

**TUGAS AKHIR**

**KINERJA BALOK LENTUR BETON BERTULANG  
DENGAN VARIASI SAMBUNGAN BAJA TULANGAN**

*(FLEXURAL PERFORMANCE OF RC BEAMS WITH VARIETY  
CONNECTIONS OF REINFORCING STEEL)*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu Teknik Sipil**



**Novia Mahlisani  
10.511.151**

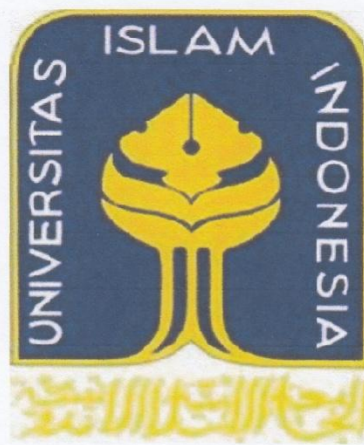
**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
YOGYAKARTA  
2014**

**TUGAS AKHIR**

**KINERJA BALOK LENTUR BETON BERTULANG  
DENGAN VARIASI SAMBUNGAN BAJA TULANGAN**

*(FLEXURAL PERFORMANCE OF RC BEAMS WITH VARIETY  
CONNECTIONS OF REINFORCING STEEL)*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu Teknik Sipil**



**Novia Mahlisani  
10.511.151**

**Disahkan Oleh :**

**Pembimbing :**

**(Prof. Ir. H. M. Teguh, MSCE., Ph.D.)**

**Tanggal : 18/12/2014**

**Ketua Jurusan :**



**(Miftahul Fauziah., ST., MT, Ph.D.)**

**Tanggal :**

**TUGAS AKHIR**

**KINERJA BALOK LENTUR BETON BERTULANG  
DENGAN VARIASI SAMBUNGAN BAJA TULANGAN**

*(FLEXURAL PERFORMANCE OF RC BEAMS WITH VARIETY  
CONNECTIONS OF REINFORCING STEEL)*

**Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu Teknik Sipil**



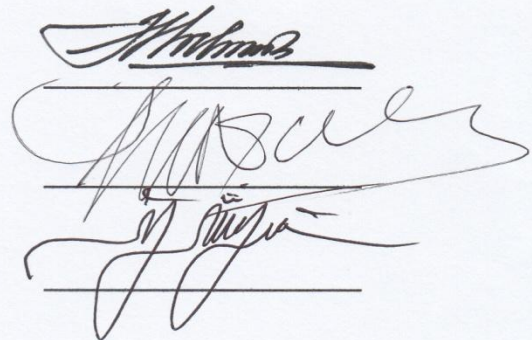
**Novia MAhlisani  
10.511.151**

**Disetujui Oleh :**

**Pembimbing/Penguji :  
Prof. Ir. H. M. Teguh, MSCE., Ph.D**

**Penguji :  
Ir. H. Suharyatmo, MT**

**Penguji :  
Yunalia Muntafi, ST., MT**



"PERSEMBAHAN YANG TELAT  
UNTUK MAMA DAN PAPA  
SEMOGA DENGAN SELESAINYA TUGAS AKHIR INI  
MENJADI SALAH SATU CARA UNTUK  
MEMBAHAGIAKAN MAMA , PAPA DAN DEDEK"

## ABSTRAK

Balok lentur beton bertulang pada umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor misalnya: kuat tekan beton, tegangan leleh pada baja tulangan, rasio tulangan, panjang bentang balok dan kekakuan balok. Ketika suatu balok memiliki bentang panjang yang melebihi panjang baja tulangan yang ada di pasaran maka akan ada beberapa permasalahan dalam penyambungan baja tulangan agar memenuhi standar SNI.

Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap kinerja balok lentur beton bertulang yang menggunakan variasi sambungan pada baja tulangan lentur. Balok lentur ditumpu sederhana (sendi-rol) dibebani secara statik dengan dua beban terpusat yang dipasang pada sepertiga bentangan untuk diketahui perilaku lentur pada balok akibat variasi sambungan baja tulangan pokok yang terpasang.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan 5 (lima) buah balok beton bertulang dengan dimensi (150 x 300 x 2000) mm, dengan tulangan lentur 3Ø12. Kelima balok beton bertulang tersebut mempunyai sambungan tulangan dengan sambungan *overlap*, sambungan las, dan kombinasi antara sambungan las dengan normal maupun *overlap* dengan normal. Sebagai pembanding benda uji digunakan satu balok dengan tulangan normal.

Dari hasil penelitian diketahui bahwa balok dengan sambungan *overlap* mampu menahan beban lebih besar dan memiliki tingkat daktilitas yang tinggi dibandingkan dengan balok yang mempunyai sambungan tipe las dan balok tulangan normal. Selain itu kelima benda uji balok mengalami keruntuhan tarik yang mana baja tulangan leleh terlebih dahulu sebelum beton mencapai regangan batasnya, dengan pola retak yang terjadi adalah retak lentur. Retak dimulai dari serat beton bagian tarik lalu menjalar kebagian serat tekan.

**Kata kunci :** Balok lentur, variasi, sambungan, daktilitas

## **ABSTRACT**

*Flexural strength of reinforced concrete (RC) beams is commonly affected by several factors for instance: compressive strength of concrete, yield stress of reinforcing rebars, reinforcement ratio, beam length, and beam stiffness. Another important factor when a beam having long span more than the practical maximum length of rebar, there will be some problems in jointing the reinforcing steel rebars to meet the SNI standard.*

*This research examines flexural performance of reinforced concrete beams utilizing variety joint techniques in the reinforcing steels. The RC beam were simply supported ( ) and loaded statically by two pointed loads that were installed on one-third of the span to look the behavior of RC beam in the variety of joint techniques of reinforcing steel.*

*These tests used five types of RC beams. The typical beams dimension was 150x300x200 mm. It used 3Ø12 reinforcing steel. All of the five RC beams have different connection. They are overlap connection, weld connection, and the combination of weld and normal connection or overlap and normal connection. As the comparison, there will be a RC beam using normal connection of reinforcing steel.*

*the aim of the research is to investigate whether the RC beams using overlap connection of reinforcing steel is able to resist more loads and have high ductility than RC beam using weld connection or normal connection of reinforcing steel. Besides that, all of the five RC beams suffered under-reinforced concrete where the reinforcing steel yielded first before the concrete reached the strain limit. The patterns of the cracks were flexural cracks. The cracks were started from the bottom of the RC beams and then spreaded to the top of the RC beams.*

**Keywords :** *flexural RC beam, Variety, connectin, ductility*

## KATA PENGANTAR

*Assalamu'alaikum Wr. Wb*

Alhamdulillah rabbil 'alamin. Puji dan Syukur dihaturkan kehadirat Allah SWT atas karunia-Nya sehingga tugas akhir yang berjudul " Kinerja Balok Lentur Dengan Variasi Sambungan Baja Tulangan" ini dapat terselesaikan. Tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat Strata Satu (S1) pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Selama pengerjaan tugas akhir ini telah banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Ir. H. Mochammad Teguh, MSCE, Ph.D selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, terima kasih atas bimbingan, nasehat dan dukungan yang diberikan dalam penyusunan tugas akhir ini.
2. Ir. H. Suharyatmo, MT dan Yunalia Muntafi, ST. MT selaku dosen penguji tugas akhir, terima kasih atas koreksi, nasehat dan masukan yang telah diberikan.
3. Papa dan mama tercinta Bpk Abdurrani dan Ibu Lisawati yang terus berjuang untuk masa depan anak-anaknya, yang selalu mendukung setiap kegiatan positif dan selalu memberikan doa disetiap harinya.
4. Segenap staf dan karyawan Laboratorium Mekanika Rekayasa, Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik Program Studi Teknik Sipil FTSP-UII, terutama Bpk. Warno dan Bpk. Daru yang telah memberikan masukan dan bantuan selama penelitian berlangsung, serta Bpk Hari terima kasih atas bantuannya selama di laboratorium, sehingga proses pengerjaan tugas akhir ini dapat lebih ringan.
5. Syamsul Bahri yang menjadi tempat cerita, yang telah memberikan semangat sehingga tugas akhir ini dapat selesai.
6. Teman-teman Teknik Sipil 2010 yang telah banyak membantu selama proses penelitian berlangsung, terima kasih atas waktu dan tenaga yang diluangkan untuk membantu penelitian ini.

7. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

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

*Wabillahittaufig wal hidayah*

*Wassalamu 'alaikum Wr. Wb*

Yogyakarta, Desember 2014

Hormat Penulis

Novia Mahlisani

## DAFTAR ISI

	Halaman
Judul	i
Pengesahan	ii
Persetujuan	iii
Persembahan	iv
ABSTRAK	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
DAFTAR NOTASI	xix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 LATAR BELAKANG MASALAH	1
1.2 RUMUSAN MASALAH	3
1.3 TUJUAN PENELITIAN	3
1.4 MANFAAT PENELITIAN	4
1.5 BATASAN PENELITIAN	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 LENTUR BALOK BETON BERTULANG	6
2.2 PENYAMBUNGAN TULANGAN POKOK	7
2.3 PENGARUH ZAT ADITIF TERHADAP KUAT TEKAN BETON	8
2.4 KEASLIAN PENELITIAN	9
<b>BAB III LANDASAN TEORI</b>	
3.1 BETON	11
3.2 BAHAN SUSUN BETON	11
3.2.1 <i>Portland Cement</i>	12
3.2.2 Air	15

3.2.3	Agregat	16
3.3	FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KUAT TEKAN BETON	19
3.3.1	Faktor Air Semen	20
3.3.2	Umur Beton	21
3.3.3	Jumlah dan Jenis Semen	21
3.3.4	Sifat Agregat	22
3.3.5	Kemudahan Dalam Pengerjaan ( <i>Workability</i> )	22
3.3.6	Bahan Tambah	23
3.4	PERAWATAN BETON	24
3.5	METODE PERANCANGAN CAMPURAN BETON	25
3.6	BAJA TULANGAN	35
3.6.1	Jenis Baja Tulangan	35
3.6.2	Ukuran Baja Tulangan	36
3.6.3	Toleransi Ukuran	37
3.6.4	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan	37
3.6.5	Tulangan Longitudinal	39
3.6.6	Panjang Penyaluran Baja Tulangan	40
3.6.7	Sambungan Baja Tulangan Dilas	42
3.7	BETON BERTULANG	42
3.7.1	Distibusi Tegangan dan Regangan Balok Tulangan Tunggal	44
3.7.2	Rasio Tulangan Maksimal dan Minimal	48
3.8	JENIS KERUNTUHAN LENTUR	51
3.8.1	Keruntuhan Tekan	51
3.8.2	Keruntuhan Seimbang	52
3.8.3	Keruntuhan Tarik	52
3.9	JENIS RETAK	53
3.10	DAKTILITAS	54
3.11	SAMBUNGAN LAS	55
3.12.1	Jenis Sambungan Las	56
3.12.2	Cacat Pada Las	58
<b>BAB IV METODOLOGI PENELITIAN</b>		
4.1	METODE PENELITIAN	60

4.2	BAHAN BENDA UJI	60
4.2.1	Bahan	60
4.2.2	Benda Uji	61
4.3	PERALATAN PENELITIAN	65
4.4	PELAKSANAAN PENELITIAN	74
4.4.1	Persiapan Bahan	74
4.4.2	Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan	75
4.4.3	Penulangan Benda Uji	75
4.4.4	Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton	75
4.4.5	Pemasangan <i>Strain Gauge</i> Pada Benda Uji	76
4.4.6	Persiapan Benda Uji	76
4.4.7	Persiapan Program MG Assistant	77
4.4.1	Pelaksanaan Pengujian	78
4.5	DATA PENGUJIAN	78
4.6	PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS	79
4.7	BAGAN ALIR PENGUJIAN	80
4.8	BAGAN ALIR Pengerjaan Tugas Akhir	83
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN		
5.1	UMUM	84
5.2	KUAT TEKAN BETON	84
5.3	KUAT TARIK BAJA TULANGAN	86
5.4	PEMBEBANAN	88
5.5	PENGUJIAN BALOK	95
5.6	HUBUNGAN BEBAN-LENDUTAN	96
5.7	HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN BETON	99
5.8	HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN BAJA TULANGAN	104
5.9	DAKTILITAS SIMPANGAN	108
5.10	POLA KERETAKAN BALOK	109
BAB VI SIMPULAN DAN SARAN		
6.1	SIMPULAN	113
6.2	SARAN	113

DAFTAR PUSTAKA  
LAMPIRAN

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Komposisi Kimia Masing-masing Jenis Semen	14
Tabel 3.2 Batas Gradasi Agregat Halus	18
Tabel 3.3 Syarat Agregat Kasar Menurut <i>British Standard</i>	19
Tabel 3.4 Hubungan Antara Umur Beton dan Kuat Tekan Beton	21
Tabel 3.5 Variasi Nilai Slump Untuk Berbagai Jenis Komponen Struktur	23
Tabel 3.6 Faktor Pengali Untuk Deviasi Standar	25
Tabel 3.7 Batas Gradasi Agregat Halus	26
Tabel 3.8 Gradasi Krikil	26
Tabel 3.9 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan Faktor Air Semen Untuk Berbagai Macam Pembetonan dan Lingkungan Khusus	29
Tabel 3.10 Ketentuan Minimum Untuk Beton Bertulang Kedap Air	29
Tabel 3.11 Ketentuan Untuk Beton yang Berhubungan Dengan Air Tanah yang Mengandung sulfat	30
Tabel 3.12 Penetapan Nilai Slump	30
Tabel 3.13 Perkiraan Kebutuhan Air Per m <sup>3</sup> Beton	31
Tabel 3.14 Ukuran Baja Tulangan Polos	36
Tabel 3.15 Ukuran Baja Tulangan Ulir	36
Tabel 3.16 Toleransi Diameter Baja Tulangan	37
Tabel 3.17 Rasio Tulangan Maksimal Dalam Persen	49
Tabel 3.18 Rasio Tulangan Minimal Dalam Persen	50
Tabel 4.1 Tipikal Dimensi Balok	62
Tabel 4.2 Data Pengujian Balok Beton Bertulang	79
Tabel 5.1 Hasil Uji Kuat Tekan Silinder Beton	85
Tabel 5.2 Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan	87
Tabel 5.3 Hasil Perhitungan Nilai P	94
Tabel 5.4 Pembebanan Maksimum Pada Benda Uji	95
Tabel 5.5 Defleksi Maksimum Pada Semua Benda Uji	98
Tabel 5.6 Nilai Tegangan dan Regangan Beton	103
Tabel 5.7 Nilai Daktilitas Balok	108



## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 3.1 Skema Bahan Susun Beton	12
Gambar 3.2 Hubungan Umur dan Kuat Tekan Beton Berdasarkan Unsur-unsur Utama Semen	13
Gambar 3.3 Hubungan Tegangan dan Regangan Beton	19
Gambar 3.4 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen	21
Gambar 3.5 Hubungan Kuat Tekan Beton Untuk Berbagai Jenis Semen	22
Gambar 3.6 Pengukuran Nilai Slump	23
Gambar 3.7 Hubungan Kuat Tekan Beton Dengan Perawatan Beton	24
Gambar 3.8 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen Untuk Benda Uji Berbentuk Silinder	27
Gambar 3.9 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen Untuk Benda Uji Berbentuk Kubus	28
Gambar 3.10 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm	32
Gambar 3.11 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm	32
Gambar 3.12 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang Dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm	33
Gambar 3.13 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Dipadatkan	34
Gambar 3.14 Grafik Hubungan Regangan dan Tegangan Baja Tulangan	39
Gambar 3.15 Contoh Pemasangan Tulangan Longitudinal Balok	40
Gambar 3.16 Material Komposit Beton Bertulang	43
Gambar 3.17 Beton Tanpa Tulangan	43
Gambar 3.18 Beton Dengan Tulangan	43
Gambar 3.19 Distribusi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Tunggal	45
Gambar 3.20 Distribusi Regangan Ultimit Pada Keruntuhan Lentur	51
Gambar 3.21 Jenis-jenis Retak Pada Balok	53
Gambar 3.22 Jenis Dasar Sambungan Las	57
Gambar 3.23 Jenis Las Tumpul	58

Gambar 4.1	Potongan BU-1	63
Gambar 4.2	Potongan BU-2	63
Gambar 4.3	Potongan BU-3	64
Gambar 4.4	Potongan BU-4	64
Gambar 4.5	Potongan BU-5	65
Gambar 4.6	Mistar	65
Gambar 4.7	Kaliper	65
Gambar 4.8	Mesin Pengaduk Campuran Beton	66
Gambar 4.9	Cetakan Silinder Beton	66
Gambar 4.10	Timbangan Kapasitas 100 kg	67
Gambar 4.11	Timbangan Kapasitas 20 kg	67
Gambar 4.12	<i>Slump Test Set</i>	68
Gambar 4.13	<i>Vibrator</i>	69
Gambar 4.14	Mesin Uji Desak Tipe ADR 3000	69
Gambar 4.15	Mesin Uji Tarik Shimatsu Tipe UMH 30	70
Gambar 4.16	<i>Loading Frame</i>	70
Gambar 4.17	<i>Hydraulic Pump</i>	71
Gambar 4.18	<i>Data Logger</i>	71
Gambar 4.19	<i>Strain Gauge</i>	72
Gambar 4.20	LVDT	73
Gambar 4.21	<i>Load Cell</i>	73
Gambar 4.22	Komputer	74
Gambar 4.23	Detail Penempatan LVDT dan Beban	77
Gambar 4.24	<i>Flowchart</i> Persiapan Pengujian Beton	80
Gambar 4.25	<i>Flowchart</i> Persiapan Pengujian Baja Tulangan	81
Gambar 4.26	<i>Flowchart</i> Persiapan Peralatan Benda Uji	82
Gambar 4.27	<i>Flowchar</i> Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir	83
Gambar 5.1	Detai Pemodelan Benda Uji	91
Gambar 5.2	Hubungan Beban-Lendutan BU-1	92
Gambar 5.3	Hubungan Beban-Lendutan BU-2	93
Gambar 5.4	Hubungan Beban-Lendutan BU-3	93
Gambar 5.5	Hubungan Beban-Lendutan BU-4	93

Gambar 5.6	Hubungan Beban-Lendutan BU-5	94
Gambar 5.7	Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-1	96
Gambar 5.8	Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-2	97
Gambar 5.9	Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-3	98
Gambar 5.10	Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-4	98
Gambar 5.11	Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-5	99
Gambar 5.12	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan BU-1	100
Gambar 5.13	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan BU-2	101
Gambar 5.14	Penulangan BU-2	102
Gambar 5.15	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan BU-3	102
Gambar 5.16	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan BU-4	103
Gambar 5.17	Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan BU-5	104
Gambar 5.18	Pola Retak BU-1	106
Gambar 5.19	Pola Retak BU-2	107
Gambar 5.20	Pola Retak BU-3	107
Gambar 5.21	Pola Retak BU-4	108
Gambar 5.22	Pola Retak BU-5	108

## **DAFTAR LAMPIRAN**

- Lampiran 1 Tabel Hasil Uji Laboratorium
- Lampiran 2 tabel Perhitungan Pembebanan
- Lampiran 3 Hasil Pembacaan Data Logger BU-1
- Lampiran 4 Dokumentasi

## DAFTAR NOTASI

$f'_c$	: kuat desak beton, MPa
$f_y$	: kuat leleh baja, MPa
$f_{as}$	: faktor air semen
$f_s$	: regangan baja tarik, MPa
$\emptyset$	: diameter tulangan, mm
$\sigma$	: kuat lentur, MPa
$\varepsilon_c$	: regangan beton
$\varepsilon_s$	: regangan baja tarik
$\mu$	: micron
$\Delta_U$	: simpangan ultimit, mm
$\Delta_Y$	: simpangan leleh pertama, mm
$\mu_s$	: daktilitas simpangan
$P$	: beban maksimum, N
$A$	: luas tampang, mm <sup>2</sup>
$E_c$	: modulus elastisitas beton, MPa
$E_s$	: modulus elastisitas baja, MPa

# **BAB I PENDAHULUAN**

## **1.1 LATAR BELAKANG**

Indonesia merupakan salah satu negara rawan gempa, hal ini dikarenakan wilayah Indonesia merupakan daerah pertemuan dua jalur gempa dunia, yaitu *Circum Pacific Earthquake Belt* ( Sabuk Gempa Circum Pasifik ) dan *Trans Asiatic Earthquake Belt*. Sepuluh tahun belakangan ini Indonesia banyak terkena gempa bumi dengan kekuatan besar seperti gempa bumi yang terjadi di Aceh 2004, Yogyakarta 2006, Padang 2009, Mentawai 2010. Pada gempa bumi ini banyak memakan korban jiwa yang kebanyakan korban jiwa yang meninggal diakibatkan oleh reruntuhan bangunan akibat berbagai faktor penyebabnya antara lain desain bangunan yang tidak sesuai dengan SNI yang berlaku, pelaksanaan bangunan yang kurang baik, kualitas dari material yang digunakan juga tidak baik, dan masih banyak faktor lainnya .

Beton bertulang adalah material konstruksi yang telah dikenal luas oleh para pelaku konstruksi di dunia, termasuk Indonesia. Material konstruksi beton bertulang ini lebih populer penggunaannya dibandingkan dengan material lainnya seperti kayu, baja, aluminium, dll. Beton bertulang adalah gabungan dari dua jenis bahan yaitu beton polos dan baja tulangan. Beton polos memiliki kekuatan tekan yang tinggi dibandingkan dengan kekuatan tariknya, untuk melengkapi kekurangannya yang lemah terhadap kuat tarik, maka dipasanglah baja tulangan yang dapat memberikan kekuatan tarik yang diperlukan. Salah satu alasan mengapa beton bertulang sering digunakan adalah dari segi biaya, beton bertulang cukup ekonomis dalam pembuatannya dan perawatannya, selain itu beton bertulang dapat dibentuk sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan, termasuk bahan yang awet, tahan aus, tahan kebakaran, sehingga biaya perawatan relatif lebih murah dibandingkan dengan menggunakan material yang lainnya seperti kayu atau baja. Untuk itu bahan konstruksi ini dianggap cukup penting untuk terus dikembangkan dan diteliti agar dapat mengetahui karakteristik material dan perilaku struktural dari beton bertulang saat menerima beban.

Pada pelaksanaan pembangunan yang menggunakan beton bertulang seperti struktur portal, bendung, dan lapisan perkerasan, terkadang baja tulangan yang diperlukan pada pembangunan sering kali lebih panjang dari baja tulangan yang tersedia di pasaran dikarenakan keterbatasan ukuran panjang baja tulangan dari pabrik yang memproduksinya. Untuk mengatasi hal seperti ini maka dilakukan penyambungan pada baja tulangan. Penyambungan baja tulangan dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu, sambungan lewatan (*lap splice*), sambungan las (*welded splice*), dan sambungan mekanis (*mechanical connections*) (Lancelot, 1985).

Kebutuhan panjang sambungan lewatan (*lap splice*) berhubungan dengan panjang penyaluran tegangan yang bertambah sesuai dengan peningkatan tegangan. Panjang penyaluran adalah panjang penanaman baja tulangan yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan leleh pada baja tulangan yang merupakan fungsi dari tegangan leleh baja, diameter tulangan, dan tegangan lekat (Dipohusodo, 1994). Kebutuhan panjang penyaluran ini harus diperhitungkan untuk menghindari dari keruntuhan sambungan. Pada prakteknya di lapangan biasanya panjang penyaluran ini langsung diambil nilainya sebesar  $40D$ , dengan  $D$  adalah diameter tulangan pokok yang dipakai.

Sambungan las dan sambungan mekanis menurut peraturan SNI-03-2847-2013 menyebutkan bahwa sambungan mekanis dan sambungan las boleh digunakan, suatu sambungan las penuh harus mengembangkan paling sedikit  $1,25f_y$ , kecuali diizinkan untuk batang tulangan D16 dan yang lebih kecil.

Balok dapat didefinisikan sebagai salah satu dari elemen struktur portal dengan bentang arahnya horizontal, sedangkan portal merupakan kerangka utama dari struktur bangunan, khususnya bangunan gedung. Balok tersebut menyalurkan beban-beban dari pelat lantai ke kolom. Pada balok beton bertulang yang ditumpu oleh tumpuan sederhana (*sendi-rol*), dan di atas balok tersebut diberikan beban, yang mana beban tersebut akan terus meningkat, maka balok tersebut akan mengalami keretakan sampai pada akhirnya akan runtuh. Ada dua jenis keretakan yang terjadi yaitu retak yang arahnya vertikal (*retak lentur*), dan retak yang arahnya miring (*retak geser*).

Dalam upaya untuk meningkatkan kemampuan konstruksi beton bertulang dalam menahan beban-beban, maka perlu kiranya dilakukan analisis dan

pengujian baik pada elemen struktur balok, kolom, plat, dan fondasi. Salah satu bagian struktur yang mempunyai peranan yang cukup penting adalah balok. Beberapa hal yang sekiranya perlu mendapatkan perhatian pada balok adalah adanya tegangan lentur dan geser yang terjadi akibat suatu kerusakan ringan, dan kerusakan berat. Oleh karena itu untuk meningkatkan kemampuan konstruksi beton bertulang dalam memikul beban-beban, maka perlu dilakukan penelitian perilaku struktur balok.

Pada penelitian ini dibuat 5 (lima) macam sambungan pada balok lentur untuk melihat perilaku dari beton maupun baja tulangan yang disambung baik dilas, *overlap*, dan gabungan dari keduanya. Karena perilaku baja tulangan tidak dapat dilihat dengan kasat mata akibat tertutup oleh beton yang menyelimuti baja, maka diperlukan suatu alat atau sensor yang ditanam agar mampu mengukur regangan rill yang terjadi pada baja tulangan tersebut pada saat pembebanan berlangsung. Oleh karena alasan tersebut, maka dalam penelitian ini difokuskan pada pengujian balok beton bertulang akibat beban statik.

## **1.2 RUMUSAN MASALAH**

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan diatas, dan dengan mempertimbangkan metode penelitian, permasalahan dapat diringkas sebagai berikut ini.

1. Bagaimanakah kinerja dari balok lentur dalam menerima beban maksimum?
2. Bagaimanakah pengaruh sambungan baja tulangan memanjang terhadap kekuatan balok?
3. Bagaimanakah daktilitas yang terjadi akibat beban yang diberikan pada balok?
4. Bagaimanakah pola retak yang terbentuk pada saat balok menerima beban maksimum?

## **1.3 TUJUAN PENELITIAN**

Adapun tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah

1. Mengetahui kinerja balok lentur saat akibat beban maksimum yang diberikan.
2. Mengetahui pengaruh sambungan baja tulangan memanjang terhadap kekuatan balok.

3. Mengetahui daktilitas yang terjadi pada balok akibat beban yang diberikan.
4. Mengetahui pola retak pada balok beton bertulang pada saat menerima beban maksimum.

#### **1.4 MANFAAT PENELITIAN**

Dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut ini :

1. Memberikan kontribusi terhadap perkembangan teknologi beton bertulang khususnya pada daerah penyaluran baja tulangan yang dilas pada balok.
2. Mengetahui hal-hal yang terjadi pada daerah penyaluran yang dilas saat balok mengalami keruntuhan pada waktu beban maksimum diberikan untuk balok.
3. Memberikan pengetahuan metode pengujian yang baik dan benar dengan menggunakan alat-alat teknologi yang canggih.
4. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam pengembangan penelitian yang akan datang.

#### **1.5 BATASAN MASALAH**

Untuk mempermudah dalam pelaksanaan penelitian ini, maka permasalahan yang ditinjau dibatasi sebagai berikut ini:

1. Beton yang digunakan adalah beton normal dengan mutu beton 25 MPa.
2. Baja tulangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja polos dengan mutu baja :
  - a. Tulangan pokok : 240 MPa
  - b. Tulangan sengkang : 240 MPa
3. Diameter baja tulangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah :
  - a. Tulangan pokok sebelah atas : 8 mm
  - b. Tulangan pokok sebelah bawah : 12 mm
  - c. Tulangan sengkang : 8 mm
4. Metode campuran (*mix design*) yang digunakan menggunakan standar SNI 03-2834-2000.
5. Agregat halus (pasir) berasal dari Merapi.
6. Agregat kasar (kerikil) berasal dari Clereng.
7. Menambahkan zat adiktiv SikaCim.
8. Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan pada saat umur beton 14 hari.

9. Dimensi balok :
  - a. B (lebar) : 150 mm
  - b. H (tinggi) : 300 mm
  - c. L (panjang) : 2000 mm
10. Ada lima tipe benda uji, yaitu :
  - a. Balok dengan tulangan tarik normal, tanpa ada sambungan.
  - b. Balok dengan semua tulangan tarik *over lap* dengan panjang sambungan 40D pada tengah bentang.
  - c. Balok dengan semua tulangan tarik *overlap* las 5 cm pada tengah bentang
  - d. Balok dengan 1 tulangan tarik bagian tengah menggunakan sambungan *over lap* 40D pada tengah bentang, dan 2 tulangan tarik bagian tepi normal tanpa sambungan.
  - e. Balok dengan 1 tulangan tarik bagian tengah menggunakan sambungan las tumpul pada tengah bentang, dan 2 tulangan tarik bagian tepi tanpa sambungan.
11. Bahan ikat yang digunakan adalah semen tipe 1 dengan merk Tiga Roda.
12. Mekanisme pembebanan diberikan secara bertahap dengan menggunakan *hydroulick pump* sesuai besar pembebanan tiap benda uji.
13. Pengukuran regangan beton ditentukan terlebih dahulu ditiga titik pengamatan, yaitu daerah tulangan tarik bagian tepi, daerah tekan beton, dan daerah tulangan tarik yang dilas dengan menggunakan *strain gauge*.
14. Untuk mengukur besarnya lendutan pada balok beton bertulang digunakan alat LVDT.
15. Penelitian ini dilakukan di laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi (BKT) dan Laboratorium Struktur dan Mekanika Rekayasa Jurusan Teknik Sipil FTSP UII.

## **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 melintang yang diletakkan pada sebuah balok beton yang dilengkapi dengan tulangan tarik dan beban tersebut ditingkatkan secara bertahap sampai balok mengalami runtuh, balok tersebut telah mengalami tiga tahap yang berbeda sebelum keruntuhan terjadi. Tahap-tahap tersebut adalah : (1) tahap beton tanpa retak, (2) tahap beton mulai retak-tegangan elastik, dan (3) tahap tegangan ultimit. Balok yang dibahas disini adalah balok yang relatif panjang sehingga geser yang terjadi tidak akan memberi pengaruh besar kepada perilaku beton (McCormac 2000).

Menurut Basuki dan Hidayati (2006), dalam beton bertulang membutuhkan penguat tekuk yang digunakan untuk menahan momen tekuk dan penguat geser yang digunakan untuk menahan gaya geser. Penguat gaya geser horizontal tidak diperhitungkan dalam menahan gaya beban yang terjadi pada sebuah balok. Penguat gaya geser vertikal mencegah sebuah balok terbelah oleh gaya geser.

Penelitian yang dilakukan oleh Basuki dan Hidayati ini untuk menemukan apakah penguat gaya geser horizontal (*alternative reinforcement*) dibutuhkan dalam suatu konstruksi. Penelitian yang dilakukan oleh Basuki dan Hidayati ini bertujuan untuk mengetahui gaya geser maksimum dan perbedaan antara *alternative reinforcement* dan *convencional reinforcement* pada balok beton bertulang. Hasil dari penelitian lab yang dilakukan oleh Basuki dan Hidayati (2006) diketahui bahwa kuat geser yang dapat ditahan oleh *alternative reinforcement* dan *conventional reinforcement* relatif sama.

Menurut Suraatmadja dkk (1998), perkembangan sistem pelaksanaan pekerjaan struktur memungkinkan elemen-elemen struktur yaitu kolom, balok dan pelat dilakukan dengan pracetak. Dengan menggunakan elemen pracetak, maka dalam pelaksanaannya tidak terlepas dari sambungan atau *joint* dari masing-masing elemen tersebut. Maksud dari penelitian ini adalah untuk mengetahui kemampuan lentur dari balok yang tersambung oleh bahan polimer jika dibandingkan dengan balok yang tidak disambung atau menerus, selain itu juga untuk mengetahui kemampuan dari bahana polimer sebagai perekat atau penyambung beton. Pengamatan lain dari ini adalah untuk mengetahui perilaku balok yang mendapat beban statis pada tengah bentangnya. Dari hasil penelitian yang dilakukan diketahui bahwa balok yang menerus mempunyai kekakuan yang lebih besar dari pada balok yang disambung, namun beban yang dipikul tetap sama 25 kN, sedangkan defleksi yang terjadi pada balok yang disambung lebih kuat dari pada balok yang menerus.

## **2.2 SAMBUNGAN TULANGAN POKOK**

Menurut Yudhanta (2009), pengelasan diperlukan dalam penyambungan tulangan dan modifikasi tulangan saat perbaikan beton yang rusak. Dalam proses pengelasan akan menghasilkan panas yang kemungkinan dapat mempengaruhi kekuatan tulangan, khususnya kekuatan tarik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh pengelasan terhadap kuat tarik baja tulangan, dan untuk mengetahui seberapa besar kuat sambungan dengan panjang sambungan yang telah ditentukan. Dalam penelitiannya digunakan berbagai variasi, untuk itu dibuat 3 macam model benda uji, yaitu berupa sambungan, modifikasi tulangan yang berupa kait (yang diperlukan untuk perbaikan beton), dan variasi dari modifikasi tulangan yang berupa kait. Pada penelitian ini pengelasan dilakukan oleh tukang las yang bukan spesialis, hal ini dimaksudkan karena secara umum pengerjaan las dilakukan oleh jasa tukang las yang bukan spesialis. Tulangan yang digunakan adalah BJTD 16 dan BJTP 10.

Dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Yudhanta ini terdapat 3 macam kerusakan yang terjadi, yaitu kerusakan pada sambungan (kerusakan pada las), kerusakan pada batang tetapi berada di luar area yang terkena panas las, dan kerusakan pada batang di area yang terkena panas saat proses pengelasan. Secara

umum, proses pengelesan mempengaruhi kuat tarik baja tulangan, tetapi karena adanya penambahan luasan tarik pada beberapa variasi benda uji, maka pengaruh proses pengelasan dapat diabaikan.

