ke bagian intinya berbeda dengan *hammer test* yang hanya pada permukaan beton saja sehingga dapat terjadi kemungkinan pada saat pengujian mengenai batu sehingga nilai kuat tekan yang didapat besar.

Pada benda uji 2 terjadi perbedaan, yaitu nilai kuat tekan beton hasil uji *hammer* dan *coredrill* lebih kecil daripada hasil uji silinder. Hal tersebut dapat

saja terjadi dikarenakan pada saat melakukan *hammer test* dan *coredrill* titik pengambilannya berdekatan dengan retakan sehingga mempengaruhi besarnya nilai kuat tekan beton. Walaupun pada saat pengambilan *sample* sudah diusahakan untuk mencari titik-titik yang tidak berdekatan dengan retakan agar didapat hasil yang akurat namun hal tersebut dapat saja terjadi.

5.4 Dasar Pembebanan dan Perhitungan

Contoh perhitungan pada benda uji pertama dengan jumlah tulangan 3 buah dan kuat tekan beton (f'_c) diambil dari hasil uji *hammer test* :



$$q = 0,15 \times 0,3 \times 24 = 1,08 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_B = 0$$

$$R_A \cdot 1,8 - \frac{1}{2} P \cdot 1,2 - \frac{1}{2} P \cdot 0,6 - q \cdot L \cdot 0,9 = 0$$

$$R_A = \frac{0,6 P + 0,3 P + 1,08 \cdot 2 \cdot 0,9}{1,8}$$

$$= \frac{1}{2} P + 1,08 \text{ kN}$$

$$R_A = R_B$$

Momen :

$$M_C = M_D$$

$$M_C = R_A \cdot 0,6 - q \cdot 0,7 \cdot 0,35$$

$$= (\frac{1}{2} P + 1,08) \cdot 0,6 - 1,08 \cdot 0,7 \cdot 0,35$$

$$= 0,3 P + 0,648 - 0,2646$$

$$= 0,3 P + 0,3834$$

$$M_E = R_A \cdot 0,9 - q \cdot 1 \cdot 0,5 - \frac{1}{2} P \cdot 0,3$$

$$M_E = (\frac{1}{2} P + 1,08) 0,9 - q \cdot 1 \cdot 0,5 - \frac{1}{2} P \cdot 0,3$$

$$M_E = 0,45 P + 0,972 - 0,54 - 0,15 P$$

$$M_E = 0,3 P + 0,432 \text{ kNm}$$

5.4.1 Momen Kapasitas

$$\text{\textcircled{O}} \text{ tulangan pokok} = 16 \text{ mm}$$

$$A_s = 3 \times \left(\frac{1}{4}\right) \times \pi \times 16^2 = 602,88 \text{ mm}^2$$

$$h = 300 \text{ mm}^2$$

$$b = 150 \text{ mm}^2$$

$$d_s = 20 + 6 + \left(\frac{1}{2} \times 16\right) = 34 \text{ mm}$$

$$d = 300 - 34 = 266 \text{ mm}$$

$$f_y = 453,705 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{453,705}{200000} = 0,00227$$

$$f'_c = 30,321 \text{ MPa}$$

$$f'_c > 30 \text{ MPa} \rightarrow \beta_1 = 0,85 - 0,008(f'_c - 30) \geq 0,65$$

$$= 0,85 - 0,008(30,321 - 30) = 0,847$$

$$C_c = T_s$$

$$0,85 \times f'_c \times a \times b = A_s \times f_y$$

$$a = \frac{A_s \times f_y}{0,85 \times f'_c \times b} = \frac{602,88 \times 453,705}{0,85 \times 30,321 \times 150} = 70,754 \text{ mm}$$

$$a = \beta_1 \times c$$

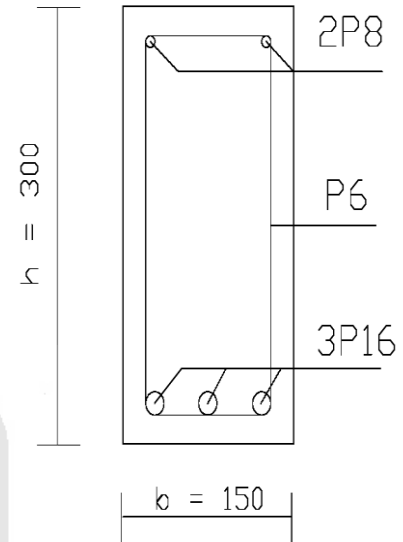
$$c = \frac{a}{\beta_1} = \frac{70,754}{0,847} = 83,492 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s = \frac{d - c}{c} \times \epsilon_{cu} = \frac{266 - 83,492}{83,492} \times 0,003 = 0,00656 > \epsilon_y \quad (\text{Baja tarik}$$

sudah leleh)

$$M_n = T_s \times \left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$= 273529,412 \times \left(266 - \frac{70,754}{2}\right)$$



$$\begin{aligned}
&= 63,082 \text{ KNm} \\
M_u &= 0,8 \text{ Mn} \\
&= 50,466 \text{ kNm} \\
M_u &= 0,3 P + 0,432 \\
50,466 &= 0,3 P + 0,432 \\
0,3 P &= 50,466 - 0,432 \\
P_u &= 166,756 \text{ kN}
\end{aligned}$$

Untuk perhitungan rasio tulangan (ρ) lentur:

$$\begin{aligned}
\rho_{\min} &= \frac{1,4}{f_y} = \frac{1,4}{453,705} = 0,0031 \\
\rho_b &= \frac{0,85 f'c}{f_y} \beta \left(\frac{600}{600+f_y} \right) = \frac{0,85 \cdot 26,68}{453,705} \cdot 0,82 \left(\frac{600}{600+453,705} \right) \\
&= 0,0233 \\
\rho_{\max} &= 0,75 \cdot \rho_b = 0,75 \cdot 0,0233 = 0,0175 \\
\rho_{\text{pakai}} &= \frac{A_s}{b \cdot h} = \frac{602,88}{150 \cdot 266} = 0,0151 \\
\rho_{\min} &\leq \rho_{\text{pakai}} \leq \rho_{\max} = 0,0031 \leq 0,0151 \leq 0,0175
\end{aligned}$$

Dari jarak sengkang (s) yang sudah diketahui maka dapat dihitung luasan sengkang (A_{s1}):

$$s \leq \frac{2 \cdot A_{D1} \cdot 1000}{A_{s1}} = \frac{2 \left(\frac{1}{4} \pi \cdot 6^2 \right) \cdot 1000}{A_{s1}}$$

$$100 = \frac{2 \cdot \left(\frac{1}{4} \pi \cdot 6^2 \right) \cdot 1000}{A_{s1}}$$

$$100 \cdot A_{s1} = 56548,6$$

$$A_{s1} = 565,486 \text{ mm}$$

Setelah A_s diketahui, maka dapat dihitung rasio tulangan sengkang dengan jarak sengkang 100 mm:

$$\begin{aligned}
\rho_s &= \frac{A_{s1}}{b \cdot d} \\
&= \frac{565,486}{1000 \cdot 266} = 0,0021
\end{aligned}$$

