PERPUSTAKAAN
HADIAH/BELI
TGL. TERIMA :
NO. JUDUL :
NO. INV. : 595/TA/JTS
NO. INDUK :

5120001279001

TUGAS AKHIR

PENGUJIAN KUAT GESER PADA BETON MUTU TINGGI

TA
625
AKH
1
01

Disusun Oleh :

Adhie Akhmad
No Mhs : 93 310 307
NIRM : 930051013114120303

Sutri Sayekti
No Mhs : 93 310 327
NIRM : 930051013114120323

MILIK PERPUSTAKAAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL
PERENCANAAN UII

JURUSAN TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2001

TUGAS AKHIR

PENGUJIAN KUAT GESER PADA BETON MUTU TINGGI

Diajukan kepada Universitas Islam Indonesia
Untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh
Derajat sarjana Teknik Sipil

Disusun oleh :

Adhie Akhmad	**No.Mhs :**	**93 310 307**
Sutri Sayekti	**No.Mhs :**	**93 310 327**

JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

YOGYAKARTA

2001

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

PENGUJIAN KUAT GESER PADA BETON MUTU TINGGI

disusun oleh :

Nama : Adhie Akhmad.
No. Mhs : 93 310 307

Nama : Sutri Sayekti
No. Mhs : 93 310 327

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Ir. Moch.Teguh, MSCE

Dosen Pembimbing I

Tanggal : 24/3/2001

Ir. Fatkhurrohman NS, MT

Dosen Pembimbing II

Tanggal :

PRAKATA

Bismillahirrahmaanirrahim

Assalamu'alaikum Wr.Wb.

Puji syukur kehadirat Allah SWT, berkat rahmat dan hidayah-Nya laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam mencapai gelar Strata 1 (S1), sesuai dengan kurikulum Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.

Dalam melaksanakan dan menyelesaikan tugas Akhir ini, banyak sekali masalah yang ditemui untuk dipelajari dan dikaji. Tugas Akhir ini diharapkan dapat meningkatkan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya bidang studi Teknik Sipil Struktur dan diharapkan dapat diterapkan di lapangan.

Selama menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini, berbagai pihak telah membantu dan mengatasi segala kesulitan yang dihadapi. Oleh karena itu dalam kesempatan ini ucapan terima kasih ditujukan kepada :

1. Bapak Ir. Widodo, MSCE, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
2. Bapak Ir. H. Tadjuddin BMA, MS, selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
3. Bapak Ir. H. Moch Teguh, MSCE, selaku Dosen Pembimbing I,

4. Bapak Ir. Fatkhurrohman N, MT, selaku Dosen Pembimbing II,
5. Bapak Ir. Andi Buntoro, selaku Pimpinan PT. Sika Nusa Pratama, Yogyakarta.
6. Segenap Pengelola dan karyawan laboratorium Mekanika Bahan PAU Ilmu Teknik, Universitas Gajah Mada, yang senantiasa mendampingi selama dalam pelaksanaan penelitian.

Kami hanya dapat berdo'a semoga budi baik semua pihak yang telah memberikan bantuannya, mendapat balasan dari Allah SWT sesuai dengan amal perbuatannya yang diberikan.

Semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi kami khususnya dan para pembaca pada umumnya. Laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna dan masih banyak kekurangannya. Oleh sebab itu saran dan koreksi yang membangun akan menjadikan Tugas Akhir ini lebih baik.

Wassalamu'alaikum Wr.Wb.

Yogyakarta, Desember 2000

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL

LEMBAR PENGESAHAN

PRAKATA i

DAFTAR ISI iii

DAFTAR GAMBAR vi

DAFTAR TABEL ix

DAFTAR LAMPIRAN xi

ABSTRAK xii

BAB I. PENDAHULUAN 1

1.1. Latar Belakang Masalah 1

1.2. Tinjauan Penelitian 2

1.3. Manfaat Penelitian 3

1.4. Rumusan Masalah 3

1.5. Batasan Masalah 3

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 5

2.1. Tinjauan Pustaka 5

2.1.1. Dasar Struktur Beton Bertulang 5

2.1.2. Material Pembentuk Beton 5

2.1.3. Perilaku Geser Pada Pembebanan 8

2.1.4. Analisa Tegangan Geser Pada Balok 9

2.1.5. Beberapa Jenis Retak Pada Balok 12

2.1.6. Hubungan Beban dan Lendutan..... 14

2.2. Landasan Teori 15

2.2.1. Umum 15

2.2.2. Perencanaan Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi..... 17

2.2.3. Persamaan Differensial Untuk Defleksi..... 25

2.2.4. Momen Kelengkungan Secara Teoritis..... 29

2.2.5. Perencanaan Geser Balok 35

2.2.6. Rencana Campuran Beton Berkekuatan Tinggi..... 38

2.2.7. Pengujian Kuat Desak Beton 42

2.2.8. Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan..... 44

2.2.9. Pengujian Geser Pada Balok 44

BAB III. METODE PENELITIAN..... 46

3.1. Rencana Pelaksanaan Penelitian 46

3.2. Bahan-bahan Penelitian 46

3.3. Alat-alat Penelitian 49

3.4. Perancangan Model Benda Uji..... 53

BAB IV. PELAKSANAAN PENELITIAN..... 56

4.1. Persiapan Bahan 56

4.2. Persiapan Alat 58

4.3. Pembuatan Beton dan Balok Uji 58

4.4. Pengujian Balok 59

BAB V. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN 64
5.1. Hasil Penelitian 64
5.1.1. Kuat Tarik Baja 64
5.1.2. Kuat Desak Beton 65
5.1.3. Kuat Geser 69
5.1.4. Hasil Pembacaan *Strain Gauge* Beton 70
5.2. Pembahasan 80
5.2.1. Kuat Tekan Beton 80
5.2.2. Pola Retak Balok Beton Bertuang 81
5.2.3. Kuat Lentur Balok 88
5.2.4. Lendutan Balok 89
5.2.5. Kuat Geser 94
5.2.6. Pengaruh Tulangan Geser 98
5.2.7. Analisis Data *Strain Gauge* Beton 101
BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN 118
6.1. Kesimpulan 102
6.2. Saran 102
DAFTAR PUSTAKA 104
LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1. Redistribusi Perlawanan Geser Sesudah Terbentuknya Retak Miring 9

Gambar 2.2. Diagram Gaya Lintang dan Momen..... 10

Gambar 2.3. Distribusi Tegangan Geser..... 10

Gambar 2.4. Kerusakan Tipikal Akibat Tarik Diagonal..... 12

Gambar 2.5. Jenis Retak pada Balok Beton Bertulang 13

Gambar 2.6. Diagram-Hubungan antara Beban dan Lendutan..... 15

Gambar 2.7. Kurva Tegangan Regangan 16

Gambar 2.8. Distribusi Tegangan dan Regangan Internal Beton Bertulang 17

Gambar 2.9. Distribusi Tegangan dan Regangan Pada Balok Bertulangan Rangkap 24

Gambar 2.10. Deformasi Segmen Balok dalam Lenturan..... 25

Gambar 2.11. Defleksi Balok 27

Gambar 2.12. Hubungan Momen dan Kelengkungan 29

Gambar 2.13. Kelengkungan Balok 30

Gambar 2.14. Kurva Momen - Kelengkungan Ideal 34

Gambar 2.15. Variasi Kekuatan Geser 37

Gambar 2.16. Letak Titik Pembebanan Pengujian Geser..... 45

Gambar 4.1. Pengujian Kuat Geser 62

Gambar 4.2. Penempatan *Dial Gauge* dan Detailnya benda Uji BG - BI 63

Gambar 5.1. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BA 71

Gambar 5.2. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BB..... 72

Gambar 5.3. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BC..... 73

Gambar 5.4. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BD 74

Gambar 5.5. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BE 75

Gambar 5.6. Pola Retak dan Pola Runtuh Balok BF..... 76

Gambar 5.7. Pola Retak dan Pola Runtuh Benda Uji BG..... 77

Gambar 5.8. Pola Retak dan Pola Runtuh Benda Uji BH..... 78

Gambar 5.9. Pola Retak dan Pola Runtuh Benda Uji BI 79

Gambar 5.10. Grafik Regresi Linear BA..... 83

Gambar 5.11. Grafik Regresi Linear BB..... 83

Gambar 5.12. Grafik Regresi Linear BC..... 84

Gambar 5.13. Grafik Regresi Linear BD..... 84

Gambar 5.14. Grafik Regresi Linear BE 85

Gambar 5.15. Grafik Regresi Linear BF 85

Gambar 5.16. Grafik Regresi Linear BG 86

Gambar 5.17. Grafik Regresi Linear BH 86

Gambar 5.18. Grafik Regresi Linear BI 87

Gambar 5.19. Grafik Beban-Defleksi Balok BA - BF Rata-rata 90

Gambar 5.20. Grafik Beban-Defleksi Balok BG - BI Rata-rata 91

Gambar 5.21. Kurva Non-Dimensional Balok Non Tulangan Geser..... 91

Gambar 5.22. Kurva Non-Dimensional Balok Dengan Tulamgan Geser..... 92

Gambar 5.23. Kurva Non-Dimensional Benda Uji Geser Murni 92

Gambar 5.24. Grafik Momen Kelengkungan BD - BF 93

Gambar 5.25. Grafik Momen Kelengkungan Rata-rata BD - BF 93

Gambar 5.26. Kurva Non-Dimensional Hubungan M/max dan $\phi/\phi y$ 94

Gambar 5.27. Grafik Hubungan Beban - Regangan Dari Pembacaan *Strain Indicator*..... 101

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 2.1.	Kuat Tekan Desain Untuk Menentukan Nilai Deviasi Standar	40
Tabel 2.2.	Ukuran Maksimum Diameter Kerikil	40
Tabel 2.3.	Fraksi Volume Kerikil Sesuai Ukuran Maksimum Nominal Kerikil	40
Tabel 2.4.	Slump yang Disarankan	41
Tabel 2.5.	Jumlah Air-Campuran yang diperlukan dan kandungan udara untuk beton segar yang menggunakan pasir dengan rasio rongga 35%	41
Tabel 2.6.	Nilai Rasio w / (c+p) untuk beton tanpa BPKA	41
Tabel 2.7.	Rasio w / (c+p) untuk beton dengan BPKA	42
Tabel 2.8.	Faktor Modifikasi Deviasi Standar	42
Tabel 5.1.	Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan	65
Tabel 5.2.	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton	66
Tabel 5.3.	Kuat Lentur Balok	88
Tabel 5.4.	Beban Retak Miring Pertama	95
Tabel 5.5.	Tegangan Geser Berdasarkan Gaya Geser Pengujian	95
Tabel 5.6.	Gaya Geser Pada Retak Miring Pertama	96
Tabel 5.7.	Nilai Banding Kuat Batas, Geser Nominal dan Hasil Pengamatan	97
Tabel 5.8.	Nilai Bandung Kuat Geser Nominal dan Hasil Pengamatan...	98

Tabel 5.9. Sudut Kemiringan Retak Miring Pertama dan Retak Pada Saat Runtuh 100

ABSTRAK

Penelitian ini mempelajari perilaku geser pada balok beton mutu tinggi akibat beban terpusat yang diberikan pada jarak sepertiga bentangan . Pola retak, pola runtuh dan kekuatan batas runtuh geser dipelajari sebagai bagian dari perilaku geser, kemudian dibandingkan dengan rumus geser balok beton bertulang yang ada dalam SK SNI T-15-1991-03 dan ACI 89.

Penelitian ekperimental ini menggunakan balok beton mutu tinggi yang bertulangan liat (rasio tulangan lentur di bawah 75% rasio tulangan seimbang) dengan tulangan geser dan tanpa tulangan geser. Jarak yang dibentuk antara tumpuan dan titik pembebanan diasumsikan sebagai bentangan geser. Balok tanpa tulangan geser yang dibebani beban terpusat, runtuh geser di sekitar bentangan geser. Balok dengan tulangan geser vertikal di sekitar bentangan geser, secara teoritis tulangan geser akan berfungsi menahan komponen gaya tarik vertikal akibat retak tarik diagonal, sehingga retak geser dan keruntuhan geser dapat dicegah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa retak geser yang terjadi merupakan kelanjutan dari retak lentur, keruntuhan geser terjadi ketika retak geser masuk ke daerah lintasan gaya tekan di sekitar bentangan geser. Didasarkan pada teori runtuh Kani, balok tanpa tulangan geser (A,B,C) runtuh mengikuti pola geser untuk a/d = 2,584. Balok dengan tulangan geser (D,E,F) dapat mencegah kegagalan geser di sekitar bentangan geser dan keruntuhan berpindah ke lokasi yang lebih lemah. Pengaruh variasi penggunaan tulangan geser pada balok memperlihatkan adanya peningkatan kapasitas geser terhadap balok tanpa tulangan geser berturut-turut sebesar 28,9% , 24,9% , dan 39,2%. Begitu pula kapasitas beban maksimum terhadap balok tanpa tulangan geser berturut-turut sebesar 35,13% , 64,23% , dan 60,26%. Kuat geser saat retak miring pertama pada balok beton bertulang menunjukkan kedekatan hasil antara pengamatan dan hitungan dengan persamaan-persamaan empiris.

Kata kunci = pola retak, tulangan geser, retak geser, lintasan gaya tekan, bentangan geser

DAFTAR LAMPIRAN

Halaman

Lampiran 1. Hasil Pemeriksaan Berat Jenis Pasir dan Kerikil/Batu Pecah 105

Lampiran 2. Pemeriksaan Gradasi Pasir 106

Lampiran 3. Hasil Pemeriksaan Gradasi Batu Pecah 109

Lampiran 4. Hasil Uji Tarik Baja 113

Lampiran 5. Hasil Uji Tekan Silinder Beton 118

Lampiran 6. Perencanaan Proporsi Campuran Beton 120

Lampiran 7. Perencanaan Balok Beton Bertulang 125

Lampiran 8. Data Pengujian P - Δ balok BA, BB, BC 134

Lampiran 9. Grafik Beban - Defleksi balok BA, BB, BC 137

Lampiran 10. Data Pengujian P - Δ balok BD, BE, BF 141

Lampiran 11. Data Momen Kelengkungan balok BD, BE, BF 141

Lampiran 12. Grafik Beban - Defleksi balok BD, BE, BF 148

Lamporan13. Grafik Beban - Defleksi rata-rata balok BD - BF 149

Lampiran 14. Grafik Momen Kelengkungan balok BD, BE, BF 152

Laampiran15. Data Pengujian P - Δ Benda Geser Murni 158

Lampiran 16. Grafik Beban - Defleksi Benda Uji Geser Murni 160

Lampiran 17. Data Hubungan P/Pmax dan l/h 163

Lampiran 18. Data Hasil Uji Regangan Beton dengan *Strain Gauge* Beton. 167

Lampiran 19. Gambar Pengujiaan Slump, Pelaksanaan, Pengecoran dan Pemadatan 169

Lampiran 20. Gambar Persiapan Pengujian Balok dan Keadaaan Balok Setelah Pengujian 172

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Salah satu jenis material bangunan yang penting, banyak digunakan untuk struktur dalam bangunan teknik sipil adalah beton (seperti gedung, jalan/jembatan dan lain-lain). Beton adalah bahan yang sangat tepat untuk digunakan sebagai sistem konstruksi bangunan. Selain beton sangat fleksibel dan dapat dibentuk sesuai dengan bentuk struktur atau konstruksi yang diinginkan, beton juga memiliki sifat khusus. yaitu kemampuan yang besar dalam menahan desak disamping bahan konstruksi lainnya, tetapi di sisi lain beton sangat lemah menahan tarik. Beton dikombinasikan dengan baja sebagai tulangannya untuk menahan lentur dan geser, sehingga diperoleh bahan konstruksi yang cukup ideal karena dapat menahan tekan, tarik, geser, dan torsi. Oleh karena itu beton merupakan bahan konstruksi utama yang banyak dipilih.