### **2.3 PENGARUH ZAT ADITIF TERHADAP KUAT TEKAN BETON**

Menurut Dianawanti (2013), pemasangan tulangan pada *joint* cukup sulit dilakukan, sehingga biasanya dipasang tidak sesuai dengan perencanaannya. Hal ini yang menyebabkan kerusakan pada *joint*, sehingga mengakibatkan keruntuhan pada bangunan struktur. Hubungan balok kolom (HBK) berkinerja baik apabila sambungan tersebut memiliki sifat daktail pada balok dan mempunyai nilai kekakuan yang tinggi pada kolom. Memodifikasi tulangan sengkang merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kinerja HBK namun di lapangan sulit untuk dilaksanakan. Kinerja HBK juga dapat diperbaiki dengan meningkatkan mutu material beton, pada penelitian yang dilakukan Dianawanti ini ditambahkan *fly ash* dan zat aditif untuk memperbaiki sifat mekanik beton. Abu terbang sendiri tidak memiliki kemampuan mengikat seperti halnya semen. Kekuatan beton yang dicampuri *fly ash* akan bertambah namun pada umur 28 hari kekuatan akan menurun. Penurunan kekuatan beton *fly ash* diakibatkan karena proses hidrasi semen yang berjalan lambat. Permasalahan ini dapat diatasi dengan penambahan zat aditif jenis akselerator untuk mempercepat proses pengeringan beton, sehingga pada umur 28 hari tidak mengalami penurunan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui nilai beban maksimum yang mampu ditahan oleh HBK setelah penambahan *fly ash* dan zat aditif sehingga diketahui nilai daktilitas, kekakuan, dan pola retak pada benda uji. Pada penelitian ini zat aditif yang digunakan adalah zat aditif SikaCim, porsi penggunaannya adalah 250 ml/sak semen. Dari hasil penelitian yang dilakukan kekuatan beton normal tanpa zat aditif pada umur 28 hari adalah 20,79 MPa dan beton yang normal yang ditambah *fly ash* kekuatannya sebesar 10,21 MPa sedangkan beton *fly ash* yang ditambah zat aditif SikaCim sebesar 23,16 MPa. Prosentasi kenaikan kuat tekannya adalah 10,23 dan 55,92% . Sehingga dapat disimpulkan kenaikan kuat tekan beton *fly ash* dan zat aditif dikarenakan penambahan zat aditif SikaCim.

Menurut Irene (2011), kuat tekan beton mengidentifikasikan mutu dari sebuah struktur. Kuat tekan beton yang tinggi dan kemudahan pekerjaan beton

merupakan salah satu kinerja utama beton. Dalam beton salah satu faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan dan workabilitas beton adalah bahan tambah (*admixture*). Penelitian yang dilakukan Irene adalah pengaruh bahan tambah SikaCim, yang mana nantinya tujuannya adalah untuk mengetahui pengaruh bahan tambah Sika Cim terhadap perkembangan kuat tekan benda uji beton, pada umur hidrasi 28 hari. Persentase penambahan SikaCim yang digunakan adalah 0%, 0,3%, 0,6% dan 0,9% terhadap berat semen dengan pengurangan air 15%. Hasil dari penelitian ini adalah penambahan *admixture* SikaCim pada penelitian ini ternyata dapat menunjukkan kuat tekan beton melebihi mutu beton rencana  $f'_c = 27,5$  MPa yaitu pada 0,3% dengan kuat tekan betonnya mencapai 38,87 MPa, 0,6% dan 0,9% dengan kuat tekan beton sama 33,94 MPa, sehingga dapat disimpulkan bahwa penambahan zat *admixture* SikaCim dengan persentasi 0,3% mendapatkan nilai kuat tekan optimum.

#### **2.4 KEASLIAN PENELITIAN**

Pada penelitian-penelitian yang telah dipaparkan di atas, memiliki topik-topik yang berbeda. Pada penelitian yang dilakukan oleh Basuki dan Hidayati (2006) penelitian ini dilakukan untuk mengetahui gaya geser maksimum dan perbedaan antara *alternative reinforcement* dan *conventional reinforcement* pada balok beton bertulang. Pada penelitian ini tidak ada parameter regangan yang diamati dan dianalisis, hanya terpaku pada pembebanan yang dapat ditahan oleh *alternative reinforcement* dan *convencional reinforcement*.

Penelitian yang dilakukan Suraatmadja dkk (1998) dilakukan untuk mengetahui perilaku lentur pada balok yang mempunyai sambungan pada balok pracetak. Pada penelitian ini sambungan yang digunakan adalah sambungan polimer. Penelitian yang dilakukan oleh Dianawanti (2013) dan Irene (2011) adalah penelitian yang menggunakan zat tambah (aditif) untuk meningkatkan mutu dari material beton. yang mana untuk mengetahui seberapa besar pengaruh peningkatan kuat tekan beton terhadap penambahan zat aditif SikaCim.

Untuk penelitian yang dilakukan oleh Yudhanta (2009), penelitiannya bukan dalam bentuk beton bertulang tetapi fokus terhadap baja tulangan yang dilas dan dimodifikasi tanpa menggunakan beton, dan kerusakan yang ditinjau adalah kerusakan pada baja tulangnya saja.

Sedangkan pada Penelitian yang dilakukan ini adalah kinerja balok lentur dengan variasi sambungan baja tulangan. Pada penelitian ini diamati perilaku dari balok saat menerima beban dan perilaku dari baja tulangannya. Pada penelitian ini akan digunakan 5 (lima) buah sampel yang dibandingkan. Penelitian ini menggunakan beberapa alat untuk mengetahui regangan yang terjadi, lendutan dan besar pembebanan. *Strain gauge* ditempatkan pada tulangan tarik dan beton daerah desak untuk mengetahui regangan-regangan yang terjadi pada tiap material penyusun beton. LVDT sebagai sensor lendutan yang terjadi pada balok dan *load cell* sebagai alat yang berfungsi untuk mengetahui besar pembebanan yang terjadi.

Penelitian ini terdapat perbedaan nyata dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya, sehingga memberikan kontribusi terhadap rekayasa konstruksi pada struktur balok beton bertulang. Dengan demikian Penelitian ini memberikan informasi baru tentang material-material penyusun beton bertulang.

## **BAB III LANDASAN TEORI**

### **3.1 BETON**

Dalam dunia konstruksi material yang paling sering digunakan adalah beton. Penggunaan material beton ini banyak dijumpai pada bangunan gedung, jembatan, bendungan, maupun konstruksi yang lainnya. Beton sendiri merupakan campuran yang terdiri dari pasir atau agregat halus, kerikil atau agregat kasar yang dicampur jadi satu dengan semen dan air.

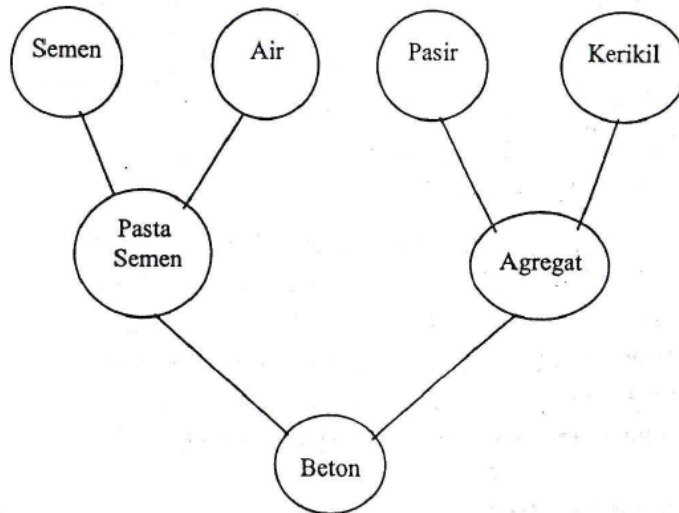
Beton yang banyak digunakan saat ini adalah beton normal. Beton normal adalah beton yang mempunyai berat isi  $2200 - 2500 \text{ kg/m}^3$  dengan menggunakan agregat alama yang dipecah atau tanpa dipecah.

Kelebihan utama beton adalah memiliki kuat tekan yang tinggi tetapi kuat tarik yang dimilikinya rendah. Untuk mengatasi kelemahannya terhadap tarik maka beton dikombinasikan dengan baja tulangan, sehingga menjadi beton bertulang, yang mana baja tulangan berfungsi menyediakan kuat tarik yang tidak dimiliki oleh beton.

### **3.2 BAHAN SUSUN BETON**

Secara sederhana, beton dibentuk oleh pengerasan campuran antara semen, air, agregat halus (pasir), dan agregat kasar (batu pecah, atau kerikil), kadang-kadang ditambah dengan campuran bahan lain (*admixture*) untuk memperbaiki kualitas beton.

Campuran antara semen dan air akan membentuk pasta semen, yang berfungsi sebagai bahan ikat. Sedangkan pasir dan kerikil merupakan bahan agregat yang berfungsi sebagai bahan begisi, dan sekaligus sebagai bahan yang diikat oleh pasta semen. Ikatan antara pasta semen dan agregat ini menjadi satu kesatuan yang kompak, dan akhirnya akan menjadi keras serta padat yang disebut dengan beton (Asroni, 2010). Gambar 3.1 berikut ini merupakan skema bahan susun beton.



Gambar 3.1 Skema Bahan Susun Beton  
(Sumber : Asroni, 2010)

### 3.2.1 *Portland Cement*

Semen portland atau *portland cement* (pc) atau semen hidraulis merupakan bahan ikat yang banyak dipergunakan dalam pembangunan fisik. Semen *portland* disebut juga semen hidraulis karena kemampuannya mengikat atau bereaksi dengan air dan mengeras didalam air. Semen berfungsi untuk merekatkan butir-butir agregat, selain itu untuk mengisi rongga-rongga antar agregat sehingga menjadi suatu massa padat.

Semen *portland* yang digunakan untuk pembuatan beton adalah semen yang berbutir halus. Kehalusan butir semen ini dapat diraba atau dirasakan dengan tangan. Semen yang tercampur atau mengandung gumpalan-gumpalan meskipun kecil, tidak baik untuk digunakan dalam pembuatan beton.

Bahan dasar semen terdiri dari bahan-bahan yang terutama mengandung kapur, sika dan alumina, serta oksida besi. Dengan demikian bahan-bahan inilah yang merupakan unsur utama semen. Pada dasarnya terdapat empat unsur utama yang paling penting, yaitu :

#### 1. Trikalium Silikat ( $C_3S$ )

Sifatnya hampir sama dengan sifat semen, yaitu jika ditambah air akan menjadi kaku dan dalam beberapa jam maka pasta akan mengeras.  $C_3S$  menunjang kekuatan awal semen dan menimbulkan panas hidrasi kurang lebih 58 kalori/gram setelah tiga hari.

## 2. Dikalsium Silikat ( $C_2S$ )

Pada saat penambahan air setelah reaksi menyebabkan pasta mengeras dan menimbulkan panas 12 kalori/gram setelah 3 hari. Pasta akan mengeras, perkembangan kekuatannya stabil dan lambat pada pada beberapa minggu kemudian mencapai kekuatan tekan akhir hampir sama dengan  $C_3S$ .

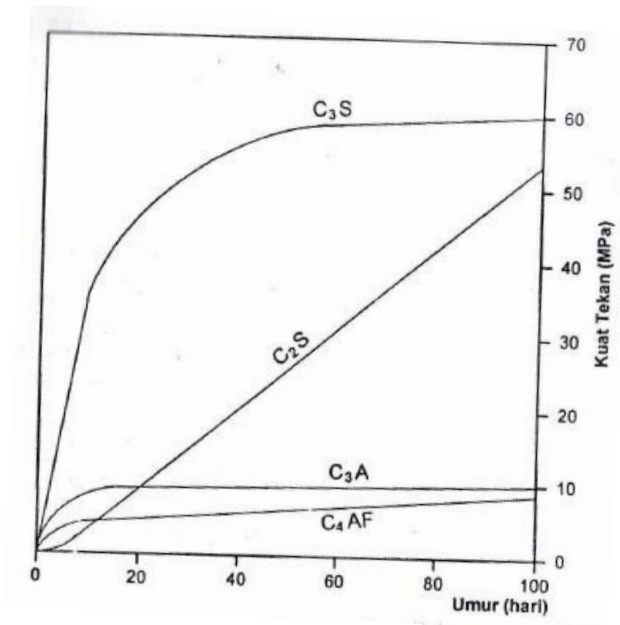
## 3. Trikalsium Aluminat ( $C_3A$ )

Unsur ini apabila bereaksi dengan air maka akan menimbulkan panas hidrasi tinggi yaitu 212 kalori/gram setelah 3 hari. Perkembangan kekuatan terjadi satu sampai dua hari tetapi sangat rendah.

## 4. Tetrakalsium Aluminoferrit ( $C_4AF$ )

Unsur ini saat bereaksi dengan air berlangsung sangat cepat dan pasta terbentuk dalam beberapa menit, menimbulkan panas hidrasi 68 kalori/gram. Warna abu-abu pada semen disebabkan oleh unsur ini.

Pada Gambar 3.2 terlihat pengaruh ke empat unsur utama semen terhadap hubungan antara umur dan kuat tekan beton.



Gambar 3.2 Hubungan Umur dan Kuat Tekan Unsur-unsur Utama Semen (Sumber : Mindess, 1981)

Ditinjau dari penggunaannya, menurut ASTM semen *portland* dapat dibedakan menjadi lima jenis, yaitu :

## 1. Jenis I

Semen *portland* untuk penggunaa umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis yang lain.

## 2. Jenis II

Semen *portland* yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat dan panas hidrasi sedang.

## 3. Jenis III

Semen *portland* yang dalam penggunaannya menuntut kekuatan awal yang tinggi.

## 4. Jenis IV

Semen *portland* yang dalam penggunaannya menuntut panas hidrasi rendah.

## 5. Jenis V

Semen *portland* yang dalam penggunaannya menuntut persyaratan sangat tahan terhadap sulfat.

Menurut Nawy (1985) komposisi kimia masing-masing jenis semen seperti pada Tabel 3.1 berikut ini.

Tabel 3.1 Komposisi Kimia Masing-masing Jenis Semen

Jenis Semen	Kandungan Kimia (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
Jenis I	49	25	12	8
Jenis II	46	29	6	12
Jenis III	56	15	12	8
Jenis IV	30	46	5	13
Jenis V	43	36	4	12

Semen *portland* dibuat melalui beberapa tahapan. Semen diperoleh dengan membakar secara bersamaan, suatu campuran yang mengandung *calcareous* (mengandung kalsium karbinat atau batu gamping), dan *argillaceous* (mengandung alumina), dengan perbandingan tertentu. Secara sederhana dapat dikatakan bahwa kandungan semen *portland* adalah kapur, silika, dan alumina. Ketiganya dicampur dengan perbandingan tertentu dan dibakar pada suhu 1550°C sehingga menjadi klinker. Kemudian didinginkan, lalu digiling sampai halus, selanjutnya dimasukkan kedalam kantong-kantong semen dengan berat 40 kg atau 50 kg.

### 3.2.2 Air

Air merupakan salah satu bahan dasar pembuatan beton yang paling penting dan murah. Air untuk pembuatan beton sebaiknya digunakan air yang bersih dan dapat diminum. Air yang digunakan pada umumnya adalah air yang diambil dari dalam tanah (misalnya air sumur) atau air yang berasal dari Perusahaan Air Minum (PAM).

Sifat-sifat air pada beton adalah :

1. Air cenderung bergerak kepermukaan (bersama-sama semen) adukan beton segar (*bleeding*) yang kemudian menjadi buih dan membentuk suatu lapisan tipis yang disebut *laitance*.
2. Air cenderung mengalir keluar (bersama-sama semen) jika cetakan kurang rapat, yang menyebabkan terjadinya sarang-sarang kerikil.
3. Kandungan kimia dan atau organik dalam air mempengaruhi kualitas beton (garam dalam air laut, kotoran-kotoran organik air permukaan, dll).

Pengaruh dan ukuran :

1. Jumlah air akan mempengaruhi sifat mudah dikerjakan (*workability*) beton segar, kualitas beton segar, dan kekuatan beton.
2. Jumlah air ditetapkan oleh perbandingan berat terhadap berat semen dan tingkat kemudahan pengerjaan.
3. Kelebihan air dengan tujuan meningkatkan kemudahan pengerjaan akan mengakibatkan kualitas beton turun.

Menurut SNI 03-6861.1-2002 persyaratan air untuk campuran beton adalah :

1. Harus bersih, tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
2. Tidak mengandung benda-benda tersuspensi lebih dari 2 gram/liter.
3. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan merusak beton ( asam-asam, zat organik, dll).
4. Kandungan klorida (Cl) < 0.50 gram/liter, dan senyawa sulfat < 1 gram/liter sebagai SO<sub>3</sub>.
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan beton yang menggunakan air suling, maka penurunan kekuatan beton yang menggunakan air yang diperiksa tidak lebih dari 10%.

6. Khusus untuk beton pratekan, kecuali syarat-syarat diatas air mengandung klorida lebih dari 0.05 gram/liter.

Air yang digunaka dalam penelitian ini adalah air yang diambil dari Laboratorium Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia, Jalan Kaliurang Km 14,5 Yogyakarta.

### 3.2.3 Agregat

Agregat adalah butiran mineral yang merupakan bahan pengisi dalam campuran beton. Agregat ini berfungsi sebagai bahan pengisi dalam campuran mortar atau beton. Volume agregat pada campuran beton adalah  $\pm 70\%$  volume beton, oleh karena itu agregat sangat berpengaruh terhadap sifat-sifat beton, serta memberi pengaruh terhadap kekuatan pada beton. Sehingga kualitas dari agregat sangat berpengaruh terhadap mutu beton yang dihasilkan.

Umumnya agregat dipisahkan menurut ukuran butirannya, yaitu :

1. Ukuran butir  $> 40$  mm, disebut batu.
2. Ukuran butir 4.80 – 5.00 mm, disebut agregat kasar atau kerikil.
3. Ukuran butir  $\leq 4.8$  mm, disebut agregat halus atau pasir.

Agregat dengan ukuran butir  $< 1.20$  mm sering disebut pasir halus, sedangkan jika ukuran butir  $< 0.075$  mm disebut *slit*, dan bila ukuran butir  $< 0,002$  mm disebut *clay*. Agregat yang umumnya digunakan dalam campuran beton berukuran  $\leq 40$  mm, selain itu agregat harus mempunyai bentuk yang baik ( bulat atau mendekati kubus), bersih ( kandungan lumpur pada pasir  $< 5\%$ , kerikil  $< 1\%$ ), keras, kuat, dan gradasinya baik, juga harus mempunyai kestabilan kimiaawi, dan dalam kondisi tertentu harus tahan aus dan tahan cuaca.

Secara umum agregat yang digunakan pada campuran beton adalah biasanya berukuran lebih kecil dari 40 mm. Biasanya agregat halus yang digunakan pada campuran beton adalah agregat halus yaitu jenis agregat alami (batu tak dipecah), sedangkan agregat kasar atau kerikil yaitu jenis agregat yang dipecah.

#### 1. Agregat Halus

Menurut SNI 03-6821-2002, agregat halus adalah agregat yang mempunyai besar butir maksimum 4.75 mm. Menurut SNI 03-6821-2002 persyaratan agregat halus yang digunakan untuk campuran beton adalah sebagai berikut :

- a. Agregat halus terdiri dari butir-butir yang tajam dan keras.
- b. Bersifat kekal, yaitu tidak mudah hancur atau pecah oleh pengaruh cuaca, seperti terik matahari dan hujan.
- c. Agregat halus tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5% (terhadap berat kering).
- d. Tidak boleh menggunakan pasarlaut (kecuali petunjuk staf ahli), karena kandungan garam dari pasir laut dapat merusak beton atau baja tulangan.

Berikut ini adalah beberapa karakteristik dari pasir :

a. Berat jenis pasir

Berat jenis pasir adalah rasio antara massa padat pasir dengan air yang mempunyai volume yang sama pada suhu yang sama. Menurut berat jenisnya, agregat secara umum dapat dibedakan menjadi beberapa kelompok yaitu (Tjokrodinuljo, 1996) :

- 1) Agregat normal yaitu agregat yang berat jenisnya antara 2.5 sampai 2.7.
- 2) Agregat ringan yaitu agregat yang memiliki berat jenis kurang dari 2 dan biasanya digunakan untuk bagian non struktural.
- 3) Agregat berat yaitu agregat yang memiliki berat jenis lebih besar dari 2.8.

b. Berat satuan pasir

Berat satuan dihitung berdasarkan berat pasir dalam suatu tempat tertentu. Sehingga yang dihitung adalah volume padat, meliputi pori tertutup dan pori terbukanya.

c. Gradasi pasir

Gradasi pasir adalah distribusi ukuran butiran pasir. Jika ukuran butiran tersebut seragam maka volume pori akan besar. Sebaliknya, jika ukuran butir-butirannya bervariasi maka volume porinya kecil. Hal ini dikarenakan apabila butiran gradasi bervariasi mereka akan saling mengisi kekosongan pada ruangnya, sehingga volume yang besar akan tertutupi oleh butiran-butiran yang lebih kecil, dengan kata lain kepadatannya akan semakin tinggi. Pada agregat untuk pembuatan beton diinginkan suatu butiran yang kepadatannya tinggi.

Batas dari gradasi agregat halus yang digunakan dalam campuran beton telah disyaratkan dalam SK. SNI T-15-1990-03 yang diadopsi dari *British Standard* di Inggris. Dimana kekasaran pasir dapat dibagi menjadi empat kelompok menurut gradasinya, yaitu :

- a. Zona I : pasir kasar
- b. Zona II : pasir agak kasar
- c. Zona III : pasir agak halus
- d. Zona IV : pasir halus

Tabel 3.2 dibawah ini adalah tabel untuk gradasi agregat halus atau pasir.

Tabel 3.2 Batas Gradasi Agregat Halus

Lu bang Ayakan (mm)	Persen Berat Butir yang Lewat Ayakan			
	I	II	III	IV
10	100	100	100	100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 - 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 - 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

(Sumber : Mulyono, 2003)

## 2. Agregat Kasar

Agregat kasar yang digunakan dalam campuran beton adalah kerikil yang berukuran 5 mm – 40 mm. Kerikil dapat pula diganti dengan batu pecah (*split*). Kerikil atau batu pecah dengan ukuran lebih dari 40 mm tidak baik digunakan untuk campuran beton. Syarat-syarat kerikil yang digunakan untuk campuran beton adalah sebagai berikut :

- a. Bersifat padat, keras, dan tidak berpori.
- b. Tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%.
- c. Tidak boleh mengandung zat yang dapat merusak, seperti zat-zat yang reaktif terhadap alkali.
- d. Pada keadaan terpaksa dapat digunakan agregat berbentuk bulat atau pipih.

Menurut *British Standard*, gradasi agregat kasar yang baik sebaiknya masuk dalam batas gradasi yang ditunjukkan pada Tabel 3.3 dibawah ini.

Tabel 3.3 Syarat Agregat Kasar Menurut *British Standard*

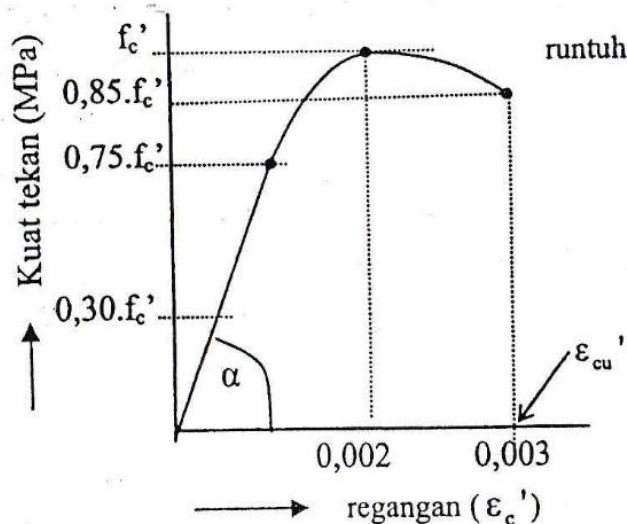
Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir lewat Ayakan, Besar Butir Maksimum		
	40 mm	20 mm	12,5 mm
40	95 – 100	100	100
20	30 – 70	95 – 100	100
12,5	-	-	90 – 100
10	10 – 35	25 – 55	40 – 85
4,8	0 – 5	0 – 10	0 – 10

(Sumber : Mulyono, 2003)

### 3.3 FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KUAT TEKAN BETON

Beton adalah material yang mempunyai kuat tekan yang besar, oleh karena itu mutu beton selalu diukur berdasarkan kuat tekan dari beton itu sendiri. Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) diperoleh melalui uji standar umumnya mengikuti tata cara *American Society for Testing Materials C39-66 (ASTM)*. Dimana pengujiannya menggunakan benda uji yang memberikan beban yang meningkat secara kontinu.

Nilai  $f'_c$  adalah nilai tegangan maksimum yang umumnya terjadi pada saat regangan desak  $\epsilon'_c = \pm 0.002$  dan nilai  $f'_c$  akan turun sejalan dengan bertambahnya regangan seperti yang terlihat pada Gambar 3.2 berikut ini.



Gambar 3.3 Hubungan Tegangan dan Regangan Beton  
(Sumber : Asroni, 2010)

Faktor-faktor yang mempengaruhi kuat tekan beton adalah :

1. Faktor air semen
2. Umur beton

3. Jumlah dan jenis semen
4. Sifat agregat
5. Kemudahan dalam pengerjaan.

### 3.3.1 Faktor Air Semen (FAS)

Jumlah air pada campuran beton pada umumnya dihitung berdasarkan nilai perbandingan antara berat air dan berat semen pada campuran adukan yang dikenal dengan faktor air semen atau disingkat dengan fas (SNI 03-2834-2000). Sehingga fas dapat dirumuskan sebagai berikut ini :

$$fas = \frac{\text{berat air pada campuran beton}}{\text{berat semen pada campuran beton}} \quad (3.1)$$

Menurut Duff Abrams (1919) hubungan antara fas dengan kuat tekan beton secara umum dapat ditulis sebagai berikut ini.

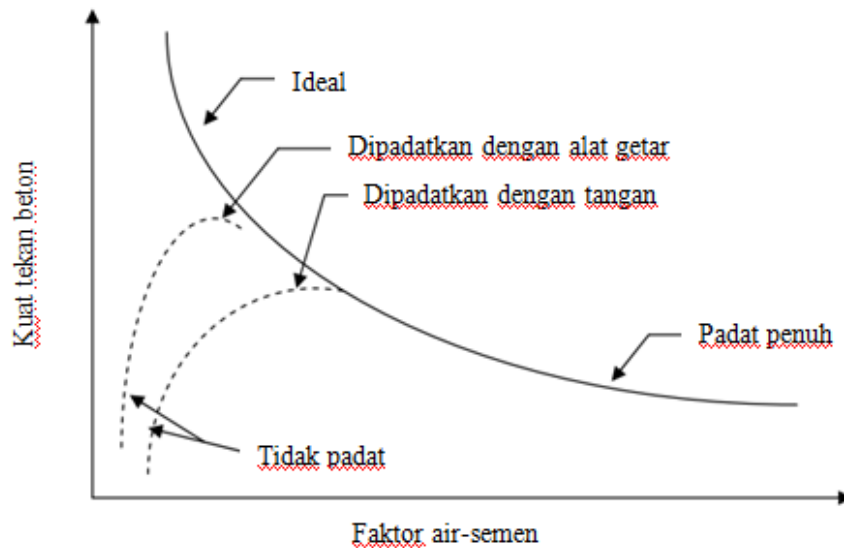
$$f'_c = \frac{A}{B^{1.5x}} \quad (3.2)$$

dengan :

- $f'_c$  : kuat tekan beton  
 $x$  : fas ( semula dalam proporsi volume)  
 $A, B$  : Konstanta

Secara umum diketahui bahwa semakin tinggi nilai fas, maka pengerjaannya semakin mudah (*workability*) akan tetapi mutu beton yang dihasilkan akan semakin rendah yang akan berpengaruh terhadap kekuatannya. Sebaliknya dengan nilai fas yang rendah maka campuran beton akan sulit dikerjakan dan akan menyebabkan mutu beton menjadi turun. Sehingga jumlah air dan semen dalam campuran adukan beton harus diperhitungkan dengan baik, agar adukan tidak terlalu encer ataupun terlalu kental.

Hubungan antara nilai fas dan kuat tekan beton dapat dilihat pada Gambar 3.4 di berikut ini.



Gambar 3.4 Hubungan Kuat Tekan Beton dan Faktor Air Semen  
(Sumber : Asroni, 2010)

### 3.3.2 Umur Beton

Kekuatan tekan beton dan umur beton berbanding lurus, apabila umur beton bertambah maka kekuatan dari beton tersebut akan bertambah juga. Kekuatan beton akan naik secara cepat sampai umur beton mencapai 28 hari, setelah mencapai umur 28 hari maka kekuatan beton akan tetap bertambah tetapi kenaikannya akan kecil.

Hubungan antara umur beton dan kekuatan tekan beton dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hubungan Antara Umur Beton dan Kuat Tekan Beton

Umur Beton (hari)	Kuat tekan beton (%)
3	40
7	65
14	88
21	95
28	100
90	120
365	135

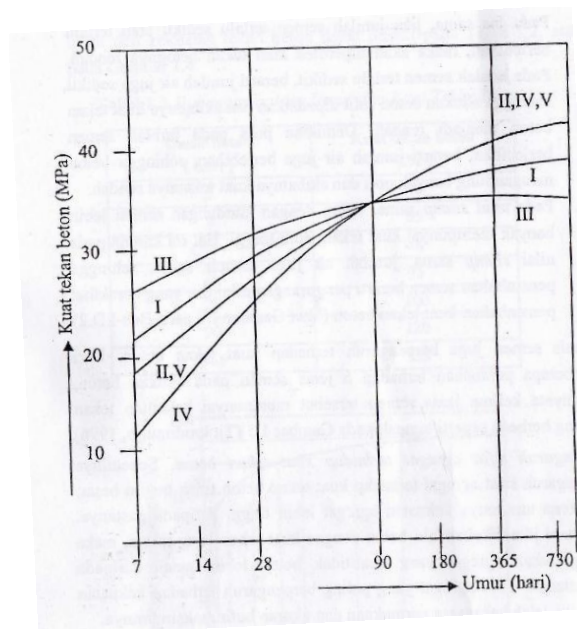
(Sumber : Asroni,2010)

### 3.3.3 Jumlah dan Jenis Semen

Jika jumlah semen yang digunakan dalam adukan beton terlalu sedikit atau terlalu banyak maka akan diperoleh kuat tekan beton yang rendah. Karena pada

jumlah semen yang sedikit, jumlah air yang digunakan akan sedikit pula, sehingga adukan beton menjadi sulit akibatnya kuat tekan beton menjadi rendah. Sedangkan jumlah semen yang digunakan terlalu banyak maka air yang digunakanpun ikut banyak, sehingga beton mengandung banyak pori dan akibatnya kuat tekan betonpun menjadi rendah.

Jenis semen juga mempengaruhi kuat tekan beton, dari lima jenis semen yang ada memberikan pengaruh tersendiri terhadap kuat tekan beton. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini.



Gambar 3.5 Hubungan Kuat Tekan Beton Untuk Berbagai Jenis Semen (Sumber : Tjokrodimuljo, 1996)

### 3.3.4 Sifat Agregat

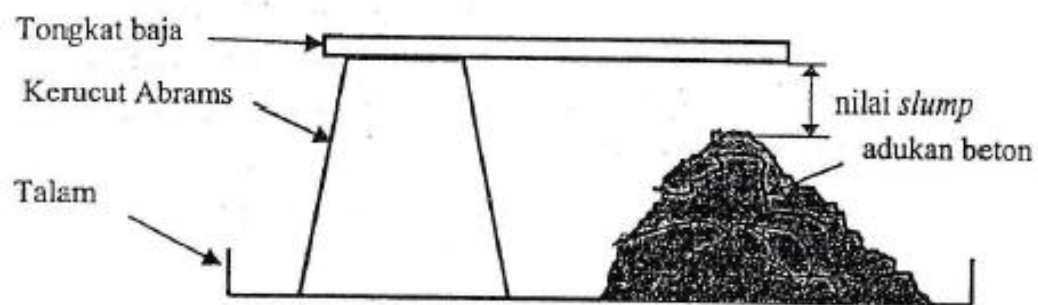
Jika menginginkan beton dengan kuat tekan yang tinggi, maka diperlukan agregat yang baik dan kuat, dimana agregat tersebut tidak boleh lebih lemah dari pastaya. Sifat agregat yang paling berpengaruh terhadap kuat tekan beton adalah kekasaran permukaan dan ukuran butir maksimalnya.

### 3.3.5 Kemudahan Dalam Pengerjaan (*Workability*)

Pada pengadukan campuran beton dibutuhkan tingkat kelecikan tertentu, agar campuran beton yang dihasilkan tidak terlalu encer ataupun terlalu kental. Salah satu cara untuk mengetahui nilai kelecikan pada campuran beton adalah dengan

melakukan uji *slump* pengujian ini menggunakan kerucut Abrams. Tahapan dalam pengujian *slump* ini adalah sebagai berikut :

1. Menuangkan adukan beton segar kedalam kerucut abrams, dimana setiap sepertiganya ditumbuk sebanyak 25 kali agar menjadi padat.
2. Selesai lapisan terakhir dipadatkan, diratakan lalu angkat kerucut abramsnya lurus keatas.
3. Lalu ukur nilai keruntuhan dari adukan beton segar yang tadi dimasukan kedalam kerucut abrams. Nilai *slump* adalah selisih tinggi antara kerucut abrams dengan permukaan atas adukan beton setelah kerucut ditarik, seperti yang tampak pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Pengukuran Nilai *Slump*

Penetapan nilai *slump* yang diinginkan dapat dilihat pada Tabel 3.5 berikut ini.

Tabel 3.5 Variasi Nilai Slump Untuk Berbagai Jenis Komponen Struktur

Pemakaian Beton	Nilai <i>Slump</i> (mm)	
	maksimum	Minimum
Dinding, pelat pondasi dan pondasi telapak bertulang	125	50
Pondasi telapak tidak bertulang, kaisan, dan struktur di bawah tanah	90	25
Pelat, balok, kolom dan dinding	150	75
Pengerasan jalan	75	50
Pembetonan masal	75	25

### 3.3.6 Bahan Tambah

Bahan tambah atau aditif atau *admixture* adalah bahan selai unsur utama beton (air, semen dan agregat) yang ditambahkan pada adukan beton, dengan tujuan untuk mengubah satu atau lebih sifat-sifat beton segar dan atau beton keras, sehingga didapatkan sifat-sifat khusus dari beton yaitu kemudahan pengerjaan,

waktu pengikatan, pengerasan, kekedapan dan keawetan. Bahan tambah umumnya diberikan dalam jumlah yang relatif sedikit (dalam % berat semen). Pemberian bahan tambah yang berlebihan justru akan merusak kualitas beton.

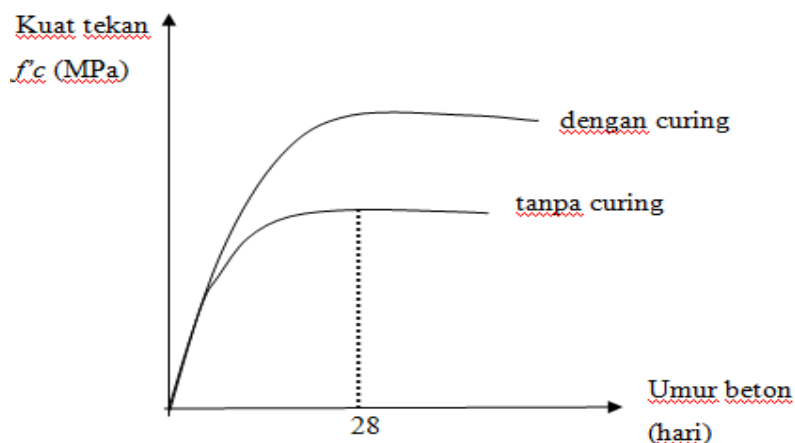
### 3.4 PERAWATAN BETON (*CURING*)

Perawatan beton dilakukan setelah beton mengeras. Perawatan ini dilakukan agar beton tetap dalam keadaan lembab dan proses hidrasi selanjutnya tidak mengalami gangguan. Jika proses hidrasi mengalami gangguan, maka beton mengalami keretakan dikarenakan beton kehilangan air yang begitu cepat. Selain itu perawatan beton juga dapat menjadikan beton lebih tahan cuaca, dan lebih kedap air. Perawatan beton minimal dilakukan selama 7 hari, dikarenakan pada saat umur beton 7 hari beton sudah mencapai kekuatan sebesar 65 %.