Untuk hasil perhitungan nilai rasio tulangan lentur dan geser pada benda uji yang lain dengan jumlah tulangan lentur dan jarak sengkang yang berbeda dapat dilihat pada Tabel 5.6 berikut ini

Tabel 5.6 Nilai rasio tulangan lentur dan geser

Benda Uji	Jumlah Tulangan Lentur	Jarak Sengkang(mm)	Rasio Tulangan	
			Lentur	Geser
1	3	100	0.0151	0.0021
2	2	75	0.0101	0.0028
3	2	75	0.0101	0.0028
4	2	100	0.0101	0.0021

5.4.2 Momen Retak

Momen retak secara teoritis berdasarkan SNI 03-2847-2002 Pasal 11.5.2.3, momen retak balok ditentukan dengan persamaan :

$$M_{cr} = \frac{f_r \cdot I_g}{y_t}$$

dan untuk beton normal,

$$f_r = 0,7\sqrt{f'_c}$$

Dengan :

M_{cr} = momen retak, N-m

f_r = modulus keruntuhan lentur beton, MPa

I_g = momen inersia penampang bruto beton terhadap garis sumbunya, dengan mengabaikan tulangan, mm⁴

y_t = jarak dari sumbu pusat penampang bruto, dengan mengabaikan tulangan, ke serat tarik terluar (mm).

Berdasarkan data yang ada maka momen retak beton adalah sebagai berikut :

$$f'_c = 30,321 \text{ MPa}$$

$$f_r = 3,855 \text{ MPa}$$

$$I_g = \frac{1}{12} \times b \times h^3$$

$$= \frac{1}{12} \times 150 \times 300^3 = 337,5 \times 10^6 \text{ mm}^4$$

$$y_t = \frac{1}{2} \times h = \frac{1}{2} \times 300 = 150 \text{ mm}$$

$$M_{cr} = \frac{f_r \times I_g}{y_t} = \frac{3,855 \times (337,5 \times 10^6)}{150} = 8,673 \text{ kNm}$$

$$M_{cr} = 0,3 P_{cr} + 0,432$$

$$P_{cr} = \frac{M_{cr} - 0,432}{0,3}$$

$$= \frac{8,673 - 0,432}{0,3}$$

$$= 27,446 \text{ kN}$$

Hasil dari perhitungan pada masing-masing benda uji dengan kuat tekan beton rata-rata dari uji silinder, *hammer test* dan *coredrill* dapat dilihat pada table 5.7 berikut ini

Tabel 5.7 Hasil perhitungan teoritis

Benda Uji	Pengujian $f'c$	Mu(kNm)	Pu(kN)	Mcr(kNm)	Pcr(kN)
1	Silinder	49.409	163.234	8.135	25.654
	Hammer test	50.466	166.756	8.673	27.446
	Coredrill	50.739	167.668	8.830	27.971
2	Silinder	35.411	116.573	8.732	27.645
	Hammer test	35.127	115.626	8.388	26.498
	Coredrill	34.923	114.946	8.165	25.753
3	Silinder	35.053	115.382	8.306	26.223
	Hammer test	35.160	115.736	8.426	26.624
	Coredrill	35.197	115.861	8.470	26.769
4	Silinder	35.070	115.435	8.324	26.282
	Hammer test	35.124	115.618	8.385	26.488
	Coredrill	35.080	115.469	8.335	26.319

Hasil perhitungan teoritis yang mendapatkan nilai beban ultimit (Pu) dan beban retak (Pcr) merupakan beban rencana yang diharapkan mampu ditahan oleh benda uji. Benda uji diharapkan mampu menahan beban sesuai yang direncanakan pada saat pengujian. Pada saat pengujian akan didapatkan nilai beban ultimit (Pu) dan beban retak (Pcr) kenyataan yang akan dibandingkan dengan beban ultimit rencana dan beban retak rencana yang akan dibahas lebih detail pada pembahasan selanjutnya.

5.5 Klasifikasi Kerusakan Benda Uji dan Teknik Perbaikan

Benda uji yang dipakai dalam penelitian ini mengalami kerusakan pada daerah lentur yang tingkat kerusakan dan jumlah retakan pada masing-masing benda uji bervariasi tetapi pada umumnya mengalami kerusakan sedang. Untuk melihat lebih jelas kerusakan yang terjadi, retak pada masing-masing benda uji diperlebar sampai pada daerah yang betonnya cukup kuat sehingga tidak terjadi keruntuhan lagi pada daerah tepi retakan.

Setelah dilakukan pengamatan maka terlihat bahwa kerusakan pada benda uji 1 merupakan kerusakan yang paling parah. Retak pada daerah lentur merupakan yang paling lebar diantara benda uji lainnya begitu juga retak-retak kecil pada daerah sekitar daerah lentur juga yang terbanyak. Namun pada daerah tepi-tepi benda uji 1 cukup kuat, hal tersebut dapat saja terjadi dikarenakan pemadatan yang kurang bagus sehingga pada daerah tengah bentang mengalami keropos dan kekuatan menahan beban menjadi berkurang. Kerusakan pada daerah lentur juga terjadi pada benda uji 2, 3 dan 4 namun tidak separah pada benda uji 1. Retak-retak kecil pada sekitar daerah lentur juga tidak sebanyak pada benda uji 1.

Melihat dari tipe kerusakan yang terjadi maka bisa ditentukan jenis perbaikan yang digunakan, apakah *grouting* atau injeksi. Pada bagian tengah benda uji yang memiliki retak yang lebar dan mengalami pengelupasan permukaan beton perbaikan yang cocok menggunakan teknik *grouting*. Sedangkan pada daerah yang mengalami retak-retak kecil maupun retak rambut dipakai perbaikan dengan teknik injeksi karena material injeksi dapat mengalir melalui celah-celah kecil.

5.5.2 Pembebanan pada Benda Uji

Pembebanan yang diberikan pada setiap balok uji adalah beban ultimit yaitu beban rencana maksimum yang masih bisa ditahan struktur pada keadaan normal. Dari hasil perhitungan sebelumnya diperoleh beban ultimit teoritis yang mampu ditahan oleh benda uji yang besarnya berbeda pada masing-masing benda uji seperti yang dapat dilihat pada tabel 5.6. Dari hasil pengujian yang dilakukan terhadap empat balok dengan jenis pembebanan yang sama didapatkan besarnya beban ultimit riil yang berbeda-beda pada setiap balok. Besarnya beban

ultimit perhitungan dengan beban ultimit riil kemudian dibandingkan seperti yang terlihat pada tabel 5.8 berikut ini