Balok beton bertulang merupakan material yang tidak homogen, sehingga kombinasi antara kegagalan lentur, tarik diagonal dan kegagalan tekan geser bisa saja terjadi secara bersamaan. Untuk memperlambat kegagalan balok (membatasi proses retakan) dan menahan baja lentur agar tetap pada tempatnya, maka diperlukan penulangan geser yang memadai.

Dengan demikian keruntuhan yang bersifat getas dapat dihindari, karena sifat keruntuhan yang getas tidak memberikan peringatan awal.

Agar mendapatkan beton yang berkuatan tinggi dengan koefisien susut dan rangkak yang lebih kecil dan mempunyai ketegaran retak yang lebih tinggi dibandingkan beton biasa, maka diupayakan berbagai cara untuk dapat meningkatkan sifat-sifat mekanis beton antara lain: *workability*, *strength*, *durability*, *permeability*, dan *corrosivity*. Parameter kekuatan beton dinyatakan dengan kekuatan karakteristik tekannya dan beton dikatakan sebagai beton mutu tinggi jika mempunyai kekuatan tekan lebih tinggi dari 43 Mpa.

Banyak penelitian yang dilakukan untuk mengetahui sejauh mana ketentuan pada beton normal dapat digunakan untuk beton mutu tinggi. Dalam perencanaan elemen struktur yang menggunakan beton mutu tinggi terdapat perbedaan perilaku geser dibandingkan beton biasa, karena itu beberapa ketentuan-ketentuan dalam perencanaan juga berbeda. Untuk mengetahui besar pengaruh kekuatan tekan dan geser dari sebuah balok beton mutu tinggi, maka perlu dilakukan penelitian laboratorium yang difokuskan pada pemakaian tulangan geser dan tanpa tulangan geser.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian Tugas Akhir ini adalah untuk mengetahui :

1. pola retak geser pada balok beton bertulang mutu tinggi.
2. pengaruh pemakaian beton mutu tinggi terhadap perilaku geser balok.

3. kemampuan balok beton bertulang mutu tinggi tanpa tulangan sengkang dan dengan tulangan sengkang dalam menerima gaya geser .

1.3. Manfaat Penelitian.

Penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk perencanaan beton mutu tinggi yang saat ini mulai bayak dibutuhkan. Selain itu beberapa hasil penelitian terdahulu (Ferguson, 1986) mendapatkan bahwa perencanaan gaya geser balok beton bertulang yang mengacu pada peraturan – peraturan yang ada, belum dapat menjawab beberapa masalah yang timbul, di antaranya tentang bentangan geser atau penampang kritis balok. Suatu usaha untuk mendapatkan jawaban tersebut serta meninjau kembali konsep geser yang ada dalam peraturan-peraturan beton bertulang mutu tinggi akan dilakukan dalam penelitian ini.

1.4. Rumusan Masalah

1. seberapa besar pengaruh pemakaian beton mutu tinggi terhadap kekuatan geser pada balok dan kekuatan geser murni,
2. bagaimana kemampuan balok beton bertulang mutu tinggi dalam menerima geser dengan adanya tulangan geser dan tanpa tulangan geser.

1.5. Batasan Masalah

Batasan-batasan yang dipakai dalam Tugas Akhir sbb ini:

1. Standar yang digunakan adalah SK-SNI-15-1991-03 dan ACI Building Code.

2. Mutu beton yang digunakan mempunyai kuat tekan fc' $\geq$ 43 Mpa, untuk semua sampel.
3. Agregat halus yang digunakan diambil dari Gunung Merapi.
4. Agregat kasar digunakan batu pecah dengan ukuran 1-1 dan 1-2 dari Celereng.
5. Semen digunakan jenis 1 merk Gresik kemasan 50 kg/zak.
6. Mutu baja rencana f_y = 390 Mpa.
7. Sampel dirancang menggunakan tulangan sebelah dengan diameter 13 mm, dengan dan tanpa tulangan sengkang dengan diameter 6 mm.
8. Uji desak beton dipakai benda uji silinder ∅ 15 cm, tinggi 30 cm.
9. Benda uji ini disesuaikan dengan kapasitas alat uji laboratorium, dan dimensi benda uji dapat dilihat pada halaman 55-56.
10. Perbandingan campuran beton sesuai dengan mutu beton (*mix design*).
11. Nilai *slump* pada adukan beton diterapkan 2,5-5 cm untuk sampel adukan beton.
12. Balok uji didasarkan pada balok sederhana (*simple beam*).

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1. Tinjauan Pustaka

2.1.1. Dasar Struktur Beton Bertulang

Beton dibentuk oleh pengerasan campuran semen, air, agregat halus/agregat kasar, kadang-kadang diberi campuran tambahan lainnya. Campuran yang masih plastis ini dicor ke dalam acuan dan dirawat untuk mempercepat reaksi hidrasi campuran semen dengan air yang menyebabkan pengerasan beton. Bahan yang terbentuk ini mempunyai kuat tekan yang tinggi dan ketahanan tarik yang rendah. Oleh karena itu penguatan tarik dan geser harus diberikan pada daerah tarik pada penampang balok, hal ini dilakukan agar beton dapat digunakan untuk komponen struktur yang terdapat gaya tarik dan tekan secara bersamaan. (Tjokrodimulyo, 1992).

2.1.2. Material Pembentuk Beton.

1. Semen *Portland*

Semen adalah bahan hidrolis yang dihasilkan dengan cara menghaluskan klinker yang 70% - 80% terdiri dari Trikalsium silikat ($3\ CaO\ SiO_2$) dan Dikalsium silikat ($2\ CaO\ SiO_2$) yang bersifat hidrolis dengan gips sebagai bahan tambahan. Semen yang terutama terdiri dari senyawa kapur, silika dan aluminat,

dapat membentuk pasta ketika dicampurkan sejumlah air, dan menjadi bahan pengikat dari agregat dalam campuran beton. (Supartono, 1992).

2. Agregat

Beton, umumnya mengandung 65% - 80% agregat (agregat halus dan kasar), yang digunakan sebagai bahan pengisi. Karena itu untuk mendapatkan beton yang baik, diperlukan agregat yang berkualitas baik (dengan pembagian ukuran butiran yang baik pula), sehingga dapat memberikan stabilitas volume dan keawetan yang lebih tinggi, sebagai beton berkekuatan tinggi (Supartono, 1992). Maksud penggunaan bahan batuan (agregat) adalah :

a. penghematan dari penggunaan semen *portland*,
b. menghasilkan kekuatan yang besar pada betonnya,
c. mengurangi susut pengerasan pada betonnya,
d. mencapai susunan pampat beton dengan gradasi (variasi besar) yang baik dari bahan bantuannya, mengontrol *workability* (sifat mudah dikerjakan) adukan beton plastis dengan gradasi yang baik.

3.Air

Air merupakan bahan dasar pembuat beton yang penting dan diperlukan untuk bereaksi dengan semen, serta untuk menjadi bahan pelumas antara butir-butir agregat agar mudah dipadatkan dan dikerjakan. Hal yang penting dalam pemilihan air antara lain kejernihannya dan air tidak mengandung bahan-bahan perusak (fosfat, asam alkali, minyak/bahan-bahan organis atau garam). Air yang

dipakai pada penelitian ini sebaiknya merupakan air tawar yang dapat diminum (Supartono, 1992).

4.*Superplasticizer*

Superplastisizer atau *high range water reducer* dalam hal ini mutlak diperlukan karena kondisi w/c yang umumnya sangat rendah pada beton mutu tinggi, untuk dapat mengontrol dan menghasilkan nilai *slump* yang optimal pada beton segar (*workable*), sehingga bisa menghasilkan kinerja pengecoran beton yang baik. Namun dalam segala hal, penggunaan *superplasticizier* perlu sesuai dengan standar ASTM – C . 494 – 81 Tipe F (Supartono, 1998).

5.*Silica fume*

Silica fume merupakan produk sampingan sebagai abu pembakar dari proses pembuatan *silicon metal* atau *silicon alloy* dalam tungku pembakaran listrik. *Silica fume* ini juga bersifat pozzolan, dengan kadar kandungan senyawa silika-dioksida (SiO_2) yang sangat tinggi (> 90 %), dan ukuran butiran partikel yang sangat halus, yaitu sekitar $\frac{1}{100}$ ukuran rata-rata partikel semen. Sebagai pengganti semen pemakaian *silica fume* dapat menghasilkan beton mutu tinggi. *Silika fume* dapat dipakai dalam dua cara, yaitu:

a. digunakan sebagai *additive* dalam jumlah yang kecil untuk mendapatkan beton yang berkualitas.
b. digunakan sebagai pengganti semen (sebesar 5%-15%) untuk mendapatkan beton mutu tinggi (Gideon Hadi Kusuma, 1992).

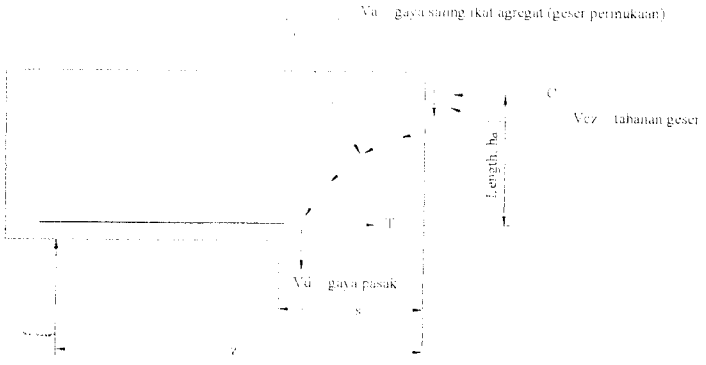
2.1.3. Perilaku Geser Pada Pembebanan

Balok beton murni tanpa tulangan sangat kecil ketahanannya terhadap gaya geser dan lentur, dibandingkan kekuatan tekannya. Sebagai akibatnya, balok tersebut mengalami kegagalan pada sisi tariknya pada beban yang rendah, jauh sebelum kekuatan beton pada sisi tekan dapat dimanfaatkan sepenuhnya.

Pada balok bertulang, geser yang disebabkan oleh gaya lintang terutama sekali dipikul oleh penulangan longitudinal selain oleh tulangan geser, sedangkan beton biasanya hanya dapat menahan tekan yang terjadi. Kombinasi komposit dari kedua material itu dapat berfungsi dengan baik dan bisa dicegah bila terjadi slip atau tergelincir beton dari tulangan (Nilson, 1993).

Transfer dari geser di dalam unsur-unsur beton bertulang terjadi dengan suatu kombinasi dari antara beberapa mekanisme sebagai berikut, seperti yang diperlihatkan di dalam gambar 2.1.

1. perlawanan geser dari beton yang belum retak, V_{cz}.
2. gaya ikat (*interlock*) antara agregat (transfer geser antara permukaan) V_a dalam arah tangensial sepanjang suatu retak yang serupa dengan gaya gesek akibat saling ikat yang tidak teratur dari agregat sepanjang permukaan yang kasar dari beton pada masing-masing pihak retak
3. aksi pasak (*dowel action*) V_d, sebagai perlawanan dari penulangan longitudinal terhadap gaya tranversal.
4. aksi pelengkung (*arch action*) pada balok relatif tinggi,
5. perlawanan tulangan geser V_s, dari sengkang vertikal atau miring.

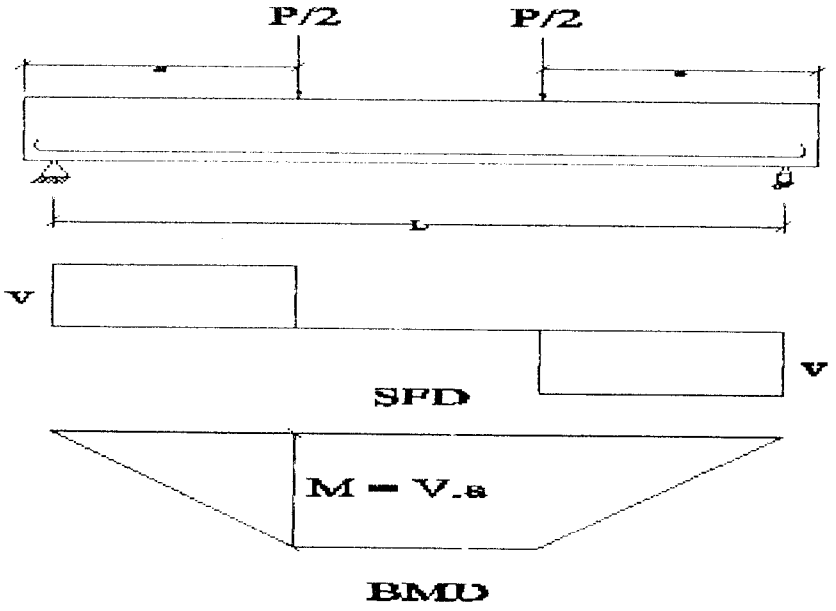


Gambar 2.1 Redistribusi perlawanan geser sesudah terbentuknya retak miring

Kemampuan dari suatu balok di dalam memikul tambahan beban setelah terbentuknya retak miring tergantung dari rapat tidaknya sebagian dari geser yang sebelumnya dipikul oleh beton yang retak, didistribusikan kembali melalui retak miring. Keberhasilan dari semua mekanisme 1 sampai 4 yang tersebut di atas dalam redistribusi geser, akan menentukan kapasitas geser dan derajat keseriusan dari pembentukan retak (Wang, Salmon,1986).