Tujuan dari perawatan beton yaitu :

1. Mencegah kehilangan *moisture* pada beton (tidak kurang dari 80%).
2. Mempertahankan suhu yang baik, agar kelembabab permukaan beton tetap terjaga untuk menjamin proses hidrasi.

Perbedaan kuat tekan beton yang dilakukan perawatan dengan tanpa perawatab dapat dilihat pada grafik Gambar 3.7 berikut ini.



Gambar 3.7 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton Dengan Perawatan Beton

Perawatan beton dapat dilakukan dengan berbagai cara yaitu :

- a. Di laboratorium
  - 1) Beton segar diletakan di dalam ruangan yang lembab.
  - 2) Menaruh beton di atas genangan air.
  - 3) Merendam beton di dalam air.

- b. Di lapangan atau proyek
- 1) Menyelimuti permukaan beton dengan air.
  - 2) Mengenangi permukaan beton dengan air.
  - 3) Menyirami permukaan beton secara rutin.

### 3.5 METODE PERANCANGAN CAMPURAN BETON

Pada penelitian yang dilakukan digunakan perancangan campuran beton dengan metode SNI 03-2834-2000. Metode ini adalah metode yang paling sering digunakan di perancangan beton di Indonesia.

Langkah-langkah perancangan adukan beton normal dengan metode SNI 03-2834-2000 diuraikan sebagai berikut ini.

1. Menentukan kuat tekan beton yang digunakan pada umur 28 hari.
2. Menghitung devisiasi standar menurut ketentuan menggunakan Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Faktor pengali untuk devisiasi standar bila data hasil uji yang tersedia kurang dari 30 benda uji

Jumlah Pengujian	Faktor Pengali Devisiasi Standar
< 15	Lihat catatan di bawah
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 atau lebih	1.00
Bila data uji lapangan tidak tersedia, maka kuat tekan rata-rata yang ditargetkan $f'_{cr}$ harus diambil tidak kurang dari $(f'_c + 12 \text{ Mpa})$	

3. Menghitung nilai tambah margin (m).

$$m = k.s \quad (3.3)$$

dengan :

m = nilai tambah atau margin

k = 1.64

s = devisiasi standar

4. Menghitung kuat tekan beton rata-rata yang ditargetkan  $f'_{cr}$ .

$$f'_{cr} = f'_c + m \quad (3.4)$$

dengan :

$f'_{cr}$  = kuat tekan rata-rata beton

$f'_c$  = kuat tekan rencana

m = margin

5. Menetapkan jenis semen yang digunakan.
6. Menentukan jenis agregat kasar dan agregat halus, agregat ini dapat dalam bentuk tak dipecahkan atau dipecahkan.
  - a. Agregat halus menggunakan Tabel 3.7

Tabel 3.7 Batas Gradasi Agregat Halus

Lubang Ayakan (mm)	Persen Berat Butir yang Lewat Ayakan			
	I	II	III	IV
10	100	100	100	100
4,8	90 – 100	90 – 100	90 – 100	95 – 100
2,4	60 – 95	75 – 100	85 – 100	95 – 100
1,2	30 – 70	55 – 90	75 – 100	90 – 100
0,6	15 – 34	35 – 59	60 – 79	80 – 100
0,3	5 – 20	8 – 30	12 – 40	15 – 50
0,15	0 – 10	0 – 10	0 – 10	0 – 15

Zona I : pasir kasar

Zona II : pasir agak kasar

Zona III : pasir agak halus

Zona IV : pasir halus

- b. Agregat kasar, menggunakan Tabel 3.8

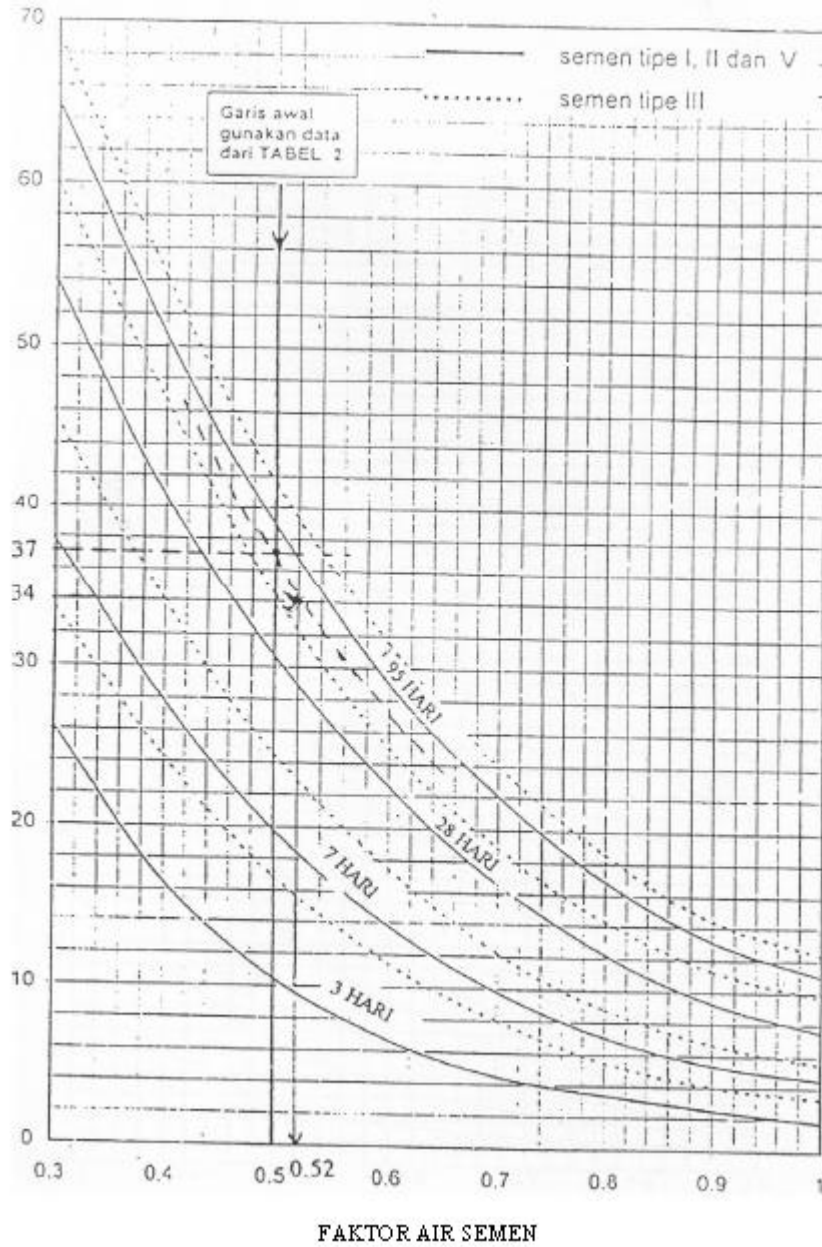
Tabel 3.8 Gradasi Krikil

Lubang Ayakan (mm)	Persen Butir lewat Ayakan, Besar Butir Maksimum	
	40 mm	20 mm
40	95 – 100	100
20	30 – 70	95 – 100
10	10 – 35	25 – 55
4,8	0 – 5	0 – 10

7. Menentukan faktor air semen (fas)

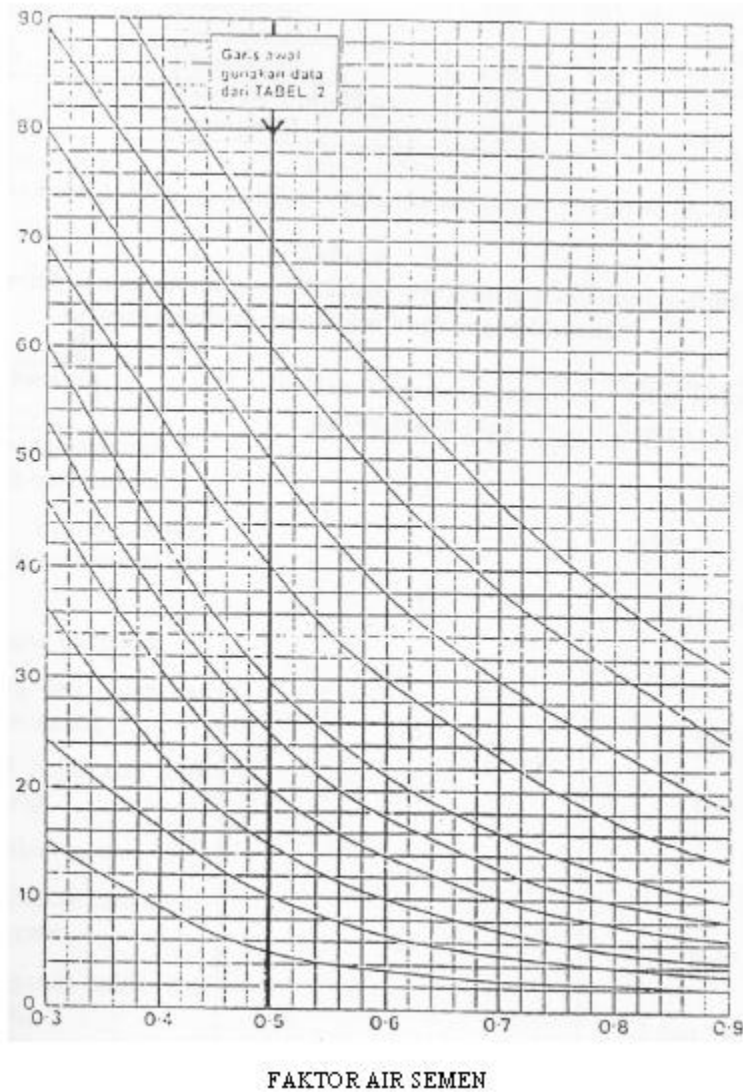
Ada dua cara menetapkan nilai fas, yaitu :

- a. Menggunakan grafik pada Gambar 3.7, apabila benda uji silinder :



Gambar 3.8 Hubungan Antara Kuat tekan dan Faktor Air Semen (Benda Uji Berbentuk Silinder diameter 150 mm, tinggi 300 mm)

b. Menggunakan grafik pada Gambar 3.8, apabila benda uji kubus :



Gambar 3.9 Hubungan Antara Kuat tekan dan Faktor Air Semen (Benda Uji Berbentuk Kubus 150 mm x 150 mm x 150 mm)

8. Nilai fas ditentukan menggunakan tabel persyarat fas maksimum untuk berbagai macam pembetonan dan lingkungan khusus. Tabel yang digunakan adalah Tabel 3.9, Tabel 3.10, Tabel 3.11.

Tabel 3.9 Persyaratan Jumlah Semen Minimum dan faktor Air Semen Untuk Berbagai Macam Pembetonan dan Lingkungan Khusus

Lokasi	Jumlah Semen Minimum Per m <sup>3</sup> Beton (kg)	Nilai Fas Maksimum
Beton di dalam ruang bangunan :		
a. keadaan keliling non korosif	275	0.6
b. keadaan keliling korosif, disebabkan oleh kondensasi atau uap korosi	325	0.52
Beton di luar bangunan :		
a. tidak terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	325	0.60
b. terlindung dari hujan dan terik matahari langsung	375	0.60
Beton yang masuk kedalam tanah :		
a. mengalami keadaan baasah dan kering berganti-ganti	325	0.55
b. mendapat pengaruh sulfat dan alkali dari tanah		Lihat Tabel 3.11
Beton yang kontinu berhubungan :		
a. air tawar		Lihat Tabel 3.10
b. air laut		Lihat Tabel 3.10

Tabel 3.10 Ketentuan Minimum Untuk Beton Bertulang Kedap Air

Berhubungan dengan :	Tipe Semen	fas	Kandungan Semen Minimum (kg/m <sup>3</sup> )	
			Ukuran Maksimum Agregat (mm)	
			40	20
Air tawar	Semua Tipe I- V	0,50	280	300
Air payau	Tipe I + Pozolan (15% - 40%) atau semen portland pozolan	0,45	340	380
	Tipe II atau V	0,50		
Air laut	Tipe II atau V	0,45		

Tabel 3.11 Ketentuan Untuk Beton yang Berhubungan Dengan Air Tanah yang Mengandung Sulfat

Konsentrasi Sulfat (SO <sub>3</sub> )			Jenis Semen	Kand. Semen Min. (kg/m <sup>3</sup> )		
Dalam Tanah		SO <sub>3</sub> dalam air tanah (g/l)		Ukuran Maks agregat (mm)		
Total SO <sub>3</sub> %	SO <sub>3</sub> dalam campuran air : tanah = 2 : 1 (g/l)			40	20	10
<0,2	<0,1	<0,3	Tipe I, dengan atau tanpa pozolan (15% - 40%)	280	300	350
0,2 – 0,5	1,0 – 1,9	0,3 – 1,2	Tipe I tanpa pozolan	290	330	380
			Tipe I dengan pozolan (15% - 40%) atau semen portland pozolan (PPC)	270	310	360
0,5 – 1,0	1,9 – 3,1	1,2 – 2,5	Tipe II atau V	250	290	340
			Tipe I dengan pozolan (15% - 40%) atau portland pozolan (PPC)	340	380	430
1,0 – 2,0	3,1 – 5,6	2,5 – 5,0	Tipe II atau V	290	330	380
			Tipe II atau V	330	370	420
>2,0	>5,6	>5,0	Tipe II atau V dan lapisan pelindung	340	370	420

Dari nilai fas yang ada maka diambil nilai fas yang terendah.

9. Menetapkan nilai *slump* menggunakan Tabel 3.12

Tabel 3.12 Penetapan Nilai *slump*

Pemakaian Beton	<i>Slump</i> (cm)	
	Maksimum	Minimum
Dinding, plat fondasi, dan fondasi telapak bertulang	12,5	5,0
Fondasi telapak tidak berulang, aison, dan struktur di bawah tanah	9,0	2,5
Pelat, balok, kolom, dinding	15,0	7,5
Pengerasan jalan	7,5	5,0
Pembetonan massal	7,5	2,5

10. Menentukan ukuran besar butir agregat.

11. Menentukan kadar air bebas menggunakan Tabel 3.13.

Tabel 3.13 Perkiraan kebutuhan Air Per m<sup>3</sup> Beton

Besarnya ukuran maks. Kerikil (mm)	Jenis batuan	Slump (mm)			
		0-10	10-30	30-60	60-180
10	Alami	150	180	205	225
	Batu Pecah	180	205	230	250
20	Alami	135	160	180	195
	Batu Pecah	170	190	210	225
40	Alami	115	140	160	175
	Batu pecah	155	175	190	205

Apabila agregat yang digunakan adalah agregat campuran (alami dan batu pecah), maka kebutuhan air dihitung menurut rumus :

$$\frac{2}{3}W_h + \frac{1}{3}W_k \quad (3.5)$$

dengan :

$W_h$  = perkiraan jumlah air untuk agregat halus (agregat alami)

$W_k$  = perkiraan air untuk agregat kasar (batu pecah)

12. Menentukan kadar semen.

13. Ada dua cara dalam menentukan kebutuhan semen, yaitu :

a. Menggunakan rumus

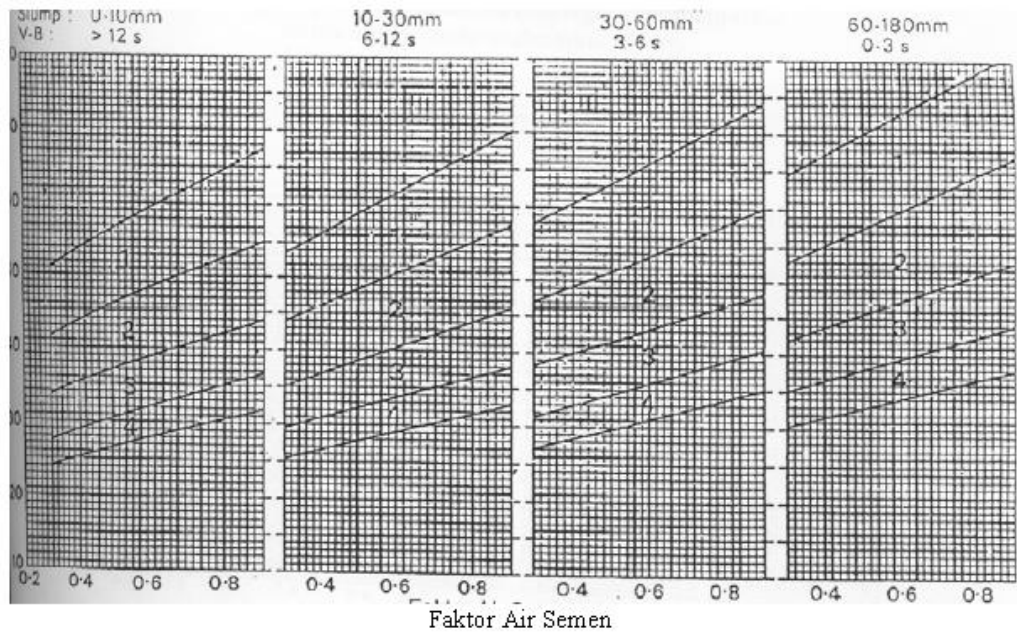
$$\text{kadar semen} = \frac{\text{jumlah kadar air}}{fas} \quad (3.6)$$

b. Menetapkan kebutuhan semen minimum menggunakan tabel 3.9, 3.10, dan 3.11 diatas.

Dari kedua langkah diatas dipilih jumlah semen terbesar.

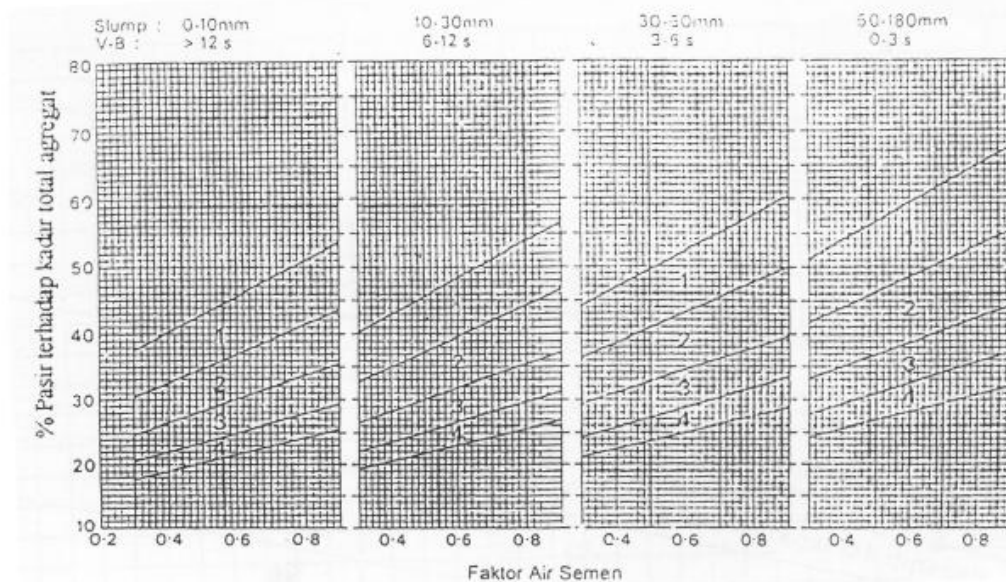
14. Menentukan persentase pasir terhadap agregat campuran menggunakan grafik pada Gambar 3.9, 3.10, dan 3.11. nilai persentase ini dibaca dengan menggunakan data nilai fas terendah, nilai *slump*, dan ukuran butir maksimum agregat.

Ukuran agregat maksimum : 10 mm

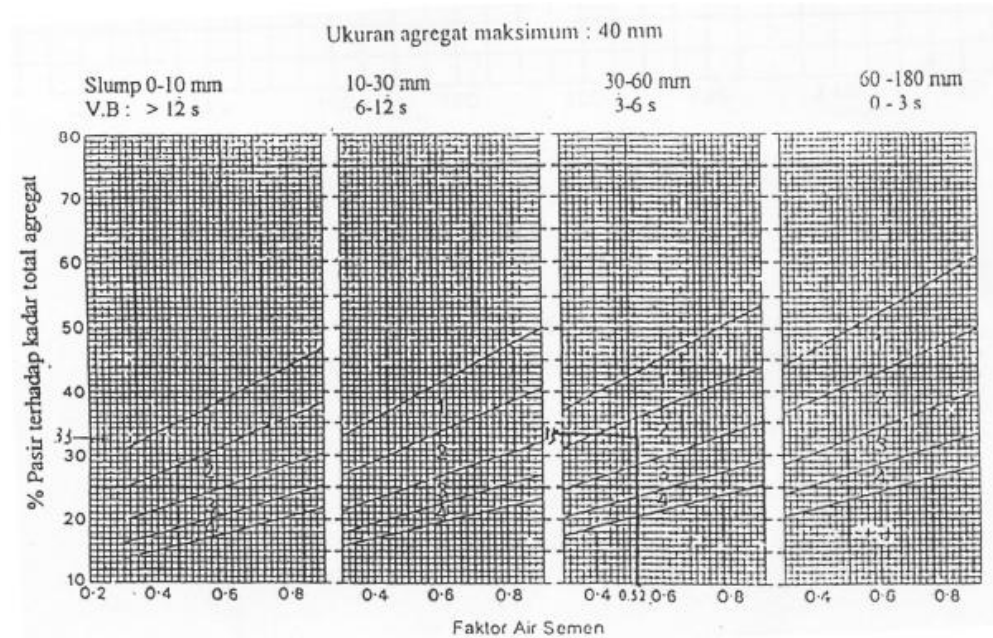


Gambar 3.10 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 10 mm

Ukuran agregat maksimum 20 mm



Gambar 3.11 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 20 mm



Gambar 3.12 Persen Pasir Terhadap Kadar Total Agregat yang dianjurkan Untuk Ukuran Butir Maksimum 40 mm

15. Menentukan persentasi agregat kasar terhadap agregat campuran.

$$K = 100\% - P \quad (3.7)$$

dengan :

$K$  = % agregat kasar

$P$  = % agregat halus (langkah 14)

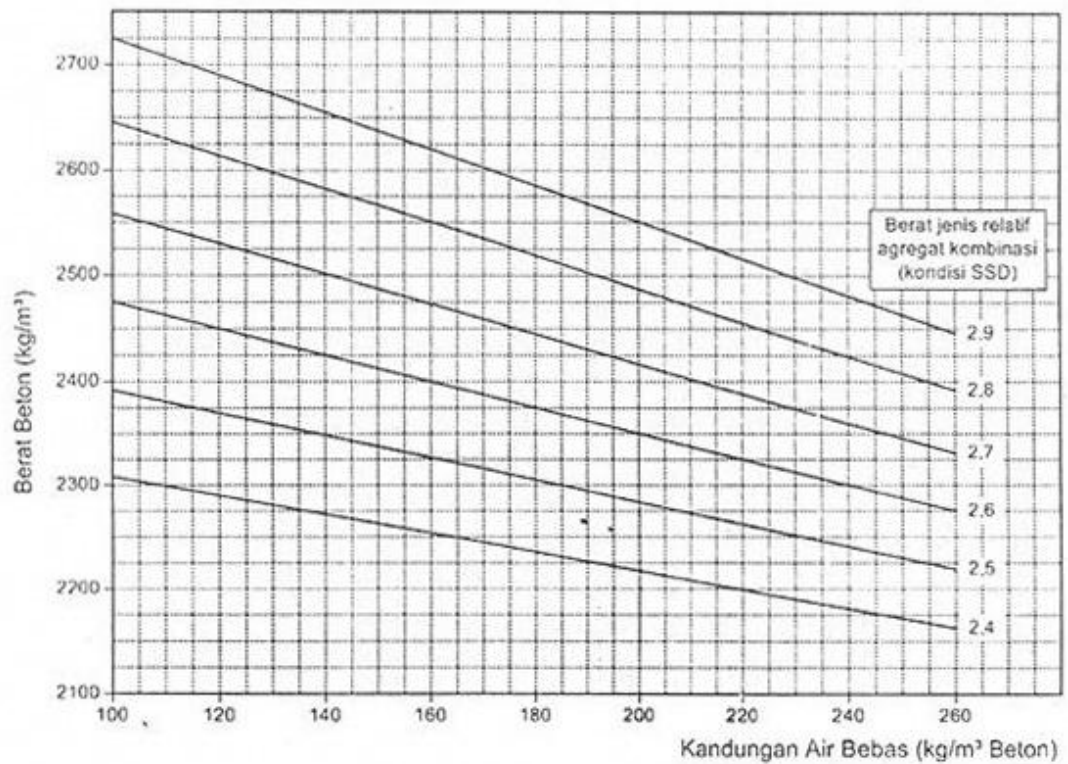
16. Menentukan berat jenis campuran pasir dan kerikil.

$$Bj_{campuran} = P \cdot Bj_{pasir} + K \cdot Bj_{kerikil} \quad (3.8)$$

17. Menentukan berat isi beton menggunakan grafik pada Gambar 3.12.

Untuk mendapatkan nilai berat isi beton pada grafik dibutuhkan data-data sebagai berikut ini :

- Berat jenis campuran (langkah 16)
- Kadar air (langkah 11)



Gambar 3.13 Perkiraan Berat Isi Beton Basah yang Telah Dipadatkan

18. Menghitung kadar agregat gabungan.

$$AG = \text{Berat isi beton} - \text{Kadar semen} - \text{Kadar air} \quad (3.9)$$

dengan :

AG = kadar agregat gabungan

19. Menghitung kadar agregat halus.

$$AH = P \times AG \quad (3.10)$$

dengan :

AH = kadar agregat halus

P = % agregat halus

20. Menghitung persentasi agregat kasar.

$$AK = K \times AG \quad (3.11)$$

dengan :

AK = kadar agregat kasar

K = % agregat kasar

21. Menghitung proporsi campuran, kondisi agregat dalam keadaan jenuh kering permukaan.

### **3.6 BAJA TULANGAN**

Seperti yang telah diketahui bahwa beton kuat terhadap tekan tetapi lemah terhadap tarik. Untuk menutupi kelemahannya terhadap tarik, maka ditambah baja tulangan yang kuat terhadap tarik. Baja tulangan itu sendiri adalah baja yang berbentuk batang yang digunakan untuk penulangan beton. Karena sering digunakan untuk penulangan beton sering disebut dengan besi beton.

Pada beton bertulang antara komponen beton dan baja tulangan mempunyai fungsi atau tugas pokoknya masing-masing, sesuai dengan sifat material yang bersangkutan. Fungsi utama baja tulangan dan beton adalah berikut ini.

Fungsi utama dari beton, yaitu untuk :

1. Menahan gaya tekan.
2. Menutupi baja tulangan agar tidak berkarat.

Fungsi utama dari baja tulangan, yaitu untuk :

1. Menahan gaya tarik.
2. Mencegah retak beton agar tidak melebar.

#### **3.6.1 Jenis Baja Tulangan**

Baja tulangan yang tersedia di pasaran ada dua jenis, yaitu baja tulangan polos (BJTP) dan baja tulangan ulir atau *deform* (BJTD). Baja tulangan polos adalah batang baja berpenampang bundar yang permukaan sisi luarnya rata tidak bersirip atau berulir. Biasanya baja tulangan polos digunakan untuk tulangan geser atau begel atau sengkang, yang mempunyai tegangan leleh ( $f_y$ ) minimal sebesar 240 MPa (disebut BJTP-24). Sedangkan baja tulangan ulir adalah baja tulangan yang permukaannya memiliki sirip melintang dan rusuk memanjang yang dimaksudkan untuk meningkatkan daya lekat dan guna menahan gerakan memujur dari batang secara relatif terhadap beton (SNI07-2052-2002). Biasanya tulangan ulir digunakan untuk tulangan longitudinal atau tulangan memanjang, dan mempunyai tegangan leleh minimum ( $f_y$ ) minimal 300 MPa.

### 3.6.2 Ukuran Baja Tulangan

Ukuran diameter nominal baja tulangan polos dan ulir yang terdaftar dalam SNI 07-2052-2002 dilihat pada Tabel 3.14 dan Tabel 3.15 berikut ini.

Tabel 3.14 Ukuran Baja Tulangan Polos

No	Penamaan	Diameter nominal (d) (mm)	Luas penampang nominal (L) (cm <sup>2</sup> )	Berat nominal per meter (kg/m)
1	P6	6	0,2827	0,222
2	P8	8	0,5027	0,395
3	P10	10	0,7854	0,617
4	P12	12	1,131	0,888
5	P14	14	1,539	1,12
6	P16	16	2,011	1,58
7	P19	19	2,835	2,23
8	P22	22	3,801	2,98
9	P25	25	4,909	3,85
10	P28	28	6,158	4,83
11	P32	32	8,042	6,31

Tabel 3.15 Ukuran Baja Tulangan Ulir

No	Penamaan	Diameter nominal (d) (mm)	Luas penampang nominal (L) (cm <sup>2</sup> )	Berat nominal per meter (kg/m)
1	D6	6	0,2827	0,222
2	D8	8	0,5027	0,395
3	D10	10	0,7854	0,617
4	D12	12	1,131	0,888
5	D14	14	1,539	1,12
6	D16	16	2,011	1,58
7	D19	19	2,835	2,23
8	D22	22	3,801	2,98
9	D25	25	4,909	3,85
10	D28	28	6,158	4,83
11	D32	32	8,042	6,31
12	D36	36	10,18	7,99
13	D40	40	12,57	9,88
14	D50	50	19,64	17,4

### 3.6.3 Toleransi Ukuran

Baja tulangan yang dijual di Indonesia masih sangat jarang ditemukan baja tulangan yang diameter nominalnya sempurna. Sehingga terdapat suatu aturan yang mengatur tentang toleransi diameter baja tulangan. Toleransi diameter baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 3.16.

Tabel 3.16 Toleransi Diameter Baja Tulangan

No	Diameter (d) (mm)	Toleransi (mm)	Penyimpangan kebulatan (%)
1	6	$\pm 0,3$	Maksimum 70 dari batas toleransi
2	$8 < d < 14$	$\pm 0,4$	
3	$16 < d < 25$	$\pm 0,5$	
4	$28 < d < 34$	$\pm 0,6$	
5	$d > 34$	$\pm 0,8$	

CATATAN

1. Penyimpangan kebulatan adalah perbedaan antara diameter maksimum dan minimum dari hasil pengukuran pada penampang yang sama dari baja tulangan beton.
2. Untuk baja tulangan beton sirip, d = diameter dalam

(Sumber : SNI 07-2052-2002)

### 3.6.4 Hubungan Regangan-Tegangan Baja Tulangan

Prilaku dari baja tulangan ini dapat dilihat dari grafik Gambar 3.14, dimana pada grafik tersebut menggambarkan hubungan antara tegangan dan regangan pada baja tulangan.

#### 1. Daerah Elastis

Dimulai dari daerah titik awal atau titik 0 pada grafik regangan-tegangan, yang berarti pertambahan panjang adalah nol pada saat beban nol, dan dibatasi dengan batas proporsional. Pada daerah ini garis linier sampai tingkat

tegangan yang disebut tegangan batas (*proportional limit*), dengan pertambahan tegangan berbanding lurus dengan pertambahan regangan. Baja tulangan pada daerah ini mengikuti hukum Hooke sampai tegangan mencapai batas proporsional. Pada tingkatan berikutnya material mencapai kondisi leleh, dimana untuk sebagian besar jenis baja tulangan, batas proporsional sama tegangan leleh (*yield stree*).

## 2. Daerah Plastis

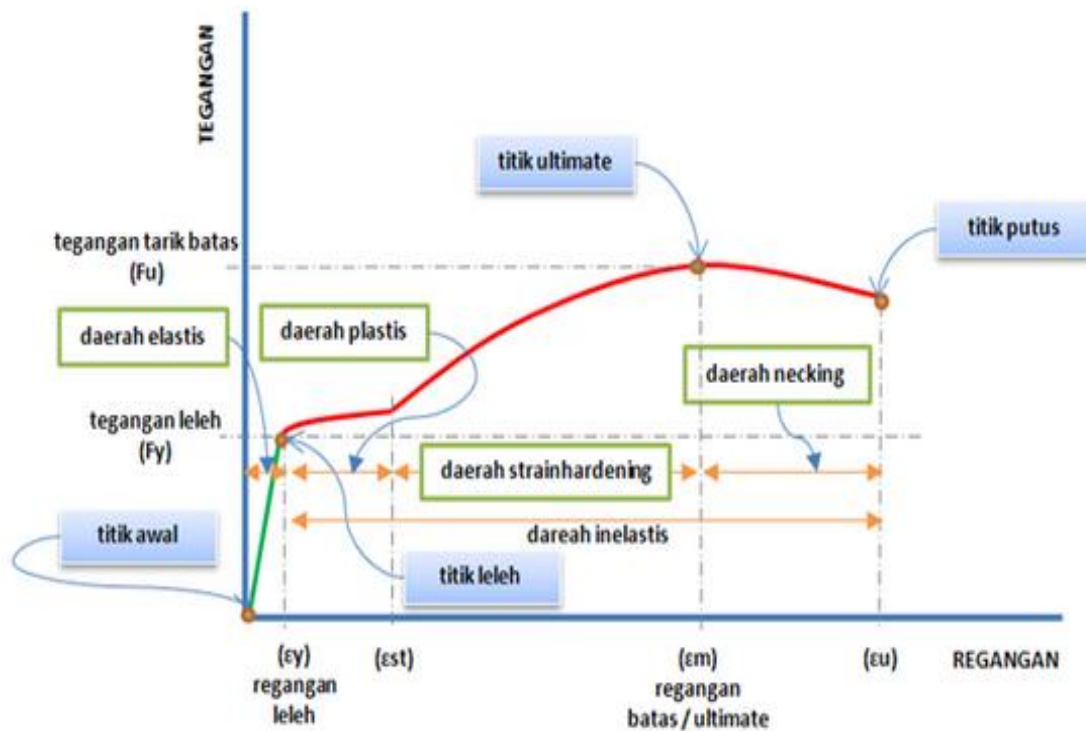
Daerah plastis merupakan daerah datar pada kurva tegangan-regangan. Dimulai dari titik leleh ditandai dengan adanya tambahn regangan tanpa adanya peningkatan tegangan yang berarti. Kelelehan terjadi dikarenakan adanya pergeseran internal pada materiala baja ditingkat atom.

## 3. Daerah *Strain Hardening*

Daerah *strain hardening* ditandai dengan adanya peningkatan tegangan pada grafik tegangan-regangan, yang berarti diperlukan adanya peningkatan tegangan untuk setiap pertambahan regangan. Efek *strain hardening* berkurang dengan bertambahnya regangan, sampai kurva mencapai puncak, yang diakibatkan berkurangnya luasan penampang spesimen pada lokasi. Tegangan maksimum terjadi pada grafik disebut dengan tegangan tarik batas (*ultimate tensile stress*), atau kuat tarik (*tensile strenght*), atau kuat batas (*ultimate strength*).