Tabel 5.8 Perbandingan Hasil Pembebanan Benda Uji

Benda Uji	Pengujian f'c	Pu(kN)		Pcr(kN)	
		teoritis	pengujian	teoritis	pengujian
1	Silinder	163.234	208.5	25.654	25
	Hammer test	166.756		27.446	
	Coredrill	167.668		27.971	
2	Silinder	116.573	158	27.645	33
	Hammer test	115.626		26.498	
	Coredrill	114.946		25.753	
3	Silinder	115.382	151	26.223	30
	Hammer test	115.736		26.488	
	Coredrill	115.861		26.769	
4	Silinder	115.435	173.5	26.282	44
	Hammer test	115.618		26.488	
	Coredrill	115.469		26.319	

Dari tabel 5.8 dapat dilihat bahwa pada perhitungan teoritis terdapat 3 macam beban ultimit dan beban retak, hal tersebut dikarenakan pada saat pengujian kuat tekan beton digunakan tiga cara yaitu dengan uji silinder, *hammer test* dan *coredrill* sehingga didapat tiga beban ultimit teoritis dan beban retak. Perbedaan nilai kuat tekan beton pada setiap percobaan mempengaruhi besarnya nilai perhitungan beban ultimit. Terlihat jelas pada semua benda uji bahwa besar beban ultimit yang mampu ditahan dengan kuat tekan beton hasil *hammer test* dan *coredrill* lebih tinggi dari pada hasil dari uji silinder. Telah dibahas sebelumnya bahwa uji silinder dilakukan sebelum benda uji mengalami perbaikan sedangkan *hammer test* dan *coredrill* dilakukan setelah balok beton mengalami perbaikan sehingga material perbaikan yang memiliki kuat tekan lebih tinggi mempengaruhi nilai kuat tekan beton yang diuji. Pengaruh dari material perbaikan tidak hanya pada nilai kuat tekan beton tetapi juga berpengaruh pada besarnya beban ultimit yang mampu ditahan benda uji dan besarnya nilai beban retak.

Besarnya nilai pembebanan hasil perhitungan teoritis dengan pembebanan hasil pengujian tidak sama, baik pada beban ultimit maupun beban retak. Beban hasil pengujian pada semua benda uji memiliki nilai lebih besar jika dibandingkan dengan beban teoritis. Hasil pengujian mendapatkan nilai beban ultimit (Pu) yang

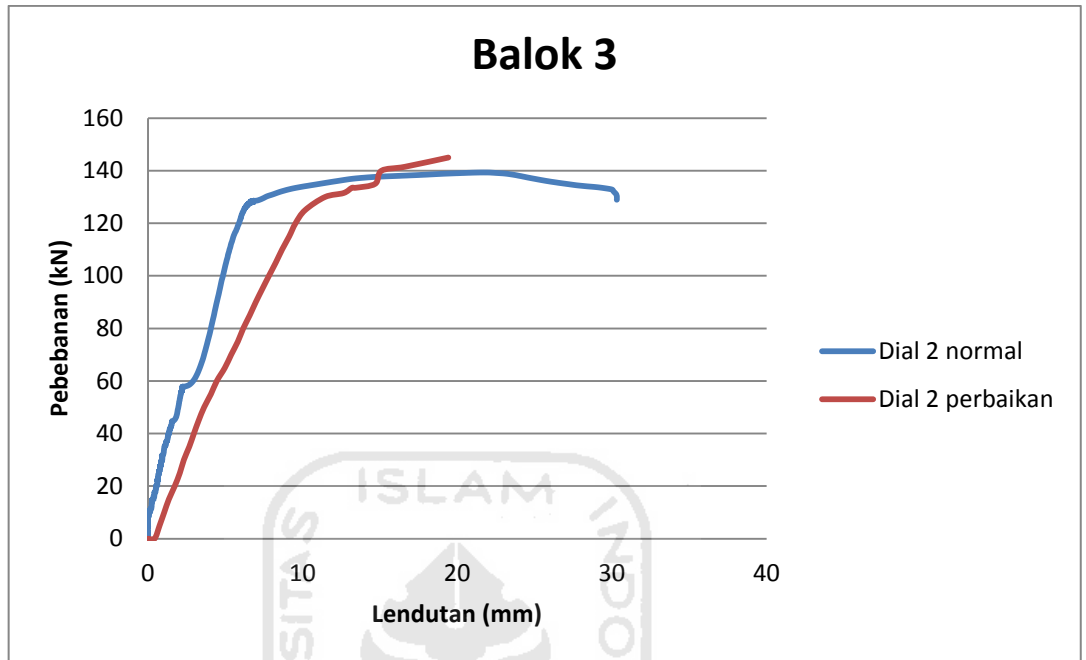
mampu ditahan oleh benda uji 1 yaitu sebesar 208,5 kN. Terjadi peningkatan kapasitas maksimum pada pengujian dibandingkan dengan perhitungan kapasitas teoritisnya. Perhitungan beban ultimit pada benda uji 1 didapat nilai P_u sebesar 163,234 kN, 166,756 kN dan 167,668 kN. Beban ultimit riil yang mampu ditahan benda uji 2 adalah sebesar 158 kN meningkat dari beban ultimit teoritisnya yaitu sebesar 116,573 kN, 115,626 kN dan 114,946 kN. Sedangkan pada benda uji 3 beban ultimit riil yang mampu ditahan adalah sebesar 151 kN lebih tinggi dari beban ultimit teoritis sebesar 115,382 kN, 115,736 kN dan 115,861 kN. Hal yang sama juga terjadi pada benda uji 4 yang memiliki beban ultimit teoritis sebesar 115,435 kN, 115,618 kN, 115,469 kN sedangkan beban ultimit riilnya lebih besar yaitu 173,5 kN.

Tidak hanya pada beban ultimit saja yang mengalami peningkatan, pada beban retak juga terjadi peningkatan kapasitas pada beban retak riilnya. Pada benda uji 1 dari perhitungan teoritis didapat nilai pembebanan retak sebesar 25.654 kN, 27,446 kN dan 27,971 kN sedangkan pada saat pengujian didapat beban sebesar 25 kN. Peningkatan kapasitas juga terjadi pada benda uji 2 yang memiliki beban retak pengujian sebesar 33 kN sedangkan beban retak teoritisnya sebesar 27,645 kN, 26,498 kN dan 25,753 kN. Sama seperti benda uji 1 dan benda uji 2, pada benda uji 3 juga terjadi peningkatan dari beban retak teoritis sebesar 26,223 kN, 26,488 kN dan 26,769 kN menjadi 30 kN pada beban pengujianya. Benda uji 4 yang memiliki beban teoritis 26,282 kN, 26,488 kN dan 26,319 kN juga meningkat pada beban retak pengujian yaitu menjadi sebesar 44 kN. Sama halnya dengan nilai pembebanan ultimit, pada pembebanan retak juga terjadi peningkatan kapasitas maksimumnya pada pengujian dibandingkan dengan perhitungan kapasitas teoritisnya. Kapasitas balok yang meningkat setelah perbaikan terjadi karena material yang digunakan untuk perbaikan yang memiliki nilai kuat tekan beton lebih tinggi dari beton asli telah menggantikan daerah terlemah pada balok sehingga kemampuan balok dalam menerima beban menjadi meningkat.