## 4. Daerah *Necking*

Daerah *necking* merupaka daerah dimana perpanjangan terjadi dengan beban yang berkurang, sampai akhirnya spesimen putus. Daerah penambahan panjang spesimen signifikan, beserta berkurangnya luas penampang pada lokasi tertentu di spesimen disebut dengan *necking*.setelah putus kedua bagian spesimen digabungkan kembali dan diukur jarak antara kedua tanda untuk menetapkan alur daerah tersebut.

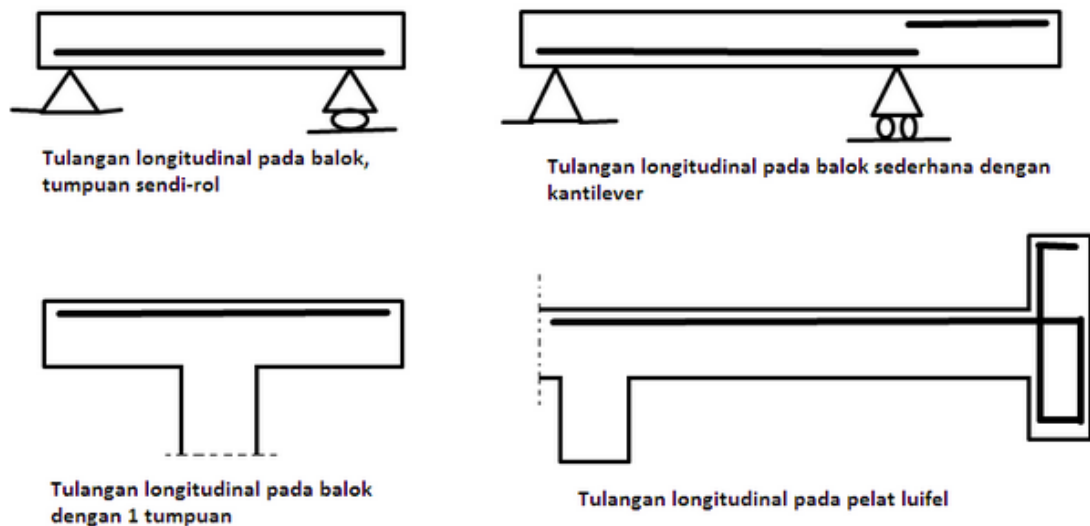


Gambar 3.14 Grafik Hubungan Regangan dan Tegangan Baja Tulangan

### 3.6.5 Tulangan Longitudinal

Fungsi utama dari baja tulangan adalah untuk menahan gaya tarik. Oleh karena itu pada struktur balok, kolom, pelat, pondasi, ataupun struktur yang lainnya yang menggunakan bahan beton bertulang, selalu diupayakan agar tulangan longitudinal dipasang pada serat-serat beton yang mengalami tarik, terutama pada daerah yang menaham momen lentur yang besar umumnya pada daerah lapangan.

Berikut ini adalah beberapa contoh pemasangan tulangan longitudinal pada balok



Gambar 3.15 Contoh Pemasangan Tulangan Longitudinal Balok

### 3.6.6 Panjang Penyaluran Baja Tulangan

Pada penggunaan beton bertulang, dimana beton diperkuat dengan baja tulangan yang diharapkan baja tulangan dan beton dapat bekerja sama dengan baik, sehingga hal ini akan menutupi kelemahan beton yaitu kurang kuat dalam menahan gaya tarik.

Salah satu persyaratan dalam struktur beton bertulang adalah adanya lekatan (*bond*) antara tulangan dan beton, sehingga dengan anggapan bahwa apabila struktur beton diberikan beban tidak terjadi *slip* antara baja tulangan dan beton dengan memberikan panjang penyaluran yang cukup. Menurut Nawy (1986), kuat lekat baja tulangan dan beton yang membungkusnya dipengaruhi oleh beberapa faktor :

1. Adhesi antara elemen beton dan bahan penguatnya yaitu baja tulanga.
2. Efek *gripping* (memegang) sebagai akibat dari susutpengeringan beton disekeliling baja tulangan, dan saling geser antara baja tulangan dengan beton disekelilingnya.
3. Efek kualitas beton dan kekuatan tarik dan tekannya.
4. Efek mekanis penjangkaran ujung baja tulangan.
5. Diameter baja tulangan.

Dasar utama dari teori panjang penyaluran adalah memperhitungkan suatu baja tulangan yang ditanam di dalam masa beton. Sebuah gaya  $P$  diberikan pada baja tulangan tersebut. Gaya ini selanjutnya akan ditahan antara baja tulangan dengan beton disekelilingnya. Tegangan lekat bekerja sepanjang baja tulangan yang tertanam di dalam masa beton, sehingga total gaya yang harus dilawan sebelum batang baja tulangan tercabut keluar dari masa beton adalah sebanding dengan luas selimut baja tulangan yang tertanam dikalikan dengan kuat lekat antara baja tulangan dengan beton.

Gaya maksimum yang dapat dilawan oleh baja tulangan itu sendiri sama dengan luas penampang batang dikalikan kekuatan tarik baja tulangan. Agar terjadi keseimbangan antara gaya, maka kedua gaya ini harus sama besar. Untuk menjamin lekatan antara baja tulangan dan beton tidak mengalami kegagalan, diperlukan adanya syarat panjang penyaluran.

$$\lambda_d \cdot \pi \cdot D \cdot fb = P \quad (3.12)$$

Dengan nilai  $P = A \cdot fy$  maka didapatkan persamaan :

$$\lambda_d \cdot \pi \cdot D \cdot fb = A \cdot fy \quad (3.13)$$

Dengan luas penampang baja tulangan adalah  $A = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2$

$$\lambda_d \cdot \pi \cdot D \cdot fb = 0.25 \cdot \pi \cdot D^2 \cdot fy \quad (3.14)$$

$$\lambda_d = 0.25 \cdot D \cdot \frac{fy}{fb} \quad (3.15)$$

dengan :

$\lambda_d$  : panjang penyaluran tegangan tulangan, mm.

$D$  : diameter baja tulangan, mm.

$fy$  : tegangan leleh baja tulangan, MPa.

$fb$  : tegangan lekat beton, Mpa.

Sehingga panjang penyaluran adalah panjang penanaman yang diperlukan untuk mengembangkan tegangan baja hingga mencapai tegangan leleh, merupakan fungsi dari tegangan leleh, diameter baja tulangan, dan tegangan lekat

baja tulangan. Panjang penyaluran menentukan tahanan terhadap tergelincirnya baja tulangan.

Panjang penyaluran dipengaruhi beberapa faktor, salah satunya yaitu dipengaruhi oleh beban (gaya) yang timbul sepanjang batang tulangan, baik berupa gaya tarik ataupun gaya tekan. Oleh karena itu, SNI-03-2847-2012 membedakan beberapa jenis panjang penyaluran, yaitu panjang penyaluran tulangan tarik dan panjang penyaluran tulangan tekan. Selain itu panjang penyaluran juga membedakan jenis tulangan, antara tulangan polos dan ulir memiliki aturan yang berbeda.

### **3.6.7 Sambungan Baja Dilas**

Menurut SNI 03-2847-2013 sambungan las diizinkan pada komponen struktur bangunan. Suatu sambungan las penuh harus mengembangkan paling sedikit  $1,25f_y$  batang tulangan, kecuali untung batang tulangan D16 dan yang lebih kecil diperbolehkan untuk tidak memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu gaya tarik total yang dapat dikembangkan disetiap penampang harus paling sedikit dua kali yang diperlukan oleh analisis, dan paling sedikit 140 MPa kali luas total tulangan terpasang.

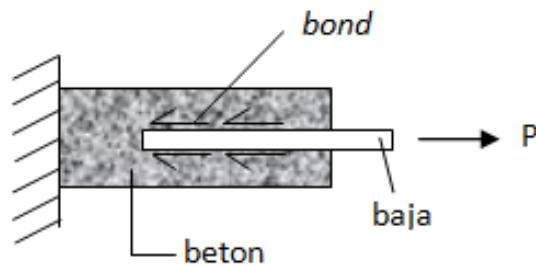
## **3.7 BETON BERTULANG**

Beton bertulang adalah beton yang ditulangi dengan luas dan jumlah tulangan yang tidak kurang dari nilai minimum yang disyaratkan dengan atau tanpa prategang, dan direncanakan berdasarkan asumsi bahwa kedua bahan tersebut bekerja sama dalam memikul gaya-gaya (SNI 03-2847-2013). Beton bertulang adalah material konstruksi yang menggunakan dua jenis bahan yang berbeda secara bersamaan yaitu beton polos, dan baja tulangan. Dimana sifat utama dari baja tulangan adalah mampu menahan kuat tarik maupun tekan. Karena baja tulangan harganya mahal, maka sedapay mungkin dihindari penggunaan baja tulangan untuk menahan beban tekan.

Dari sifat utama tersebut dapat dilihat bahwa tiap-tiap bahan mempunyai kelebihan dan kekurangan, maka jika kedua bahan beton polos dan baja tulangan dipadukan menjadi satu kesatuan akan diperoleh bahan baru yang disebut dengan

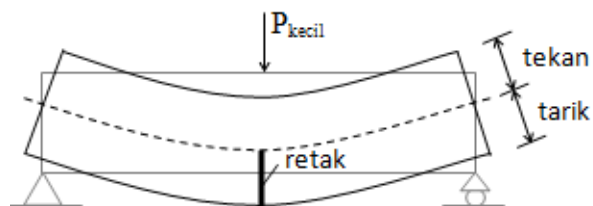
beton bertulang. Beton bertulang ini mempunyai sifat sesuai dengan bahan penyusunnya, yaitu kuat terhadap beban tarik maupun tekan.

Beton bertulang membentuk suatu material komposit dengan ikatan yang disebut dengan *bond* atau lekatan. Hubungan antara beton, baja tulangan dan *bond* seperti yang terlihat pada Gambar 3.16.

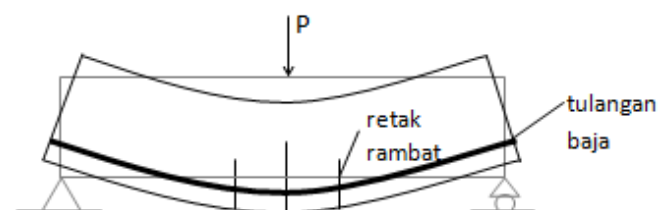


Gambar 3.16 Material Komposit Beton Bertulang

Beton polos tanpa baja tulangan hanya mampu menahan gaya tekan saja, dan relatif hanya dapat memikul beban yang relatif kecil. Ketika beton polos diberikan beban yang relatif kecil maka akan timbul retakan beton akibat gaya tarik, seperti yang terlihat pada Gambar 3.17. Dengan adanya tambahan baja tulangan maka beton bertulang dapat menahan beban yang relatif jauh lebih besar dibandingkan dengan beton polos, seperti yang tampak pada Gambar 3.18.



Gambar 3.17 Beton Tanpa Tulangan,  $P$  yang Dipikul Kecil Akibat Keruntuhan Tarik



Gambar 3.18 Beton Bertulang Dapat Menahan  $P$  yang Jauh Lebih Besar

### 3.7.1 Distribusi Tegangan dan regangan Balok Tulangan Tunggal

Model tegangan-regangan yang digunakan dalam memodelkan perilaku material beton dapat dibagi dalam dua katagori, yaitu (1) beton normal, dan (2) beton mutu tinggi ( $f'_c > 40$  Mpa). Perilaku kedua material tersebut terutama terletak pada nilai daktilitasnya. Beton normal akan memiliki nilai daktilitas yang lebih besar dibandingkan dengan beton mutu tinggi dikarenakan beton mutu tinggi lebih getas dari pada beton normal.

#### 1. Beton normal

Persamaan yang digunakan untuk memodelkan perilaku beton normal adalah persamaan Hognested.

$$f_c = f'_c \left[ \frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} - \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \right)^2 \right] \quad (3.16)$$

dengan :

$f_c$  = tegangan pada beton (MPa)

$\varepsilon_c$  = regangan pada beton

$f'_c$  = kuat tekan beton uniaksial

$\varepsilon_c'$  = regangan pada saat beton mencapai  $f'_c$

dengan :

$$\varepsilon_c' = \frac{f'_c}{E_c} \quad (3.17)$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

Karena sifat kelengkungannya yang tinggi terutama pada bagian awal, persamaan parabola ini hanya akurat untuk menggambarkan hubungan tegangan-regangan pada beton mutu rendah dan normal yang memang mempunyai sifat non linearitas yang tinggi pada tahap awal pembebananya.

#### 2. Beton mutu tinggi ( $f'_c > 40$ MPa)

Persamaan yang digunakan untuk memodelkan perilaku beton mutu tinggi adalah persamaan Collins & Mitchell (1992).

$$f_c = f'_c \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \frac{n}{n-1 + \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} nk} \quad (3.18)$$

$$k = 1 \quad \text{untuk } \varepsilon_c / \varepsilon_c' \leq 1$$

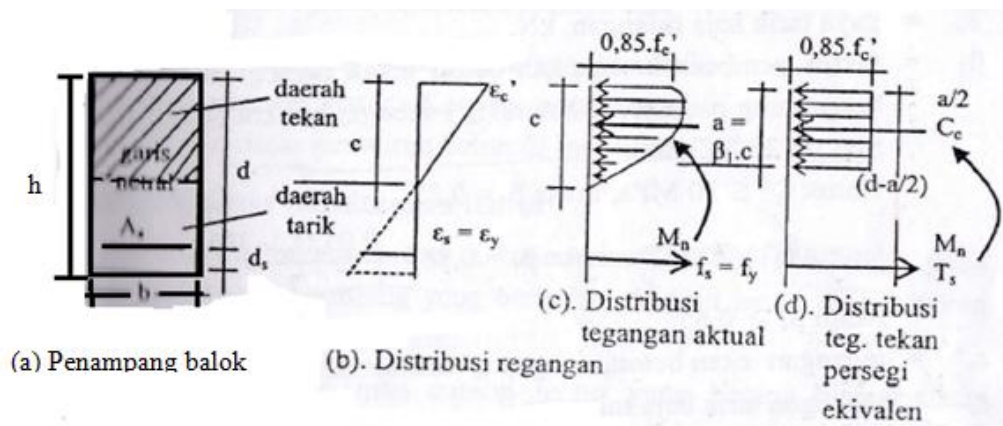
$$k = 0,7 + \frac{f'c}{20} \text{ (MPa)} \quad \text{untuk } \varepsilon_c / \varepsilon_c' > 1$$

$$n = 0,8 + \frac{f'c}{20} \text{ (MPa)}$$

$$\varepsilon_c' = \frac{f'c}{E_c} \frac{n}{n-1}$$

$$\varepsilon_{\max} = 1,5 \varepsilon_c'$$

Untuk balok khususnya balok tulangan tunggal terkadang sering disebut dengan balok tulangan sebelah. Untuk perhitungan balok persegi panjang dengan tulangan tunggal atau tulangan sebelah, berikut ini digambarkan bentuk penampang balok yang dilengkapi dengan distribusi tegangan dan regangan beton serta notasinya, seperti yang terlihat pada Gambar 3.19.



Gambar 3.19 Distribusi Tegangan-Regangan Balok Tulangan Tunggal  
(Sumber : Asroni, 2010)

Dengan:

$h$  = tinggi penampang balok, mm

$b$  = lebar penampang balok, mm

$d$  = tinggi efektif penampang balok, mm

$d_s$  = jarak antara titik tengah tulangan tarik dan tepi balok tarik, mm

$A_s$  = luas tulangan tarik, mm<sup>2</sup>

$$A_s = \frac{0,85 \times f'c \times a \times b}{f_y} \quad (3.19)$$

$c$  = jarak antara garis netral dan tepi beton tekan, mm

$E_s$  = modulus elastis baja tulangan, nilainya sebesar 200000 MPa

$\varepsilon_c'$  = regangan tekan beton, dengan  $\varepsilon_c'$  maksimum ( $\varepsilon_{cu}'$ ) = 0.003

$$\varepsilon_c' = \frac{a}{\beta_1 x d - a} \times \varepsilon_y \quad (3.20)$$

$\varepsilon_s$  = regangan tarik baja tulangan

$\varepsilon_y$  = regangan tarik baja tulangan pada saat leleh

$$\frac{f_y}{E_s} = \frac{f_y}{200000} \quad (3.21)$$

$f_y$  = tegangan tarik baja tulangan pada saat leleh, MPa

$f'_c$  = tegangan tekan beton yang diisyaratkan pada umur 28 hari, MPa

$a$  = tinggi balok tegangan beton tekan

$f_s$  = tegangan tarik baja tulangan

$$f_s = \varepsilon_s \times E_s \quad (3.22)$$

$\beta_1$  = faktor pembentuk tegangan beton, yang bergantung dengan nilai mutu beton ( $f'_c$ ). Nilai  $\beta_1$  berdasarkan SNI 03-2847-2002 sebagai berikut ini.

Untuk  $f'_c \leq 30$  Mpa, maka  $\beta_1 = 0.85$

$$\text{Untuk } f'_c \geq 30 \text{ Mpa, maka } \beta_1 = 0.85 - \frac{0.05 \times (f'_c - 30)}{7} \quad (3.23)$$

$C_c$  = gaya tekan beton, kN

$$C_c = 0.85 \times f'_c \times a \times b \quad (3.24)$$

$T_s$  = gaya tarik baja tulangan, kN

$$T_s = A_s \times f_y \quad (3.25)$$

$M_n$  = momen nominal, kNm

Dari gambar diatas dapat diketahui luas tulangan balok dapat dihitung, dan nilainya tergantung dengan nilai  $f'_c$ , a, b dan  $f_y$ . Dari Gambar 3.19 besarnya gaya tekan beton  $C_c$  sama dengan gaya tarik baja tulangan  $T_s$ , sehingga dari gambar dapat dihitung nilai momen nominal ( $M_n$ ) dengan persamaan berikut ini.

$$M_n = C_c x \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (3.26)$$

Selanjutnya menghitung faktor momen pikul ( $K$ ) yang didefinisikan sebagai momen nominal ( $M_n$ ) yang dibagi dengan hasil perkalian antara luas tampang efektif balok dan tinggi efektif balok, maka diperoleh perhitungan sebagai berikut.

$$K = \frac{M_n}{b x d^2} \quad \text{atau} \quad K = \frac{M_u}{\phi b x d^2} \quad (3.27)$$

dengan :

$$\phi = 0.8$$

Karena nilai  $a$  selalu lebih kecil dari tinggi efektif balok ( $d$ ), maka diperoleh nilai  $a$  sebagai berikut.

$$a = d \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{2K}{0.85 x f'_c}} \right] \quad (3.28)$$

selain itu nilai  $a$  dapat dicari dengan menyamakan antara nilai  $T_s$  dan  $C_c$ , sehingga didapat persamaan tinggi balok tegangan beton sebagai berikut ini.

$$a = \frac{A_s x f_y}{0.85 x f'_c x b} \quad (3.29)$$

Setelah dihitung momen nominal, maka dapat ditentukan momen yang direncanakan dengan rumus berikut ini.

$$M_r = \phi M_n, \text{ dengan } \phi = 0.8. \quad (3.30)$$

Menurut SNI 03-2847-2002, sistem perencanaan beton bertulang dibatasi dengan dua kondisi berikut ini.

1. Agar tulangan yang digunakan tidak terlalu sedikit atau tulangan  $\rho$  tidak terlalu kecil diberikan syarat sebagai berikut :

$$A_s \geq A_{smin} \text{ atau } \rho \geq \rho_{min}$$

$$\rho = \frac{A_s}{b x d} \quad (3.31)$$

$$A_{smin} = \frac{f'_c}{4 x f_y} x b x d \text{ atau}$$

$$A_{smin} = \frac{1.4}{f_y} \times b \times d \text{ (dipilih yang terbesar)} \quad (3.32)$$

$$\rho_{min} = \frac{\overline{f'_c}}{4 \times f_y} \text{ atau}$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \text{ (dipilih yang terbesar)} \quad (3.33)$$

2. Agar penampang beton dapat mendekati keruntuhan seimbang, diberikan syarat berikut :

$$A_s \leq A_{smaks} \text{ atau } \rho \leq \rho_{maks}$$

$$A_{smaks} = 0.75 \times A_{s,b} \quad (3.34)$$

$$\rho_{maks} = 0.75 \times \rho_b \quad (3.35)$$

### 3.7.2 Rasio Tulangan Maksimal dan Minimal

Pada pembahasan sebelumnya telah diuraikan bahwa penggunaan tulangan atau rasio tulangan pada sistem perencanaan beton bertulang dibatasi dengan dua keadaan, yaitu  $A_s \geq A_{smin}$  atau  $\rho \geq \rho_{min}$  dan  $A_s \leq A_{smaks}$  atau

Persamaan (3.31), dengan prinsip dasar bahwa  $\rho \leq \rho_{maks}$ .

1. Rasio tulangan maksimal.

Persamaan (3.31) tersebut memberikan batasan nilai  $\rho$ , yaitu  $\rho \leq \rho_{maks}$ , dengan  $\rho_{maks} = 0.75 \times \rho_b$ . Apabila nilai dari  $\rho_b$  dimasukkan ke dalam Persamaan (3.32), maka diperoleh nilai  $\rho_{maks}$  sebagai berikut.

$$\rho_{maks} = 0.75 \times \rho_b = \frac{382.5 \times \beta_1 \times f'_c}{600 + f_y \times f_y} \quad (3.36)$$

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa rasio tulangan maksimal ( $\rho_{maks}$ ) hanya dipengaruhi oleh mutu beton ( $f'_c$ ) dan mutu baja tulangan ( $f_y$ ) saja, tanpa ada pengaruh dari dimensi penampang balok. Oleh karena itu nilai dari rasio tulangan maksimal ini dapat ditabelkan sesuai dengan mutu beton ( $f'_c$ ) dan mutu baja ( $f_y$ ) yang digunakan dalam perencanaan, seperti yang terlihat pada Tabel 3.17.

Tabel 3.17 Rasio Tulangan Maksimal ( $\rho_{maks}$ ) dalam Persentase (%)

Mutu Beton $f'_c$ (MPa)	Mutu baja tulangan $f_y$ (MPa)					
	240	300	350	400	450	500
15	2,419	1,805	1,467	1,219	1,032	0,887
20	3,225	2,408	1,956	1,626	1,376	1,182
25	4,032	3,010	2,445	2,032	1,720	1,478
30	4,838	3,616	2,933	2,438	2,064	1,773
35	5,405	4,036	3,277	2,724	2,306	1,981
40	5,912	4,414	3,585	2,980	2,522	2,167
45	6,344	4,737	3,846	3,197	2,707	2,325
50	6,707	5,008	4,067	3,380	2,862	2,458
55	7,002	5,228	4,245	3,529	2,998	2,567
60	7,400	5,525	4,486	3,729	3,157	2,712

Catatan untuk Tabel 3.17 :

- a. Jika mutu beton ( $f'_c$ ) dan mutu baja tulangan ( $f_y$ ) tidak sesuai dengan yang tercatum pada Tabel 3.17 di atas, maka tulangan maksimal dapat ditentukan pada Persamaan 3.32.
  - b. Dari Tabel 3.17 dapat diketahui dua kondisi berikut ini :
    - 1) Pada mutu baja ( $f_y$ ) sama, semakin tinggi mutu beton ( $f'_c$ ) maka nilai  $\rho_{maks}$  semakin besar.
    - 2) Pada mutu beton ( $f'_c$ ) sama, semakin tinggi mutu baja ( $f_y$ ) maka nilai  $\rho_{maks}$  semakin menurun.
2. Rasio tulangan minimal.

Dapat dilihat pada Persamaan (3.29) memberikan batasan minimal terhadap penggunaan rasio tulangan, yaitu  $\rho \geq \rho_{min}$  dan nilai  $\rho_{min}$  dipilih dari nilai yang paling besar dari Persamaan 3.25.

Karena nilai  $\rho_{min}$  pada kedua rumus di atas dipilih yang besar, maka dapat ditentukan batasannya dengan penjabaran rumus berikut ini

$$\rho_{min} = \frac{\overline{f'_c}}{4.f_y} = \frac{1.4}{f_y}$$

$$\overline{f'_c} = 1.4 \cdot 4 = 5.6 \rightarrow f'_c = 5.6^2 = 31.36 \text{ MPa}$$

Jadi dapat diberikan batasan nilai  $\rho_{min}$  sebagai berikut:

- a. Untuk mutu beton  $f'_c \leq 31.36 \text{ MPa}$ , maka dipakai nilai

$$\rho_{\min} = \frac{1.4}{f_y} \quad (3.37)$$

b. Untuk mutu beton  $f'_c \geq 31.36$  MPa, maka dipakai nilai

$$\rho_{\min} = \frac{\overline{f'_c}}{4.f_y} \quad (3.38)$$

Dari Persamaan (3.32) dan (3.34) dapat dilihat bahwa nilai  $\rho_{\min}$  untuk mutu beton  $f'_c \leq 31.36$  MPa hanya dipengaruhi oleh mutu baja ( $f_y$ ) saja. Sedangkan untuk mutu beton  $f'_c \geq 31.36$  MPa nilai  $\rho_{\min}$  dipengaruhi oleh mutu beton ( $f'_c$ ) dan juga dipengaruhi oleh mutu baja ( $f_y$ ) yang digunakan. Sehingga nilai dari  $\rho_{\min}$  tidak ada pengaruh dari dimensi penampang balok yang digunakan. Oleh karena itu rasio tulangan minima ( $\rho_{\min}$ ) juga dapat ditabelkan sesuai dengan mutu beton ( $f'_c$ ) dan mutu baja ( $f_y$ ) yang digunakan untuk perencanaan, seperti yang terlihat pada Tabel 3.18.

Tabel 3.18 Rasio Tulangan Minimal ( $\rho_{\min}$ ) dalam Persentase (%)

Mutu beton $f'_c$ (MPa)	Mutu baja tulangan $f_y$ (MPa)					
	240	300	350	400	450	500
$\leq 31,36$	0,583	0,467	0,400	0,350	0,311	0,280
35	0,616	0,493	0,423	0,370	0,329	0,296
40	0,659	0,527	0,452	0,395	0,351	0,316
45	0,699	0,559	0,479	0,419	0,373	0,335
50	0,737	0,589	0,505	0,442	0,393	0,354
55	0,773	0,618	0,530	0,464	0,412	0,371
60	0,807	0,645	0,553	0,484	0,430	0,387

Catatan untuk Tabel 3.18

- a. Jika mutu beton dan mutu baja tulangan yang digunakan tidak tercatum pada Tabel 3.18, maka rasio tulangan minimal ( $\rho_{\min}$ ) dapat ditentukan berdasarkan persamaan (3.33) dan Persamaan (3.34).
- b. Pada Tabel 3.18 juga menunjukkan dua keadaan yang sama dengan Tabel 3.17, yaitu
  - 1) Pada mutu baja ( $f_y$ ) sama, semakin tinggi mutu beton ( $f'_c$ ) maka nilai  $\rho_{\max}$  semakin besar.

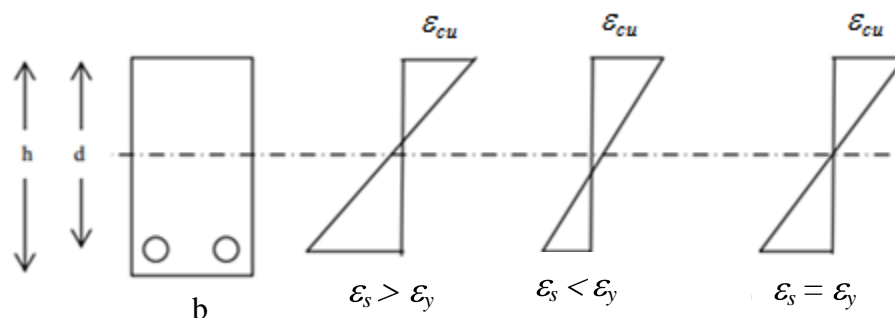
- 2) Pada mutu beton ( $f'_c$ ) sama, semakin tinggi mutu baja ( $f_y$ ) maka nilai  $\rho_{maks}$  semakin menurun.

### 3.8 JENIS KERUNTUHAN LENTUR

Jenis keruntuhan yang terjadi pada balok lentur tergantung pada sifat-sifat penampang balok, dan dapat dibedakan menjadi 3 jenis berikut :

1. Keruntuhan tekan (*over reinforced concrete*).
2. Keruntuhan seimbang (*balance*).
3. Keruntuhan tarik (*under reinforced concrete*).

Distribusi tegangan pada penampang beton untuk ketiga jenis keruntuhan lentur dapat digambarkan seperti pada Gambar 3.20.



Gambar 3.20 Distribusi Regangan Ultimit Pada Keruntuhan Lentur

Dimana :

Gambar a : penampang balok bertulan tunggal.

Gambar b : distribusi regangan ultimit pada keruntuhan tarik.

Gambar c : distribusi regangan ultimit pada keruntuhan tekan.

Gambar d : distribusi regangan ultimit pada keruntuhan seimbang.

Dan nilai  $\epsilon_{cu}$  : 0.003.

#### 3.8.1 Keruntuhan Tekan

Pada keruntuhan tekan ini, beton hancur sebelum baja tulangan leleh. Jenis keruntuhan ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan besar, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum, baja tulangan belum mencapai regangan lelehnya sedangkan beton sudah mencapai regangan maksimumnya yaitu 0.003.

Balok dengan kondisi keruntuhan tekan ini bersifat getas, sehingga pada saat beton mulai hancur baja tulangnya masih kuat, sehingga lendutan pada balok

relatif tetap. Tetapi jika balok ditambahkan beban yang besar, maka baja tulangan akan meleleh dan dapat menyebabkan keruntuhan secara tiba-tiba, tanpa adanya peringatan atau tanda-tanda tentang lendutan yang membesar pada balok.

### 3.8.2 Keruntuhan Seimbang

Pada penampang balok dengan keruntuhan seimbang, keadaan beton hancur dan baja tulangan leleh terjadi bersamaan, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum baja tulangan dan beton hancur secara bersamaan. Hal ini berarti regangan tekan beton telah mencapai regangan maksimum yaitu 0.03 dan regangan tarik baja tulangan telah mencapai leleh pada saat yang sama, atau  $\epsilon_c' = \epsilon_{cu}'$  dan  $\epsilon_s = \epsilon_y$  terjadi pada saat yang sama.

Karena beton dan baja tulangan mengalami kerusakan pada saat yang sama, maka kekuatan beton dan baja tulangan dapat dimanfaatkan sepenuhnya, sehingga penggunaan material beton dan baja tulangan tersebut menjadi lebih efisien. Sistem perencanaan beton bertulang yang seperti ini merupakan sistem perencanaan beton bertulang yang ideal, tetapi sulit dipraktikan di lapangan.

### 3.8.3 Keruntuhan Tarik

Pada keadaan penampang beton dengan kondisi keruntuhan tarik, baja tulangan sudah leleh sebelum beton hancur. Jenis keruntuhan seperti ini terjadi pada balok dengan rasio tulangan kecil, sehingga pada saat beban yang bekerja maksimum baja tulangan sudah mencapai regangan lelehnya sedangkan beton belum hancur (belum mencapai regangan maksimumnya yaitu sebesar 0.003).

Karena kerusakan terjadi pada baja tulangan yang menahan beban tarik lebih dulu dan baja tulangan bersifat liat, maka keruntuhan beton seperti ini kadang disebut dengan keruntuhan liat. Keruntuhan jenis ini memberi keuntungan karena pada saat baja mulai leleh betonnya masih kuat (belum hancur), sehingga dapat terjadi lendutan pada balok. Jika balok ditambahkan beban yang lebih besar maka lendutan pada balok semakin besar dan pada akhirnya akan runtuh. Lendutan yang ditimbulkan oleh balok ini merupakan peringatan sebelum runtuh.

### 3.9 JENIS RETAK

Menurut Gibert, retak yang terjadi pada balok dapat dikategorikan menjadi tiga bagian, seperti yang tampak pada Gambar 3.21. ketiga kategori retak ini, yaitu retak lentur, retak geser lentur dan retak geser.

1. Retak lentur (*flexural crack*)

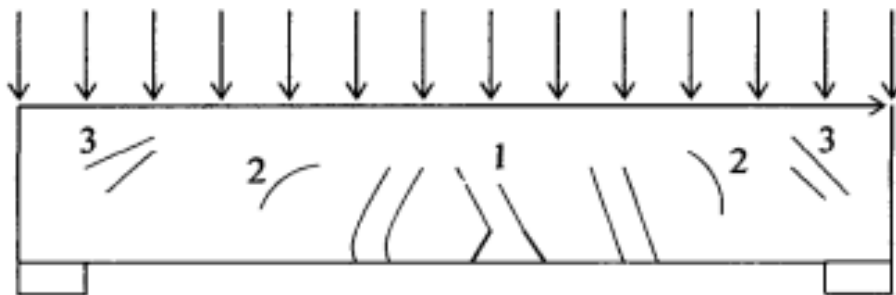
Retak lentur terjadi pada balok yang mendapat beban lentur lebih besar dari pada gaya geser. Arah dari retak lentur ini hampir tegak lurus terhadap sumbu balok. Retak lentur terjadi setelah tegangan tarik normal pada serat bagian atas beton melampaui kekuatan tarik beton. Biasanya terjadi pada daerah lapangan karena pada daerah tersebut merupakan daerah momen terbesar.

2. Retak geser lentur (*flexural shear crack*)

Retak geser lentur adalah retak miring yang merupakan lanjutan dari retak lentur yang terjadi sebelumnya. Retak ini terjadi apabila momen dan gaya geser yang terjadi relatif sama besar.

3. Retak geser badan (*web shear crack*)

Retak geser badan adalah retak miring yang terjadi pada bagian balok yang sebelumnya tidak mengalami lentur. Biasanya retak geser badan terjadi pada daerah garis netral penampang balok yang gaya gesernya lebih besar dibandingkan dengan momen, seperti di daerah tumpuan.



dengan : 1. Retak lentur

2. Retak geser lentur

3. Retak geser

Gambar 3.21 Jenis-jenis Retak Pada Balok

### 3.10 DAKTILITAS

Menurut Kwan, Ho et al (2002), dalam desain balok beton bertulang terutama yang terbuat dari beton normal mutu tinggi dan merupakan struktur tahan gempa, kekuatan lentur dan daktilitasnya perlu dipertimbangkan. Meskipun biasanya lebih banyak perhatian diberikan kepada kekuatan lentur dan hanya dilakukan pengecekan sederhana yang dilakukan untuk memastikan tingkat minimum daktilitas lentur yang disediakan oleh balok. Hal ini membuktikan bahwa daktilitas tidaklah penting. Dari sudut pandang keamanan struktural, daktilitas setidaknya sama pentingnya dengan kekuatan. Sebuah daktilitas yang baik akan memberikan balok yang baik untuk bertahan ketika mendapat kelebihan beban ataupun ketika terjadi guncangan yang kuat seperti gempa bumi.

Pada level pembebanan tertentu elemen struktur beton sudah mulai retak-retak akibat adanya regangan tulangan tarik yang cukup besar. Pada intensitas beban tertentu maka regangan tarik baja tulangan semakin besar, sehingga retak betonpun semakin besar. Agar elemen beton mampu menahan beban, maka beton tersebut harus mempunyai daktilitas yang baik.

Elemen struktur beton boleh relatif kecil dan berperilaku inelastik, tetapi beton tersebut harus daktil. Daktil itu sendiri adalah kemampuan dari suatu elemen beton untuk berdeformasi inelastik secara berkelanjutan akibat beban siklik tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti. Lawan dari daktil adalah getas, yang mana struktur yang getas kekuatannya turun secara tajam setelah mencapai kekuatan maksimum. Secara teoritik semakin tinggi tingkat daktilitasnya maka akan semakin baik dalam keberlanjutan menahan beban.