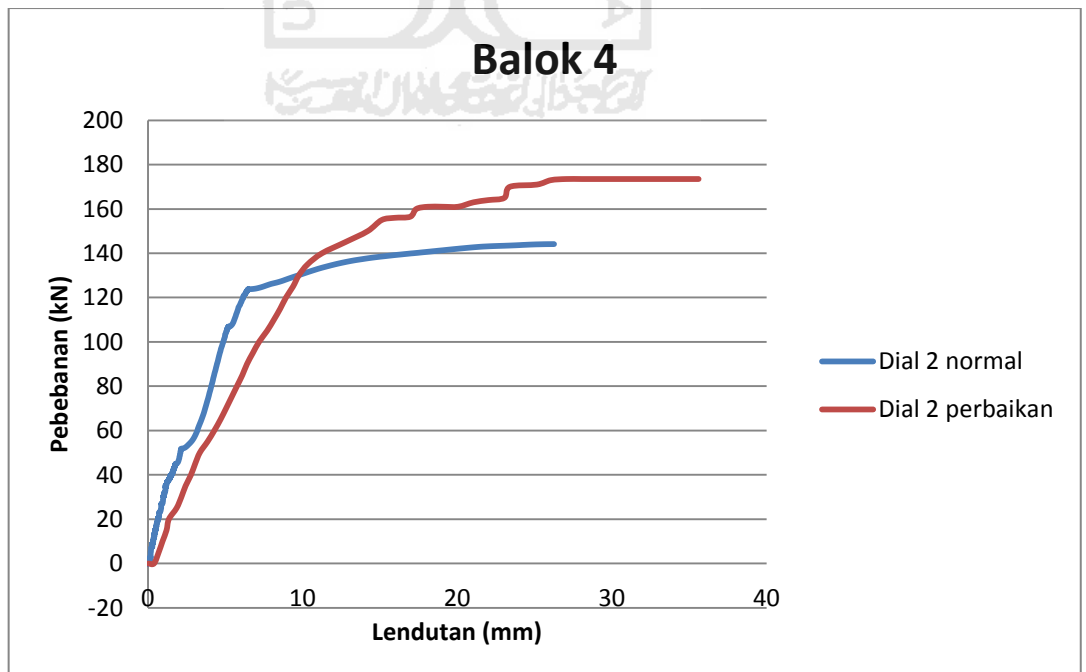
5.5.3 Hubungan Beban dan Lendutan Balok

Pengujian kuat lentur balok dilaksanakan setelah balok uji selesai mengalami proses perbaikan *injection* dan *grouting*. Dari pengujian yang telah dilaksanakan terhadap 4 benda uji hanya benda uji 3 dan benda uji 4 yang dapat dibandingkan

grafiknya pada beton normal dan setelah perbaikan karena sensor pada beton normal benda uji 1 dan 2 kurang dapat dibaca dengan baik. Grafik hubungan beban-lendutan hasil pengujian ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini



Gambar 5.5 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan pada Benda Uji 3



Gambar 5.6 Perbandingan Hubungan Beban-Lendutan pada Benda Uji 4

Dari dua grafik diatas dapat diketahui besarnya pembebanan dan lendutan yang terjadi pada masing-masing benda uji sebelum dan sesudah perbaikan. Terdapat 3 buah dial pada tiap-tiap benda uji yang ditempatkan di sisi utara, sisi tengah dan sisi selatan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 5.1 dan gambar 5.2. Masing-masing dial tersebut menunjukkan besarnya lendutan yang terjadi pada daerah dial ditempatkan. Pada gambar 5.5 dan 5.6 menunjukkan perbandingan dial 2 yaitu dial pada daerah tengah yang mengalami lendutan terbesar pada benda uji normal dan benda uji setelah perbaikan.

Dari gambar 5.5 dan 5.6 yang menunjukkan perbandingan dial tengah pada benda uji normal dan perbaikan dapat disimpulkan bahwa pada benda uji setelah perbaikan dapat menerima beban lebih besar dari pada benda uji normal, yaitu pada benda uji 3 setelah perbaikan sebesar 151 kN dan pada benda uji 4 setelah perbaikan sebesar 173,5 kN sedangkan pada benda uji 3 normal hanya sebesar 139,32 kN dan pada benda uji 4 normal sebesar 144,13 kN. Namun, walaupun benda uji setelah perbaikan dapat menerima beban lebih besar dari pada benda uji normal tetapi benda uji normal lebih daktail dari pada benda uji setelah perbaikan.

Perbandingan besarnya beban yang dapat diterima dan besarnya lendutan yang terjadi dapat diringkas ke dalam tabel 5.9 dibawah ini

Tabel 5.9 Perbandingan hasil pembacaan hubungan beban dengan lendutan

Benda Uji	Beban riil (kN)		Lendutan yang terjadi (mm)	
	Normal	Setelah perbaikan	Normal	Setelah perbaikan
3	139.32	151	21.78	19.8
4	144.13	173.5	26.25	35.6

5.5.4 Daktilitas Kelengkungan (*Curvature Ductility*)

Contoh perhitungan *curvature ductility* pada benda uji 1 dengan nilai kuat tekan beton (f'_c) diambil dari *hammer test* adalah sebagai berikut

$$\emptyset \text{ tulangan tarik} = 0,63 \text{ in}$$

$$\emptyset \text{ tulangan desak} = 0,315 \text{ in}$$

$$b = 5,906 \text{ in}$$

$$h = 11,811 \text{ in}$$

$$d = 10,472 \text{ in}$$

$$\begin{aligned}
d' &= 1,181 \text{ in} \\
\varepsilon_s &= \frac{f_y}{E_s} = \frac{453,705}{200000} = 0,002 \\
A_s &= 3 \times \left(\frac{1}{4}\right) \times \pi \times 0,63^2 = 0,934 \text{ in}^2 \\
A_s' &= 2 \times \left(\frac{1}{4}\right) \times \pi \times 0,315^2 = 0,156 \text{ in}^2 \\
\rho &= \frac{A_s}{bxd} = \frac{0,934}{5,906 \times 10,472} = 0,015 \\
\rho' &= \frac{A_s'}{bxd} = \frac{0,156}{5,906 \times 10,472} = 0,003 \\
n &= \frac{E_s'}{E_c} = 9,06 \\
k &= \left[(\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) n \right]^{1/2} - (\rho + \rho') n \\
&= \left[(0,015 + 0,003)^2 9,06^2 + 2 \left(0,015 + \frac{0,003 \times 1,181}{10,472} \right) 9,06 \right]^{1/2} - (0,015 + 0,003) 9,06 \\
&= 0,392 \\
kd &= 0,392 \times 10,472 \\
&= 4,106 \text{ in} \\
\varphi_u &= \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{0,003}{3,287} = 0,0009 \text{ rad/in} = 0,0359 \text{ rad/m} \\
\varphi_y &= \frac{\varepsilon_s}{d - kd} = \frac{0,002}{10,472 - 4,106} = 0,0004 \text{ rad/in} = 0,014 \text{ rad/m} \\
\text{curvature ductility} &= \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{0,0009}{0,0004} = 2,561
\end{aligned}$$