Pada dasarnya daktilitas dibagi atas beberapa jenis, hal ini terjadi karena adanya beberapa pengertian yang timbul. Pengertian daktilitas dapat ditinjau dari tiga jenis metode perhitungan. Daktilitas dapat ditinjau dari segi tegangan (*strain*), lengkungan (*curvature*), dan lendutan (*displacement*).

#### 1. Daktilitas Regangan (*Strain Ductility*)

Pengertian dasar dari daktilitas adalah kemampuan dari material/ struktur untuk menahan tegangan plastis tanpa penurunan yang drastis dari tegangan. Daktilitas tegangan dapat diberikan pada Persamaan 3.39 berikut ini.

$$\mu_{\epsilon} = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_y} \quad (3.39)$$

Dengan  $\epsilon_u$  adalah total regangan yang terjadi dan  $\epsilon_y$  adalah regangan pada saat leleh. Daktilitas yang sangat berpengaruh pada struktur dapat tercapai pada panjang tertentu pada salah satu bagian dari struktur tersebut. Jika tegangan inelastik dibatasi dengan panjang yang sangat pendek, maka akan terjadi penambahan yang besar pada daktilitas tegangan. Daktilitas tegangan merupakan daktilitas yang dimiliki oleh material yang digunakan.

## 2. Daktilitas Lengkungan (*Curvature Ductility*)

Pada umumnya sumber yang paling berpengaruh dari lendutan struktur inelastis adalah rotasi pada sambungan plastis yang paling potensial. Sehingga, ini sangat berguna untuk menghubungkan rotasi per unit panjang (*curvature*) dengan moment bending ujung. Daktilitas lengkungan maksimum dapat ditunjukkan pada Persamaan 3.40 berikut,

$$\mu_{\varphi} = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} \quad (3.40)$$

## 3. Daktilitas Simpangan (*Displacement Ductility*)

Daktilitas simpangan adalah rasio antara simpangan ultimit  $\Delta_u$ , dengan simpangan saat luluh pertama  $\Delta_y$ . Sehingga daktilitas simpangan dapat dirumuskan dengan persamaan berikut ini.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (3.41)$$

### 3.11 SAMBUNGAN LAS

Menyambung baja dengan cara dilas adalah menyambung dengan cara memanaskan baja hingga mencapai suhu lumer (meleleh), dengan ataupun tanpa bahan pengesi, yang kemudian setelah dingin akan menyatu dengan baik. Menurut SNI 2847-2012 suatu sambungan las penuh harus mengembangkan paling sedikit  $1,25 f_y$  batang tulangan, kecuali pada batang tulangan D16 dan yang lebih kecil. Untuk menyambung baja dalam konstruksi bangunan yang menggunakan baja dikenal 2 jenis las, yaitu :

### 1. Las Karbit (Las Otogen)

Las karbit yaitu pengelasan yang menggunakan bahan pembakar dari gas oksigen (zat asam) dan gas acetylene (gas karbit). Las karbit biasanya hanya digunakan untuk pekerjaan-pekerjaan ringan, seperti pagar besi, teralis, dan sebagainya.

### 2. Las Listrik (Las Lumer)

Las karbit yaitu pengelasan yang menggunakan energi listrik. Untuk pengelasannya diperlukan pesawat las yang dilengkapi dengan dua buah kabel, dengan cara satu kabel dihubungkan dengan penjepit benda kerja dan satu kabel yang lain dihubungkan dengan tang penjepit batang las atau elektroda las.

Jika elektroda las tersebut didekatkan pada benda kerja maka terjadi kontak yang menimbulkan panas yang dapat melelehkan baja, dan elektroda (batang las) tersebut juga ikut melebur ujungnya yang sekaligus menjadi pengisi pada celah sambungan las.

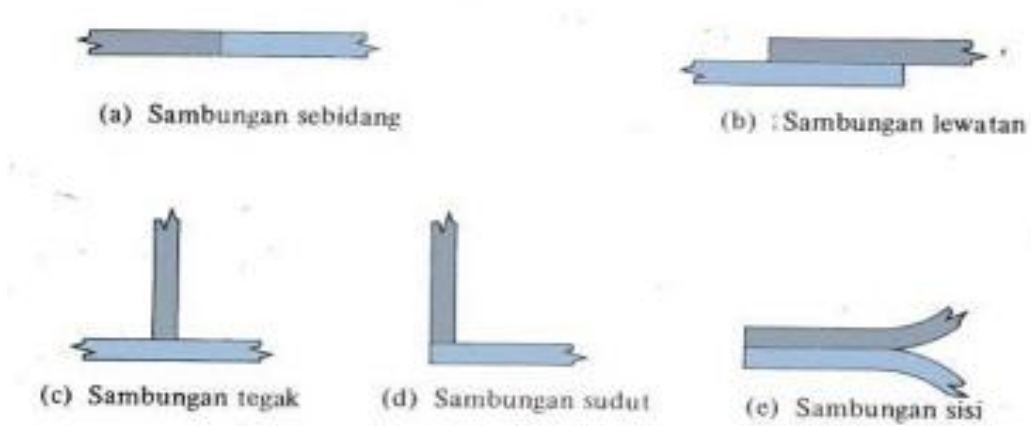
Untuk konstruksi baja yang bersifat struktural, maka sambungan las yang digunakan adalah sambungan las listrik dan harus dikerjakan oleh tenaga ahli yang sudah profesional.

Kerugian atau kelemahan sambungan las sebagai berikut ini:

1. Kekuatan sambungan las sangat dipengaruhi oleh kualitas pengelasan, jika pengelasannya baik maka kekuatan sambungan akan baik juga, akan tetapi jika pengelasannya jelek atau tidak baik maka kekuatan sambungannya akan tidak baik dan dapat membahayakan dan berakibat fatal.
2. Konstruksi sambungan las tidak dapat dibongkar pasang.

#### **3.12.1 Jenis-jenis Sambungan Las**

Jenis sambungan las tergantung pada ukuran dan profil yang bertemu di sambungan, jenis pembebanan, besarnya luas sambungan yang tersedia. Sambungan las terdiri dari lima jenis dasar dengan berbagai variasi dan kombinasi. Kelima jenis dasar ini adalah sambungan sebidang (*butt*), lewatan (*lap*), tegak (T), sudut, dan sisi, seperti yang terlihat pada Gambar 3.22



Gambar 3.22 5 Jenis Dasar Sambungan Las  
(Sumber : Salmon dkk, 1991)

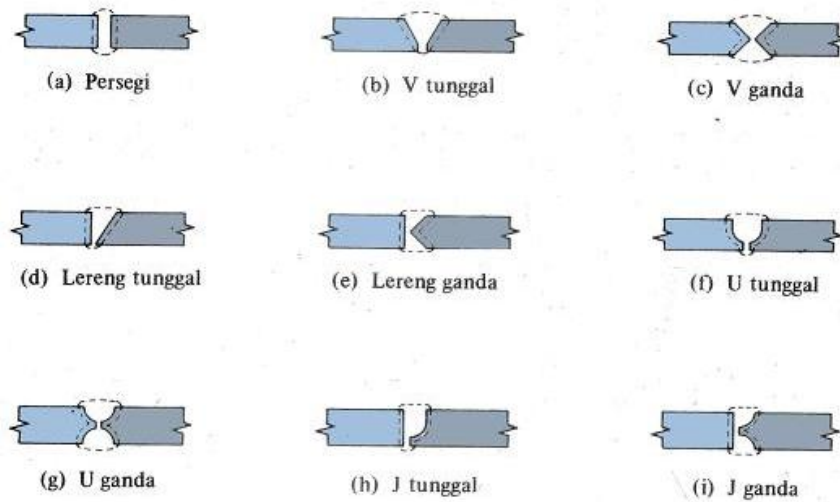
Jenis las yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah las tumpul dan las sudut.

### 1. Las Tumpul

Las tumpul dipakai terutama untuk menyambung batang struktural yang bertemu dalam satu bidang. Karena las tumpul biasanya ditujukan untuk menyalurkan semua beban batang yang disambungnya. Las ini harus memiliki kekuatan yang sama seperti potongan yang disambungnya. Las tumpul seperti ini disebut dengan las tumpul penetrasi sempurna.

Oleh PPBBI ditetapkan bahwa apabila pengelasan dilakukan oleh ahli dengan menggunakan elektroda las yang memenuhi syarat dan penampang las minimal las dibuat sama dengan penampang batang yang disambung, maka kekuatan dari las tumpul tidak perlu diperhitungkan lagi, karena kekuatan dari las tumpul tersebut minimal sama dengan kekuatan batang yang disambung.

Banyak variasi las tumpul dapat dibuat dan masing-masing dibedakan berdasarkan bentuknya, seperti yang terlihat pada Gambar 3.23 berikut ini.



Gambar 3.23 Jenis Las Tumpul  
(Sumber : Salmon dkk, 1991)

## 2 Las Sudut

Las sudut bersifat lebih ekonomis secara keseluruhan, mudah dibuat, dan mampu beradaptasi, serta merupakan jenis las yang paling banyak digunakan dibandingkan dengan jenis las dasar lainnya. Las sudut umumnya memerlukan sedikit presisi dalam pemasangannya karena potongannya saling bertumpu (*overlap*), sedangkan las tumpul memerlukan kesejajaran yang tepat dan alur tertentu antara potongan. Las sudut lebih menguntungkan terutama dalam penggunaannya di lapangan, dan untuk menyesuaikan kembali batang atau sambungan yang difabrikasi.

### 3.12.2 Cacat Pada Las

Teknik dan prosedur pengelasan yang tidak baik dapat menimbulkan cacat pada las yang menyebabkan diskontinuitas dalam las, cacat yang umumnya dijumpai disebabkan oleh berbagai faktor berikut ini :

#### 1. Peleburan Tidak Sempurna

Cacat dengan kondisi ini disebabkan logam dasar dan logam las yang berdekatan tidak melebur bersama secara menyeluruh. Ini dapat terjadi jika permukaan yang akan disambung tidak dibersihkan dengan baik dan dilapisi kotoran, terak, oksida, ataupun bahan lainnya. Penyebab lain dari cacat ini adalah pemakaian peralatan las yang arus listriknya tidak memadai, sehingga

logam dasar tidak mencapai titik lebur. Laju pengelasan yang terlalu cepat juga dapat menimbulkan pengeruh yang sama.

2. Penetrasi Kambuh yang Tidak Memadai

Penetrasi kambuh yang tidak memadai adalah keadaan dimana kedalaman las kurang dari tinggi alur yang ditetapkan. Cacat ini sering terjadi pada jenis las tumpul, yang disebabkan oleh perencanaan alur yang tidak sesuai dengan proses pengelasan yang dipilih, elektroda yang terlalu besar, arus listrik yang tidak memadai, atau laju pengelasan yang terlalu cepat.

3. Porositas

Porositas terjadi bila rongga-rongga gas yang kecil terperangkap selama proses pendinginan. Cacat ini ditimbulkan oleh arus listrik yang terlalu tinggi atau busur nyala yang terlalu panjang.

4. Peleburan Berlebihan

Peleburan berlebihan adalah terjadinya alur pada bahan dasar di dekat ujung kaki las yang tidak terisi oleh logam las. Arus listrik dan panjang busur nyala yang berlebihan dapat membakar atau menimbulkan alur pada logam dasar. Cacat ini mudah terlihat dan dapat diperbaiki dengan memberi las tambahan.

5. Kemasukan Terak

Terak terbentuk selama proses pengelasan akibat reaksi kimia lapisan elektroda yang mencair, terak biasanya berada pada permukaan dan dapat dihilangkan dengan mudah setelah dingin.

6. Retak

Retak adalah pecah-pecah yang terjadi pada las, baik searah ataupun transversal terhadap garis las. Retak kadang-kadang terbentuk ketika las mulai memadat dan umumnya diakibatkan oleh unsur-unsur yang getas (baik besi, ataupun elemen paduan).

## **BAB IV METODE PENELITIAN**

### **4.1 METODE PENELITIAN**

Metode penelitian adalah suatu rangkaian pelaksanaan penelitian dalam rangka mencari jawaban dari suatu permasalahan, dengan cara mengambil, menganalisa, dan mengidentifikasi variabel yang diteliti. Penelitian ini dapat berjalan dengan baik dan sistematis serta tercapai tujuan yang diinginkan tidak terlepas dari metode penelitian yang disesuaikan dengan prosedur, alat, bahan, dan jenis penelitian. Berikut ini akan diuraikan pelaksanaan metode penelitian yang meliputi :

1. bahan dan benda uji,
2. peralatan penelitian,
3. pelaksanaan penelitian,
4. hasil penelitian.

### **4.2 BAHAN DAN BENDA UJI**

#### **4.2.1 Bahan**

Bahan-bahan yang perlu dipersiapkan untuk pembuatan benda uji penelitian ini adalah sebagai berikut

1. Semen

Semen yang digunakan untuk pembuatan benda uji pada penelitian ini adalah semen *portland* tipe 1 dengan merk Tiga Roda, semen merk ini sudah umum digunakan dan tidak perlu adanya persyaratan khusus. Selain itu semen merk Tiga Roda ini dapat diperoleh dipasaran Daerah Istimewa Yogyakarta.

2. Agregat kasar

Agregat kasar yang digunakan dari penelitian ini merupakan batu pecah, dengan ukuran maksimum agregat kasar ini 20 mm yang berasal dari kali Progo. Agregat kasar yang digunakan tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1%.

3. Agregat halus

Agregat halus yang digunakan dalam penelitian ini adalah pasir yang lolos saringan 4.8 mm yang berasal dari Merapi. Selain itu pasir yang digunakan juga harus dilakukan tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 5%.

4. Baja tulangan

Baja tulangan yang digunakan untuk pembuatan benda uji pada penelitian ini adalah baja tulangan polos (BJTP). Diameter baja tulangan yang digunakan untuk pembuatan benda uji dalam penelitian ini adalah diameter 8 mm, dan 12 mm. Baja-baja tulangan tersebut dapat diperoleh dipasaran yang ada di Daerah Istimewa Yogyakarta.

5. Air

Air yang digunakan dalam pembuatan benda uji untuk penelitian ini harus memiliki kriteria secara visual tampak jernih, tidak berbau, dan tidak berwarna. Air yang digunakan pada pembuatan benda uji ini diambil dari instalasi air yang ada di Laboratorium Teknologi Bahan Kontruksi (BKT) Jurusan Teknik Sipil FTSP UII.

6. Kawat ikat

Kawat ikat ini digunakan untuk mengikat batang-batang baja tulangan agar posisi dari batang-batang baja tulangan setelah pengecoran tetap seperti sebelum pengecoran.

7. *Concrete Additive*

*Concrete additive* yang digunakan untuk penelitian kali ini adalah SikaCim, yang berfungsi sebagai campuran adukan beton untuk mempercepat pengerasan beton.

#### **4.2.2 Benda Uji**

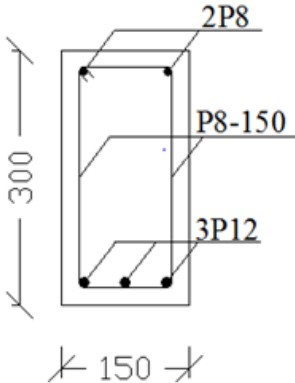
Benda uji dimodelkan sebagai balok yang ditumpu secara sederhana dengan tumpuan sendi dan rol seperti pada dengan dimensi 300 mm x 150 mm, dan bentang 2000 mm. Pembuatan beton pada penelitian ini digunakan metode SNI 03-2834-2000, dengan mutu beton rencana sebesar 25 MPa. Untuk baja yang digunakan direncanakan kuat tariknya sebesar 240 MPa. Benda uji balok tersebut memiliki 3 buah tulangan tarik dengan diameter 12 mm, dan 2 buah tulangan tekan dengan diameter 8 mm, serta tulangan sengkang dengan diameter 8 mm. Pada penelitian ini semua tulangan menggunakan tulangan polos.

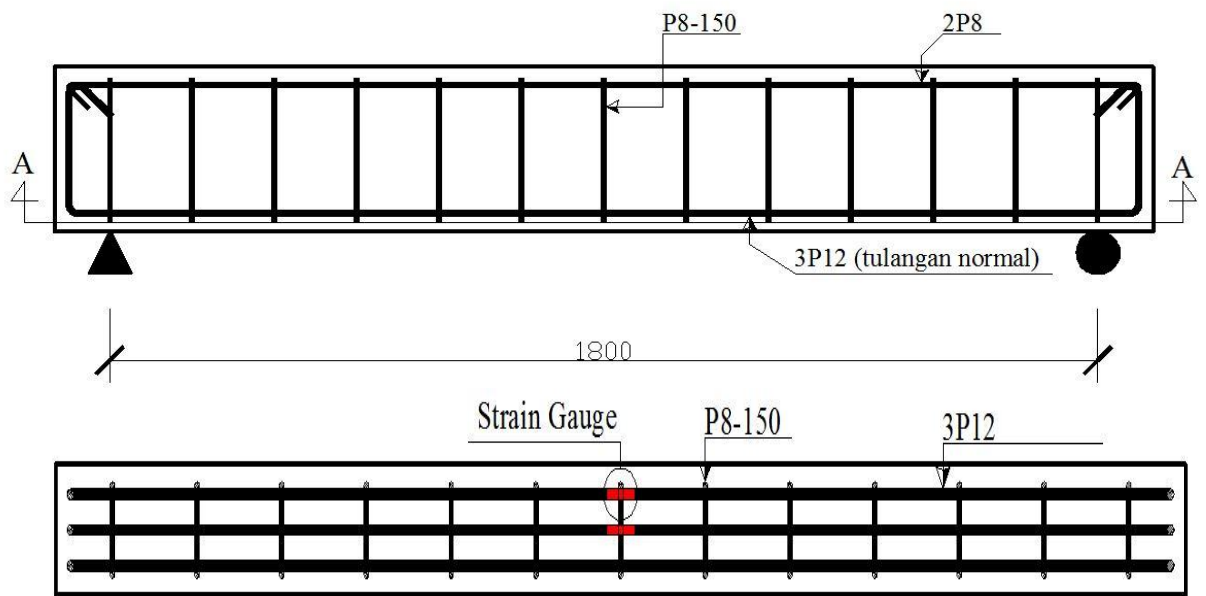
Benda uji pada penelitian ini dibuat dengan 5 variasi sambungan tulangan balok, yaitu :

1. 1 sampel balok tulangan normal sebagai kontrol.
2. 1 sampel balok dengan semua tulangan tarik *overlap* pada daerah tengah bentang.
3. 1 sampel balok dengan semua tulangan tarik dilas 5 cm pada daerah tengah bentang.
4. 1 sampel balok dengan 1 tulangan tarik *overlap* pada bagian tengah, dan 2 tulangan tarik bagian tepinya normal.
5. 1 sampel balok dengan 1 tulangan tarik bagian tengah menggunakan sambungan las, dan 2 tulangan tarik bagian tepinya normal.

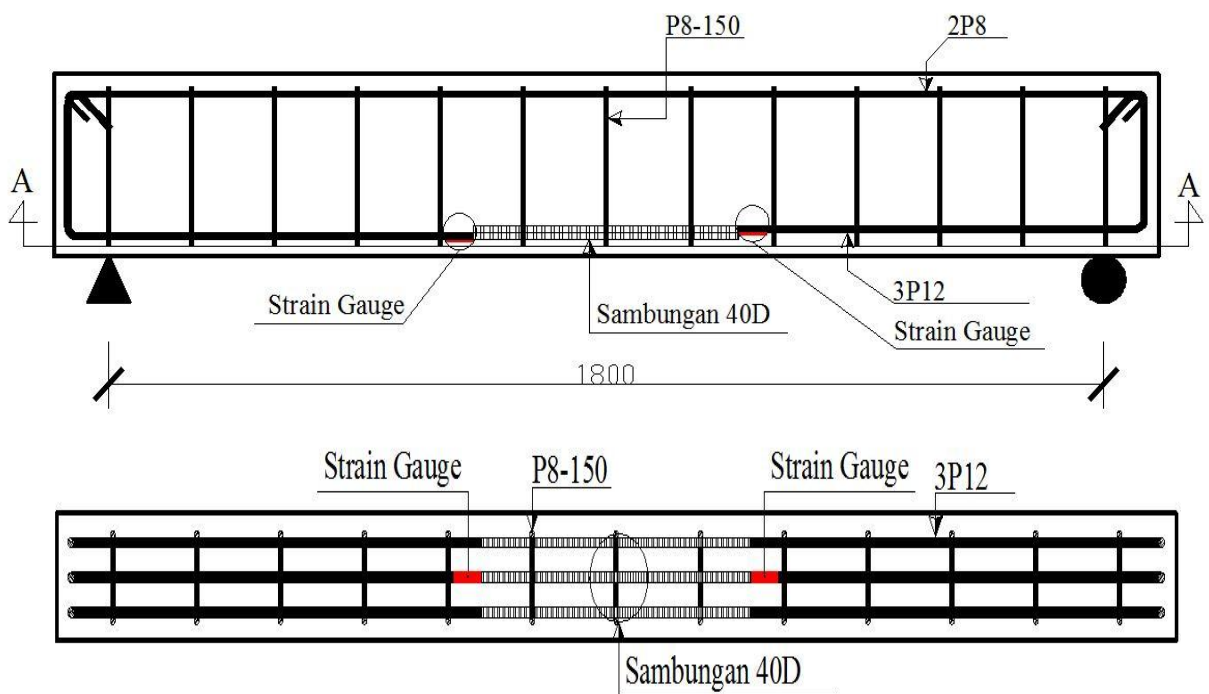
Perencanaan dimensi benda uji yang akan digunakan disesuaikan dengan kapasitas peralatan yang tersedia di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi Teknik Sipil FTSP UII. Adapun kelima benda uji tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini dan Gambar 4.1 sampai Gambar 4.5 berikut ini

Tabel 4.1 Tipikal Dimensi Balok

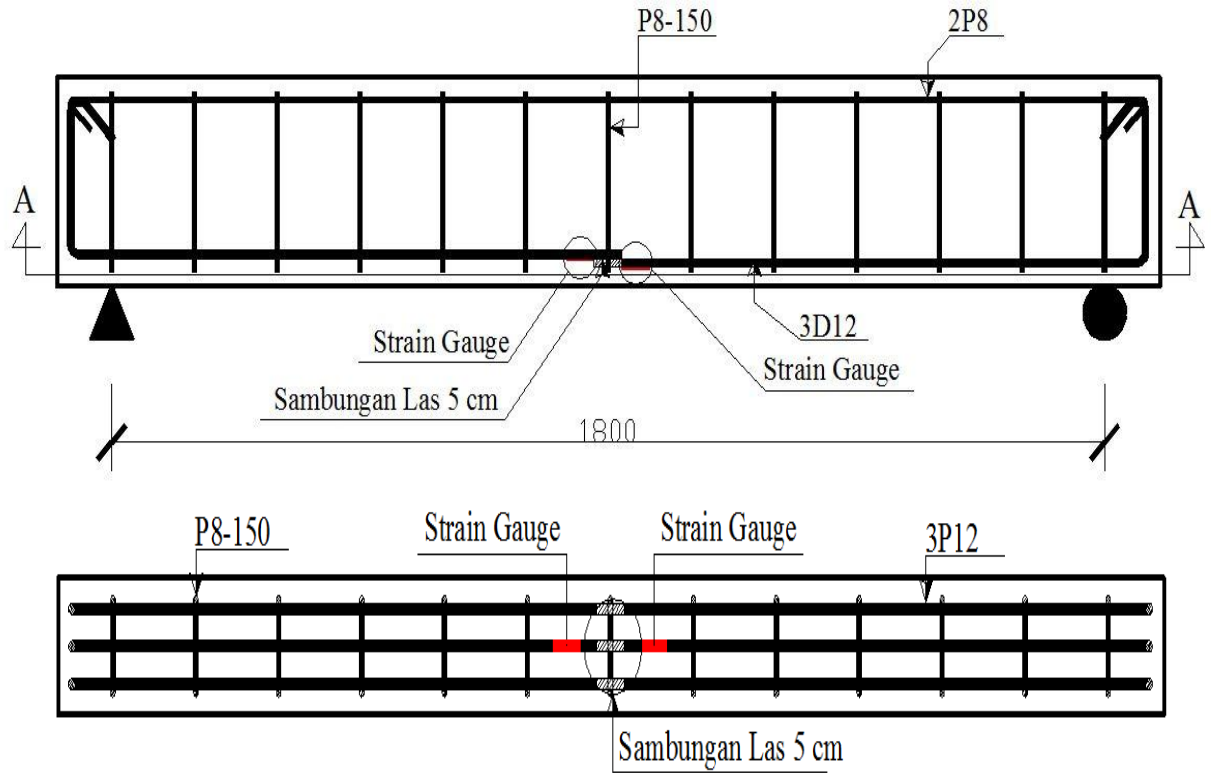
Benda Uji (BU)	Model Tulangan Tarik	Tampang Balok	Panjang ( mm )
BU-1	3 tulangan tarik normal		2000
BU-2	3 tulangan tarik <i>over lap</i> 40D		
BU-3	3 tulangan tarik di las 5 cm		
BU-4	1 tulangan tarik bagian tengah <i>overlap</i> 40D dan 2 tulangan tarik bagian tepi normal		
BU-5	1 tulangan tarik bagian tengah las tumpul dan 2 tulangan tarik bagian tepi normal		



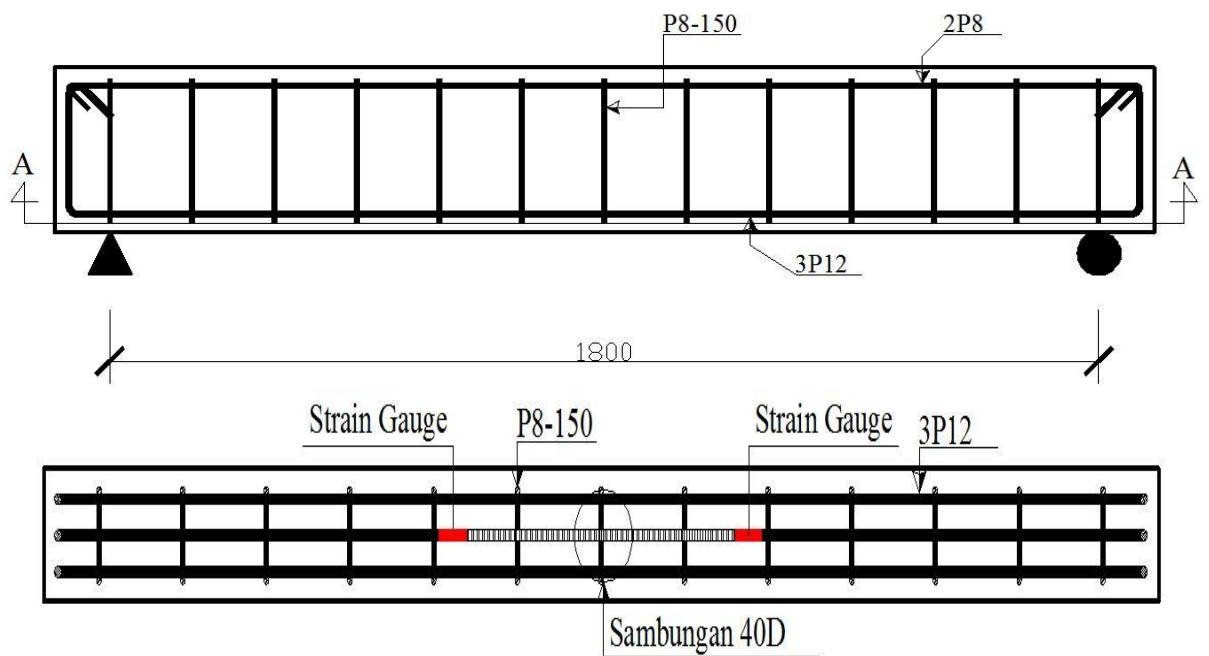
Gambar 4.1 Potongan BU-1



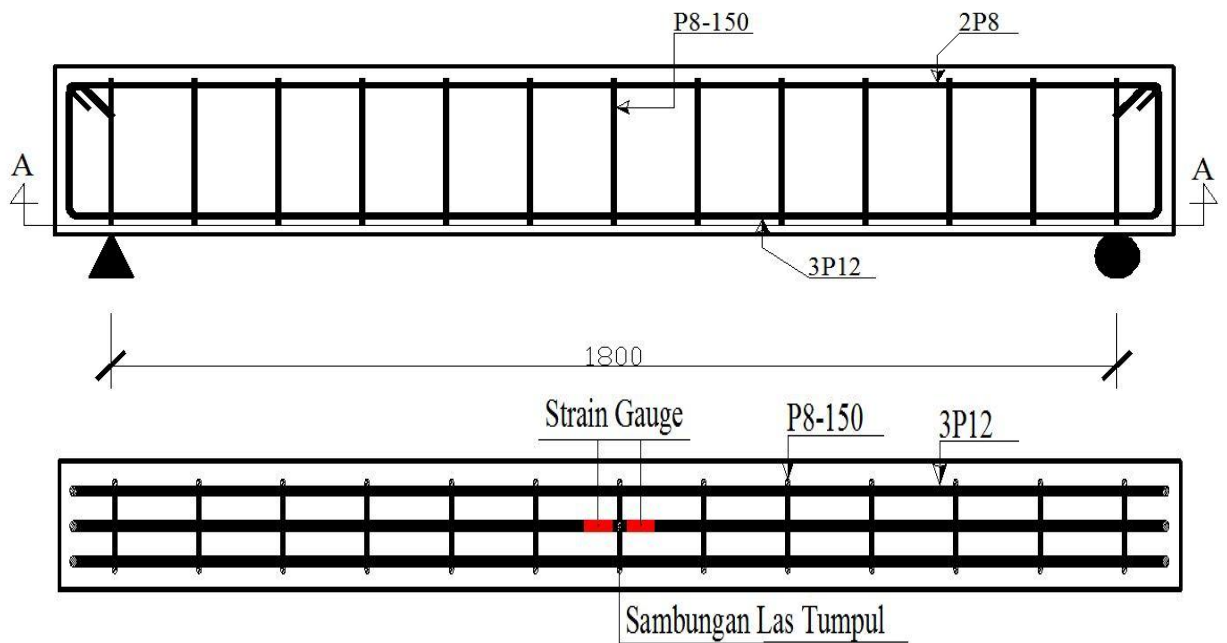
Gambar 4.2 Potongan BU-2



Gambar 4.3 Potongan BU-3



Gambar 4.4 Potongan BU-4



Gambar 4.5 Potongan BU-5

### 4.3 PERALATAN PENELITIAN

Pada penelitian ini digunakan beberapa peralatan sebagai sarana mencapai tujuan penelitian. Peralatan-peralatan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

#### 1. Mistar dan Kaliper

Mistar berfungsi untuk mengukur dimensi cetakan pada benda uji, dapat dilihat pada Gambar 4.6. Sedangkan kaliper berfungsi untuk pengukuran tulangan ataupun benda lainnya yang membutuhkan ketelitian lebih tinggi, dapat dilihat pada Gambar 4.7



Gambar 4.6 Mistar



Gambar 4.7 Kaliper

2. Mesin pengaduk campuran beton

Mesin pengadukan campuran beton atau *mixer* atau biasa juga disebut dengan molen berfungsi untuk mencampur material penyusun beton, dapat dilihat pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Mesin Pengaduk Campuran Beton

3. Cetakan silinder beton

Cetakan silinder beton berfungsi untuk mencetak benda uji silinder beton, dengan tinggi 300mm dan diameter 150 mm, dapat dilihat pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Cetakan Silinder Beton

4. Cetakan balok (acuan)

Cetakan balok (acuan) berfungsi untuk mencetak balok agar memiliki dimensi yang tepat dan sesuai dengan perencanaan dan mendapat permukaan yang rata. Cetakan balok (acuan) dapat dibuat dari kayu dan *multiplex* yang

dirangkai sedemikian rupa agar mampu menampung beton segar dan memiliki permukaan yang rata.

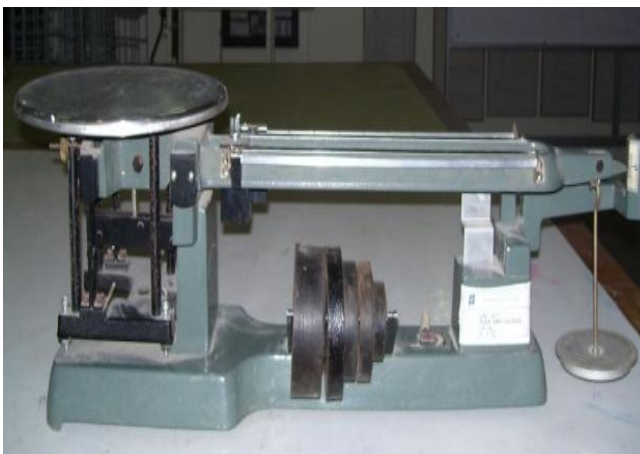
#### 5. Timbangan

Timbangan berfungsi untuk mengukur berat material bahan penyusun beton, dapat dilihat pada Gambar 4.10 dan 4.11. Dalam penelitian ini menggunakan dua jenis timbangan, yaitu :

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



Gambar 4.10 Timbangan Kapasitas 100 kg



Gambar 4.11 Timbangan Kapasitas 20 kg

6. Kerucut Abrams, tongkat baja, talam baja, dan cetok

Kerucut Abrams dengan diameter lubang atas 100 mm, diameter lubang bawah 200 mm, dan tingginya 300 mm. digunakan pada saat pengujian *slump*.

Tongkat baja digunakan untuk memadatkan campuran adukan beton, dengan ujungnya dibulatkan, diameter dari tongkat baja adalah 16 mm dan panjangnya 600 mm.

Talam baja adalah tempat adukan beton yang tidak menyerap air. Berfungsi sebagai tempat pengujian *slump* dan tempat untuk menampung adukan beton dari mesin adukan beton.

Cetok berfungsi untuk memasukkan benda uji kedalam kerucut Abrams dan cetakan benda uji. Semua alat-alat tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 *Slump Test Set*

7. Saringan

Saringan berfungsi untuk memisah material berdasarkan gradasinya. Saringan yang digunakan dalam penelitian ini adalah saringan no 200 untuk pasir dan saringan 20 mm untuk kerikil atau batu pecah.

8. *Vibrator*

*Vibrator* merupakan alat yang mengubah tenaga gerak motor menjadi tenaga getar. Oleh adanya penggetaran tersebut maka sarang kerikil dan rongga kosong yang menyebabkan keroposnya beton dapat dicegah. Dengan

demikian dapat dihasilkan beton yang mampat/padat, tidak berongga dan tidak keropos.



Gambar 4.13 *Vibrator*

9. Mesin uji desak beton

Mesin uji desak yang digunakan dalam penelitian ini bertipe ADR 3000 dengan kapasitas 3000 kN, seperti yang terlihat pada Gambar 4.14. Mesin uji desak beton ini berfungsi untuk mengetahui kuat desak silinder beton yang telah dibuat.