Hasil dari perhitungan pada masing-masing balok uji dengan kuat tekan beton rata-rata dari uji silinder, *hammer test* dan *coredrill* dapat dilihat pada tabel 5.10 berikut ini

Tabel 5.10 Hasil perhitungan *curvature ductility*

Benda Uji	ρ	ρ'	n	k	kd(in)	ϕ_u		ϕ_y		curvature ductility
						(rad/in)	(rad/m)	(rad/in)	(rad/m)	
1	0.015	0.003	9.063	0.392	4.106	0.0009	0.0359	0.0004	0.0140	2.56
	0.015	0.003	9.063	0.392	4.106	0.0009	0.0369	0.0004	0.0140	2.63
	0.015	0.003	9.063	0.392	4.106	0.0008	0.0317	0.0004	0.0140	2.26
2	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0506	0.0003	0.0128	3.95
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0012	0.0479	0.0003	0.0128	3.74
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0014	0.0545	0.0003	0.0128	4.25
3	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0510	0.0003	0.0128	3.99
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0516	0.0003	0.0128	4.03
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0496	0.0003	0.0128	3.87
4	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0505	0.0003	0.0128	3.95
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0499	0.0003	0.0128	3.90
	0.010	0.003	9.063	0.334	3.497	0.0013	0.0498	0.0003	0.0128	3.89

Tabel 5.10 menunjukkan nilai *curvature ductility* hasil dari perhitungan yang didasarkan pada perhitungan *yield curvature* (ϕ_y) dan *ultimate curvature* (ϕ_u). Nilai *curvature ductility* dari benda uji 1, benda uji 2, benda uji 3 dan benda uji 4 berkisar antara 2,26 sampai 4,25. Masing-masing benda uji memiliki 3 *curvature ductility* karena pengaruh dari kuat tekan beton yang didapat dari 3 pengujian berbeda namun nilainya hampir mendekati. Peningkatan daktilitas dari perhitungan dengan kuat tekan beton sebelum perbaikan dan setelah perbaikan berkisar antara 1%-2,73%.

Selain berdasarkan perhitungan nilai *curvature ductility* juga didapat dari program response2000. Pada program tersebut didapat grafik hubungan momen- ϕ sehingga dapat dicari nilai ϕ_y dan ϕ_u . Besarnya nilai *curvature ductility* yang merupakan hasil dari response2000 dapat dilihat pada tabel 5.11 berikut ini

Tabel 5.11 *Curvature ductility* hasil response2000

Benda Uji	Pengujian f _c	ϕ_u (rad/km)	ϕ_y (rad/km)	curvature ductility
1	Silinder	17.671	4.230	4.18
	Hammer test	19.447	4.232	4.60
	Coredrill	16.075	3.848	4.18
2	Silinder	18.416	4.409	4.18
	Hammer test	16.740	4.849	3.45
	Coredrill	16.740	4.849	3.45
3	Silinder	16.761	7.108	2.36
	Hammer test	16.761	5.341	3.14
	Coredrill	16.762	4.013	4.18
4	Silinder	16.740	5.334	3.14
	Hammer test	16.740	4.849	3.45
	Coredrill	16.740	4.408	3.80

Nilai *curvature ductility* antara hasil perhitungan dengan hasil dari response2000 terjadi perbedaan. Pada *curvature ductility* masing-masing benda uji hasil dari response2000 terlihat lebih besar dari pada hasil perhitungan. Perbedaan besarnya nilai *curvature ductility* berkisar antara 2.37%-84.96%, perbedaan yang terendah yaitu pada benda uji benda uji 4 sebesar 2,37% dan yang terbesar ada pada benda uji 1. Terjadinya perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil program dikarenakan pada saat pemilihan diameter tulangan pada program response2000 hanya dimasukan diameter yang mendekati saja karena pada kolom diameter tersebut sudah tersedia pilihan diameter tulangnya, selain itu kurang teliti dalam pemasukan data maupun pembacaan grafik juga berpengaruh terhadap perbedaan nilai tersebut.

Perbandingan nilai *curvature ductility* pada benda uji normal dan benda uji perbaikan dapat dilihat pada tabel 5.12 berikut

Tabel 5.12 Perbandingan hasil perhitungan *curvature ductility*

Benda Uji	<i>Curvature Ductility</i>		
	Normal	Setelah perbaikan	
		Pehitungan	Response2000
3	5.65	3.99	2.36
4	5.68	3.95	3.14

Hasil perbandingan *curvature ductility* seperti yang ditunjukkan pada tabel 5.12 antara benda uji normal dengan benda uji setelah perbaikan adalah bahwa benda uji normal memiliki nilai *curvature ductility* yang lebih besar dari pada benda uji setelah perbaikan, sehingga dapat disimpulkan bahwa benda uji normal lebih daktil dari pada benda uji setelah perbaikan.

5.5.5 Daktilitas Simpangan

Selain daktilitas kelengkungan dapat juga dihitung daktilitas simpangan pada balok yang didapat dari grafik hubungan beban-lendutan. Dari grafik hubungan beban-lendutan dapat diketahui besarnya lendutan pada saat ultimit dan pada saat leleh pertama sehingga dapat dicari besarnya daktilitas simpangan pada masing-masing balok tersebut, yaitu dengan membandingkan antara lendutan pada saat ultimit dengan lendutan pada saat leleh. Hasil perhitungan daktilitas simpangan pada masing-masing balok dapat dilihat pada tabel 5.13 berikut ini

Tabel 5.13 Hasil perhitungan daktilitas simpangan

Benda Uji	Δy	Δu	Daktilitas Simpangan
1	12.11	18.65	1.540
2	9.71	28.15	2.899
3	9.54	19.8	2.075
4	10.32	35.6	3.450

Dapat dilihat bahwa daktilitas pada benda uji berkisar antara 1,54-3,450 sehingga benda uji tersebut dapat dikatakan daktil. Perbandingan antara daktilitas simpangan pada benda uji normal dengan benda uji setelah perbaikan terdapat pada tabel 5.14 dibawah ini

Tabel 5.14 Perbandingan hasil perhitungan daktilitas simpangan

Benda Uji	Daktilitas Simpangan	
	Normal	Setelah perbaikan
3	4.445	2.075
4	5.271	3.450

Walaupun benda uji setelah perbaikan cukup daktil namun setelah dibandingkan dengan benda uji normal ternyata benda uji normal lebih daktil

dari pada benda uji perbaikan. Pada benda uji normal daktilitas simpangannya pada benda uji 3 sebesar 4,445 dan pada benda uji 4 sebesar 5,271 sedangkan setelah perbaikan nilai daktilitas simpangan pada benda uji 3 sebesar 2,075 dan pada benda uji 4 sebesar 3,450 lebih kecil dari benda uji normal.