Gambar 4.14 Mesin uji desak tipe ADR 3000

#### 10. Mesin uji tarik baja tulangan

Mesin uji tarik baja tulangan yang digunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan merk Shimasu tipe UMH dengan kapasitas 30 ton, seperti yang terlihat pada Gambar 4.15. Mesin uji tarik baja tulangan ini berfungsi untuk menguji kekuatan leleh baja tulangan dan kuat tarik maksimum dari baja tulangan yang akan digunakan.



Gambar 4.15 Mesin Uji Tarik Shimasu tipe UMH 30

#### 11. *Loading frame*

*Loading frame* berfungsi untuk menempatkan benda uji balok pada saat akan diuji, seperti yang terlihat pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 *Loading Frame*

12. Dukungan sendi dan rol

Dukungan sendi rol merupakan perletakan benda uji selama pengujian berlangsung.

13. *Hydraulic pump*

*Hydraulic pump* merupakan pompa hidrolik yang berfungsi untuk memberikan beban pada pengujian benda uji balok. *Hydraulic pump* memiliki kapasitas maksimum sebesar 100 ton. *Hydraulic pump* dapat dilihat pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 *Hydroulik Pump*

14. *Data logger*

*Data logger* adalah mesin pembaca yang sekaligus menampilkan data dari pengujian yang berlangsung, dapat dilihat pada Gambar 4.18.



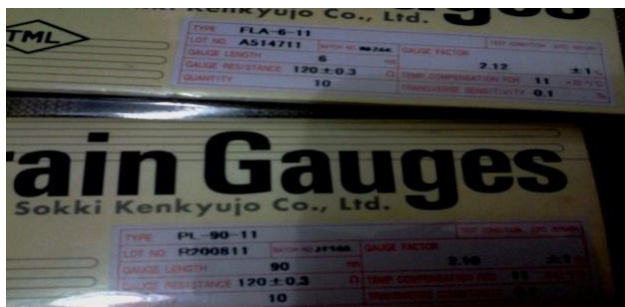
Gambar 4.18 *Data Logger*

### 15. *Strain gauge*

*Strain Gauge* merupakan alat yang digunakan untuk mendeteksi regangan yang terjadi pada benda uji. Pada penelitian kali ini *strain gauge* dipasang pada daerah desak beton dan pada daerah tarik pada baja tulangan. Prinsip kerja dari *strain gauge* ini adalah dengan memanfaatkan regangan yang terjadi pada kawat *strain gauge*.

Menurut Suhendro (2010) perubahan panjang sejenis kawat menyebabkan adanya perubahan tahanan (*resistance*) dari kawat tersebut. Ada hubungan antara regangan dengan perubahan panjang. Bila sejenis kawat tersebut dilekatkan dengan sempurna pada suatu permukaan benda maka regangan yang terjadi pada kawat tersebut sama dengan regangan yang terjadi pada permukaan benda yang ditempelnya.

Pada pengujian ini digunakan dua *type strain gauge* yaitu FLA-6-11 yang ditempelkan pada baja dan PL-90-11 yang digunakan untuk beton. *Strain gauge* yang digunakan tersebut dikeluarkan oleh perusahaan Tokyo Sokki Kenkyujo. *Strain gauge* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 4.19 dibawah ini.



Gambar 4.19 *Strain gauge*

### 16. *Linier Variabel Differential Transformer (LVDT)*

LVDT dapat dilihat pada Gambar 4.20, LVDT adalah sensor yang daya kerjanya mirip dengan *dial gauge*, namun sudah beroperasi lebih modern. Data yang dihasilkan langsung terbaca pada *data logger*.



Gambar 4.20 LVDT

17. *Load cell*

*Load cell* dapat membaca beban yang diberikan pada benda uji yang besarnya langsung terbaca pada *data logger*, seperti yang terlihat pada Gambar 4.21.



Gambar 4.21 *Load Cell*

18. Komputer

Komputer berfungsi untuk mengolah data dan menyimpan data yang terbaca oleh *data logger*. Komputer yang digunakan harus memiliki spesifikasi yang baik demi kelancaran penelitian. Komputer yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 4.22.



Gambar 4.22 Komputer

## 4.4 PELAKSANAAN PENELITIAN

### 4.4.1 Persipan Bahan

Pada persiapan bahan ini meliputi, pengujian sifat-sifat bahan penyusun beton, perencanaan adukan beton, uji kuat desak silinder beton, uji kuat tarik baja. Untuk pengujian sifat-sifat bahan penyusun beton antara lain :

1. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus  
Maksud dari pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat halus ini adalah untuk menentukan berat jenis kering permukaan jenuh (SSD) dan angka penyerapan air dalam agregat halus (pasir).
2. Pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar  
Maksud dari pengujian berat jenis dan penyerapan air agregat kasar ini adalah untuk menentukan berat jenis kering permukaan jenuh (SSD) dan angka penyerapan air dalam agregat kasar (kerikil).
3. Pengujian lolos saringan No 200
4. Pengujian analisa saringan agregat halus  
Maksud dari pengujian ini adalah untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan saringan.
5. Pengujian analisa saringan agregat kasar  
Maksud dari pengujian ini adalah untuk menentukan pembagian butir (gradasi) agregat halus dengan saringan.

Setelah data-data dari hasil pengejian bahan-bahan penyusun beton tersebut didapat, maka dapa dilakukan perncanaan campuran beton. Perencanaan campuran beton pada penelitian ini digunakan metode SNI 03-2834-2000, dengan

mutu beton rencana sebesar 25 Mpa. Dan nilai *slump* yang ditetapkan sebesar  $10 \pm 2$ .

#### 4.4.2 Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian kuat tarik baja tulangan dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta. Data yang digunakan adalah beban maksimum, beban patah dan beban luluh awal. Tegangan tarik baja tulangan dapat diketahui dengan cara :

$$f_u = \frac{P_{maks}}{A_o} \quad (4.1)$$

$$f_y = \frac{P_y}{A_o} \quad (4.2)$$

dengan :

$P$  : beban

$A_o$  : luasan penampang awal benda uji (sebelum diuji)

$f_u$  : tegangan tarik maksimum

$f_y$  : tegangan leleh

#### 4.4.3 Penulangan Benda Uji

Pada penelitian ini dilakukan penulangan pada benda uji berupa balok dengan penggunaan standar perencanaan tulangan sebelah, akan tetapi pada bagian tekan balok akan ditambah 2 buah tulangan sehingga menjadi tulangan rangkap. Pada daerah tarik dipasang 3 buah tulangan dengan diameter 12 mm. Pada daerah tekan digunakan tulangan dengan diameter 8 mm, dengan jumlah 2 buah. Untuk sengkang digunakan baja tulangan dengan diameter 8 mm dan jarak antar sengkang adalah 150 mm.

#### 4.4.4 Pengujian Kuat Tekan Silinder Beton

Pengujian kuat tekan silinder beton dilakukan di Laboratorium Teknologi Bahan Konstruksi, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, dengan umur silinder beton 14 hari. Kuat tekan beton dapat diketahui dengan cara berikut ini.

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (4.3)$$

dengan :

- $f'_c$  : kuat tekan beton  
 $P$  : beban maksimum  
 $A$  : luas penampang benda uji

#### 4.4.5 Pemasangan *Strain Gauge* Pada Benda Uji

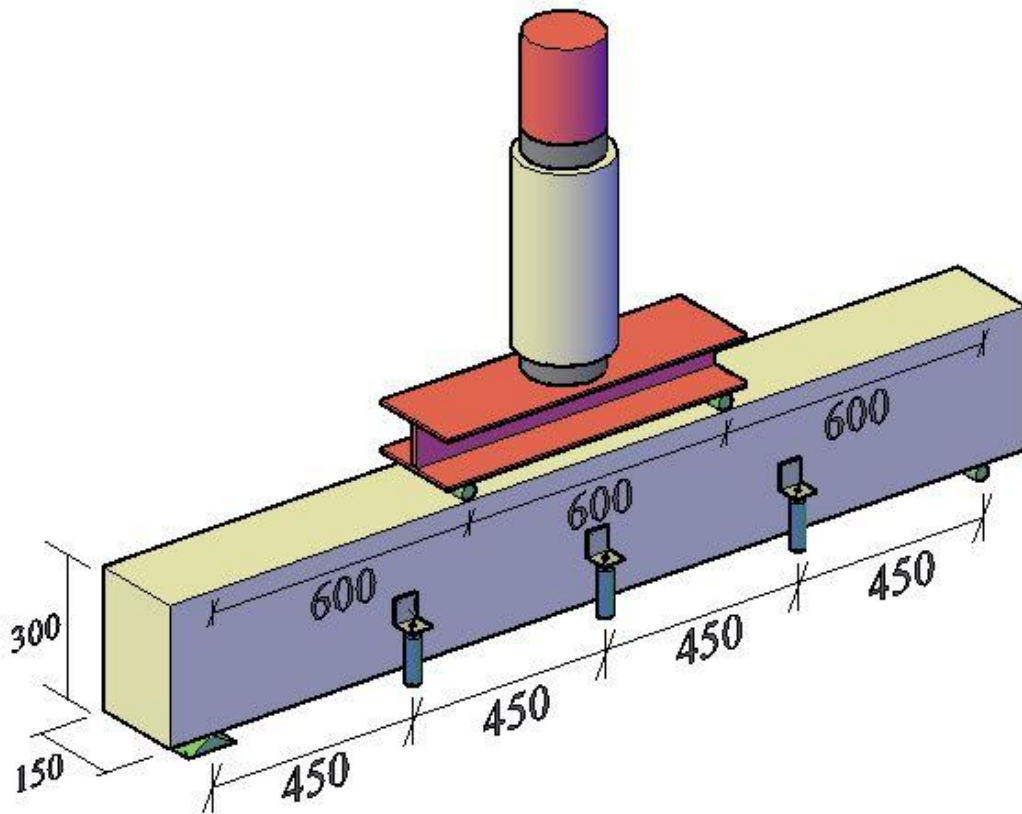
Pemasangan *strain gauge* pada benda uji balok dipasang pada beton daerah desak dan baja daerah tarik. Untuk baja daerah tarik dipasang pada tulangan tarik yang tengah pada sisi kanan dan kiri sambungan, sedangkan untuk balok lentur yang normal dipasang pada tulangan tarik bagian tengah dan tepi. Untuk pemasangan *strain gauge* pada beton dipasang pada bagian teka beton di daerah tengah bentang. Syarat pemasangan *strain gauge* adalah dipasang pada permukaan yang halus dan rata agar mendapatkan hasil yang akurat. Berikut ini adalah urutan pemasangan *strain gauge*.

- a. Meratakan permukaan benda uji
- b. Membersihkan permukaan benda uji yang telah diamplas
- c. Menyiapkan *strain gauge*
- d. Pemasangan *strain gauge* pada benda uji.

#### 4.4.6 Persiapan Benda Uji

Dalam mempersiapkan peralatan ada beberapa hal yang perlu diperhatikan antara lain diuraikan berikut ini.

1. Perletakan benda uji yang sesuai dengan rencana dapat dilihat pada Gambar 4.23.



Gambar 4.23 Detail Penempatan LVDT dan Beban

2. Posisi benda uji adalah sejajar sama tinggi dan dipastikan kedudukannya horizontal dengan *waterpass*.
3. Ketelitian jarak harus diperhatikan.
4. Pemasangan sensor LVDT dan *dial gauge* pada jarak yang sesuai dengan rencana penelitian.
5. Instalasi dan kalibrasi sensor-sensor yang digunakan pada mesin pembaca *data logger*.
6. Letakan balok penerus beban tepat pada posisinya.
7. Letakan *load cell* dan *hydraulic pump* pada posisinya.

#### 4.4.7 Persiapan Program MG Assistant

Persiapan pengujian didampingi oleh tenaga ahli laboratorium dan pembimbing penelitian dengan sebelumnya menyelesaikan tahap akhir persiapan pengujian. Berikut ini adalah tahapan akhir persiapan pengujian.

1. Menjalankan program “MGC assistant” dengan bantuan PC, program berjalan di *operating system windows* .
2. Konektifitas *data logger* dengan program dijalankan dengan meng-aktifkan *USB ports* yang ada pada *data logger* dikoneksikan dengan *USB ports* yang ada dalam PC .
3. Mulai menjalankan program “MGC assistant”, secara otomatis program akan mendeteksi keberadaan sensor yang aktif pada *data logger*.
4. Instalasi dan kalibrasi sensor dalam program MGC asisstant lebih mudah karena mengadopsi sistem dari *data logger* yang sudah dilaksanakan sebelum koneksi dilakukan.
5. Kalibrasi dapat dilakukan dalam program MGC assistant dengan merubah besaran dalam kolom *calibration sheet*.
6. Mengatur banyaknya data output yang akan dibaca.
7. Mengatur interfal pembacaan, misal 1/100 detik .
8. Setelah kalibrasi selesai, meng-aktifkan tombol play.

#### **4.4.8 Pelaksanaan Pengujian**

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

1. *Hydraulic pump* mulai dipompakan bersamaan dengan menjalankan program MGC assistant.
2. Benda uji diberi pembebanan sampai mengalami keruntuhan (*failure condition*), kemudian pembebanan dihentikan dan direkam melalui program MGC assistant.
3. Selama berlangsungnya pengujian, dilakukan pembacaan pengamatan serta penggambaran pola retak yang terjadi secara manual.

#### **4.5 DATA PENGUJIAN**

Data yang diperoleh berupa hasil rekaman dari program MGC assistant berupa file dengan format DAT yang dapat dibaca menggunakan MS Excel. Data ini diperoleh dari sensor pada alat *data logger*, data pada file tersebut berupa nilai dari hasil perubahan yang terjadi pada benda uji akibat pembebanan yang

diberikan. Data yang diperoleh dari hasil penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.2 berikut ini.

Tabel 4.2 Data Pengujian Balok Beton Bertulang

No	Sensor	Data	Satuan
MGC assistant			
1	<i>Time</i>	Waktu	Detik
2	<i>Load cell</i>	Beban	KN
3	LVDT	Lendutan	Mm
4	<i>Strain gauge</i>	Regangan	$\mu\text{m/m}$
Manual			
6	Visual	pola dan panjang retak	kN, mm

#### 4.6 PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

Data yang diperoleh dari hasil pengujian balok beton bertulang dapat diolah menggunakan MS Excel. Data diolah dan dianalisis untuk mendapatkan hasil akhir dari penelitian. Pengolahan data ini diuraikan sebagai berikut.

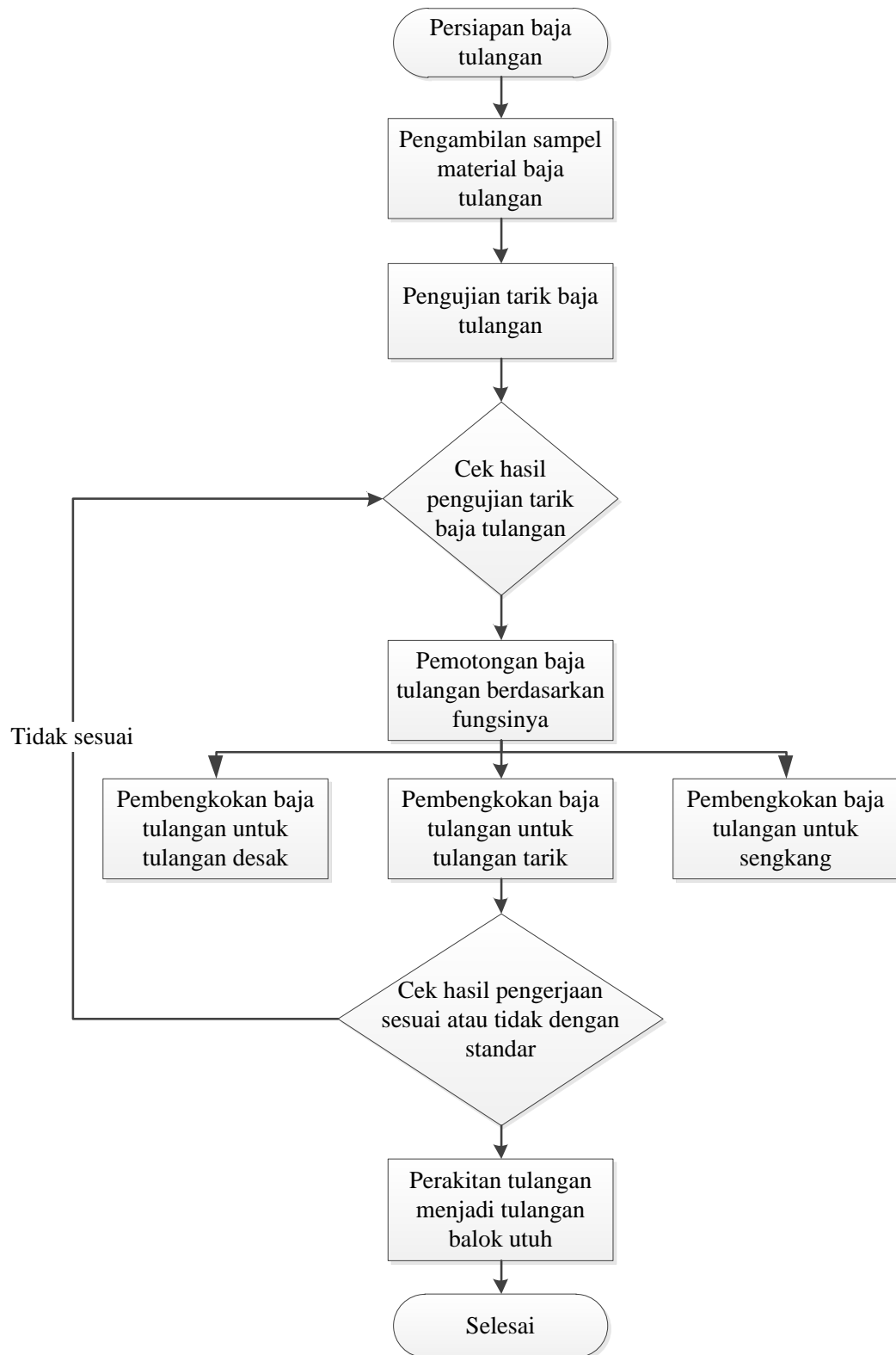
1. Hubungan beban dan lendutan
2. Hubungan tegangan regangan beton
3. Hubungan tegangan regangan baja tulangan
4. Pola keretakan balok beton

Dari hasil pengolahan ini dapat dilakukan analisis pengujian, Pembahasan dan menarik kesimpulan.

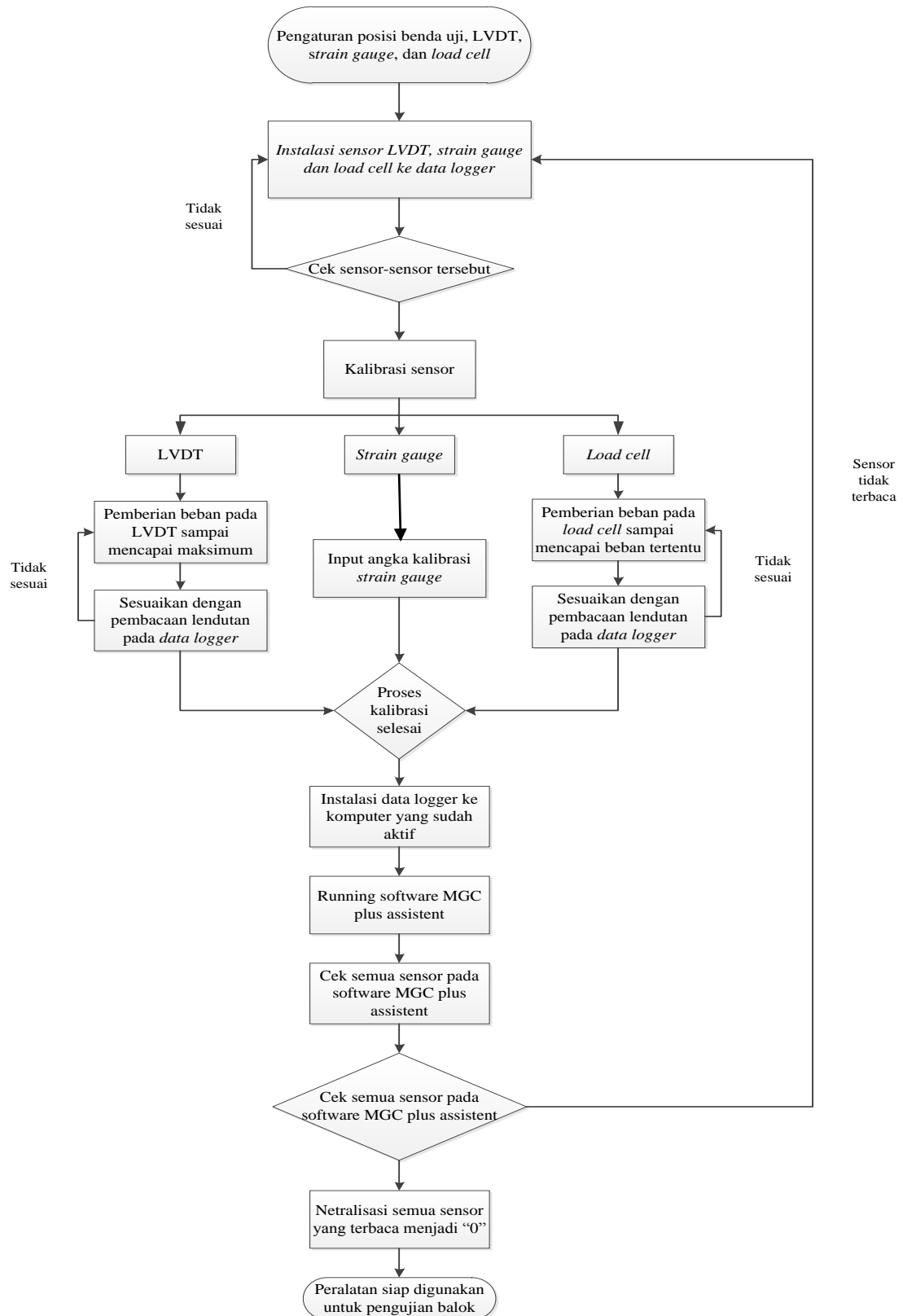
## 4.7 BAGAN ALIR PENGUJIAN



Gambar 4.24 *Flowchart* Persiapan Pengujian Beton

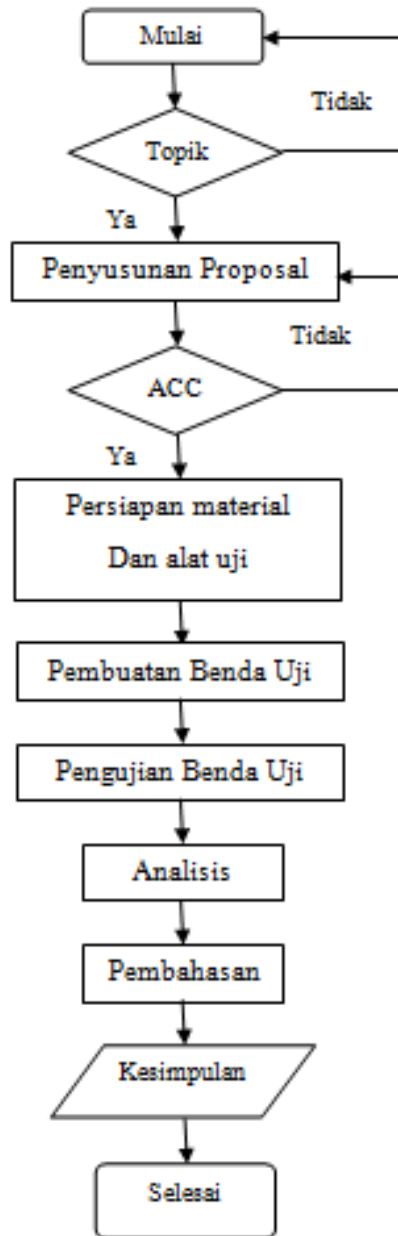


Gambar 4.25 *Flowchart* Persiapan Pengujian Baja Tulangan



Gambar 4.26 Flowchart Persiapan Peralatan Benda Uji

#### 4.8 BAGAN ALIR Pengerjaan TUGAS AKHIR



Gambar 4.27 *Flowchart* Bagan Alir Pengerjaan Tugas Akhir

## **BAB V**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

#### **5.1 UMUM**

Pada bab ini, ditampilkan hasil-hasil dari pengujian yang telah dilakukan. Hasil pengujian yang telah dianalisis akan ditampilkan dalam bentuk tabel maupun grafik yang memberikan kemudahan dalam mencapai tujuan dari penelitian ini. Hasil penelitian ini dimulai dari menampilkan hasil dari pengujian karakteristik material beton bertulang hingga hasil pengujian kinerja struktural balok lentur dengan variasi sambungan tulangan tarik.

Pada bab ini juga akan dijelaskan mengenai prosedur analisis pengujian 5 buah sampel balok beton bertulang dengan pembebanan terdistribusi menjadi 2 titik pembebanan dan tiap-tiap benda uji dibebani dengan beban maksimum yang berbeda-beda berdasarkan kapasitas pembebanan masing-masing. Data yang dibutuhkan dalam menganalisis antara lain sebagai berikut ini :

1. Data kuat tekan beton riil (kuat tekan yang didapat dari hasil pengujian silinder, bukan kuat tekan rencana).
2. Data kuat tarik baja tulangan riil.
3. Data lendutan yang terjadi pada balok saat dibebani.
4. Data beban dan regangan hasil dari *strain gauge*.
5. Gambar pola retak yang terjadi pada balok.

Diharapkan dengan adanya data di atas maka diperoleh berbagai grafik kinerja balok lentur yang diinginkan.

#### **5.2 KUAT TEKAN BETON**

Tujuan umum dilakukannya pengujian kuat tekan beton ini adalah untuk mendapatkan kuat tekan beton ( $f'_c$ ). Pada penelitian ini digunakan  $f'_c$  rencana sebesar 25 MPa, uji kuat tekan silinder beton ini dilakukan dengan menguji 15 buah silinder beton dengan masing-masing balok diwakili oleh 3 silinder beton. Umur beton yang digunakan pada penelitian ini adalah 14 hari, karena untuk mengejar waktu penyelesaian tugas akhir ini sehingga umur beton yang digunakan adalah 14 hari. Untuk memenuhi kebutuhan waktu pengujian, maka pada beton

ditambahkan za aditif SikaCim agar kualitas benda uji akan mendapatkan kuat tekan yang diinginkan.

Dari hasil pengujian 15 silinder beton ini didapatkan hasil kuat tekan silinder beton yang ditampilkan pada Tabel 5.1 berikut ini.

Tabel 5.1 Hasil Uji Kuat Tekan Silinder Beton Umur 14 Hari

Benda Uji (BU)	No Silinder	Kuat Tekan (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata (MPa)	Kuat Tekan Rata-rata Total (MPa)
BU-1	1	37.03	41.28	38.89
	2	44.51		
	3	42.29		
BU-2	1	38.40	41.04	
	2	41.04		
	3	43.69		
BU-3	1	27.86	34.79	
	2	38.50		
	3	38.00		
BU-4	1	36.32	38.89	
	2	43.61		
	3	36.75		
BU-5	1	38.80	38.46	
	2	38.45		
	3	38.13		

Dari hasil pengujian kuat tekan silinder beton didapatkan hasil kuat tekan rata-rata silinder beton yang melebihi kuat tekan rencana sebesar 25 MPa. Dari hasil pengujian didapatkan kuat tekan rata-rata silinder beton sebesar 38,89 MPa. Pada pengujian ini silinder beton mengalami peningkatan kekuatan sebesar 35,72% dari kuat tekan rencana. Hal ini dapat terjadi dikarenakan beberapa hal, antara lain :

1. kualitas dari bahan material yang digunakan,
2. proses pemadatan beton saat dicetak,
3. proses perawatan beton yang sudah dicetak,
4. penambahan SikaCim *concrete additive*.

Kualitas dari material yang digunakan berpengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan pada pengujian ini. Permukaan krikil yang tajam dan bukan krikil yang licin yang digunakan dalam pengujian ini, sehingga krikil dapat saling mengunci. Selain itu, kerikil yang digunakan untuk campuran beton ini sebelum digunakan

dicuci terlebih dan dikeringkan sampai permukaannya kering dalam kondisi jenuh kering muka, sehingga bersih dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu mutu beton.

Pada pengujian yang dilakukan ini, pemadatan beton menggunakan alat pengetar *vibrator*, sehingga pemadatan beton lebih baik dibandingkan dengan pemadatan yang dilakukan secara manual dengan cara ditumbuk. Proses pemadatan yang baik akan membuat rongga-rongga udara yang ada di dalam beton keluar dan akan membuat beton padat tanpa rongga udara di dalamnya karena bagian yang terisi udara tadi digantikan oleh air dan semen sehingga beton relatif lebih padat dan mutu betonnya lebih baik dibandingkan dengan beton berongga.

Untuk perawatan silinder beton pada pengujian ini dilakukan dengan cara merendam beton ke dalam air. Perawatan pada beton dilakukan agar suhu pada saat beton mengalami hidrasi menjadi stabil, sehingga tidak terjadi keretakan-keretakan yang disebabkan perubahan suhu secara tiba-tiba. Untuk benda uji balok perawatan dilakukan dengan cara menyirami balok dan menyelimuti balok dengan karung goni basah sebanyak 2 kali sehari.


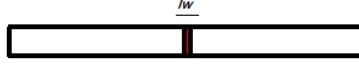
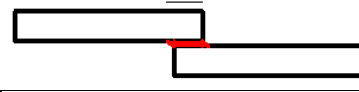
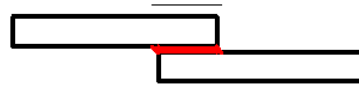
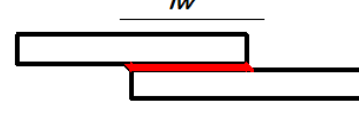
Hal yang berpengaruh lainnya dalam peningkatan kuat tekan silinder beton pada pengujian ini adalah penambahan SikaCim *concrete additive*. Tujuan dari penambahan SikaCim pada pengujian ini adalah untuk mempercepat umur beton. Di dalam SikaCim *concrete additive* terdapat zat kimia yang dapat mengurangi penggunaan air dalam beton, penggunaan air akan berkurang sebanyak 15% dan penggunaan SikaCim ini dihitung berdasarkan jumlah semen yang digunakan dalam pengcoran dengan ketentuan 300 ml per 40 kg semen, dengan dikurangnya air maka nilai *fas* akan menurun. Menurut Dianawanti (2013), nilai *fas* yang menurun akan mempengaruhi kepadatan beton tetapi workabilitas tetap terjaga. Semakin padat beton maka semakin besar nilai kuat tekannya, oleh karena itu terjadi peningkatan kuat tekan silinder beton, sehingga hasil pengujian kuat tekan meningkat secara signifikan.

### **5.3 KUAT TARIK BAJA TULANGAN**

Pengujian kuat tarik baja dilakukan dengan maksud untuk mengetahui kualitas dari baja tulangan yang akan digunakan untuk balok. Kualitas dari baja

tulangan mempengaruhi hasil perhitungan setiap pembebanan benda uji balok. Hasil dari pengujian kuat tarik baja tulangan dapat dilihat pada Tabel 5.2. Pada pengujian baja tulangan ini diuji baja untuk tulangan tarik dengan diameter 12 mm. Pengujian tarik baj tulangan dilakukan untuk kelima tipe sambungan yang ada pada Tabel 5.2 dengan tujuan dapat mengetahui tegangan masing-masing tipe sambungan dan selanjutnya tipe sambungan tersebut dipilih sebagai variasi sambungan tulangan tarik.

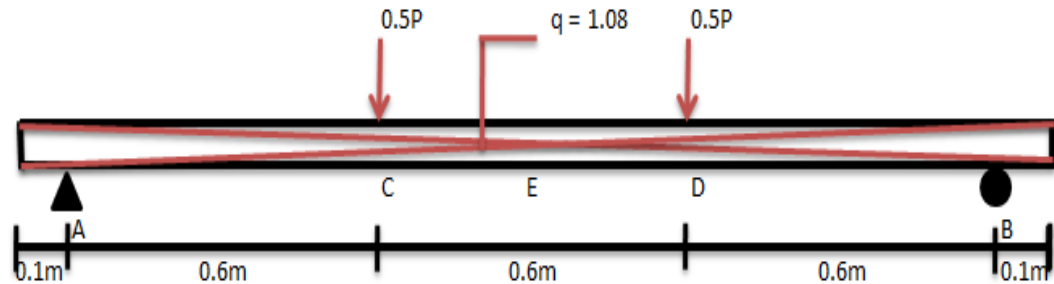
Tabel 5.2 Hasil Uji Kuat Tarik Baja Tulangan

No	Tipe Sambungan	Panjang Las ( $l_w$ ) (mm)	Tegangan (MPa)		Penggunaan Dalam Penelitian
			Leleh Awal	Tegangan Maksimal	
1		-	247.207	377.316	Tulangan normal tanpa sambungan dan tulangan yang <i>overlap</i> 40D, BU-1, BU-2, BU-4
2		0	255.0139	328.742	Las tumpul, BU-4
3		50	252.412	386.857	<i>Overlap</i> las 5 cm, BU-3
4		100	252.412	383.388	-
5		150	261.085	383.388	-

Dari hasil pengujian tarik baja tulangan didapatkan hasil kuat tarik baja ( $f_y$ ) setiap tipe sambungan tidak jauh berbeda. Untuk penelitian kali ini digunakan sambungan baja no 2 dan no 3 selain itu juga digunakan baja tulangan no 1 sebagai kontrol. Dari hasil pengujian tarik baja tulangan pada tipe sambungan no 4 dan 5 mengalami kerusakan pada daerah tepi sambungan yang dilas, selain itu dikhawatirkan kekuatan dari sambungan yang dilas dengan panjang 10 cm - 15 cm yang ada pada no 4 dan no 5 pada Tabel 5.2 terlalu kuat sehingga dikhawatirkan beton akan runtuh terlebih dahulu sebelum baja tulangan leleh, sehingga untuk penulangan pada balok dipilih sambungan baja tulangan no 2 dan no 3.

## 5.4 PEMBEBANAN

Pada penelitian ini digunakan beton bertulang dengan dimensi seperti pada Gambar 5.1. Berikut ini adalah contoh perhitungan pembebanan BU-1.