5.5.6 Pola Retak Balok Beton

Retak yang terjadi pada benda uji dapat dijadikan sebagai salah satu acuan untuk menentukan efektifitas perbaikan yang dilaksanakan dalam penelitian ini. Benda uji 1 seperti yang terlihat pada gambar 5.7 dibawah menunjukkan bahwa retak yang terjadi adalah retak geser. Hal tersebut dikarenakan benda uji 1 tidak mampu menahan tegangan geser yang terjadi. Kalau dilihat dari besarnya nilai kuat tekan beton (f^c) hasil *hammer test* dan *coredrill* pada tabel 5.3 dan 5.4 pada sisi barat balok uji memiliki nilai kuat tekan beton yang lebih kecil dari pada sisi tengah dan timur. Hal tersebut menjadi salah satu bukti kenapa balok uji 1 mengalami retak geser pada sisi barat. Selain hal tersebut, dilihat dari besarnya rasio tulangan pada tabel 5.6, rasio tulangan lentur pada benda uji 1 yaitu 0,0151 yang lebih besar dari rasio tulangan lentur 3 benda uji lainnya yaitu 1,0101 sehingga mampu menahan tegangan lentur yang terjadi, sedangkan rasio tulangan geser sebesar 0,0021 yang lebih kecil dari pada benda uji lainnya yang sebesar 0,0028, maka wajar apabila benda uji 1 mengalami kegagalan pada geser.

Pada benda uji 2 yang ditunjukkan oleh gambar 5.8 dibawah mengalami retak pada bagian tengah dan sebagian pada sisi barat. Nilai kuat tekan beton pada benda uji 2 memang menunjukkan pada sisi tengah dan barat lebih kecil dari pada sisi timur sehingga pada sisi timur tidak terjadi retakan yang besar. Pola keretakan pada benda uji 3 dapat dilihat pada gambar 5.10 yang menunjukkan bahwa kerusakan terjadi pada sisi tengah. Kalau dilihat dari nilai f^c pada benda uji 3 pada tabel 5.3 dan 5.4 memang menunjukkan besarnya nilai f^c pada sisi tengah yang lebih kecil sehingga kerusakan yang terjadi cenderung pada sisi tengah.

Pola keretakan pada benda uji 4 dapat dilihat pada gambar 5.12 di bawah yang menunjukkan keretakan terjadi pada sisi tengah dan barat. Kalau dilihat dari besarnya nilai f^c hasil uji *coredrill* memang menunjukkan bahwa pada sisi tengah memiliki nilai yang terkecil kemudian pada sisi barat lebih tinggi. Hal tersebut sesuai dengan pola keretakan yang terjadi. Sedangkan nilai f^c hasil *hammer test* menunjukkan bahwa nilai pada sisi tengah memang yang terkecil, namun pada sisi

barat nilainya lebih besar daripada pada sisi timur. Hal tersebut tidak sesuai dengan pola keretakan yang terjadi pada balok uji 4. Besarnya nilai kuat tekan beton yang tidak sesuai dengan pola keretakan disebabkan pada saat pengambilan titik untuk melakukan *hammer test* terjadi pada daerah yang dekat dengan retakan sehingga hasil yang didapat lebih kecil dan tidak sesuai. Selain disebabkan oleh faktor nilai kuat tekan beton, pola kerusakan pada balok juga dipengaruhi oleh besarnya nilai rasio penulangan lentur dan geser. Pada benda uji 4 jika dibandingkan dengan benda uji 1 yang memiliki nilai rasio tulangan geser yang sama yaitu sebesar 0,0021 ternyata memiliki pola keretakan yang berbeda, hal tersebut dikarenakan pada benda uji 1 memiliki jumlah tulangan lentur 3 buah sedangkan pada benda uji 4 sebanyak 2 buah sehingga benda uji 1 lebih kuat terhadap lentur jika dibandingkan dengan benda uji 4 yang mengalami kerusakan lentur walaupun memiliki nilai rasio geser yang sama-sama kecil jika dibandingkan dengan benda uji 2 dan 3.

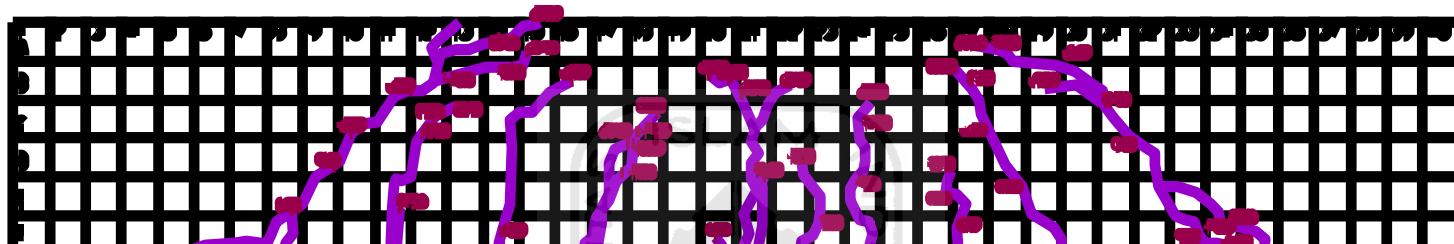
Perbandingan pola retak antara benda uji normal dengan benda uji setelah perbaikan dapat dilihat pada benda uji 3 dan benda uji 4, yaitu pada gambar 5.9 dengan 5.10 dan gambar 5.11 dengan 5.12. Dari perbandingan gambar pola retak tersebut dapat disimpulkan bahwa pola retak yang terjadi pada benda uji setelah perbaikan berada diluar daerah perbaikan dan bergeser dari retak semula pada benda uji normal, namun keretakan tetap terjadi pada daerah lentur. Penggunaan bahan perbaikan yang mempunyai nilai kuat tekan lebih tinggi dari nilai kuat tekan beton benda uji membuat retak yang terjadi berada diluar daerah retak semula karena daerah yang lemah yaitu yang mengalami keretakan telah digantikan oleh material perbaikan sehingga daerah tersebut menjadi daerah yang kuat sedangkan pada beton yang tidak mengalami perbaikan menjadi daerah terlemah pada balok tersebut. Dari pola keretakan yang terjadi diluar daerah perbaikan menunjukkan bahwa perbaikan yang telah dilakukan cukup berhasil.

Balok 1

Tampak depan

Barat

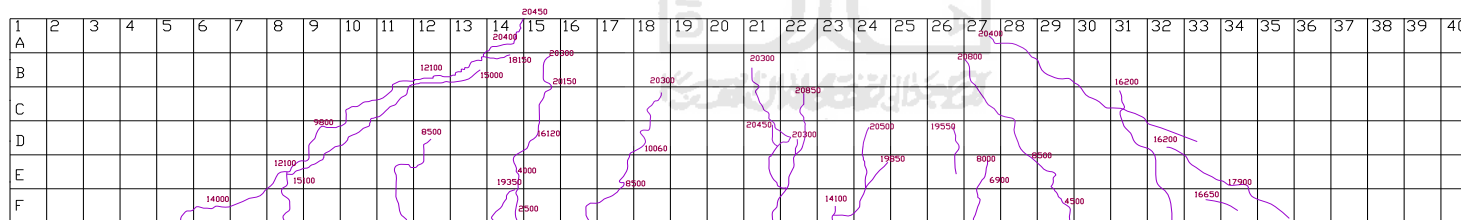
Timur



Tampak belakang

Barat

Timur



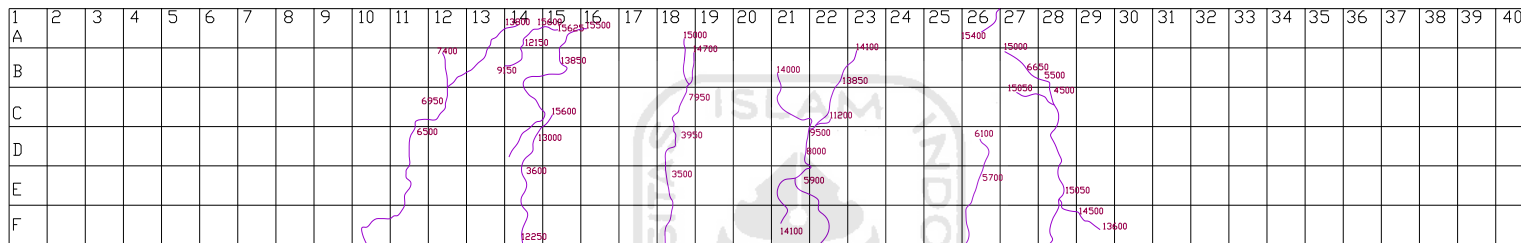
Gambar 5.7 Pola retak benda uji 1

Balok 2

Tampak depan

Barat

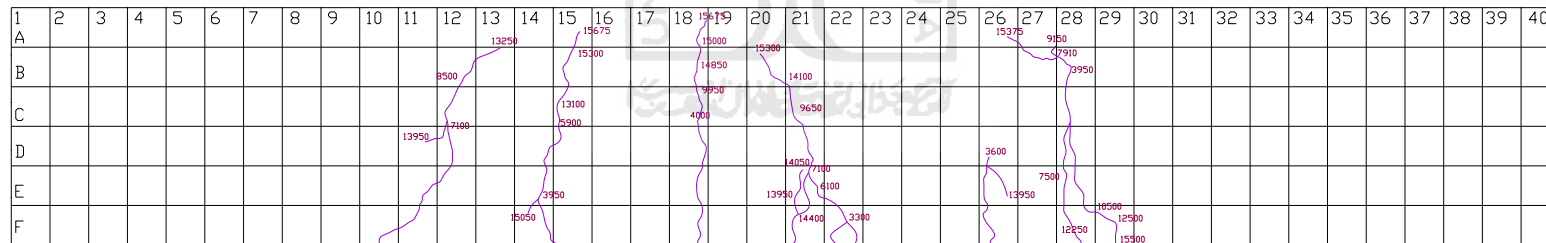
Timur



Tampak belakang

Barat

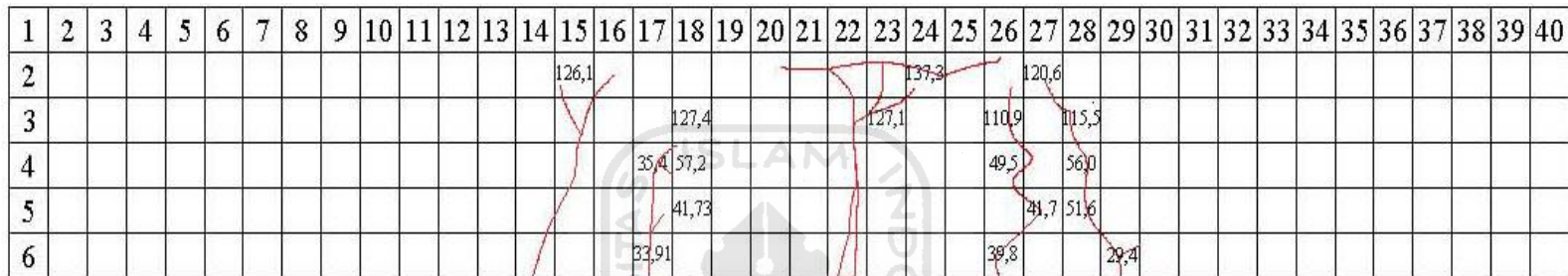
Timur



Gambar 5.8 Pola retak benda uji 2

Balok 3 normal

Tampak depan



Tampak belakang



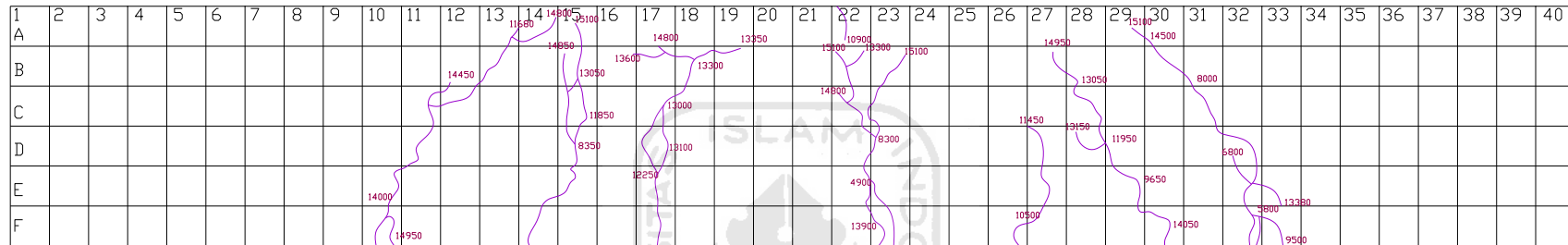
Gambar 5.9 Pola retak benda uji 3 normal