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

$$\Sigma M_B = 0$$

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

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

$$R_A = R_B$$

Momen :

$$M_C = M_D$$

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

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

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

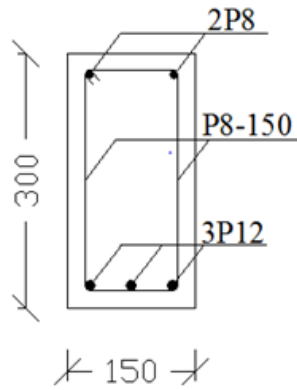
$$= 0,3 P + 0,3834$$

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

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

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

$$M_E = 0,3 P + 0,432$$



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

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

$$f_y = 247,207 \text{ MPa}$$

$$f_u = 377,316 \text{ MPa}$$

$$f_u = 350,611 \text{ MPa}$$

$$f'_c = 41,28 \text{ MPa}$$

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$$

$$= 30197,2714$$

$$\epsilon_c' = \frac{f'_c}{E_c} = 0,001367$$

$$\epsilon_y = \frac{f_u}{E_s} = 0,001887$$

$$\epsilon_y' = \frac{f_u'}{E_s} = 0,001753$$

$$A_s = 339,292 \text{ mm}^2$$

$$A_s' = 100,531 \text{ mm}^2$$

$$s_b = 20 \text{ mm}$$

$$d_s = s_b + \emptyset_{\text{sengkang}} + \emptyset_{\text{tul pokok}}/2$$

$$= 34 \text{ mm}$$

$$d_s' = s_b + \emptyset_{\text{sengkang}} + \emptyset_{\text{tul pokok}}/2$$

$$= 32 \text{ mm}$$

$$d = h - d_s$$

$$= 266 \text{ mm}$$

### 1. Perhitungan Tulangan Sebelah

Gaya-gaya dalam  $C = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a$  dan  $T = A_s \cdot f_u$

$$C = T$$

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

$$a = \frac{A_s \cdot f_u}{0,85 f'_c \cdot b} = \frac{339,292 \cdot 377,316}{0,85 \cdot 41,28 \cdot 150} = 24,3236 \text{ mm}$$

$$\text{jika } f'_c < 30 \text{ MPa maka } \beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 30)}{7}$$

$$f'_c > 30 \text{ MPa maka } \beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 30)}{7}$$

$$\beta_1 = 0,85 - \frac{0,05 (f'_c - 30)}{7} = 0,769$$

$$c = a/\beta = 31,63 \text{ mm}$$

Periksa regangan baja tulangan tarik :

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{c} \cdot \epsilon_c' = \frac{266-31,63}{31,63} \cdot 0,001367 = 0,01013 > \epsilon_y = 0,001236$$

Momen nominal :

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

$$M_n = 128020,3028 \left( 266 - \frac{24,3236}{2} \right) \cdot 10^{-6}$$

$$= 32,4964 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,8 M_n$$

$$= 25,997 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,3 P + 0,432$$

$$25,997 = 0,3 P + 0,432$$

$$0,3 P = 25,997 - 0,432$$

$$P = 85,217 \text{ kN}$$

Jumlah tulangan (n) :

$$n = \frac{A_{s,u}}{0,25 \cdot \Pi \cdot D^2}$$

$$= 3 \text{ buah}$$

## 2. Perhitungan Tulangan Rangkap

Asumsi tulangan tekan belum leleh.

$$T_s = C_c + C_s$$

$$T_s = A_s \cdot f_u$$

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

$$C_s = A_{s'} \cdot f_u$$

$$A_s \cdot f_u = 0,85 f'_c \cdot b \cdot a + A_{s'} \cdot f_u$$

$$a = \frac{A_s - A_{s'} \cdot f_u}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$= \frac{339,292 - 100,531' \cdot 377,316}{0,85 \cdot 41,28 \cdot 150}$$

$$a = 17,11665 \text{ mm}$$

$$c = a/\beta = 17,11665/0,769 = 22,25832 \text{ mm}$$

Cek regangan baja tulangan tarik :

$$\epsilon_s = \frac{d-c}{d} \cdot \epsilon_c' = \frac{266-22,25832}{22,25832} \cdot 0,001367 = 0,01497 > \epsilon_y$$

### **Baja tulangan tarik sudah leleh**

Cek regangan baja tulangan tekan :

$$\epsilon_s' = \frac{c-d_s'}{c} \cdot \epsilon_c' = \frac{22,25832-32}{22,25832} \cdot 0,001367 = -0,0006 < \epsilon_y'$$

### Baja tulangan tekan belum leleh

Dilakukan trial untuk mencari nilai  $f_s'$

Percobaan 1

$$\varepsilon_s' = 1,1 \times 10^{-10}$$

$$f_s = \varepsilon_s' \cdot E_s$$

$$= 1,1 \times 10^{-10} \times 200000$$

$$f_s = 0,000022 \text{ MPa}$$

$$C_c = 0,85 f_c' \cdot b \cdot a$$

$$= 0,85 \times 41,28 \times 150 \times a$$

$$= 5263,2 a$$

$$C_s = A_s' \cdot f_s$$

$$= 100,531 \times 0,000022$$

$$= 0,0022117 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_u$$

$$= 339,292 \cdot 377,316$$

$$= 128020,3$$

$$a = \frac{T_s - C_s}{0,85 \cdot f_c' \cdot b}$$

$$a = \frac{128020,3 - 0,0022117}{0,85 \cdot 41,28 \cdot 150}$$

$$a = 24,3 \text{ mm}$$

$$c = a/\beta = 24,3 / 0,769 = 31,6 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d_s'}{c} \cdot \varepsilon_c' = \frac{31,6 - 32}{31,6} \cdot 0,001367 = -1,6 \times 10^{-5} > 1,1 \times 10^{-10}$$

Percobaan 1

$$\varepsilon_s' = -1,3 \times 10^{-5}$$

$$f_s = \varepsilon_s' \cdot E_s$$

$$= -1,3 \times 10^{-5} \times 200000$$

$$f_s = -2,6 \text{ MPa}$$

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

$$= 0,85 \times 41,28 \times 150 \times a$$

$$= 5263,2 a$$

$$C_s = A_s' \cdot f_s$$

$$= 100,531 \times -2,6$$

$$= -261,4 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_u$$

$$= 339,292 \cdot 377,316$$

$$= 128020,3$$

$$a = \frac{T_s - C_s}{0,85 \cdot f'_c \cdot b}$$

$$a = \frac{128020,3 - (-261,4)}{0,85 \cdot 41,28 \cdot 150}$$

$$a = 24,4 \text{ mm}$$

$$c = a/\beta = 24,4 / 0,769 = 31,7 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = \frac{c - d_s'}{c} \cdot \varepsilon_c' = \frac{31,7 - 32}{31,7} \cdot 0,001367 = -1,3 \times 10^{-5} = -1,3 \times 10^{-5}$$

Momen nominal :

$$M_1 = C_c (d - a/2)$$

$$= 0,85 \times 41,28 \times 150 \times 24,4 \times (266 - 24,4/2)$$

$$= 32,5596 \text{ kNm}$$

$$M_2 = C_s \cdot (d - d_s')$$

$$= -261,4 (266-32)$$

$$= -3,0354 \text{ kNm}$$

$$M_n = M_1 + M_2$$

$$= 32,49844 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,8 M_n$$

$$= 25,999 \text{ kNm}$$

$$M_u = 0,3 P + 0,432$$

$$25,999 = 0,3 P + 0,432$$

$$0,3 P = 25,999 - 0,432$$

$$P = 85,2 \text{ kN}$$

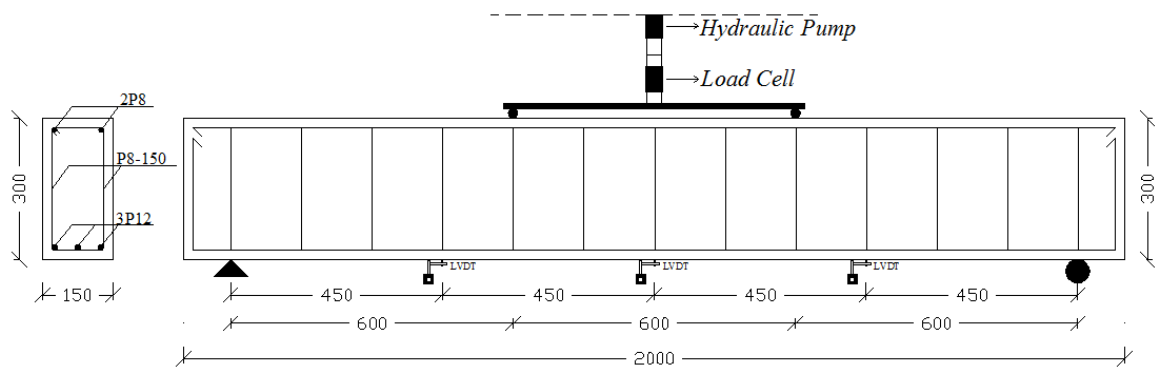
Dari hasil perhitungan desain tulangan tunggal dan rangkap dapat dilihat bahwa nilai P yang didapat antara tulangan tunggal dan tulangan rangkap tidak berbeda jauh, hal ini membuktikan bahwa penambahan tulangan tekan pada balok tidak memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap balok dalam kemampuannya menahan beban. Berikut pada Tabel 5.3 hasil dari perhitungan nilai P dengan menggunakan tulangan tunggal dan tulangan rangkap. Untuk perhitungan pembebanan pada benda uji yang lainnya dapat dilihat pada lampiran 2.

Tabel 5.3 Hasil Perhitungan Nilai P

BU	P tul sebelah (kN)	P tul rangkap (kN)
BU-1	85.217	85.223
BU-2	163.473	164.012
BU-3	164.056	165.016
BU-4	111.804	111.836
BU-5	79.623	79.627

## 5.5 PENGUJIAN BALOK

Pembebanan yang diberikana pada balok adalah beban titik yang didistribusi menjadi 2 beban terpusat dengan jarak sepertiga bentang seperti yang terlihat pada Gambar 5.1 berikut ini. Beban yang diberikan adalah beban maksimum yang menyebabkan keruntuhan pada suatu penampang balok mulai terjadi. Pada Tabel 5.4 berikut ini adalah hasil pengujian ke lima balok dengan jenis pembebanan yang sama dengan besar beban yang berbeda.



Gambar 5.1 Detail Pemodelan Benda Uji

Tabel 5.4 Pembebanan Maksimum Pada Benda Uji

Benda Uji (BU)	P teoritis (kN)	P percobaan (kN)
BU-1	85.223	107.00
BU-2	164.012	136.39
BU-3	165.016	107.08
BU-4	111.836	130.69
BU-5	79.627	111.32

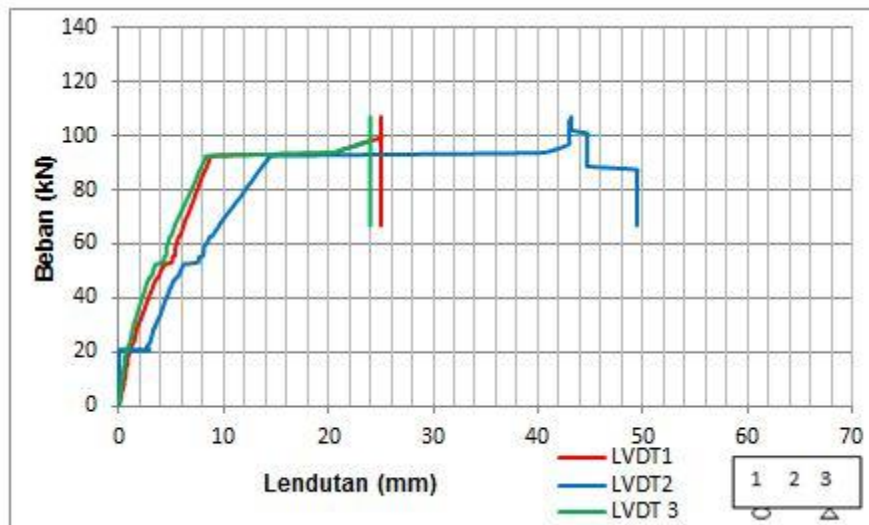
Pada penelitian ini, kapasitas tampang dihitung pada daerah tengah bentang. Hal ini dikarenakan daerah tengah bentang merupakan daerah momen terbesar dan daerah terjadinya lendutan terbesar, sehingga kapasitas tampang dihitung pada daerah tengah bentang.

Berdasarkan Tabel 5.4 dapat dilihat terjadi perbedaan antara nilai pembebanan secara teoritis dengan pembebanan riil. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor alat yang tidak terkalibrasi dengan baik selain itu terjadi kebocoran pada *hydraulic jack*, sehingga menyebabkan pembebanan tidak berjalan dengan baik.

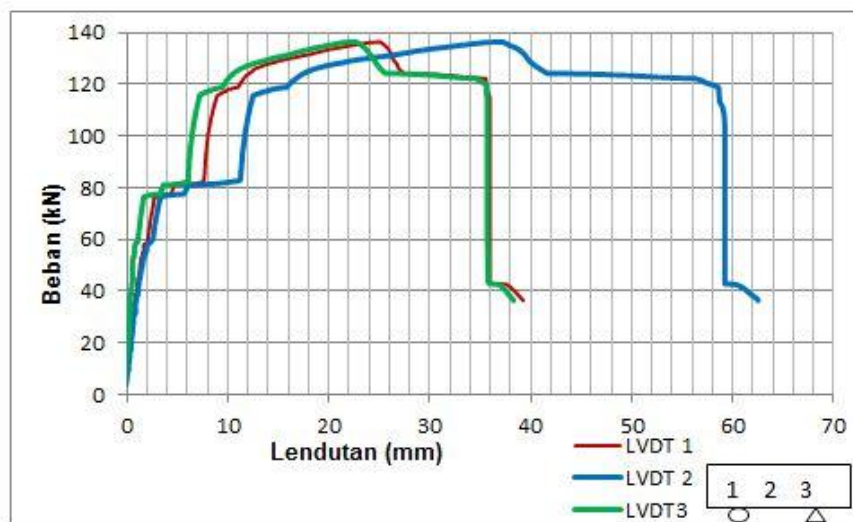
## 5.6 HUBUNGAN BEBAN-LENDUTAN (*LOAD DISPLACEMENT RELATIONSHIP*)

*Load displacement relationship* dapat menggambarkan fleksibilitas dan defleksi yang terjadi pada setiap penambahan beban dari suatu benda uji. Nilai lendutan ini dibaca dari alat yang LVDT yang dipasang pada balok, nilai lendutan yang terbaca oleh LVDT dapat dilihat pada Lampiran 3. Lendutan BU-1, BU-2, BU-3, BU-4 dan BU-5 dapat dilihat pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.6 berikut ini.

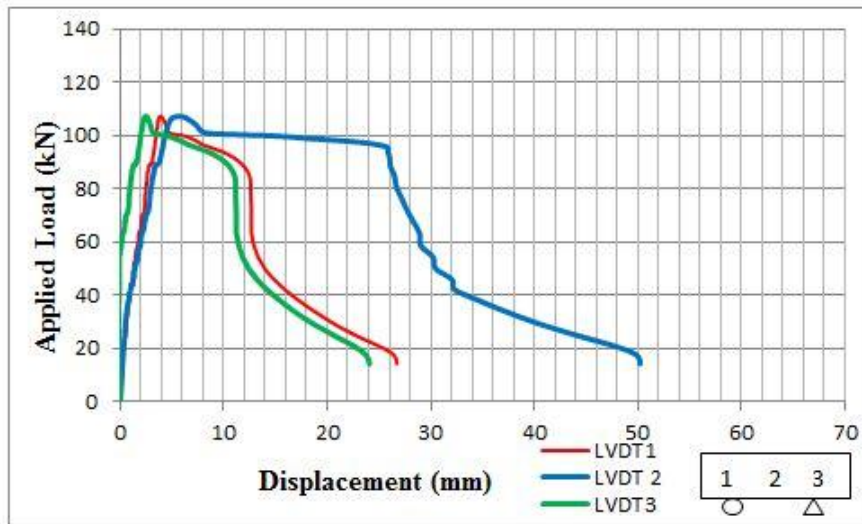
Pada pengujian ini data lendutan dari balok diambil pada tengah bentang dan seperempat bentang. Besarnya defleksi ini diukur dengan menempatkan LVDT pada tempat-tempat tersebut.



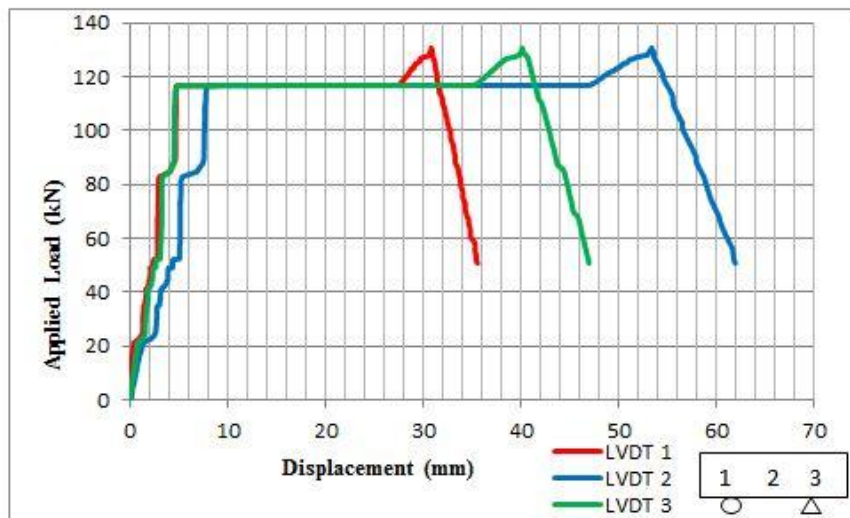
Gambar 5.2 Hubungan Beban-Lendutan BU-1



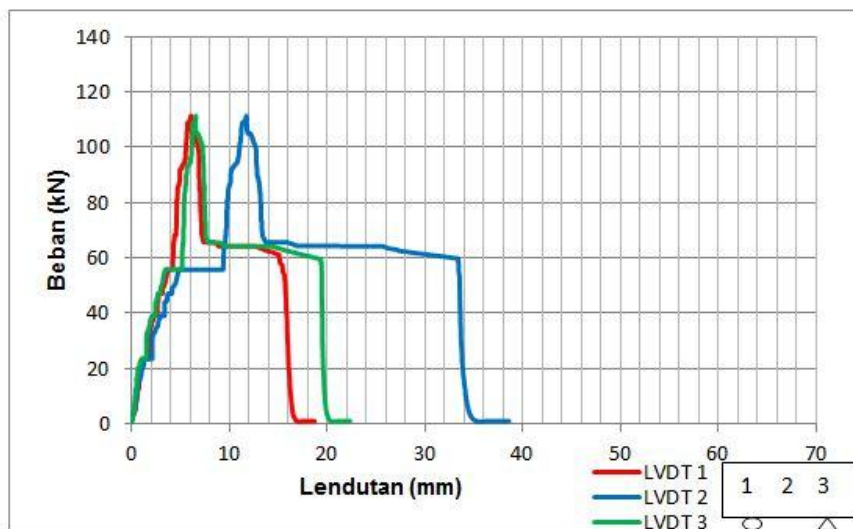
Gambar 5.3 Hubungan Beban-Lendutan BU-2



Gambar 5.4 Hubungan Beban-Lendutan BU-3



Gambar 5.5 Hubungan Beban-Lendutan BU-4



Gambar 5.6 Hubungan Beban-Lendutan BU-5

Dari grafik pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.6 terdapat perbedaan baik pada pembebanan dan lendutan maksimal yang dapat ditahan oleh balok lentur tersebut. Balok-balok yang diuji pada pengujian ini mempunyai dimensi yaitu panjang dan luasan yang sama akan tetapi sambungan pada tulangnya berbeda sehingga kemampuan menahan bebanpun berbeda-beda. LVDT 2 digunakan untuk mengetahui besarnya lendutan pada daerah tengah bentang yang mana pada daerah tengah bentang merupakan daerah momen maksimum dan lendutan maksimum. LVDT 1 dan LVDT 2 digunakan untuk kontrol lendutan pada sisi kanan dan kiri beton di luar daerah pembebanan, hal ini dilakukan untuk mengecek apakah terdapat kesamaan besarnya lendutan pada daerah LVDT 1 dan LVDT 3 akibat beban yang diberikan. Apabila terdapat sedikit perbedaan antara LVDT 1 dan LVDT 3 seperti yang terjadi pada BU-4 kemungkinan disebabkan oleh sifat non-homogen material beton sebelah kiri dan kanan pada balok lentur tersebut, sehingga menyebabkan perbedaan nilai lendutan.

Dari grafik dapat dilihat bahwa nilai lendutan pada LVDT 2 pada semua benda uji balok mempunyai nilai lendutan yang lebih besar dibandingkan dengan nilai LVDT 1 dan LVDT 3. Sebagai contoh nilai LVDT pada BU-1 didapatkan nilai LVDT 1 sebesar 25,03 mm, LVDT 2 sebesar 49,45 dan LVDT 3 sebesar 24 mm. Pada BU-1 ini terbukti bahwa LVDT 2 yang terletak pada tengah bentang mempunyai nilai lendutan yang lebih besar, sedangkan pada LVDT 1 dan LVDT 3 mempunyai nilai lendutan yang tidak jauh berbeda, hal ini dikarenakan balok mengalami kerusakan yang tidak merata disepanjang bentang balok tersebut. Kerusakan yang tidak merata dapat disebabkan oleh tidak meratanya kuat tekan yang dimiliki oleh balok. Pada pengujian balok-balok tersebut semua benda uji memiliki perbedaan nilai lendutan antara LVDT 1 dan LVDT 3. Selain itu pada semua pengujian balok nilai lendutan pada LVDT 2 merupakan lendutan terbesar.

Pada Tabel 5.5 berikut ini adalah hasil dari pembacaan lendutan maksimum pada setiap benda uji.

Tabel 5.5 Lendutan Maksimum Pada Semua Benda Uji

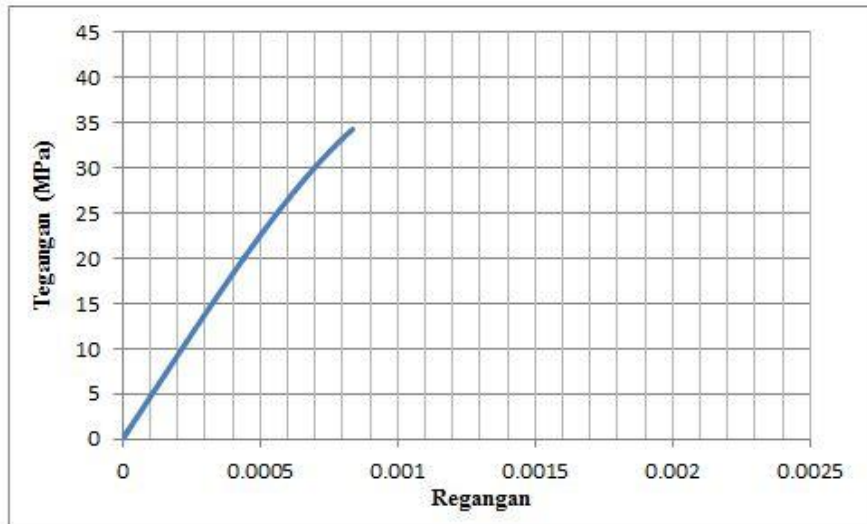
Benda Uji	No LVDT	Lendutan maksimum (mm)
BU-1	1	25.03
	2	49.45
	3	24.00

BU-2	1	39.24
	2	62.53
	3	38.29
BU-3	1	26.73
	2	50.22
	3	24.07
BU-4	1	35.53
	2	61.94
	3	46.95
BU-5	1	18.70
	2	38.6
	3	22.34

Secara mekanik besarnya lendutan tergantung dari besarnya beban yang diberikan pada balok itu sendiri. Berdasarkan hasil pengujian balok BU-2 mempunyai kekuatan tertinggi, hal ini terbukti dengan beban maksimum yang mampu ditahan sebesar 136,39 kN dan lendutan maksimum sebesar 56,42 mm dibandingkan dengan keempat benda uji lainnya. Pada balok pada BU-5 mempunyai nilai lendutan yang lebih kecil dari pada balok BU-1 dan BU-3, dengan nilai lendutan balok BU-5 sebesar 38,60 mm, BU-1 sebesar 49,45 mm dan BU-3 sebesar 50,22. Hal ini kemungkinan disebabkan terjadi kesalahan pada saat penyetingan alat pada BU-5. Kemungkinan pada saat setelah pengecekan alat LVDT memenuhi syarat, LVDT tersebut terjadi penurunan karena penguncinya kurang kuat sehingga LVDT tidak menyentuh balok.

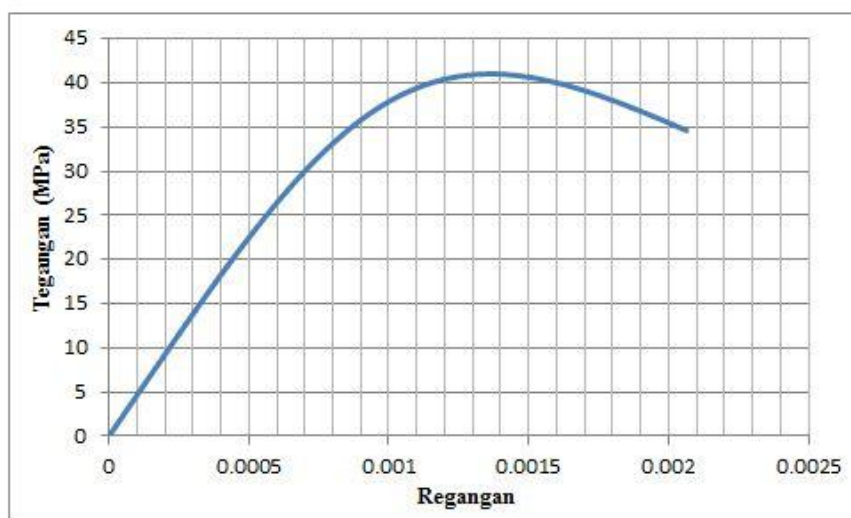
### 5.7 HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN BETON

Hubungan tegangan dan regangan pada balok ini ditinjau pada daerah desak beton. Regangan beton adalah hasil dari pengujian yang dibaca oleh alat sensor yaitu *strain gauge*. *Strain gauge* yang digunakan pada pengujian ini mempunyai sifat yang sangat sensitif, adanya sedikit sentuhan pada kabel atau kesalahan pada pemasangan akan mempengaruhi pembacaan regangan pada data logger. *Strain gauge* untuk beton dipasang pada daerah desak beton pada bagian tengah bentang. Gambar 5.7 berikut ini menggambarkan hubungan tegangan dan regangan beton pada benda uji balok.



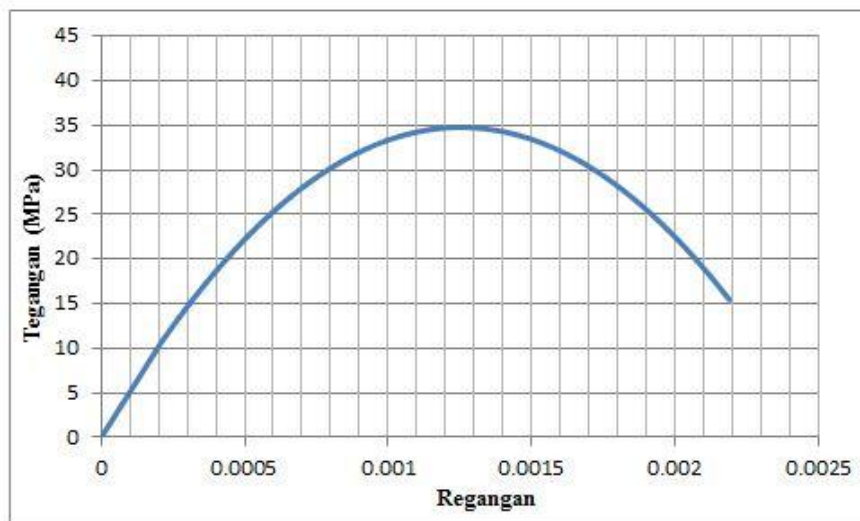
Gambar 5.7 Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-1

Pada BU-1 dapat dilihat dari grafik di atas bahwa nilai regangan beton belum mencapai regangan maksimum beton ( $0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,003$ ). Pada grafik diketahui regangan beton hanya mencapai nilai 0,000836, dan beton mengalami keruntuhan. Hal ini dapat terjadi dikarenakan baja tulangan tarik pada BU-1 sudah mencapai titik leleh, nilai regangan baja tulangan tarik dapat dilihat pada sub bab hubungan tegangan dan regangan baja tulangan, karena baja tulangan tarik sudah mencapai leleh tetapi regangan tekan beton belum mencapai regangan batas 0,003, sehingga apabila beban tetap ditambah maka akan ada peningkatan nilai lendutan dan kerusakan pada beton semakin besar sehingga beton akan hancur.



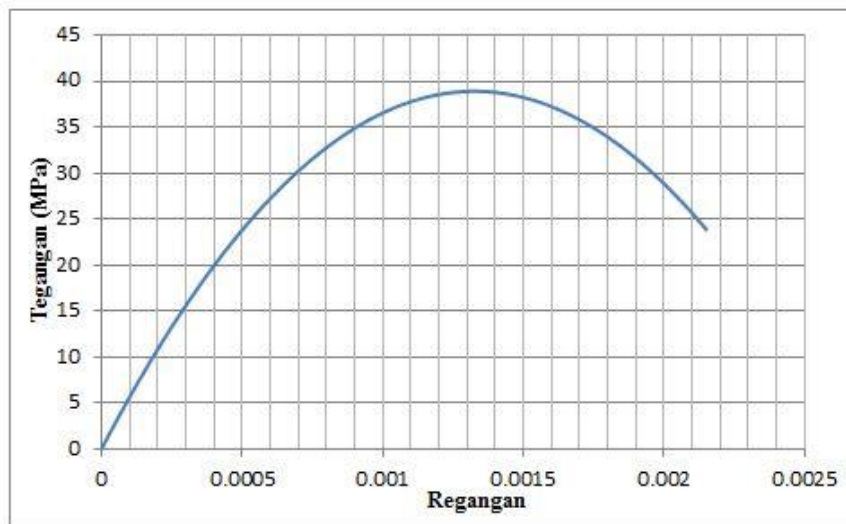
Gambar 5.8 Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-2

Pada Gambar 5.8 dapat dilihat hubungan tegangan dan regangan beton BU-2. Pada BU-2 nilai regangan beton mencapai 0,002063, nilai regangan beton berada diantara ( $0,002 \leq \epsilon_c \leq 0,003$ ) tetapi belum mencapai nilai regangan batas 0,003 dan akhirnya beton runtuh sebelum beton mencapai nilai regangan batas. Hal ini dapat terjadi dikarenakan pada saat baja tulangan mulai mendekati nilai leleh baja tulangan tarik betonnya masih kuat, sehingga dapat terjadi peningkatan nilai lendutan pada balok. Jika diatas balok ditambahkan lagi bebannya maka terjadi keruntuhan pada balok. Hal ini menguntungkan bagi kehidupan manusia, karena ada peringatan tentang lendutan yang semakin membesar sebelum balok tersebut runtuh.



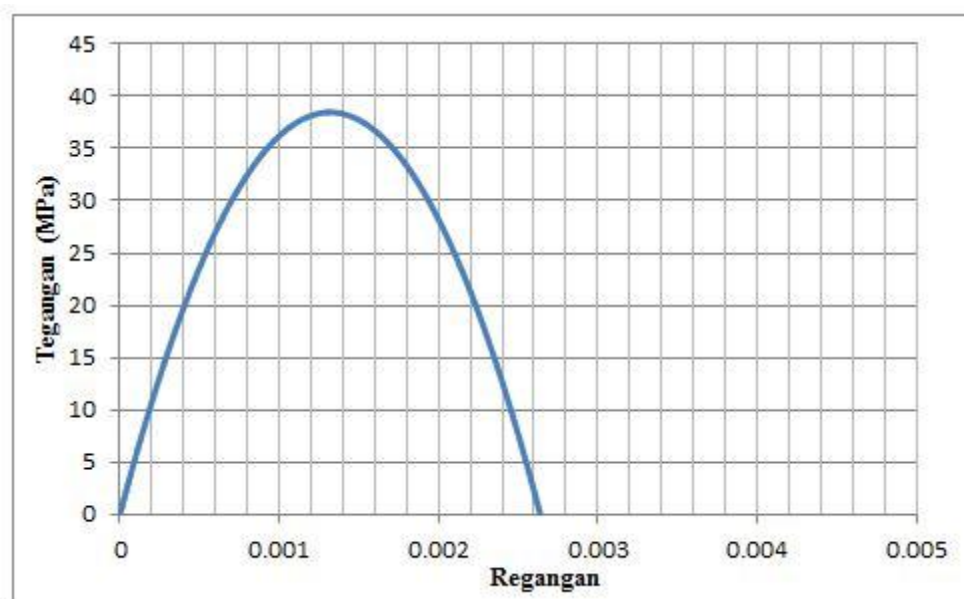
Gambar 5.9 Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-3

Pada Gambar 5.9 dapat dilihat hubungan tegang dan regangan beton untuk BU-3, nilai regangan beton pada BU-3 mencapai 0,002191. Sama dengan regangan pada BU-2 nilai regangan beton belum mencapai nilai regangan batas beton yaitu 0,003 tetapi beton sudah mengalami keruntuhan. Hal ini dapat terjadi karena baja tulangan tarik sudah mencapai leleh tetapi beton belum hancur, sehingga lendutan pada beton terus bertambah dan pada akhirnya ketika beton terus diberikan beban beton akan hancur, dan balok mengalami keruntuhan tarik.



Gambar 5.10 Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-4

Pada Gambar 5.10 dapat dilihat hubungan tegangan dan regangan beton untuk BU-4. Nilai regangan beton BU-4 mencapai 0,002151, sama halnya dengan BU-2 dan BU-3 balok pada BU-4 nilai regangannya belum mencapai nilai regangan batas yaitu 0,003 tetapi beton sudah runtuh. Balok pada BU-4 mengalami keruntuhan tarik dimana baja tulangan tarik sudah leleh tetapi betonnya masih kuat, sehingga kerusakan akan menjalar dari daerah serat beton bagian bawah ke serat beton bagian atas dan akhirnya beton runtuh sebelum mencapai nilai regangan batas beton yaitu 0,003.



Gambar 5.11 Hubungan Tegangan-Regangan Beton BU-5

Pada Gambar 5.11 dapat dilihat hubungan tegangan dan regangan beton BU-5, yang mana nilai regangan beton sudah mencapai 0,00132. Sama halnya dengan BU-2 dan BU-3 balok pada BU-4 nilai regangannya belum mencapai nilai regangan batas yaitu 0,003 tetapi beton sudah runtuh. Balok pada BU-5 mengalami keruntuhan tarik dimana baja tulangan tarik sudah leleh tetapi betonnya masih kuat, sehingga kerusakan akan menjalar dari daerah serat beton bagian bawah ke serat beton bagian atas dan akhirnya beton runtuh sebelum mencapai nilai regangan batas beton yaitu 0,003.

Perlu diketahui bahwa Gambar 5.7-5.11 merupakan grafik hubungan tegangan dan regangan dari beton pada balok struktur di lokasi serat desak tengah bentangan. Grafik-grafik tersebut tidak mempresentasikan hubungan tegangan dan regangan silinder beton.

Dari grafik hubungan tegangan dan regangan beton diatas maka perilaku beton pada saat dibebani, dapat diuraikan sebagai berikut :

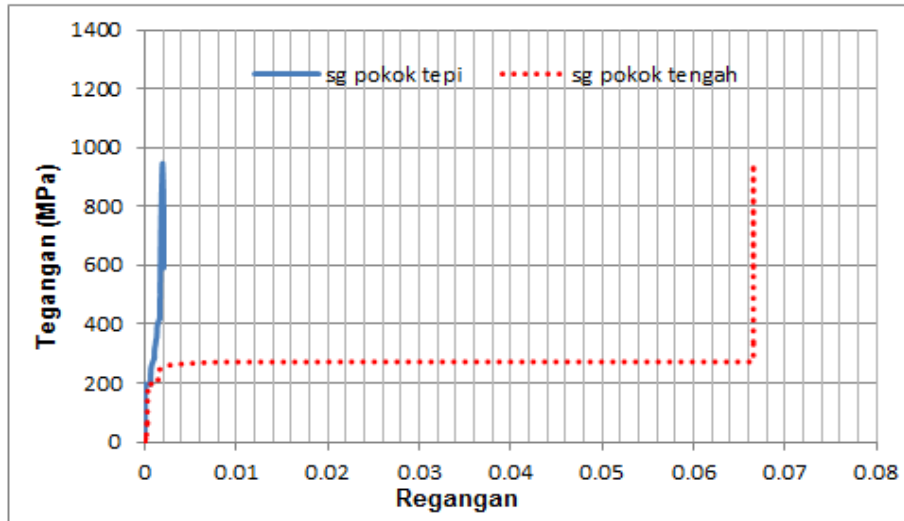
1. Pada balok BU-1 sampai dengan BU-5 nilai regangan beton belum mencapai nilai regangan batas yaitu 0,003 tetapi beton sudah runtuh atau hancur, hal ini dapat terjadi karena baja tulangan tarik sudah mencapai leleh tetapi beton masih kuat, sehingga mulai terjadi kerusakan yang dimulai dari serat bawah balok menjalar ke bagian serat atas balok dan akhirnya beton runtuh sebelum mencapai nilai regangan batas, sehingga beton mengalami keruntuhan tarik..
2. Dengan persamaan 3.16 dan 3.18 serta nilai regangan yang diperoleh dari hasil pengujian maka dapat dihitung besarnya tegangannya dapat dilihat pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 Nilai Tegangan dan Regangan Beton

Teg-Reg Beton	BU-1	BU-2	BU-3	BU-4	BU-5
$\epsilon_{ultimet}$	0,000836	0,0013667	0,001255	0,001327	0,00132
$\sigma_{ultimet}$ (MPa)	34,292	41,039	34,79	38,89	38,46
$\epsilon_{hancur}$	-	0,002063	0,0021906	0,002151	-
$\sigma_{hancur}$ (Mpa)	-	34,642	154,532	238,673	-

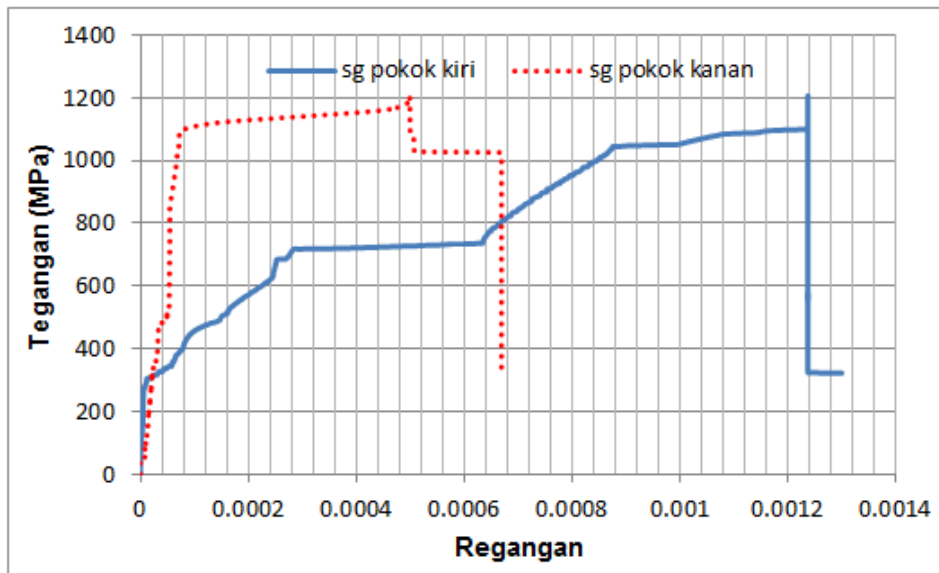
## 5.8 HUBUNGAN TEGANGAN DAN REGANGAN BAJA TULANGAN

Hubungan tegangan dan regangan pada baja tulangan ini meninjau pada dua titik yaitu pada bagian-bagian ujung sambungan baja tulangan. Pada grafik dibawah ini dapat dilihat hubungan tegangan dan regangan baja tulangan untuk kelima benda uji.



Gambar 5.12 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Tulangan BU-1

*Strain gauge* pada baja tulangan tarik BU-1 dipasang pada daerah tengah bentang baja tulangan bagian tengah dan tepi kiri, *strain gauge* dipasang pada daerah tarik baja tulangan yaitu pada bagian bawah permukaan tulangan. Pada Gambar 5.11 di atas dapat dilihat grafik hubungan tegangan dan regangan baja tulangan BU-1 terlihat *smooth*, ini membuktikan bahwa pembebanan yang diberikan berjalan cukup konstan. Dari hasil pembacaan, besarnya nilai regangan baja tulangan bagian tepi BU-1 sebesar 0,002086, sedangkan regangan baja tulangan bagian tengah sebesar 0,06657. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca oleh *strain gauge*, dapat disimpulkan bahwa regangan pada baja tulangan BU-1 sudah mencapai regangan leleh. Hal ini dapat dilihat dari nilai regangan leleh pengujian lebih besar dibandingkan dengan nilai regangan teoritis baja sebesar 0,001887. Dari data *strain gauge* menunjukkan bahwa baja tulangan di bagian tepi leleh lebih awal dibandingkan dengan baja tulangan tengah, tetapi tegangan maksimum yang dapat dicapai relatif sama.

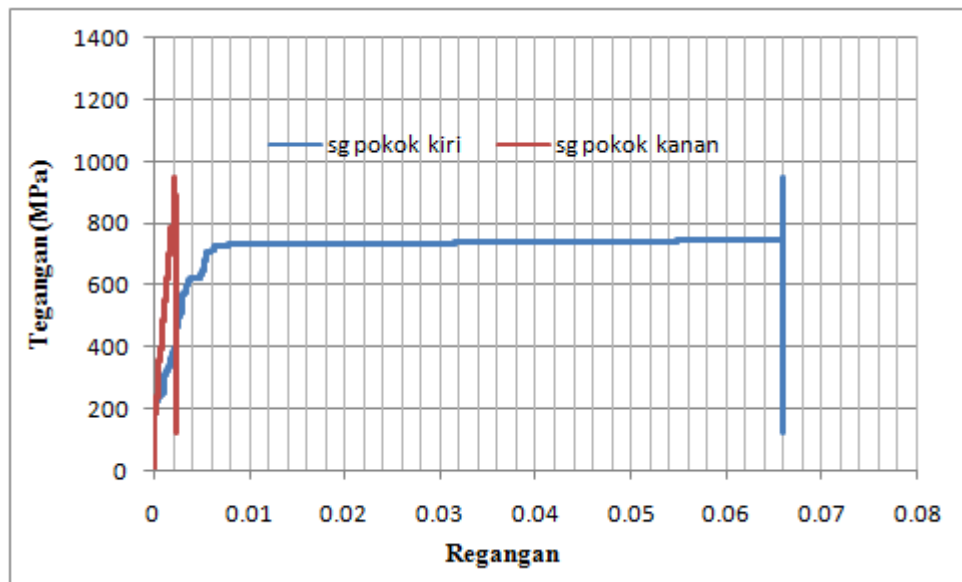


Gambar 5.13 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Tulangan BU-2

Pada BU-2 *strain gauge* dipasang pada tulangan tarik bagian tengah dan *strain gauge* ditempelkan pada bagian ujung sambungan kanan dan kiri. Dari grafik dapat dilihat nilai regangan baja tulangan bagian kanan pada BU-2 sebesar 0,000669, dan untuk nilai regangan baja tulangan bagian kiri pada BU-2 sebesar 0,001232. Dari hasil pembacaan regangan oleh *strain gauge* dapat dilihat bahwa baja tulangan pada bagian sebelah kanan belum mencapai regangan leleh, sedangkan baja tulangan sebelah kiri sudah mulai memasuki leleh, hal ini terlihat dari nilai regangan leleh teoritis baja sebesar 0,001236. Pada baja tulangan sebelah kanan belum mencapai leleh hal ini mungkin saja terjadi dikarenakan pada bagian ujung sambungan *overlap* diberikan bengkokan atau kaitan sehingga terjadi ikatan yang lebih kuat dengan beton, seperti yang terlihat pada Gambar 5.13 berikut ini.

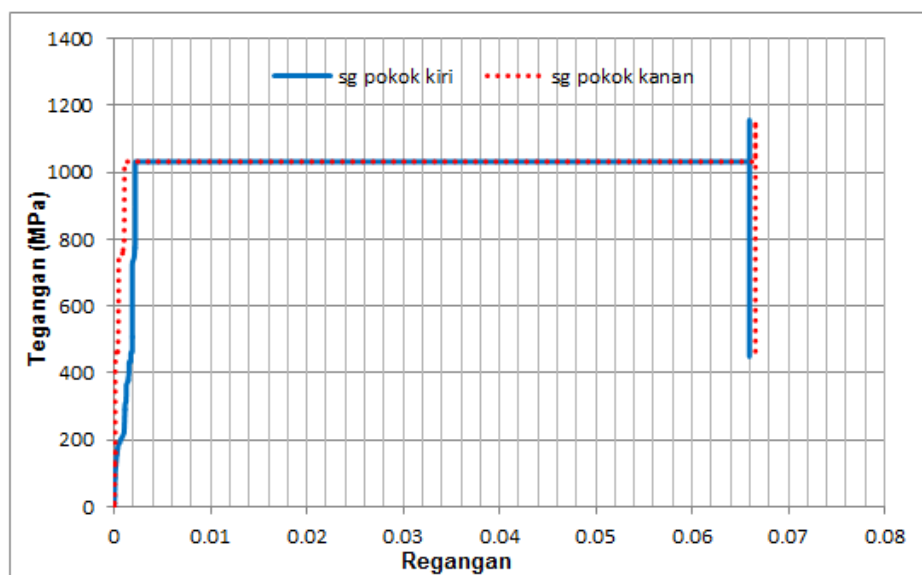


Gambar 5.14 Penulangan BU-2



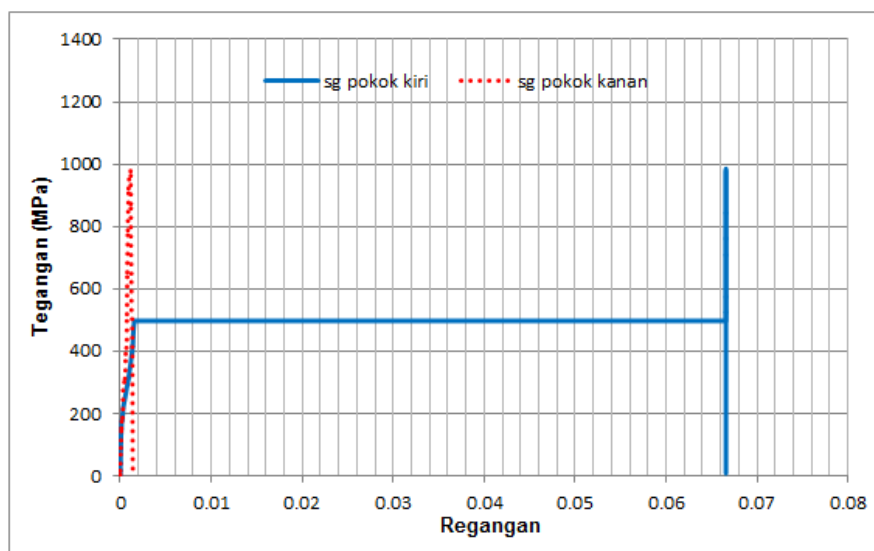
Gambar 5.15 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Tulangan BU-3

Pada BU-3 *strain gauge* dipasang pada tulangan tarik bagian tengah dan *strain gauge* ditempelkan pada bagian ujung sambungan kanan dan kiri. Dari grafik diatas dapat dilihat nilai regangan baja tulangan bagian kanan pada BU-3 sebesar 0,002336 dan nilai regangan baja tulangan bagian kiri pada BU-3 sebesar 0,06595. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca oleh *strain gauge*, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan BU-3 sudah mencapai regangan leleh, yang mana nilai regangan pada pengujian lebih besar dibandingkan nilai regangan leleh teoritis baja BU-3 sebesar 0,001887.



Gambar 5.16 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Tulangan BU-4

Pada BU-4 *strain gauge* dipasang pada tulangan tarik bagian tengah dan *strain gauge* ditempelkan pada bagian ujung sambungan kanan dan kiri. Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa nilai regangan baja tulangan bagian kanan dan kiri pada BU-4 hampir sama. Nilai regangan baja tulangan bagian kanan BU-4 sebesar 0,06657 sedangkan nilai regangan baja tulangan bagian kiri pada BU-4 sebesar 0,06595. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan pada bagian kanan dan kiri sudah mencapai nilai regangan leleh, hal ini terlihat dari nilai regangan leleh teoritis baja tulangan sebesar 0,001887.



Gambar 5.17 Hubungan Tegangan dan Regangan Baja Tulangan BU-5

Dari grafik diatas dapat dilihat nilai regangan baja tulangan bagian kanan pada BU-5 sebesar 0,066574 sedangkan nilai regangan baja tulangan bagian kiri pada BU-5 sebesar 0,001415. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan bagian kanan dan kiri pada BU-5, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan pada bagian kanan dan kiri pada BU-5 sudah mencapai regangan leleh, hal ini dapat terlihat dari nilai regangan leleh teoritis baja tulangan sebesar 0,001256.

Dari grafik diatas dapat dilihat gambar grafik BU-1 sampai dengan BU-5 kecuali BU-4, terdapat perbedaan yang cukup jauh antara kedua buah *strain gauge*, hal ini dapat disebabkan salah satunya karena cara pemasangan dan letak posisi *strain gauge* sangat berpengaruh sehingga dapat mempengaruhi hasil pembacaan dari *strain gauge*.

## 5.9 DAKTILITAS SIMPANGAN

Daktilitas merupakan kemampuan struktur untuk menahan respon inelastik yang dominan dalam memikul beban agar tidak runtuh. Secara matematis, nilai daktilitas ( $\mu_{\Delta}$ ) struktur didefinisikan sebagai perbandingan antara suatu parameter deformasi rencana maksimum struktur ( $\Delta_u$ ) dengan deformasi pada saat terjadi leleh pertama pada struktur yang ditinjau ( $\Delta_y$ ), seperti yang telah disampaikan dalam persamaan 3.40.

Pada penelitian ini akan dicari nilai daktilitas simpangan, yang mana nilai daktilitas simpangan dapat diambil dari hasil pengujian lendutan yang telah dilakukan sebelumnya. Pada Tabel 5.7 berikut ini akan ditampilkan nilai daktilitas simpangan berdasarkan hasil prngujian lendutan pada LVDT 2.

Tabel 5.7 Nilai Daktilitas Balok

Benda Uji	$\Delta_y$	$\Delta_u$	$\mu_{\Delta}$
BU-1	8.3	49,45	5.96
BU-2	6.3	56	8.89
BU-3	3.56	25.98	7.3
BU-4	8.2	53.86	6.57
BU-5	4.55	11.98	2.63

Secara umum daktilitas dibagi menjadi 3 level, yaitu elastik penuh, daktilitas terbatas dan daktilitas penuh dengan nilai nilai daktilitas dapat dilihat pada Tabel 5.8 berikut ini.

Tabel 5.8 Tingkatan Daktilitas

No	Tingkat Daktilitas	Nilai Daktilitas SNI-02,2002	Faktor Reduksi SNI-02,2002
1	Elastik penuh	1,0 (R = 1,6)	R = 1,6
2	Daktilitas terbatas	1,5 (R = 2,4) 2,0 (R = 3,2) 2,5 (R = 4,0) 3,0 (R = 4,8) 3,5 (R = 5,6) 4,0 (R = 6,4) 4,5 (R = 7,2) 5,0 (R = 8,0)	R = 2,4 R = 3,2 R = 4,0 R = 4,8 R = 5,6 R = 6,4 R = 7,2 R = 8,0
3	Daktilitas penuh	5,5 (R = 8,5)	R = 8,5

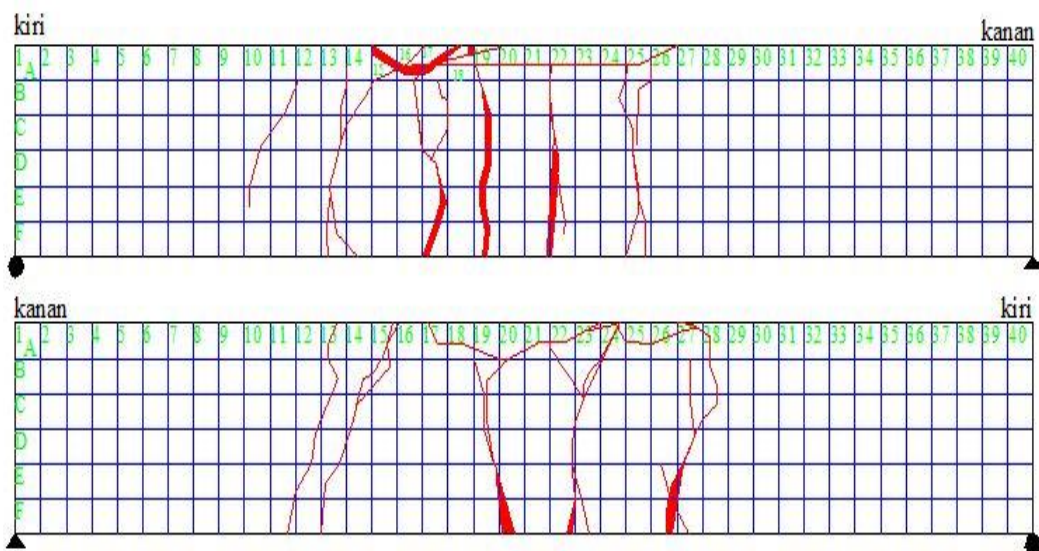
Secara teoritik semakin tinggi tingkat daktilitas maka akan semakin baik, baik dalam keberlanjutannya menahan beban. Dari Tabel 5.7 dapat dilihat bahwa nilai daktilitas semua benda uji lebih dari 1. Untuk balok BU-2 memiliki nilai daktilitas

tertinggi hal ini dapat dilihat pada grafik Gambar 5.2 balok masih dapat menahan beban tanpa adanya penurunan yang drastis ketika balok sudah mencapai beban maksimum, sehingga dari hasil pengujian dapat diketahui bahwa sambungan *overlap* mempunyai tingkat daktilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan tulangan normal tanpa sambungan dan tulangan yang menggunakan sambungan las. Hal ini dapat terjadi karena sambungan *overlap* memiliki sambungan sepanjang  $40D$ , hal ini dapat membuat balok menahan beban yang lebih besar dibandingkan dengan sambungan yang lain. Pada BU-1 sampai BU-4 masuk dalam kategori daktilitas penuh yang mana nilai daktilitasnya melebihi 5,5, sedangkan BU-5 masuk dalam kategori daktilitas terbatas karena nilai daktilitasnya hanya mencapai 2,63.

#### **5.10 POLA KERETAKAN BALOK**

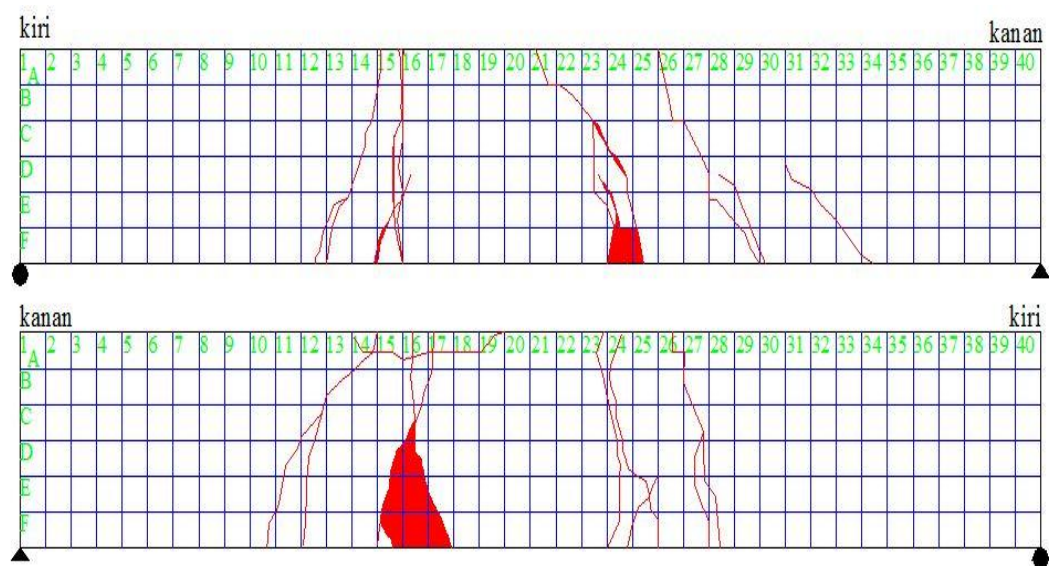
Pola retak yang umumnya terjadi pada balok adalah berupa retak lentur dan retak geser. Pada pengujian yang telah dilakukan ini, retak-retak yang terjadi pada benda uji umumnya diawali dengan retak halus pada sisi bawah benda uji yaitu sisi tarik dari penampang lalu diikuti dengan retak lentur pada sisi yang telah terjadi retak halus sebelumnya. Retak lentur dominan terjadi pada daerah momen terbesar, yaitu pada daerah sekitar tengah bentang tepatnya berada pada daerah dua beban titik diberikan.

Berdasarkan Gambar 5.18 menunjukkan bahwa keretakan yang terjadi pada BU-1 adalah keretakan lentur dengan panjang retakan  $\pm 25$  cm dan lebar retakan sebesar  $\pm 1$  cm. Pada BU-1 ini tidak banyak terdapat retak geser, dan retak dominan terjadi pada daerah pembebanan.



Gambar 5.18 Pola Retak BU-1

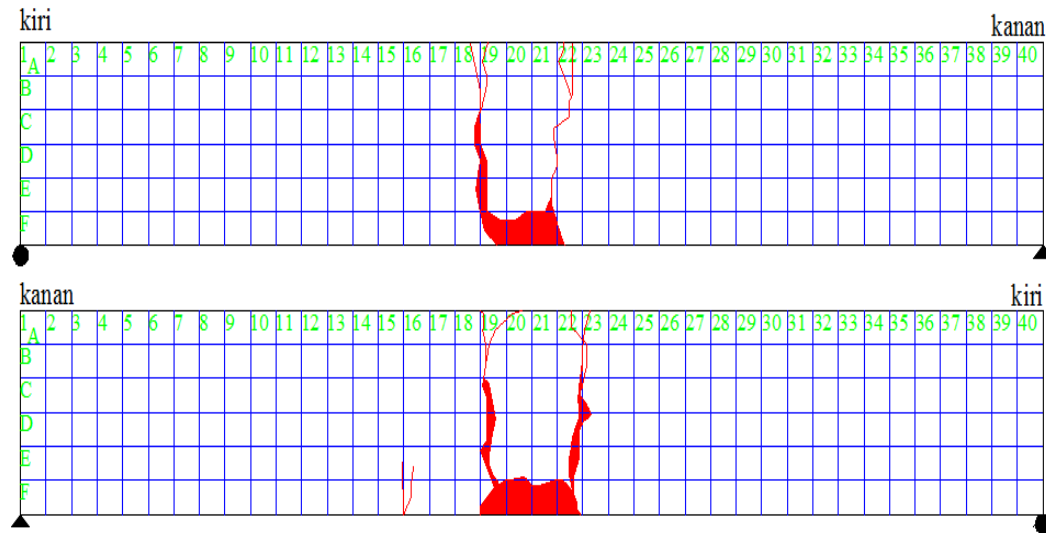
Untuk pola retak yang terjadi pada BU-2 dapat dilihat pada Gambar 5.19 kerusakan yang terjadi pada BU-2 adalah kerusakan lentur dengan panjang retakan sebesar  $\pm 30$  cm. Pada BU-2 ini bagian bawah balok mengalami pelepasan mortar beton sehingga baja tulangan didalamnya terlihat. Pada BU-2 ini terdapat retak arah diagonal sepanjang  $\pm 15$  cm di daerah luar pembebanan. Retak diagonal ini muncul ketika balok hampir runtuh yang mana balok sudah mencapai beban maksimum.



Gambar 5.19 Pola Retak BU-2

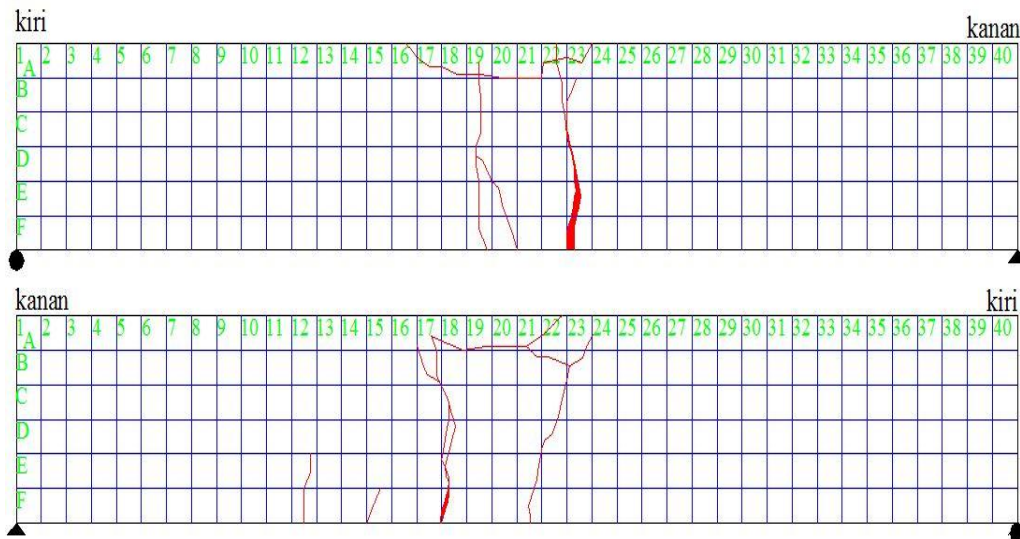
Untuk pola retak yang terjadi pada BU-3 dapat dilihat pada Gambar 5.20 dibawah ini. Pada Gambar 5.20 menunjukkan keretakan yang terjadi pada balok

BU-3 adalah keretakan lentur dengan kerusakan yang berpusat pada daerah pembeban. Panjang retakan vertikal yang terjadi adalah sepanjang  $\pm 30$  cm dengan lebar  $\pm 20$  cm. Pada balok BU-3 ini kerusakan banyak terjadi pada daerah bawah balok yang mana merupakan daerah tarik. Pada bagian bawah balok yang mengalami kerusakan terjadi pelepasan mortar, yang mana pada daerah tersebut merupakan daerah sambungan tulangan yang dilas sepanjang 5cm.



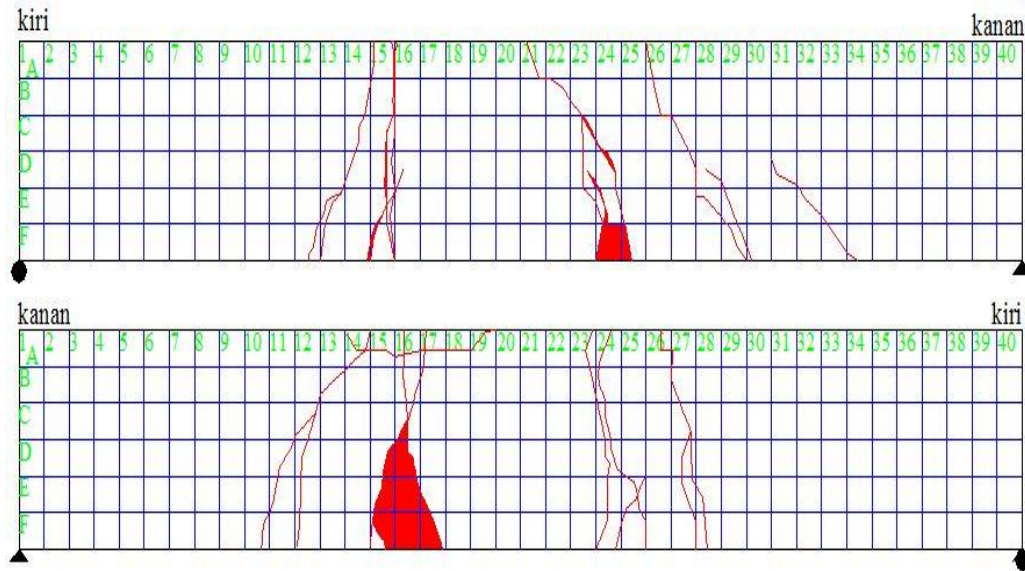
Gambar 5.20 Pola Retak BU-3

Untuk pola retak yang terjadi pada balok BU-4 dapat dilihat pada Gambar 5.21. kerusakan yang terjadi pada balok BU-4 adalah kerusakan lentur dengan keretakan arah vertikal sepanjang  $\pm 25$  cm dan lebar retakan  $\pm 5$  mm. kerusakan pada balok BU-4 ini berada pada daerah sekitar pembebanan.



Gambar 5.21 Pola Retak BU-4

Untuk pola retak yang terjadi pada balok BU-5 dapat dilihat pada Gambar 5.22. Pada balok BU-5 ini kerusakan yang dominan terjadi adalah kerusakan lentur dibandingkan dengan kerusakan gesernya. Arah retak vertikal mencapai panjang  $\pm 30$  cm dengan lebar retakan  $\pm 10$  cm sedangkan arah retak vertikal mencapai panjang  $\pm 15$  cm dengan lebar retakan  $\pm 1$  mm.



Gambar 5.22 Pola Retak BU-5

## **BAB VI**

### **SIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1 SIMPULAN**

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab sebelumnya, maka dapat ditarik kesimpulan akhir untuk menjawab rumusan masalah dari penelitian ini, yaitu sebagai berikut ini.

1. Dari hasil pengujian ke lima benda uji ternyata nilai regangan beton belum mencapai regangan batas ( $0,002 \leq \varepsilon \leq 0,003$ ) dikarenakan baja tulangan sudah mencapai leleh terlebih dahulu akan tetapi beton masih kuat, sehingga beton runtuh sebelum mencapai nilai regangan batas. Untuk nilai regangan baja tulangan pada balok BU-1, BU-2, BU-3, BU-4 dan BU-5 sudah mencapai regangan leleh teoritis baja sebesar 0,001236, sedangkan pada baja tulangan BU-2 sebelah kanan belum mencapai nilai regangan leleh teoritis baja tulangan dikarenakan terdapat bengkokan atau kaitan pada bagian ujung baja tulangan yang dilakukan sambungan *overlap* sehingga memberi pengaruh kekuatan pada balok.
2. Daktilitas terbesar terjadi pada BU-2, hal ini terbukti bahwa BU-2 ketika beban mencapai maksimum untuk pembebanan selanjutnya tidak terjadi penurunan beban secara tiba-tiba. Hal ini membuktikan bahwa sambungan *overlap* memiliki tingkat daktilitas yang baik.
3. Pada BU-1, BU-2, BU-3, BU-4 dan BU-5 memiliki pola retak yang hampir sama, yaitu keretakan lentur. Keretakan lentur dimulai dari retak pada daerah tarik yang menjalar ke bagian atas serat penampang.

#### **6.2 SARAN**

Bedasarkan kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan, maka disarankan beberapa hal sebagai berikut ini.

1. Pada penelitian selanjutnya agar mendapatkan data regangan yang lebih akurat, sebaiknya penggunaan alat sensor *strain gauge* perlu ditambah terutama pada daerah regangan tulangan tarik. Cara pemasangan dan penempatan *strain gauge* harus sangat diperhatikan, ketika salah tempat

pemasangan maka hasil yang didapatkanpun tidak akurat dan pemasangannya harus sangat hati-hati sehingga regangan dapat dibaca dengan baik.

2. Untuk penelitian selanjutnya, perlu adanya pengaturan kecepatan untuk penggunaan *hydraulic pump* agar pembebanan berjalan dengan konstan dan grafik yang dihasilkan lebih baik.
3. Diperlukannya kalibrasi alat, sehingga hasil penelitian yang didapatkan lebih akurat.
4. Untuk pengamatan pola retak harus diperhatikan dengan seksama agar retak yang terjadi dapat teridentifikasi lebih akurat.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. *Buku Ajar Teknologi Bahan Konstruksi*. Penerbit UII. Yogyakarta.
- Anonim. (2014). *Buku Pedoman Tugas Akhir*. Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Asroni, Ali. (2010). *Balok dan Pelat Beton Bertulang*. Penerbit Graha Ilmu. Yogyakarta.
- Basuki dan Hidayati. (2006). "Simulasi Keruntuhan Lentur Pada Balok Beton Bertulang Dengan Menggunakan Sengkang". *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- BSN (2002). SNI 03-2847-2013 : Tata Cara Perhitungan Struktur Beton dan Bangunan Gedung. Percetakan BSN. Bandung.
- BSN (2002). SNI 03-6861.1-2002 : Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bangunan Bukan Logam. Percetakan BSN. Bandung.
- BSN (2002). SNI 03-6821-2002 : Spesifikasi Agregata Ringan Untuk Batu Cetak Beton. Percetakan BSN. Bandung.
- BSN (2002). SNI T-15-1990-03 : Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Percetakan BSN. Bandung.
- BSN (2002). SNI 03-2834-2000 : Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Percetakan BSN. Bandung.
- BSN (2002). SNI 07-2052-2002 : Baja Tulangan Beton. Percetakan BSN. Bandung.
- Dianawanti. (2013). "Pengaruh Penambahan *Fly Ash* Dan Zat Aditif Pada Campuran Beton Terhadap Kinerja Hubungan Balok Kolom (HBK) Dengan Pembebanan Statik". *e-Jurnal Matriks Teknik Sipil*. (tidak diterbitkan). Universitas Sebelas Maret. Solo.
- Kwan, A. K. H., Ho, J. M. C., et al. (2002). *Flexural Strength and Ductility of Reinforced Concrete Beams*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, Hongkong, pp 361-369.
- Lancelot, H.B. (1985). *Mechanical Splices of Reinforcing Bars*. Richmond Screw Anchor Company Inc. Fort Worth. Texas.

- McCormac. (2001). *Design of Reinforced Concrete Fifth Edition*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Mulyono, Tri. (2004). *Teknologi Beton*. Penerbit Andi. Yogyakarta.
- Nawy, E.G. (1990). *Beton Bertulang Suatu pendekatan Dasar*. PT. Eresco. Bandung.
- Park R. and Paulay T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. John Wiley and Sons Inc. New York.
- Parwirodikromo, Widodo. (2012). *Seismologo Teknik dan RekayasaKegempaan*. Penerbit Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Irene. Serli. (2011). "Pengaruh Bahan Tambah SikaCim terhadap Kuat Tekan Dan Workabilitas Beton Normal Dengan Agregat Asal Taratak Buluh". *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Riau. Pekanbaru.
- Suraatmadja. Djuanda. (1998). "Pengujian Lentur Pada Balok Beton Yang Disambung Dengan Polimer". *Jurnal*. (tidak diterbitkan). Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Tjokrodinuljo, K. (2004). *Teknologi Beton*, Buku Ajar, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta.
- Yudhanta. Isag. (2009). "Pengaruh Pengelasan terhadap Kuat Tarik Baja". *Tugas Akhir*. (tidak diterbitkan). Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.