Balok 3 setelah perbaikan

Tampak depan

Barat

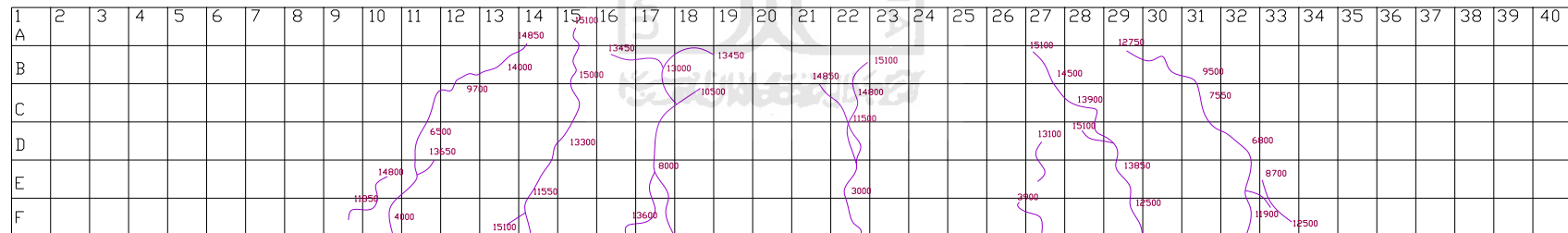
Timur



Tampak belakang

Barat

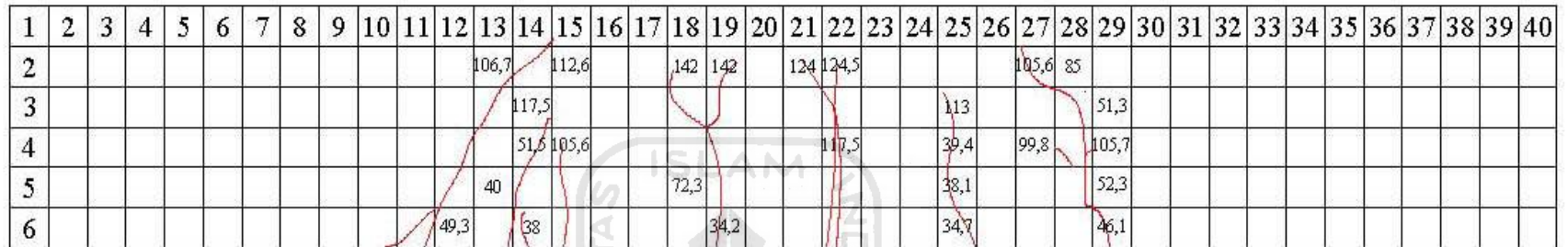
Timur



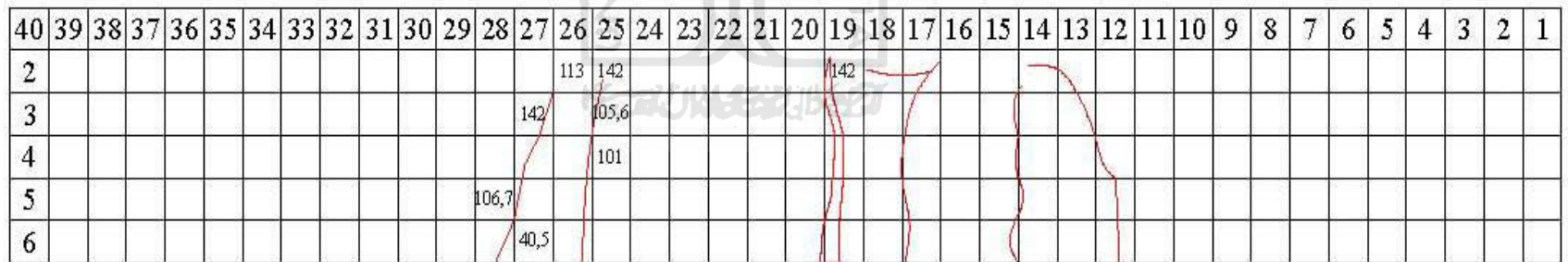
Gambar 5.10 Pola retak benda uji 3 setelah perbaikan

Balok 4 normal

Tampak depan



Tampak belakang



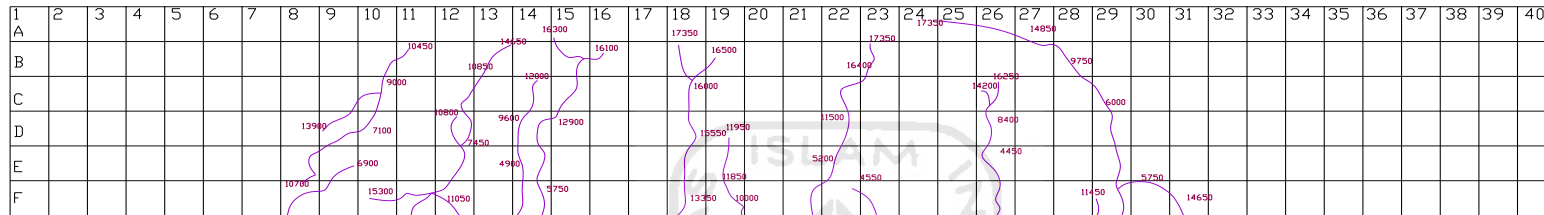
Gambar 5.11 Pola retak benda uji 4 normal

Balok 4 setelah perbaikan

Tampak depan

Barat

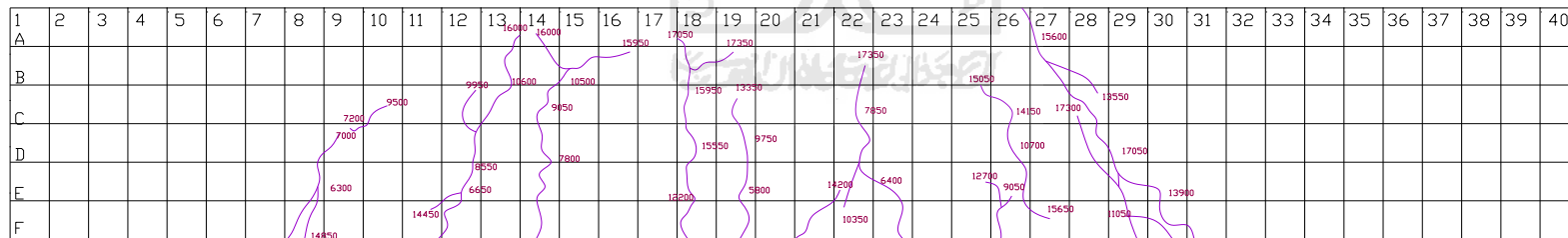
Timur



Tampak belakang

Barat

Timur



Gambar 5.12 Pola retak benda uji 4 setelah perbaikan



DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 1991, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung (SK-SNI T-15-1991-03), Bandung : Yayasan LPMB
- Aboe, Kadir, 2000, Struktur Beton I, Yogyakarta : Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
- Emmons H Peter, (2001), "Concrete Repair and Maintenance Illustrated", Galgotia Publication pvt. Ltd., New Delhi
- McCormac Jack C dan Sumargo, (2008), "Desain Beton Bertulang", Penerbit Erlangga, Jakarta
- Nawy Edward G dan Bambang Suryoatmo, (2008), "Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar", PT Refika Aditama, Bandung
- Nawy Edward G dan Tavio, (2010), :Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar Edisi Tata Cara ACI 318-05", ITS Press, Surabaya
- Park. R and Paulay. T, 1975, *Reinforced Concrete Structures*, New York : John Wiley and Sons Inc.
- Tri Mulyono, (2005), "teknologi Beton", C.V. Andi Offset, Yogyakarta
- Widodo, 2006, Seismologi dan Teknik Kegempaan, Yogyakarta :Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia
- _____, 2009, "Buku Panduan Praktikum Teknologi Bahan Konstruksi", Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta
- _____, 2005, Buku Pedoman Tugas Akhir Dan Praktik Kerja, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta