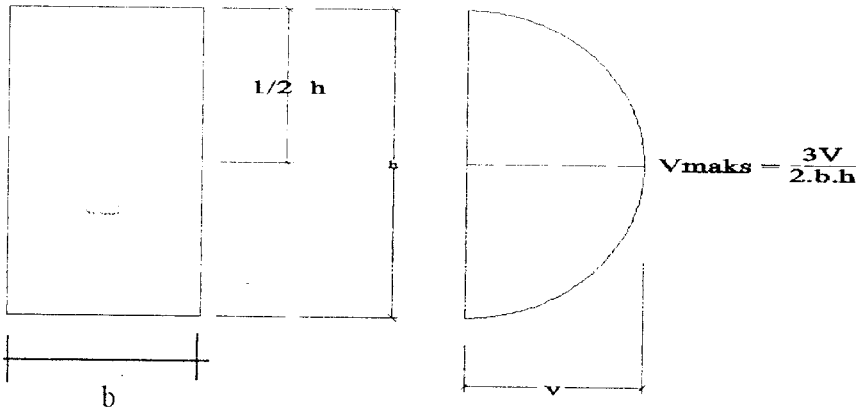
2.1.4. Analisa Tegangan Geser Pada Balok

Perencanaan balok beton bertulang terhadap gaya lintang ternyata sesuai dengan lentur murni. Beban ini dapat digambarkan gaya lintang yang menyatakan arah pergeseran yang cenderung terjadi pada balok. Untuk suatu balok sederhana yang dibebani dengan dua beban terpusat yang simetris, perbandingan M/V dapat dianggap sebagai daerah sejarak a yang mempunyai geser yang konstan. Jarak a dikenal sebagai bentang geser dan hal ini ditunjukkan pada gambar 2.2



Gambar 2.2. Diagram gaya lintang dan momen

Distribusi geser dapat digambarkan sebagai bentuk parabolis pada penampang seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.3. Distribusi tegangan geser

$$v = \frac{V.s}{b.I} \quad \text{.....(2.1)}$$

V = gaya lintang,

s = momen statis dari bagian tergeser terhadap garis netral,

b = lebar balok,

I = momen intersia tampang

Untuk penampang persegi nilai maksimal tegangan geser

$$v_{maks} = \frac{V.s}{b.I} = \frac{3V}{2.b.h} \quad \ldots\ldots (2.2)$$

Berdasarkan SKSNI T-15-1991-03 Bab 3.4. pasal 3.4.1.1 menetapkan bahwa gaya lintang yang bekerja pada penampang yang ditinjau harus direncanakan sehingga

$$V_u \leq \phi V_n \quad \ldots\ldots (2.3)$$

dengan V_u adalah gaya lintang pada penampang yang ditinjau

Dengan memperhatikan faktor-faktor beban,

$$V_u = 1{,}2\ V_d + 1{,}6\ V_l \quad \ldots\ldots (2.4)$$

dengan,

V_d = gaya lintang pada penampang akibat beban mati,

V_l = gaya lintang pada penampang akibat beban hidup.

Kekuatan geser nominal (V_n) yang dihitung adalah sebagai berikut :

$$V_n = V_c + V_s \quad \ldots\ldots (2.5)$$

Dengan ,

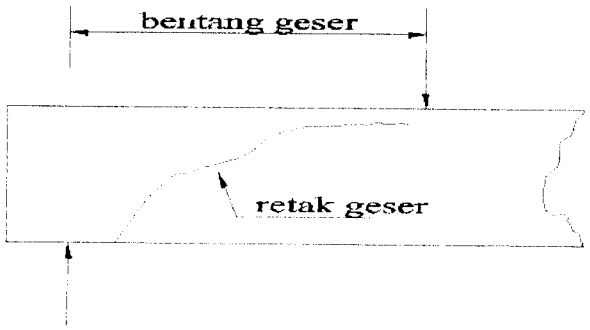
V_c = kekuatan geser nominal pada beton,

V_s = kekuatan geser nominal pada tulangan geser,

ϕ = faktor reduksi kekuatan.

2.1.5. Beberapa Jenis Retak pada Balok

Tegangan tarik dengan variasi besar dan kemiringan, baik sebagai akibat geser saja maupun gabungan dengan lentur, akan timbul disetiap tempat disepanjang balok, yang harus diperhitungkan pada analisis dan perencanaan. Pada balok beton tanpa tulangan, kerusakan akibat geser pada umumnya akan terjadi pada daerah sepanjang kurang lebih tiga kali tinggi efektif balok, dan dinamakan bentang geser. Pada gambar 2.4 retak akibat tarik diagonal merupakan salah satu cara terjadinya kerusakan geser.

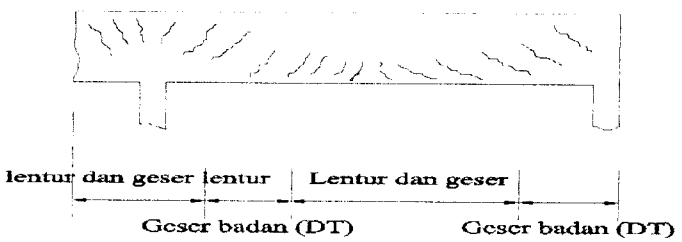


Gambar 2.4. Kerusakan tipikal akibat tarik diagonal

Untuk bentang geser yang lebih pendek, kerusakan akan timbul sebagai kombinasi dari pergeseran, remuk dan belah. Sedangkan untuk balok beton tanpa tulangan dengan bentang geser lebih panjang, retak karena tegangan tarik lentur akan terjadi lebih dahulu sebelum timbul retak karena tegangan tarik diagonal. Dengan demikian terjadinya retak tarik lenturan pada balok tanpa tulangan merupakan peringatan awal kerusakan geser.

Pada dasarnya, macam-macam retak dalam balok dibagi menjadi tiga jenis yang dijelaskan sebagai berikut ini (gambar 2.5)

1. retak lentur (*flexural crack*), terjadi didaerah yang mengalami momen yang besar, proses terjadinya retak lentur dimulai dari tepi balok tarik terus masuk merambat ke dalam balok dengan arah hampir vertikal ($\theta \cong 0$). Kecenderungan retak lentur terjadi pada balok yang semakin langsing.
2. retak geser lentur (*flexural shear crack*), terjadi pada balok sebagai kelanjutan dari retak lentur, dan lebar atau panjang retak ini dikendalikan oleh adanya tulangan memanjang. Bila tegangan tarik diagonal pada daerah diatas retak ini melampaui kekuatan tarik beton, retak tersebut akan menjalar membelok ke arah diagonal. Retak jenis ini dapat dijumpai pada balok beton bertulang biasa dan prategang.
3. retak geser badan (*web shear crack*), adalah retak miring yang tanpa didahului oleh retak lentur, biasa terjadi pada daerah garis netral penampang dengan gaya geser maksimum dan tegangan aksial sangat kecil ($\theta \cong 45^{o}$). Kejadian retak geser badan jarang dijumpai pada balok beton bertulang biasa, tetapi lebih sering dijumpai pada balok beton prategang berbentuk huruf I dengan badan tipis dan *flens* (sayap lebar).



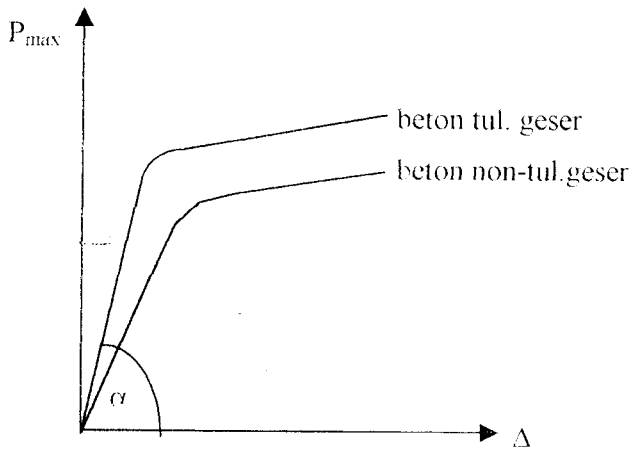
Gambar 2.5. Jenis retak pada balok beton bertulang (Nawy,1990)

Jadi, keretakan diagonal pada badan balok dapat berkembang sebelum terjadinya retak lentur (*flexural crack*) ataupun sebagai perpanjangan retak lentur yang telah ada. Jenis retak diagonal *web-shear cracks* terjadi pada titik yang tegangan gesernya melampaui kekuatan tarik beton, dan *flexural-shear cracks* timbul apabila kombinasi tegangan geser dan tegangan tarik melampaui kekuatan tarik beton. *Flexural-shear cracks* ini hampir selalu diawali dengan keretakan lentur (Standar Baru SNI T-15-1991-03).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa pada beton mutu tinggi, bagian retak tarik diagonal lebih halus bila dibandingkan dengan beton normal. Pada beton mutu normal retak-retak biasanya berkembang pada ikatan (*interface*) antara agregat dengan pasta semen, kemudian berkembang melalui pasta kesegala arah. Sebaliknya retak pada beton mutu tinggi terjadi melalui agregat yang disebabkan oleh perbedaan kekuatan dan kekakuan relatif pasta terhadap batuan lebih kecil atau tidak mencukupi. (5^{th} *international symposium on utilization of HSC/ HPC*, Paris, 1996).

2.1.6 Hubungan Beban dan Lendutan

Hubungan beban (P) dengan lendutan (Δ) diperoleh dari hasil uji pembebanan (*loading test*). Sesuai yang dilakukan Suhendro (1991) pemberian beban pada balok akan mengakibatkan penurunan (defleksi).



Gambar 2.6 Diagram hubungan antara beban (P) dan lendutan (Δ)

Dari hubungan antara kekuatan (P) dan lendutan (Δ) pada Gambar 2.6, maka diperoleh kekakuan balok (k), lihat persamaan :

$$k = tg\alpha = \frac{P}{\Delta} \qquad \text{.....(2.6)}$$

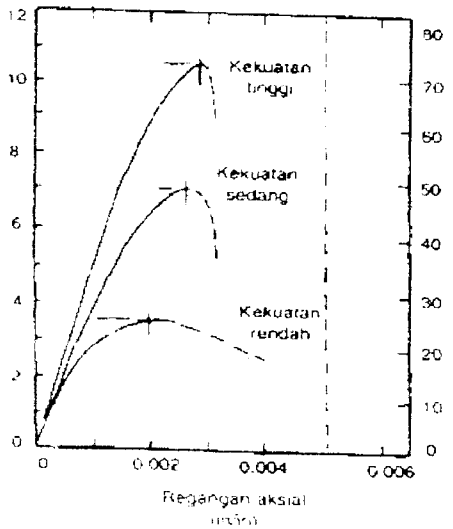
2.2. Landasan Teori

2.2.1. Umum

Kekuatan beton diukur dari keawetan dari sifat perubahan bentuknya, yang dipengaruhi oleh beberapa faktor penentu antara lain kekuatan mortar, ikatan antara agregat dan mortar dan kekuatan agregat. Pada beton mutu tinggi, jumlah retak mikro ikatan lebih sedikit karena kompatibilitas kekuatan dan sifat elastis agregat dengan mortar lebih baik, serta makin tingginya kekuatan lekatan tarik (*tensile bondstrength*), juga kekuatan terhadap beban lebih tinggi dibandingkan pada beton normal.

Dengan mengamati kurva tegangan-regangan kuat beton pada Gambar 2.7. (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G-Editor, 1985), tampak karakteristik yang membedakan beton mutu lebih tinggi dari beton normal. Sudut awal kurva-E lebih

curam, bagian yang menarik dari kurva-E lebih linier, sudut dari bagian yang menurun kurva-E lebih curam dan batas regangan lebih rendah. Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 28 Mpa-83 Mpa (4.000 psi-12.000 psi), perbedaan tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan.



Gambar 2.7. kurva tegangan-regangan

Oleh karena itu, rumus modulus elastisitas untuk beton normal dipandang *overestimate* dan tidak memenuhi. Untuk beton mutu tinggi dengan kuat desak beton 41-83 Mpa, dianjurkan untuk menggunakan rumus (Standar baru SNI T-15-1991-03) sebagai berikut:

$$Ec = (3320\sqrt{Fc'} + 6900)(Wc/2300)^{1,5} \text{ Mpa} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.7)$$

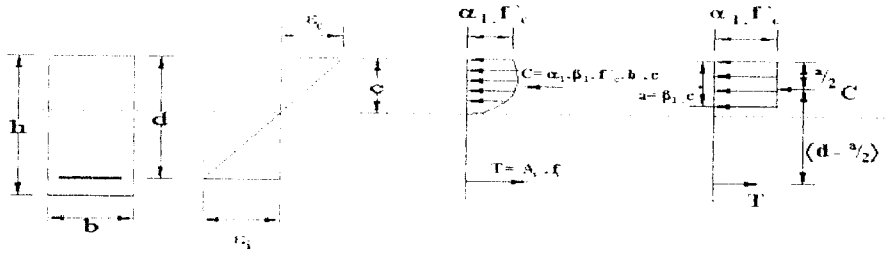
dengan Ec = modulus elastisitas beton tekan, dalam satuan N/mm^2

Wc = berat beton dalam satuan kg/m^3

fc' = kuat tekan beton lebih dari 41 Mpa

2.2.2. Perencanaan Balok Beton Bertulang Mutu Tinggi

Dalam analisis penampang balok disini, telah ditetapkan dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari lebar balok (b), tinggi efektif balok (d), tinggi total (h), kuat tekan beton (f_c'), kuat leleh baja (f_y), dan modulus elastisitas baja Es = 2.10^5 Mpa). Distribusi tegangan dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Distribusi tegangan dan regangan internal beton bertulang

Untuk balok yang disebabkan oleh keruntuhan akibat melelehnya tegangan baja menunjukkan bahwa blok tegangan ekivalen aman untuk digunakan bahkan untuk tegangan tekan diatas 83 Mpa atau 12.000 psi (Nilson, A.H. dalam Russell, H.G-Editor, 1985). Karena itu dalam analisis lentur di sini, digunakan balok tegangan tekan ekivalen sebagai dasar perhitungan kemampuan balok dalam menahan lentur.

Dari gambar 2.8. dan berdasarkan prinsip keseimbangan gaya-gaya horisontal, gaya tekan C dalam beton dan gaya tarik T dalam baja harus seimbang satu sama lain, yaitu: C = T, sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\alpha_1.\beta_1.fc'.a.b = A_s.f_s, \quad \ldots\ldots(2.8)$$

dengan :

α_1 = intensitas tegangan pada balok tegangan,

β_1 = rasio tinggi blok tegangan terhadap tinggi sumbu netral.

b = lebar balok,

h = tinggi total balok,

A_s = luas baja tarik,

f_s = tegangan dalam tarik baja

Akibat gaya tekan C dan gaya tarik T yang dipisahkan oleh lengan momen (d-a/2) seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.8. dihasilkan momen tahanan internal M sebagai berikut, bila terhadap gaya tarik:

$$M = T.[d - \frac{a}{2}] \quad \text{.....(2.9)}$$

dan jika ditinjau terhadap gaya tekan beton:

$$M = C.[d - \frac{a}{2}] \quad \text{.....(2.10)}$$

Analisis penampang persegi bertulangan tarik terhadap tulangan lentur

1. Tegangan yang terjadi pada baja tulangan (f_s), sama dengan tegangan luluh baja (f_y), sehingga gaya tarik dalam balok:

   $T=A_s.f_s$ .....(2.11)

   Dengan luas baja tarik sebagai berikut :

   $A_s = \rho.b.d$ .....(2.12)

   Dengan : ρ = rasio penulangan

   d = tinggi efektif balok

2. Pembatasan penulangan tarik

Berdasarkan persamaan (2.12) diperoleh rasio tulangan tarik

$$\rho = \frac{As}{b.d} \quad \ldots\ldots (2.13)$$

untuk menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba-tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa tulangan, maka diperlukan batas minimum tulangan, yaitu:

$$\rho_{min} = \frac{1,4}{f_y} \quad \ldots\ldots (2.14)$$

sehingga dipenuhi persyaratan:

$\rho \geq \rho_{min}$

Rasio baja minimum tersebut yang tersebut yang termasuk dalam peraturan AC 1989, konservatif untuk balok-balok beton bertulang persegi empat pada semua tingkat kekuatan, kecuali untuk beton dengan mutu sangat tinggi dimana f'c > 100 Mpa. Menurut Nilson, untuk menjamin pola keruntuhan daktail di dalam lentur, maka peraturan ACI menetapkan batasan ρ maksimum adalah sebagai berikut

$$\rho_{min} = 0,75.\alpha\beta_1 \left[\frac{f'c}{f_y}\right]\left[\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu}+\varepsilon_y}\right] \quad \ldots\ldots (2.15)$$

Pada blok tegangan dalam gambar 2 8 nilai rasio tinggi balok tegangan terhadap sumbu netral β_1, untuk beton mutu tinggi berbeda dibandingkan dengan beton normal seperti yang terdapat dalam peraturan ACI (Ibrahim, H-H dan Mac Gregor,J.G, 1997).

Pada beton normal, nilai β_1 adalah sebagai berikut

$0{,}65 \leq \beta_1 \leq 0{,}85$ ..... (2.16)

nilai β_1 pada persamaan diatas tidak konservatif untuk dipakai dalam perhitungan balok beton mutu tinggi. Beberapa percobaan yang dilakukan oleh Cusson dan Pault, memberikan hasil yang lebih rendah dari nilai tersebut. Pada prinsipnya β_1 cenderung lebih rendah dengan meningkatnya kekuatan beton. Adapun nilai β_1 untuk beton mutu tinggi sebagai berikut :

$$\beta_1 = 0{,}95 - \frac{fc'}{400} \geq 0{,}70 \quad \text{..... (2.17)}$$

fc' dalam Mpa

Demikian halnya dengan parameter yang menunjukkan intensitas tegangan pada blok tegangan α_1. Untuk beton normal biasanya 0,85; pada beton mutu tinggi nilainya menjadi-lebih rendah yaitu :

$$\alpha_1 = 0{,}85 - \frac{fc'}{800} \geq 0{,}70 \quad \text{..... (2.18)}$$

fc' dalam Mpa

Untuk nilai regangan batas beton dengan kekuatan 4000 psi-12000psi (28 Mpa-83 Mpa), perbedaannya tidak begitu besar, sehingga asumsi regangan batas 0,003 sebagaimana ditentukan dalam peraturan ACI 1989 dapat digunakan, sedangkan untuk menentukan nilai regangan luluh baja ε_y diperoleh :

$$\varepsilon_s = \frac{f_y}{E_s} \quad \text{..... (2.19)}$$

1. Menentukan tinggi balok tegangan tekan

   Tinggi balok tegangan tekan dapat diperoleh berdasarkan keseimbangan gaya internal balok persamaan (2.8) sebagai berikut :

   $A_s.f_s = \alpha_1.\beta_1.fc'.b.c$

   Dengan $a = \beta_1.C$, maka

   $$a = \frac{A_s.f_y}{\alpha_1.fc'.b} \quad \text{.....(2.20)}$$

   dengan:

   a = tinggi balok tegangan tekan

2. Menghitung kuat lentur nominal

   Kuat lentur nominal balok beton bertulang persegi empat dengan mutu tunggi dapat dihitung dengan persamaan biasa:

   $$M_n = A_s.f_y\left(d - \frac{a}{2}\right) \quad \text{.....(2.21)}$$

   dengan $\left(d - \frac{a}{2}\right)$ = lengan momen internal, yaitu jarak antara resultan gaya tekan beton dengan gaya tarik ditulangan.

   Persamaan diatas dapat dinyatakan juga dengan persamaan sebagai berikut :

   $$M_n = \rho.b.d^2.f_y\left[1 - \frac{1}{1}\rho\left(\frac{f_y}{\alpha_1.fc'}\right)\right] \quad \text{.....(2.22)}$$

   dengan $\frac{f_y}{\alpha_1.fc'} = m$, maka:

   $$M_n = \rho.b.d^2.f_y\left(1 - \frac{1}{2}\rho.m\right) \quad \text{.....(2.23)}$$

dan koefisien lawan :

$$k = \frac{M_n}{b.d^2} = \rho.f_y\left(1 - \frac{1}{2}\rho.m\right) \quad \text{..... (2.24)}$$

atau

$$\rho = \frac{1}{m}\left(1 - \sqrt{1 - \frac{2.m.k}{f_y}}\right) \quad \text{..... (2.25)}$$

Persyaratan kekuatan untuk lentur dapat dinyatakan berikut ini :

$\varnothing$ Mn > Mu

dengan : Mu = momen akibat beban berfaktor,

$\varnothing$ = faktor reduksi kekuatan.

Bila suatu penampang persegi dengan ukuran yang telah ditetapkan, diperlukan mempunyai kekuatan yang lebih besar dari kekuatan yang tersedia dengan hanya menggunakan tulangan tarik saja (tulangan sebelah). Diperlukan tambahan tulangan tarik dan pemberian tulangan tekan. Dalam distribusi diagram tegangan pada balok bertulangan rangkap, tegangan internalnya dapat dianggap menjadi tiga bagian, yaitu:

1. pada arah tekan beton : $C_c = \alpha_1.fc'.a.b$
2. pada daerah tekan baja tulangan: $C_s = A_s'.f_y$
3. pada daerah tarik baja tulangan: $T = As.f_y$

Prosedur untuk perencanaan penampang persegi dengan tulangan rangkap : berdasarkan keseimbangan horisontal gaya internal

Cc + Cs = T, dihasilkan persamaan:

$$\alpha_1.fc'.a.b + As'.f_y = As.f_y \quad \text{.....(2.26)}$$

dengan tinggi blok tegangan adalah:

$$a = \frac{(A_s - A_s').f_y}{\alpha_1 .fc'.b} \quad \text{.....(2.27)}$$

1. Momen ketahanan nominal penampang adalah:

$$Mn = \alpha_1 .fc'.a.b.\left(d - a/2\right) + A_s'.fy(d - d') \quad \text{.....(2.28)}$$

atau dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$Mn = (A_s - A_s')f_y.\left(d - a/2\right) + A_s'.f_y(d - d') \quad \text{.....(2.29)}$$

2. Bila tegangan dalam persamaan $\varepsilon_s' = 0{,}003\,\frac{c - d'}{c}$ dan $\varepsilon_s = 0{,}003\,\frac{d - c}{c}$ tidak dipenuhi, mungkin tegangan tulangan tekan ataupun tulangan tarik tidak mencapai tegangan leleh materialnya, sehingga persamaan tersebut tidak berlaku lagi. Untuk dapat menentukan momen ketahanan penampang, tegangan aktual harus dihitung, yang dapat dilakukan dengan persamaan:

$$\varepsilon_s' = 0{,}003\,\frac{c - d'}{c} = 0{,}003\,\frac{a - \beta_1 .d'}{a}$$

selanjutnya diperoleh:

$$f's = \varepsilon_s'.Es = 0{,}003.Es\left(\frac{a - \beta.d'}{a}\right) \quad \text{.....(2.30)}$$

3.Melalui substitusi nilai ρ dari persamaan (2.27) dan dibagi (bd), persamaan diatas dapat dirumuskan menjadi:

$$f_s' = 600\left(1 - \frac{\beta.d - a}{a}\right) \quad \text{.....(2.31)}$$

dan,

$$f_s' = \varepsilon_s' Es = 0{,}003.Es\left(\frac{\beta.d' - a}{a}\right) \quad \text{.....(2.32)}$$

dengan cara yang sama,

$$f_s = 600\left(\frac{\beta.d'}{a} - 1\right) \quad \text{.....(2.33)}$$

dengan mensubstitusikan pers. (2.30) dan (2.32) kedalam pers. (2.26), diperoleh:

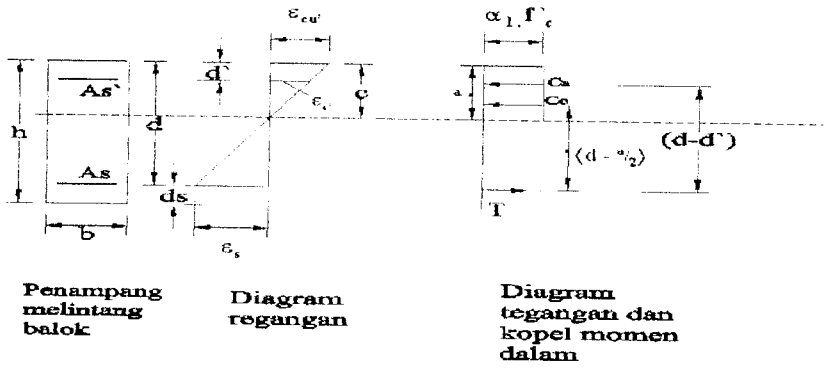
$$= \frac{As.fy - As'.fs'}{\alpha_1.f'c.b} \quad \text{.....(2.34)}$$

sehingga, momen tahanan penampang menjadi:

$$Mn = \alpha_1.fc'.\rho.b\left(d - a/2\right) + As'.fs'(d - d') \quad \text{.....(2.35)}$$

momen desain dapat diperoleh dengan memberikan faktor reduksi tertentu, yang disarankan dalam SNI-91.

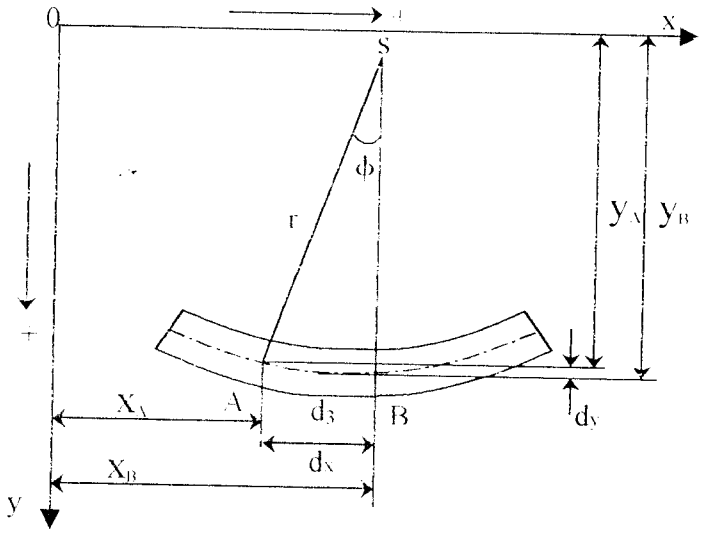
Distribusi tegangan pada balok bertulangan rangkap, dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 2.9. Distribusi tegangan dan regangan pada balok bertulangan rangkap.

2.2.3. Persamaan Differensial Untuk Defleksi

Teori defleksi balok dipengaruhi oleh geometri atau kinematika dari sebuah elemen balok. Menurut **Sumono (1982),** sumbu-balok yang semula lurus, menjadi garis bengkok (melengkung) setelah balok menahan momen-lengkung. Garis-bengkok yang di-wujudkan oleh sumbu-balok itu dinamakan garis-elastis atau garis-lentur.



Gambar 2.10 Deformasi segmen balok dalam lenturan

Dari Gambar 2.10. kita dapat menyelidiki dua titik A dan B, sebagai berikut:

$$d_y = y_B - y_A$$

$$d_x = x_B - x_A$$

$$AB = d_s = \sqrt{d_x^2 + d_y^2} = d_x \sqrt{1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2} \quad \text{.....(2.36)}$$

Garis-garis normal yang ditarik dari titik-titik A dan B memotong di titik S sehingga SA = r adalah radius bengkokan di A atau $\frac{1}{r}$ = derajat bengkokan di A.

Dari Gambar 2.10 dapat kita lihat bahwa:

$$AB = d_s = r.d\phi \quad \text{.....(2.37)}$$

$$r = \frac{d_s}{d\phi} = \frac{d_s}{dtg\phi} \cdot \frac{dtg\phi}{d\phi} \quad \text{.....(2.38)}$$

untuk $$\frac{dtg\phi}{d\phi} = \sec^2\phi = 1 + tg\phi = 1 + \left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2 \quad \text{.....(2.38a)}$$

Jika persamaan (2.36) dan (2.38a) disubtitusikan ke persamaan (2.38), maka:

$$r = \frac{d_x\sqrt{1+\left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2}}{dtg\phi}\left\{1+\left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2\right\} \quad \text{.....(2.39)}$$

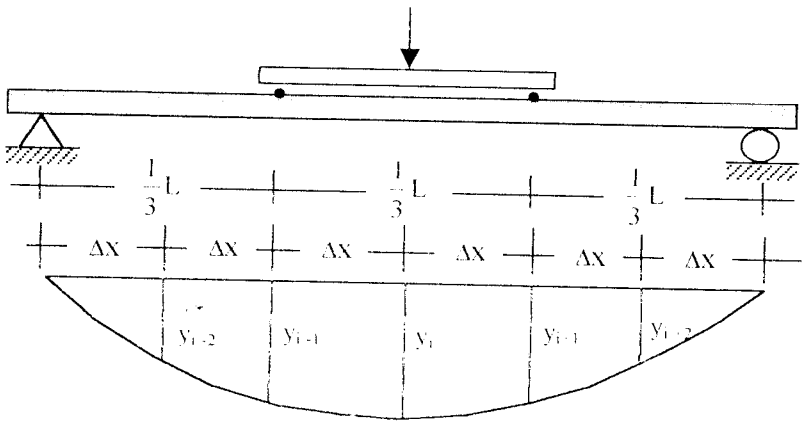
$$\frac{1}{r} = \frac{\frac{dtg\phi}{d_x}}{\left\{1+\left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad \text{.....(2.40)}$$

$$\frac{1}{r} = \frac{\frac{d^2y}{d_x^2}}{\left\{1+\left(\frac{d_y}{d_x}\right)^2\right\}^{\frac{3}{2}}} \quad \text{.....(2.41)}$$

Karena ordinat-ordinat garis-elastis itu kecil sekali, maka $\frac{dy}{dx}$ juga amat kecil nilainya terhadap satuan, sehingga $\frac{d^2y}{dx^2}$ boleh diabaikan terhadap 1. Jadi, persamaan (3.41) atau disebut juga persamaan derajat bengkokan ditulis:

$$\frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx^2} \qquad \text{.....(2.42)}$$

dari pengujian kuat lentur didapat defleksi pada titik-titik diskrit. Pendekatan kemiringan menggunakan metode *central difference*.



Gambar 2.11. Defleksi balok

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta X} \qquad \text{.....(2.43)}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\frac{dy}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta X - \frac{dy}{dx}(2\Delta X)(y_{i+1} - y_{i-1})}{(2\Delta X)^2} \qquad \text{.....(2.44)}$$

Karena ΔY bernilai konstan maka, $\frac{dy}{dx}(2\Delta Y)(y_{i+1} - y_{i-1}) = 0$, sehingga persamaan (2.44) menjadi:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\frac{dy}{dx}(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \quad \ldots\ldots(2.45)$$

Jika disubtitusikan persamaan (2.43) ke persamaan (2.45), maka persamaannya menjadi:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{\left(\frac{y_{i+1} - y_{i-1}}{2\Delta Y}\right)(y_{i+1} - y_{i-1})2\Delta Y}{(2\Delta Y)^2} \quad \ldots\ldots(2.46)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})}{(2\Delta Y)^2} \quad \ldots\ldots(2.47)$$

Menurut Thimoshenko, kelengkungan balok didekati dengan :

$$\phi = \frac{d^2y}{dx^2} \quad \ldots\ldots(2.48)$$

Jadi, persamaan kelengkungan balok yaitu:

$$\phi = \frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1})}{(2\Delta Y)^2} \quad \ldots\ldots(2.49)$$

Mengacu pada Gambar 2.11. didapat momen (M):

$$M = {}^1/_6 \cdot PL \quad \ldots\ldots(2.50)$$

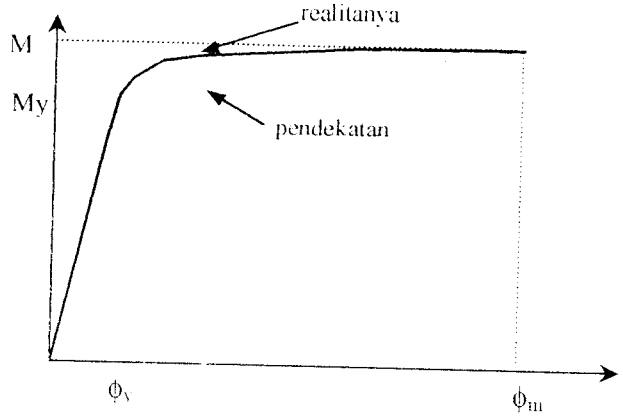
sehingga dapat disimpulkan besar EI dengan rumus:

$$EI = M/\phi \quad \ldots\ldots(2.51)$$

$$M = EI \cdot \phi \quad \ldots\ldots(2.52)$$

$$M = EI \frac{d^2y}{dx^2} \quad \text{.....(2.53)}$$

Hubungan momen (M) dan kelengkungan (ϕ) ditunjukkan pada Gambar 2.12, **Roufaiel dan Meyer (1983)**.



Gambar 2.12. Hubungan Momen (M) dan Kelengkungan (ϕ)

Setelah balok mengalami lendutan, nilai EI menjadi turun yang menyebabkan nilai M menjadi kecil, sehingga kekuatan ($P = \frac{6M}{L}$) menjadi berkurang. Perbaikan nilai EI akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan balok.

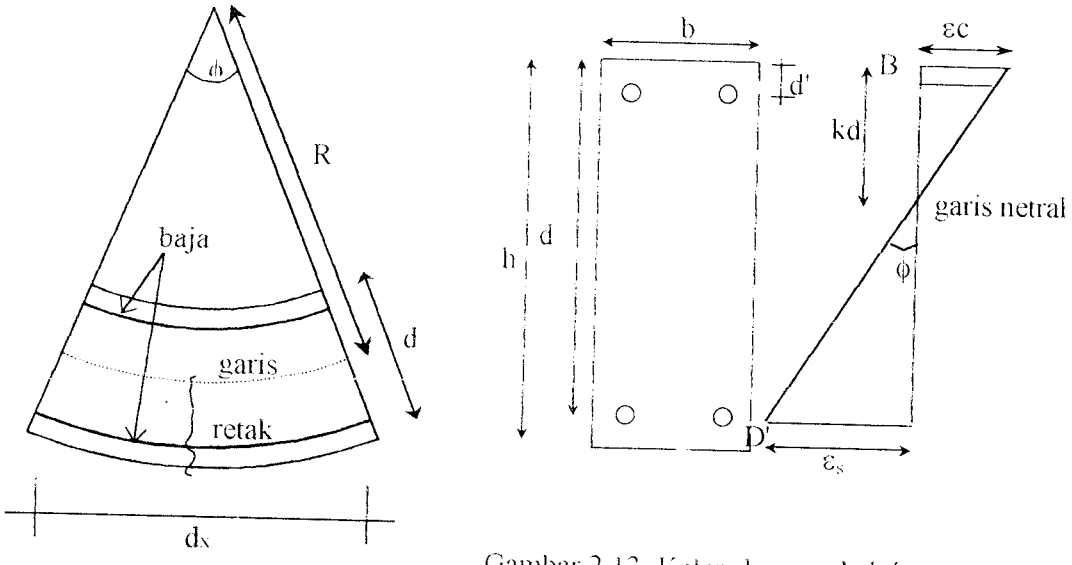
2.2.4. Momen-Kelengkungan Secara Teoritis

Perhitungan momen-kelengkungan secara teoritis menurut **Park and Pauley (1975),** dinyatakan dalam tiga bagian yaitu:

1. Momen-Kelengkungan Retak Awal

Dengan mengambil sebuah elemen lurus dari sebuah balok beton bertulang dengan momen-momen ujung dan gaya axial yang sama seperti Gambar 2.13 jari-jari kelengkungan R diukur dari garis netral. Retak-retak pada beton akibat terjadi

penambahan tegangan akan merubah jari-jari kelengkungan (R), tinggi netral (C), regangan beton (ε_c) dan regangan baja tarik (ε_s).



Gambar 2.13. Kelengkungan balok

Untuk menghitung momen retak awal pada sebuah balok beton bertulang digunakan rumus kuat lentur balok dengan menganggap bahan homogen (serba sama) dan elastik:

$$M_{crack} = \frac{fr \cdot I}{y_{bawah}} \qquad \text{.....(2.54)}$$

dengan: M_{crack} = momen retak awal

fr = modulus retak = $0{,}8\sqrt{f_c'}$

I = inersia balok

y_{bawah} = jarak dari garis netral ke tepi bawah balok

Menganggap sebuah elemen kecil dengan panjang dx dari balok dan menggunakan notasi seperti pada Gambar 2.13, maka rotasi diantara ujung-ujung dari elemen ditunjukkan dalam persamaan:

$$\frac{d_x}{R} = \frac{\varepsilon_c \, d_x}{kd} + \frac{\varepsilon_s \, d_x}{d(1-k)}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\varepsilon_c}{kd} + \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)}$$

dengan $1/R = \phi$, maka:

$$\phi = \frac{\varepsilon_c}{kd} + \frac{\varepsilon_s}{d(1-k)} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{d} \qquad \text{.....(2.55)}$$

dengan :

ϕ = kelengkungan

ε_c = regangan beton

ε_s = regangan baja

d = tinggi efektif penampang

Ini menunjukkan bahwa kelengkungan (ϕ) adalah gradien regangan dari elemen seperti dalam Gambar 2.13. Kelengkungan akan benar-benar berubah sepanjang bentang balok karena naik-turunnya garis netral dan regangan-regangan diantara retak-retak. Jika panjang elemen kecil, dan sebuah retak berakhir, kelengkungan dihitung dengan persamaan 2.55 untuk penampang ijin yang diperoleh dari hubungan momen-kelengkungan. Dua grafik yang diperoleh dari hitungan balok tulangan sebelah adalah lurus atau linear di awal, dan hubungan antara momen dan kelengkungan dalam persamaan:

$$EI = M.R = \frac{M}{\phi} \qquad \text{.....(2.56)}$$

dengan EI adalah faktor kekakuan dari penampang. Dengan peningkatan momen, retak pada beton dapat mengurangi faktor kekakuan pada penampang. Perilaku dari penampang setelah retak tergantung dari jumlah tulangan pokok. Balok bertulangan sedikit menghasilkan sebuah kurva linear M-ϕ di atas titik leleh baja. Ketika baja leleh, peningkatan yang besar terjadi di dalam kelengkungan pada momen hampir konstan.

Hubungan M-ϕ yang ideal adalah ditunjukkan pada grafik tri-linear. Garis awal pertama adalah retak awal, garis kedua adalah tegangan leleh baja dan ketiga adalah regangan ultimit dari beton. Untuk balok beton bertulang di bawah beban layan Hubungan M-ϕ dari beban 0 sampai leleh baja kedua garis hampir linier sehingga sering juga ditampilkan grafik hubungan M-ϕ dalam bentuk bi-linear.

2. Momen-kelengkungan setelah retak pada saat leleh pertama

Pada Gambar 2.13 menunjukkan kasus umum dari sebuah penampang persegi tulangan ganda pada leleh pertama dari tegangan baja dan regangan ultimit beton. Kelengkungan pada leleh pertama dari baja ϕ_y dicari dengan persamaan 2.55 dalam istilah dari regangan baja saat leleh.

Momen-kelengkungan pada saat leleh pertama ditentukan dengan persamaan:

$$k = \sqrt{(\rho+\rho')^2 n^2 + 2\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right)n} - (\rho+\rho')n \quad \text{.....(2.57)}$$

$$M_y = As.f_y.jd + As'.fy.(\varepsilon_s.kd-d') + 0{,}85.f'_y.0{,}85.(h-kd).b.j_d' \text{.....(2.58)}$$

$$\phi_y = \frac{fy}{d(1-k)} \quad \text{.....(2.59)}$$

Dengan: k = faktor tinggi garis netral

M_y = momen leleh pertama

ϕ_y = kelengkungan leleh pertama

A_s = luas tulangan tarik

A_s' = luas tulangan tekan

d = tinggi efektif penampang

d' = jarak dari serat tekan ketitik berat baja tekan

E_c = modulus elastis beton

E_s = modulus elastis baja

f_y = tegangan leleh baja

jd = lengan dari titik berat dari baja tekan dan beton ketitik berat tulangan tarik.

$n = E_s/E_c$; ρ $As\ bd$; ρ' $As'\ bd$

3. Momen-kelengkungan ultimit

Momen ultimit (Mu) dan kelengkungan ultimit (ϕ_u) dari penampang bertulangan rangkap (lihat Gambar 2.13) dalam persamaan :

$$a = \frac{A_s.f_y - A'_s.f_y}{0{,}85.f'_c.b} \quad \text{.....(2.60)}$$

$$M_u = 0{,}85.f_c'\ .a.b(d - a/2) + A'_s.f_y(d - d') \text{.....(2.61)}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_c.\beta_1}{a} \quad \text{.....(2.62)}$$

Regangan baja tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.13 dicari dengan persamaan:

$$\varepsilon's = \varepsilon_c \left(\frac{c - d'}{c}\right) = \varepsilon_c \left(1 - \frac{\beta_1.d'}{a}\right) \text{.....(2.63)}$$

subtitusi persamaan (2.60) ke persamaan (2.63) menunjukkan bahwa gaya tekan akan leleh ketika:

$$\varepsilon_c \left[1 - \beta_1 . d' \left(\frac{0{,}85 . f_c' . b}{A_s . f_y - A'_s . f_y} \right)\right] \geq \frac{f_y}{E_s} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.64)$$

Jika persamaan (2.64) kurang sesuai (baja tekan tidak leleh) maka nilai nyata dari tegangan baja dicari dengan persamaan:

$$f_s' = \varepsilon_s' . E_s \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.65)$$

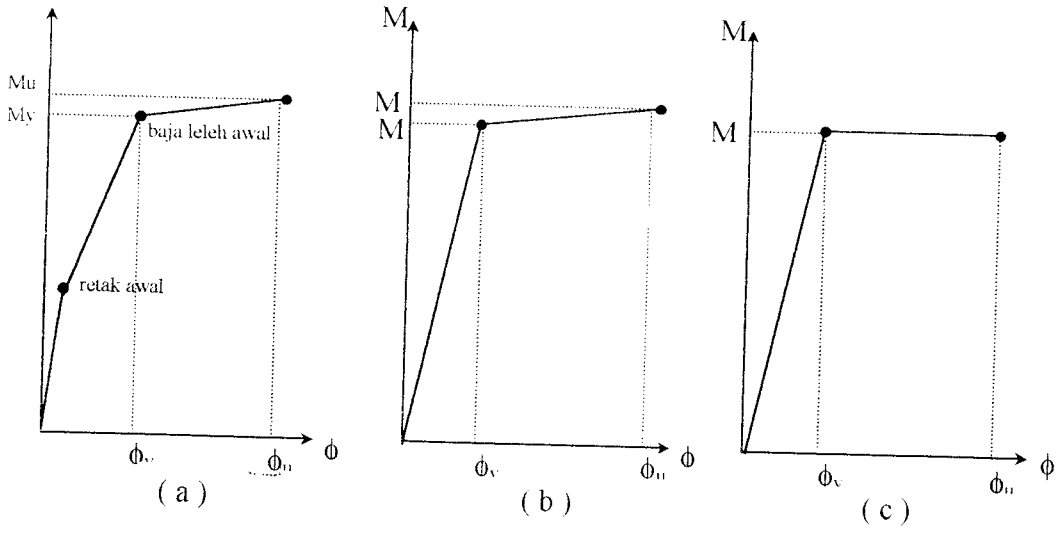
maka momen ultimit dapat dicari dengan persamaan:

$$M_n = A_s . f_y . (d - kd) + 0{,}85 . f_{rl} . 0{,}85 . b . (h - kd)^2 . 0{,}5 + 0{,}67 . f'_{cf} . kd . b . \tfrac{5}{8} . kd +$$

$$A'_s . f_y . (kd - d') \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (2.66)$$

dan kelengkungan ϕ_u dicari dengan persamaan (3.62).

Grafik momen kelengkungan untuk uji lentur ditunjukkan oleh Gambar (2.14)



Gambar 2.14. Kurva momen-kelengkungan ideal

Keterangan Gambar 2.14. :

(a) Grafik trilinier momen kelengkungan

(b) Grafik bilinier momen kelengkungan dengan peningkatan momen

(c) Grafik bilinier momen kelengkungan tanpa peningkatan momen

2.2.5. Perencanaan Geser Balok

Beton mutu tinggi dengan kekuatan desak yang tinggi dan kesesuaian dalam kuat tarik beban, retakan geser yang terjadi lebih tinggi juga. Karena itu diperlukan jumlah tulangan geser minimum yang lebih banyak, serta jarak sengkang minimum juga harus dibatasi (Yoon, Y.S, Cook, W.D, dan Mitchell, D, 1996)

Perencanaan kekuatan geser menurut ACI adalah dengan meninjau kekuatan geser nominal Vn dari penjumlahan dua faktor kontribusi:

$V_n = V_c + V_s$ .....(2.67)

Dengan : V_n = kekuatan geser nominal

V_c = kekuatan geser dari balok beton,

V_s = kekuatan geser akibat penulangan geser.

Perencanaan kekuatan geser pada balok adalah sebagai berikut:

1. Desain untuk kuat geser balok tanpa tulangan badan.

   Menghitung kuat geser dengan kombinasi geser dan lentur menurut SNI adalah :

$$V_c = 1/7\left[\sqrt{fc'} + 120\rho\frac{V_u d}{M_u}\right]b.d \le 0{,}30\sqrt{fc'}.b.d \quad .....(2.68)$$

dengan $\rho = \frac{As}{b.d} ; \frac{V_u d}{M_u} \leq 1{,}0$

nilai ρ merupakan rasio tulangan longitudinal.

Dengan meningkatkan rasio ρ, yaitu memperbesar luas tulangan longitudinal, dapat meningkatkan kekuatan geser penampang. Rumus di atas umumnya dimanfaatkan untuk balok tinggi dan kondisi dengan adanya beban terpusat yang terletak didekat tumpuan. Faktor $\frac{V.d}{M}$, juga berpengaruh terhadap geser lentur.

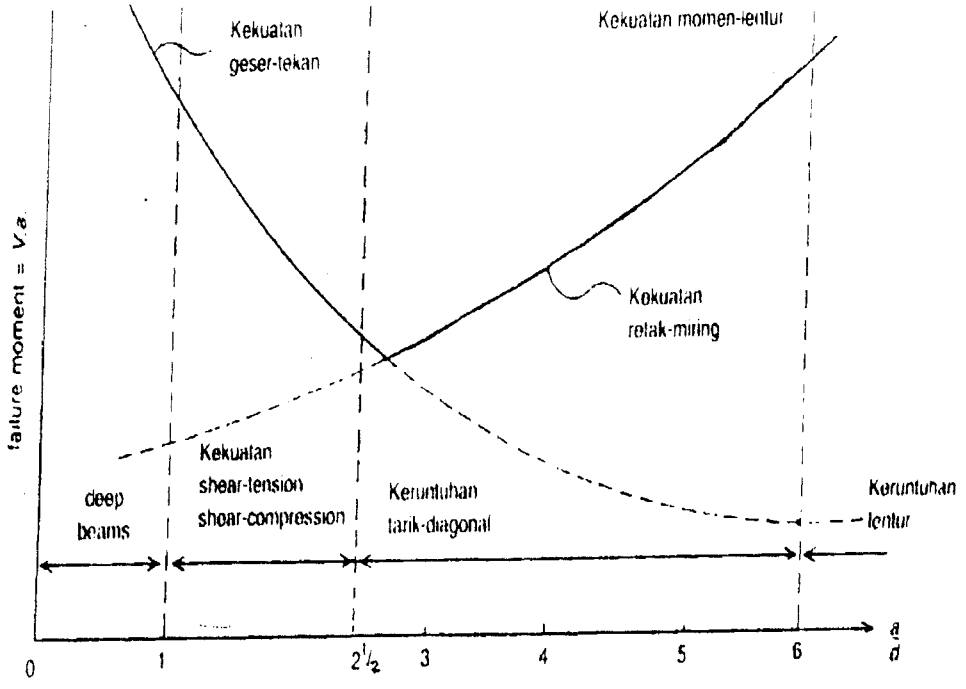
Bila a menyatakan rasio momen dibagi geser $\frac{M}{V}$,berdasarkan nilai rasio a/d atau $\frac{M}{Vd}$, keruntuhan geser dapat dibagi menjadi empat kategori (Wang dan Salmon, 1986):

a. balok dengan a/d <1 disebut balok tinggi,

b. balok pendek dengan a/d sebesar 1 sampai $2\frac{1}{2}$, dengan kuat geser melampaui kapasitas retak miring,

c. balok biasa dengan panjang menengah dan a/d dari $2\frac{1}{2}$ sampai 6, dengan kuat geser menyamai kapasitas retak miring,

d. balok panjang dengan a/d yang lebih besar dari 6 dengan kuat lentur yang lebih kecil dari kuat gesernya.



Gambar 2.15 Variasi Kekuatan Geser

Dalam satuan SI kuat geser dengan kombinasi geser dan lentur menjadi:

$$Vc = \frac{1}{6}\sqrt{fc'}.b.d \quad \text{.....(2.69)}$$

2. Perumusan batas keruntuhan geser balok dengan tulangan badan

Diasumsikan bahwa semua sengkang leleh saat runtuh, maka geser yang ditahan oleh sengkang adalah:

Jika Vu melebihi ∅ Vc, sengkang harus disediakan sebagai :

$$Vs = \frac{Av.fy.d}{S} \quad \text{.....(2.70)}$$

$$V_u \leq \varnothing V_n \quad \text{.....(2.71)}$$

Dengan V_u =gaya beban berfaktor,

∅ = faktor reduksi kekuatan,

V_n = perlawanan geser nominal,

V_n yang diberikan oleh persamaan (2.71), dalam desain ini secara umum disusun dari bentuk:

$$Vs = \frac{Vu}{\phi} - Vc \qquad \text{.....(2.72)}$$

Dari persamaan (2.73) memberikan jarak sengkang :

$$S = \frac{Av.fy.d}{\frac{Vu}{\phi} - Vc} \qquad \text{.....(2.73)}$$

3. Tulangan Badan Minimum

Kebutuhan tulangan badan minimum menurut ACI 318-83 M untuk satuan SI, adalah:

$$Av_{min} = \frac{b.S}{3.f_y} \quad (\text{Av dalam mm}^2) \text{.....(2.74)}$$

Untuk geser yang ditahan oleh sengkang adalah:

$$Vs_{min} = \left(\frac{1}{3} Mpa\right) b.d \,. \qquad \text{.....(2.75)}$$

maka dari persamaan diatas, diperlukan tulangan geser dengan jarak:

$$S = \frac{Av.fy.d}{Vs_{min}} \,. \qquad \text{.....(2.76)}$$

2.2.6. Rencana campuran Beton Berkekuatan Tinggi

1. Rencana Umum

Secara Umum, kekuatan beton sangat tergantung pada rasio air-semen (w/c) yang umumnya diambil lebih rendah untuk beton berkekuatan tinggi daripada beton normal.

Disamping itu kekuatan beton juga sangat tergantung pada :

a. jenis semen yang dipakai,

b. ukuran maksimum agregat kasar.

c. kualitas agregat, misalnya : gradasi, kekerasan, bentuk dan kebersihan agregat,

d. jenis bahan tambah (*admixtures*)

2. Langkah -langkah pokok perencanaan campuran beton mutu tinggi, yaitu

a. Menentukan slump dan kuat tekan rata – rata f 'cr, bila :

(1) berdasarkan data lapangan, f ' cr dipilih dari nilai terbesar dari :

$f'cr = fc' + 1{,}34 \cdot S$ .....(2.77)

$f'cr = 0{,}9\ fc' + 2{,}33 \cdot S$ .....(2.78)

(2) berdasarkan data laboratorium

$f'cr = (fc' + 27{,}6) / 0{,}90$ .....(2.79)

b. Menentukan diameter butir agregat, tabel 2.2 ,

c. Menentukan kandungan agregat kasar (kerikil) optimum, tabel 2.3,

d. Estimasi air campuran dan kandungan udara (*air content*), tabel 2.5,

e. Menentukan rasio air/perekat, w / (c + p), dalam berat, tabel 2.6 dan 2.7. C = kandungan semen , P = *pozzolan,*

f. Menghitung material P (*pozzolan*) yang diperlukan,

Nilai ini dapat dari membagi jumalah air (m^3) pada tahap 4, dengan rasio w / (c + p), tabel 2.6 dan 2.7,

g. Membuat proposi campuran dasar, tanpa bahan *cementious* P,

h. Membuat proposi suatu campuran penyerta menggunakan bahan *pozzolan* P, misalnya : *silica fume*.

i. Membuat hasil campuran coba untuk setiap proposi campuran yang di desain dari langkah - langkah a sampai h,

j. Melakukan modifikasi proposi campuran untuk mencapai *slump* yang ditetapkan, dengan mengubah kandungan bahan, mengatur BPKA untuk beberapa campuran coba.

k. Menetapkan campuran yang optimum (campuran final)

3. Tabel perencanaan campuran beton mutu tinggi :

Tabel – 2.1 Kuat Tekan Desain (bila rekaman data tidak tersedia) untuk menentukan Nilai Deviasi Standar.

Kuat tekan spesifik f ' cr (Mpa)	Kuat tekan perlu fc' (Mpa)
> 34,5	Fc' + 9,7

Tabel – 2.2 Ukuran maksimum diameter kerikil

Kuat beton yang Disyaratkan (Mpa)	Ukuran maksikum Agregat, kerikil (mm)
< 62	19 –25
> 62	10 – 12,5

Tabel – 2.3 Fraksi volume kerikil sesuai ukuran maksimum nominal kerikil.

Ukuran maksimum Nominal (mm)	10	12.5	20	25
Volume fraksi dari kerikil kering oven kompak, ϕ vol	0,65	0,68	0,72	0,75

Tabel – 2.4 *Slump* yang disarankan

Dengan BPKA (mm)	Tanpa BPKA (mm)
25 – 50	50 – 100

Catatan : Atur slump dengan menambah / mengurangi BPKA (*platicizer*) di lapangan

Tabel- 2.5. Jumlah air – campuran (kg/m^3 beton) yang diperlukan dan kandungan udara (*air content*) untuk beton segar yang menggunakan pasir dengan rasio rongga 35 % (kandungan air – coba tahap awal)

Slump (mm)	Air - pencampur (kg / m^3) untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
	10	12,5	20	25
25 – 50	183	174	168	165
50 – 75	189	183	174	171
75 – 100	195	189	180	177
Udara (terperangkap) %	2,5	2.0	1,5	1,0

Tabel – 2.6. Nilai rasio w / (c + p) untuk beton tanpa BPKA (Bahan Pengurang Kandungan Air).

Kuat beton lapangan f 'cr (Mpa)		Rasio w / (c + p) untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
		10	12,5	20	25
48	28 hari	0,42	0,41	0,40	0,39
48	56 hari	0,46	0,45	0,44	0,39
55	28 hari	0,35	0,34	0,33	0,33
55	56 hari	0,38	0,37	0,36	0,35
62	28 hari	0,30	0,29	0,29	0,28
62	56 hari	0,33	0,32	0,31	0,30
69	28 hari	0,26	0,26	0,25	0,25
69	56 hari	0,29	0,28	0,27	0,26

Catatan : f 'cr = (fc' + 9,7) Mpa Tabel - 1

Tabel – 2.7. Rasio w / (c+ p) untuk beton dengan BPKA / *plasticizer*

Kuat beton lapangan f'cr (Mpa)		Rasio w / (c+ p) untuk ukuran maksimum agregat yang telah ditentukan (mm)			
		10	12,5	20	25
48	28 hari	0,50	0,48	0,45	0,43
48	56 hari	0,55	0,52	0,48	0,46
55	28 hari	0,44	0,42	0,40	0,38
55	56 hari	0,48	0,45	0,42	0,40
62	28 hari	0,38	0,36	0,35	0,34
62	56 hari	0,42	0,39	0,37	0,36
69	28 hari	0,33	0,32	0,31	0,30
69	56 hari	0,37	0,35	0,33	0,32
76	28 hari	0,30	0,29	0,27	0,27
76	56 hari	0,37	0,31	0,29	0,29
83	28 hari	0,27	0,26	0,25	0,25
83	56 hari	0,30	0,28	0,27	0,26

Catatan : f 'cr = (fc' + 9,7) Mpa Tabel - 1.

Tabel – 2.8 Faktor modifikasi Deviasi Standar (D S) (Bila terdapat kurang dari 30 hasil uji) Lihat juga ACI - 318 Tabel 5.3.1.2.

Jumlah Hasil Uji	Faktor Modifikasi D S
<15	Gunakan Tabel 2.1.
15	1,16
20	1,08
25	1,03
>30	1,00

2.2.7. Pengujian Kuat Desak Beton

Kuat desak beton adalah kemampuan beton untuk menahan beban dibagi dengan luasan permukaan beton yang menerima beban tersebut. Pengujian benda uji dilakukan setelah sampai berumur 28 hari. Untuk

mendapatkan kuat desak beton tersebut dari masing-masing benda uji digunakan rumus :

$$Kuat\ desak\ f_c = \frac{P}{A} \quad \text{..... (2.80)}$$

$$f_{cr}' = \frac{\sum_i^N f_c}{N} \quad \text{.....(2.81)}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_1^N (f_c - f_{cr})^2}{N-1}} \quad \text{..... (2.82)}$$

$$m = k \cdot Sd \quad \text{..... (2.83)}$$

$$fc' = fc_r' - m \quad \text{..... (2.84)}$$

dengan :

P = beban maksimum (kN),

A = luas permukaan (cm^2),

f_c = kuat desak beton masing- masing benda uji (Mpa),

f_{cr}' = kuat desak beton rata - rata (Mpa),

N = jumlah benda uji,

Sd = standar deviasi (Mpa),

m = nilai margin (Mpa),

m = konstanta (1,64),

fc' = kuat desak karakteristik (Mpa)

2.2.8. Pengujian Kuat Tarik Baja Tulangan

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui berapa besar saat terjadinya luluh, dan beban maksimum baja tulangan, serta tegangan luluh baja yang terjadi.

$$f_y = \frac{P_{luluh}}{luas\ bidang\ tarik} \quad (kg\ \ cm^2) \qquad \ldots\ldots(2.85)$$

$$f_{y\ rata-rata} = \frac{f_{y\ n-2} + f_{y\ n-1} + f_{y_n}}{n} \quad (kg\ \ cm^2) \qquad \ldots\ldots(2.86)$$

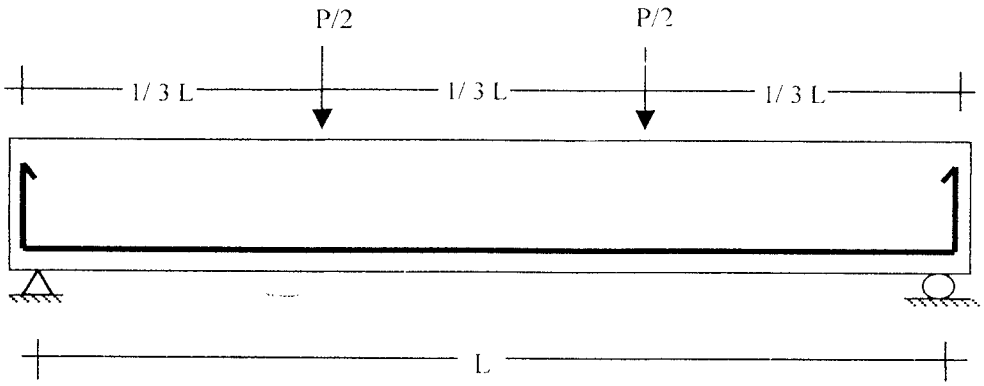
dengan :

f_y = tegangan luluh baja,

N = jumlah sampel baja tulangan

2.2.9. Pengujian Geser pada Balok.

Pengujian geser ini bertujuan untuk mengetahui atau mengamati lendutan yang terjadi sampai kekuatan pembebanan maksimal dan perilaku geser dari pola retak yang terjadi. Pada penelitian ini digunakan balok biasa dan diharapkan akan terjadi runtuh gesernya menyamai kekuatan retak miring, sehingga perbandigan bentangan geser (a) terhadap tinggi efektif balok-balok (d) berada di sekitar 2,5 sampai 6. Pendekatan untuk bentang geser digunakan jarak $^1/_3$ L dari tumpuan dengan dua titik pembebanan (*third point loads*).



Gambar 2.16. Letak titik pembebanan pengujian geser

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Rencana Pelaksaan Penelitian

Pelaksaan penelitian diusahakan sesuai jadwal yang ditetapkan dengan segala sarana dan prasarana yang menunjang, seperti persiapan alat dan bahan, perancangan model balok uji, perancangan campuran adukan beton. Pembuatan benda uji dan pengujiannya dilakukan di laboratorium Mekanika Bahan PAU, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

3.2. Bahan – bahan Penelitian

Bahan yang dimaksud di sini adalah bahan – bahan pokok yang berhubungan dengan pembuatan beton bertulang, yaitu:

1. Semen

Semen merupakan bahan ikat yang memiliki sifat hidrolis, berfungsi merekatkan butir-butir agregat penyusun beton agar terjadi suatu massa yang kompak/padat, selain itu untuk mengisi rongga- rongga di antara butiran agregat. Semen yang digunakan adalah semen jenis I untuk syarat-syarat yang berlaku umum, dipakai merek "Semen Gresik" dalam kemasan kertas seberat 50 kg.

2. Pasir

Untuk penelitian ini digunakan pasir dari Gunung Merapi. Pasir digunakan sebagai agregat halus. Pasir disiapkan dalam keadaan jenuh kering permukaan sebelum digunakan sebagai bahan pembuat beton. Analisis saringan dilakukan untuk mengetahui gradasinya. Analisis saringan dilakukan untuk membuat desain campuran beton. Pengeringan dalam analisis saringan memanfaatkan panas matahari, sehingga disebut kering udara.

3. Kerikil

Kerikil sebagai agregat kasar dipakai batu pecah dengan ukuran butir maksimum 20 mm, berasal dari Celereng, Kulon Progo.

Sebagaimana pada pasir, kerikil ini juga dilakukan analisis saringan untuk mengetahui gradasinya. Untuk memisahkan butiran yang lebih besar dari 20 mm dilakukan pengayakan menggunakan ayakan 20 mm, sedangkan butiran halus yang lebih kecil dari 5 mm dipisahkan dengan cara mengayak kembali kerikil yang lolos ayakan 20 mm dengan menggunakan ayakan pasir. Pada proses pengayakan yang kedua ini dilakukan pencucian dengan cara menyemprotkan air pada kerikil di atas ayakan, hal ini dilakuakan dengan maksud selain menghilangkan lumpur yang melekat pada permukaan kerikil juga untuk membasahi kerikil agar terjadi proses penjenuhan. Kemudian dihamparkan di tempat terbuka dan kondisinya jenuh kering permukaan atau SSD, kerikil ditimbang.

4. Air

Air merupakan bahan dasar yang penting pada pembuatan beton. Air diperlukan untuk menimbulkan reaksi dengan semen dan menjadi bahan pelumas antara butir- butir agregat agar beton dapat mudah dikerjakan dan dipadatkan. Air yang digunakan pada penelitian ini berasal dari laboratorium mekanika Bahan PAU, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.

5. Besi Tulangan

Besi tulangan yang digunakan memiliki bentuk polos dan ulir. Dipakai dua macam ukuran, untuk tulangan longitudinal dipakai diameter pengenal 13 mm, sedangkan untuk tulangan geser atau sengkang dipakai diameter pengenal 6 mm, Untuk mengetahui mutu besi tulangan dilakukan uji kuat tarik sesuai standar ASTM E 8 M - 86a untuk bahan-bahan logam. Pengambilan sampel untuk uji kuat tarik besi tulangan dilakukan dengan mengambil ujung – ujung batangnya saja. Kawat ikat ukuran 1 mm digunakan untuk mengikat antar tulangan agar kedudukan tulangan tetap sesuai dengan rencana.

6. Beton

Beton adalah campuran antara semen *portland*, agregat halus, agregat kasar dan air dengan bahan tambahan berupa *silica fume* dengan proporsi 5 % dari berat semen dan *superplastizer* dengan dosis 1 liter per 100 kg semen. Untuk mendapatkan sifat-sifat beton yang diinginkan, komposisi masing-masing bahan dihitung dalam perencanaan campuran

beton. Pada penelitain ini, perencanaan beton dipakai cara American Concrete Institute (ACI) yang diadopsikan dari beberapa sumber penelitian untuk pembuatan campuran beton mutu tinggi.

Dari hasil hitungan, untuk beton dengan kuat tekan rata-rata yang direncanakan 45 Mpa, dipakai campuran semen, pasir, dan kerikil dalam perbandingan berat 1:1,5 :2,25 dengan faktor air semen 0,4 dan *slump* 2,5-5 cm.

7. Kayu

Bahan pembuat acuan digunakan kayu lapis dengan tebal 9 mm. Papan-papan dari kayu digunakan sebagai pengganjal dan pengaku hubungan acuan. Penggunaan multiplek ini menghasilkan permukaan beton halus dan rata serta beton tidak keropos.

3.3 Alat-alat Penelitian.

Alat-alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari:

1. Timbangan

   a. Timbangan gantung merk Nagata dengan kapasitas 200 kg dan ketelititian 0,5 kg, digunakan menimbang berat semen / pasir, dan kerikil sebagai bahan susun beton,

   b. Timbangan duduk merk Ohaus dengan kapasitas 20 kg dan ketelitian 0.01 kg, digunakan menimbang pasir dan kerikil pada uji analisis gradasi pasir dan kerikil.

2. Saringan/ayakan

   a. Ayakan uji yang digunakan untuk menganalisis gradasi butiran pasir dan kerikil. Ayakan ini terdiri dari serangakaian susunan saringan uji dengan ukuran lubang 19 mm; 13,6 mm; 9,6 mm; 4,8 mm; 2,4 mm; 1,2 mm; 0,6 mm; 0,3 mm; 0,15 mm.

   b. Ayakan yang terbuat dari anyaman kawat dengan lubang berbentuk bujur- sangkar yang terdiri dari dari dua ukuran, yaitu lebar sisi-sisinya 20 mm dan 5 mm digunakan untuk memperoleh diameter butiran kerikil sebesar 5 mm sampai 20 mm, dan ayakan dengan lebar sisi-sisinya 5 mm digunakan pula untuk menyaring pasir.

3. Mesin Aduk Beton (*Rotating Drum Mixer*)

   Mesin aduk beton memiliki kapasitas 0,25 m^3 , digunakan untuk mengaduk bahan susun beton berupa semen, pasir, kerikil, dan air.

4. Mesin Uji Tarik (*Universal Testing Machine*)

   Universal Testing Machine merk *United Model SFM* – 30 seri 989540 dengan kapasitas 30.000 kg untuk uji tarik baja tulangan.

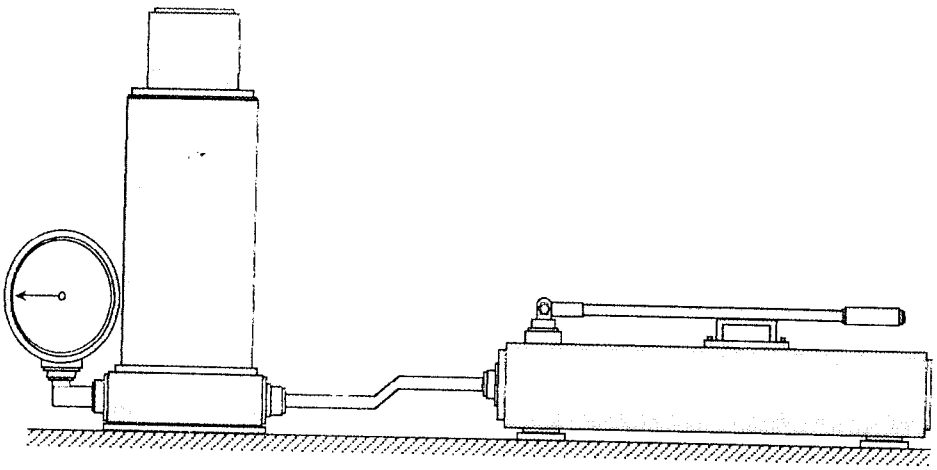
5. Mesin Tekan

   Mesin Tekan merek Control, buatan Italy, memiliki kapasitas beban 2000 kN digunakan untuk uji tekan silinder beton.

6. Dongkrak Hidrolis (*Hydraulic Jack*)

   Dongkrak hidrolis kapasitas 15 tonf yang dilengkapi dengan *Hand Pump* merk *Ogawa Seiki, LTD, Tokyo, Japan*, kapasitas 25 tonf berfungsi

untuk memberikan beban terpusat yang akan diubah menjadi momen pada balok uji.



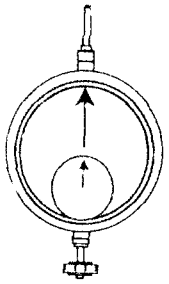
Gambar *Hidraulic Jack*

7. Sel Beban *(Load Cell)*

Sel beban merek *Showa* kapasitas 10 tonf yang dilengkapi transduser merek *Showa DS-1200, Showa Measuring Instrument Co. , LTD, Japan,* digunakan untuk membaca peningkatan beban yang diberikan oleh dongkrak hidrolis.

8. *Dial Gauge*

Dial Gauge atau pengukur perpendekan atau perpanjangan merek Peacock dengan ketelitian 0.01 memiliki panjang pengukuran maksimum 1 cm dan 3 cm digunakan untuk mengukur lendutan dititik tertentu dan mengukur pertambahan tinggi balok uji akibat retak yang terjadi pada beton.



Gambar . *Dial Gauge*

9. Alat getar (*Concrete Vibrator*)

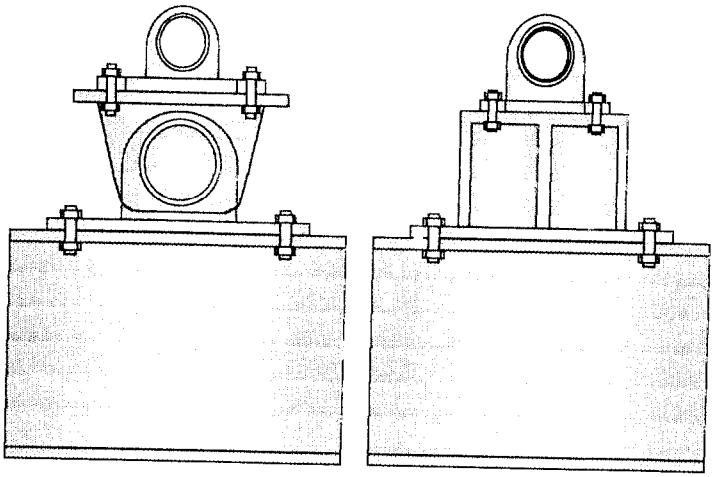
Concrete Vibrator adalah alat getar yang digunakan untuk membantu pemadatan beton. Alat getar menimbulkan getaran pada beton segar yang baru saja dituang, sehingga mengalir dan menjadi padat.

10. Teropong Pengukur Retak

Teropong Pengukur Retak merk *Ele* memiliki ketelitian 0,02 mm digunakan untuk mengetahui lebar retak sesungguhya yang terjadi pada beton.

11. Rangkaian Rangka Besi

Rangkaian rangka besi berupa dudukan dongkrak hidrolis dan dudukan sendi dan rol yang ditempatkan di lantai kayu (*rigidfloor*) digunakan untuk menghasilkan sistem pembebanan.



(a.) Dukungan Rol (b.) Dukungan Sendi

12. Strain Indicator

Strain Indicator merk Vishay, buatan *Measurement Group Instruments Division Releigh, North - Carolina*, P-3500. Digunakan untuk membaca besarnya regangan pada beton yang terjadi pada titik yang ditempeli *strain gauge* beton.

13. Strain Gauge

Strain Gauge yang dipakai merk *Showa*, buatan *Tokyo, Japan, Type* PL – 120 – 11, panjang 120 mm, resisten 120 ± 0.3 Ω, gauge faktor 2,13 ± 1 % dan *Temperatur Compensation* 11 X 10^{-6}/ ^{0}C.

Digunakan untuk mengukur regangan beton.

3.4. Perancangan Model Benda uji

1. Perencanaan Benda Uji.

Perencanaan benda uji didasarkan pada tujuan Penelitian, yaitu agar balok runtuh, geser dan tidak runtuh lentur. Untuk balok biasa dengan perbandingan bentang geser dan tinggi efektif balok ($^{a}/_{d}$) antara 2,5 sampai dengan 6, kekuatan gesernya menyamai kapasitas retak miring. Bila perbandingan $^{a}/_{d}$ antara 1 sampai 2,5 balok masuk pada kriteria balok pendek yang mempunyai kekuatan geser melampaui kapasitas retak miringnya sedangkan $^{a}/_{d}$ lebih besar dari 6 kekuatan lenturnya lebih kecil dari kekuatan gesernya (Wang dan Salmon, 1986).

Berdasarkan uraian di atas/perencanaan balok pada penelitian ini dihitung sebagai balok biasa dengan perbandingan bentang geser dan tinggi efektif balok ($^{a}/_{d}$) antara 2,5 sampai dengan 6, diharapkan terjadi runtuh geser dengan kekuatan geser yang terjadi menyamai kapasitas retak miringnya.

Untuk balok ini diambil bentang geser $a = \frac{1}{3} L$, dan apabila dimasukkan pada $2,5 < {}^{a}/_{d} < 6$, diperoleh,

$$2,5 < {}^{1}/_{3} < 6$$

$$7,5 < {}^{L}/_{d} < 18 \qquad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3.1)$$

Bila ditetapkan dimensi balok uji memiliki tinggi 220 mm, lebar 110 mm, tebal penutup beton 20 mm dan dipakai tulangan memanjang dengan diameter 13 mm serta tulangan geser / sengkang diameter 6 mm, maka diperoleh tinggi defektif balok (d) adalah 187,5 mm. Untuk d sebesar 187,5 mm, panjang bentang balok uji berdasarkan pertidaksamaan 3.1 memberikan batasan $1406,25 < L < 3375$ mm. Masih dalam batasan tersebut, panjang bentang bersih balok uji pada penelitian ini dipakai 1500 mm, dengan demikian panjang bentang geser (a) sesuai yaitu : $a = {}^{1}/_{3} L$ adalah 500 mm, tepat berada pada sepertiga balok.

Perbandingan panjang bentang geser dan tinggi efektif ($^{a}/_{d}$) memiliki nilai 2,667, ini berarti rencana balok uji telah memenuhi kriteria sebagai balok biasa dan kemungkinan terjadi runtuh geser dengan kekuatan gesernya diharapkan menyamai kekuatan tekan miringnya (Wang dan Salmon, 1986).

Perencanaan kekuatan lentur dan kekuatan geser balok dihitung dengan menggunakan cara SK SNI T – 15 - 03 – 1991. Dalam perencanaan ini dihitung sedemikian rupa, sehingga balok beton bertulang akan mengalami keruntuhan

geser dan kuat terhadap lentur, di samping itu harus memiliki sifat *under reinforced*, tetapi daktilitas yang terjadi diusahakan tidak terlalu rendah.

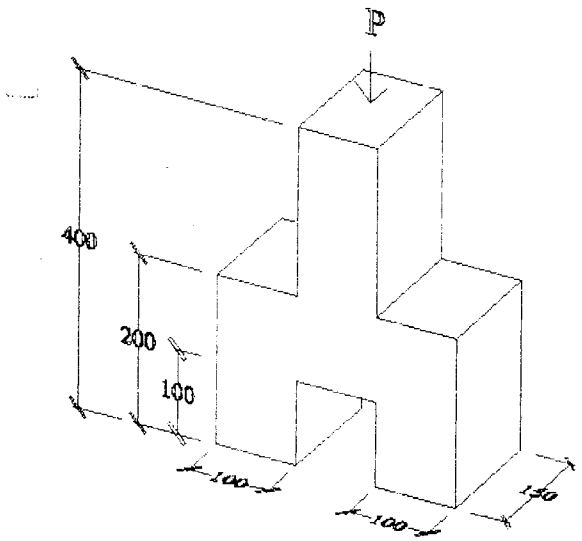
Untuk itu nilai perbandingan luas penampang tulangan tarik (As) terhadap luas efektif penampang balok (b.d) harus lebih kecil dari 75 % nilai perbandingan tulangan seimbang (Pb).

Tulangan geser atau sengkang dihitung berdasarkan selisih gaya geser nominal dengan gaya geser beton. Penggunaan tulangan geser dan tanpa tulangan geser merupakan variabel dalam penelitian ini. Sesuai dengan perkiraan runtuh geser yang akan terjadi berada dekat tumpuan, maka penempatan tulangan geser diletakkan pada sepanjang bentangan geser.

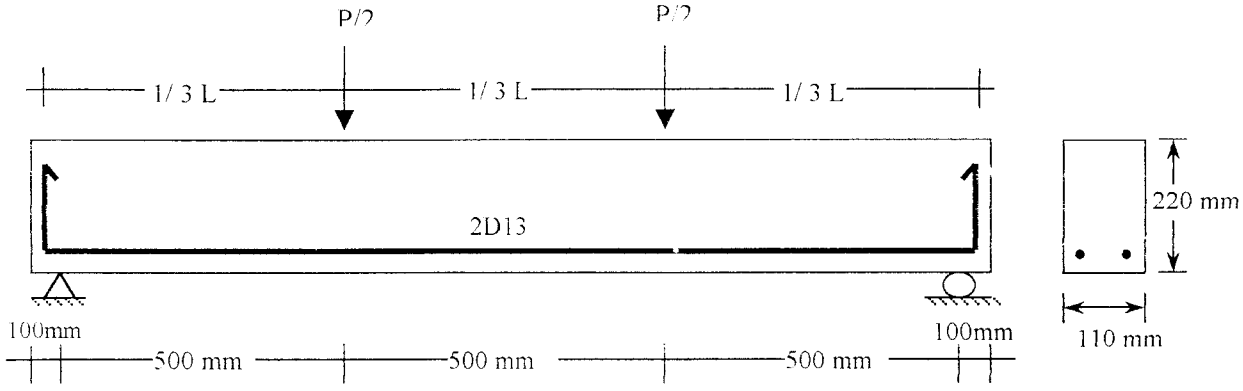
2. Benda Uji

Model benda uji yang di pakai ada 3 macam seperti berikut ini :

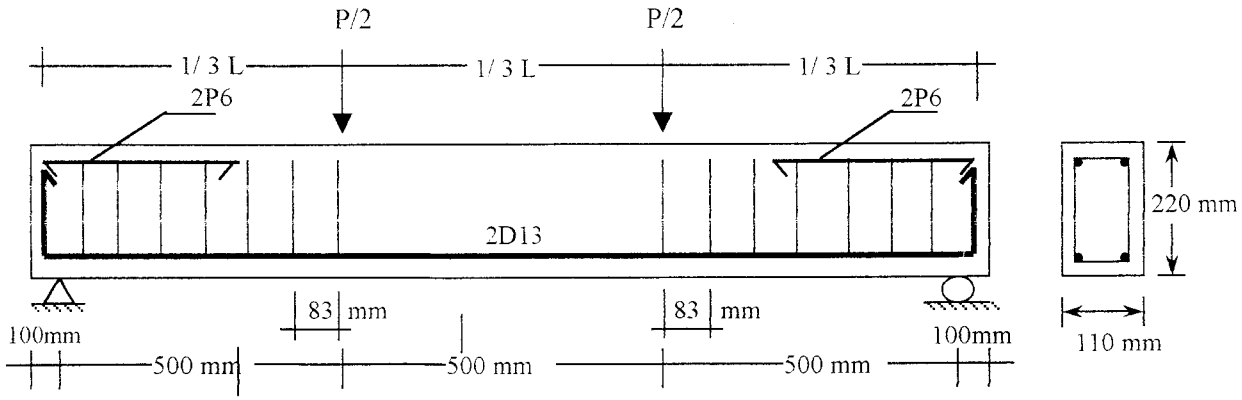
a. Model balok uji untuk mengetahui kuat geser murni balok, sebanyak 3 buah benda uji.



b. Model balok uji untuk mengetahui kuat geser dan pola retak balok beton bertulang tanpa tulangan geser, sebanyak 3 buah denda uji.



c. Model balok uji untuk mengetahui kuat geser dan pola retak balok beton bertulang dengan tulangan geser, sebanyak 3 buah benda uji.



BAB IV

PELAKSANAAN PENELITIAN

4.1. Persiapan Bahan

Persiapan awal dalam rangka pelaksanaan penelitian ini dimulai dengan pengadaan bahan–bahan untuk keperluan pembuatan beton dan balok uji. Bahan-bahan untuk pembuat beton dan benda uji berupa kerikil, pasir, semen, besi tulangan dan kayu untuk keperluan acuan balok. Pasir dan kerikil dipersiapkan sampai pada tahap siap untuk digunakan sebagai bahan susun beton, yaitu melalui tahapan analisis saringan untuk mengetahui gradasi butirannya, pengayakan dengan menggunakan anyaman kawat untuk mengetahui gradasi butirannya, pengayakan dengan menggunakan anyaman kawat untuk mendapatkan diameter butiran yang dikehendaki, pencucian untuk menghilangkan kandungan lumpur dan sekaligus sebagai tahap perendaman agar butiran mengalami proses penjenuhan selanjutnya dilakukan usaha untuk mencapai kondisi SSD. Kemudian dilakukan penimbangan untuk menentukan komposisi campuran agar didapat sifat-sifat beton mutu tinggi yang sesuai dengan yang direncanakan. Baja tulangan sebagai bahan pembentuk beton bertulang diuji tarik untuk mendapatkan data kuat tarik dan regangannya.

4.2. Persiapan Alat

Tahap persiapan alat adalah mempersiapkan semua alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini, terutama adalah alat-alat yang berkaitan dengan pelaksanaan pengujian balok. Alat tersebut meliputi dongkrak hidrolis sebanyak satu buah berikut pompanya, *Load Cell* sebanyak satu buah berikut *transducer*, *dial gauge* sebanyak 3 buah, strain *indicator*, dan alat-alat tulis berupa spidol warna-warni untuk menggambarkan rambatan retak.

Untuk menghasilkan sistem pembebanan dipasang rangkaian rangka besi yang berfungsi sebagai dudukan beban uji dan tumpuan. Proses pembuatan rangkaian rangka besi ini dilakukan secara cermat dan teliti, karena dudukan rangka besi ini harus kuat dan kaku serta tidak terjadi pergeseran pada tempat-tempat pengangkuran saat pembebanan diberikan pada balok. Untuk kelancaran pelaksanaan semua alat diuji coba dan diperiksa kapasitas dan ketelitiannya. Pada alat *Load Cell* dilakukan kalibrasi untuk konversi beban yang terbaca pada *transducer*.

4.3. Pembuatan beton dan balok uji

Pelaksanaan pembuatan beton untuk keperluan balok uji dan silinder beton dikerjakan dalam satu rangkaian kerja. Komponen agregat yang sebelumnya telah dipersiapkan diaduk dalam mesin aduk beton (*rotating drum mixer*), pengadukan beton sebanyak 5 kali sesuai dengan jumlah balok uji.

Balok uji dicetak dalam acuan yang kokoh dan rapat sehingga tidak mengalami perubahan bentuk maupun keropos pada hasil akhirnya. Sebelum

pelaksanaan pengecoran balok, terlebih dahulu dilakukan pemeriksaan besi tulangan, tebal penutup beton berupa penempatan tahu beton dan juga dilakukan dengan menggunakan alat getar (*vibrator*) dan mengetuk-ngetuk acuan.

Pemeliharaan beton keras untuk silinder beton dilakukan dengan cara perendaman, sedangkan untuk balok diselimuti dengan menggunakan karung goni yang telah dibasahi dalam setiap hari. Untuk melihat pola retak, balok beton diberi pewarna putih dengan menggunakan cat tembok merek dagang Delingo, sehingga perambatan dan pola retak yang terjadi dapat teramati dengan jelas serta dapat diberi warna dengan spidol.

Untuk mengetahui kuat tekan beton dilakukan uji silinder beton. Pada balok beton bertulang untuk mengetahui regangannya, maka pada balok beton bertulang dipasang *strain gauge*.

4.4. Pengujian balok

Pelaksanaan pengujian balok merupakan pengujian utama pada penelitian ini. Balok diuji horisontal dengan dua titik pembebanan pada jarak $^1/_3$ L dari tumpuan. Pada prinsipnya balok ditumpu sendi-rol dengan jarak bersih antar dua tumpuan 1500 mm. Pengamatan dipusatkan pada balok uji sepanjang 1500 mm, perambatan retak dan pola retak diamati, sedangkan regangan beton dibaca dari *strain gauge* yang telah terpasang pada balok bertulang dengan tulangan geser. Sepanjang bentang ini dipasang *dial gauge* sebanyak 3 buah yang masing – masing berfungsi sesuai dengan data yang diharapkan, yaitu lendutan balok dan retak geser.

Pengujian dilaksanakan setelah semua alat ukur terpasang dengan baik, balok uji pada posisi siap uji yang terletak pada suatu sistem rangka dan pembebanan pada dua titik dengan jarak $^1/_3$ L dari tumpuan. Secara rinci proses pengamatan untuk mendapat data dari alat yang terpasang adalah sebagai berikut:

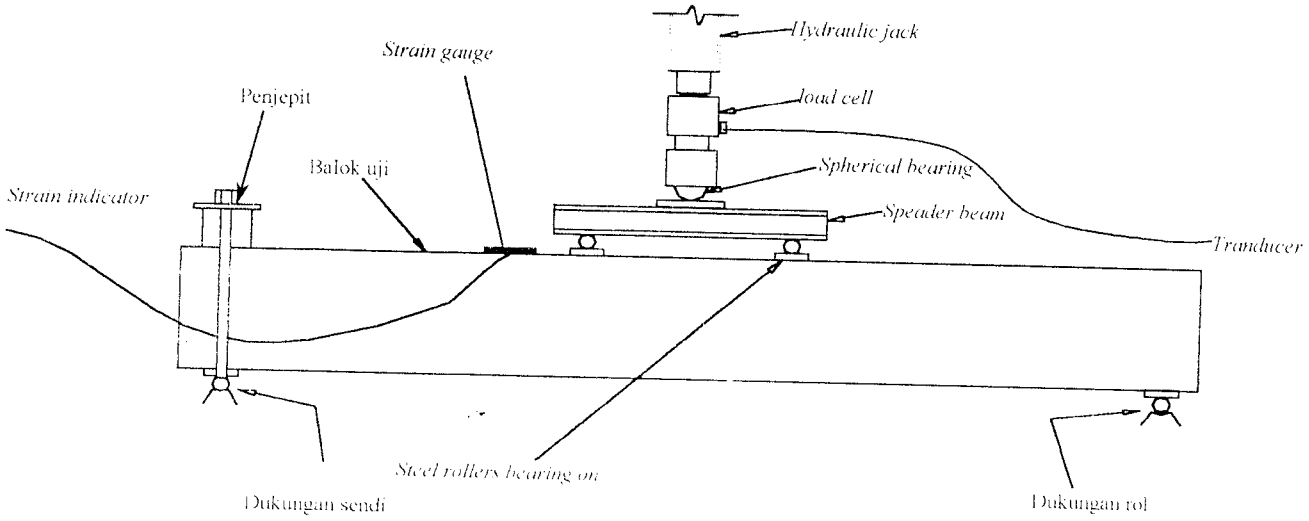
1. Untuk mendapatkan data lendutan pada balok uji dipasang *dial gauge* sepanjang 3 buah yang masing – masing memiliki kapasitas pengukuran sepanjang 10 mm dengan ketelitian pembacaan 0,01 mm. *Dial gauge* diletakkan pada titik – titik pengamatan dengan jarak antar *dial* 250 mm, jarak dial paling tepi ketumpuan sebesar 500 mm Penempatan *dial gauge* dibuat simetris terhadap titik tengah balok. Gambar penempatan *dial gauge* untuk mengukur lendutan balok uji dapat dilihat pada gambar 4.1, sedangkan data hasil pembacaan lendutan balok ini disajikan dalam bentuk tabel
2. Untuk mengamati retak geser dipasang *dial gauge* yang dilekatkan pada balok. Dudukan dial terbuat dari plat siku yang dilekatkan pada sisi lebar balok. Posisi *dial gauge* dalam keadaan tertekan; jika terdapat pertambahan tinggi berupa pembesaran atau retak miring pada badan balok akan terbaca oleh *dial*. Jumlah *dial gauge* yang terpasang pada seitiap titik pengamatan sepanjang bentang balok uji sebanyak 3 buah dengan kapasitas pengukuran 10 mm dergan pembacaan 0,01 mm.
3. Untuk mendapatakan data regangan pada balok, diperoleh dengan memasang alat bantu *strain indicator* yang dihubungkan dengan menggunakan kabel ke *strain gauge*.

Titik-titik yang diamati / ditempeli *strain gauge* terdapat pada balok BD, BE, BF sebanyak satu buah, terpasang pada balok memanjang dengan jarak 750 mm dari dukungan.

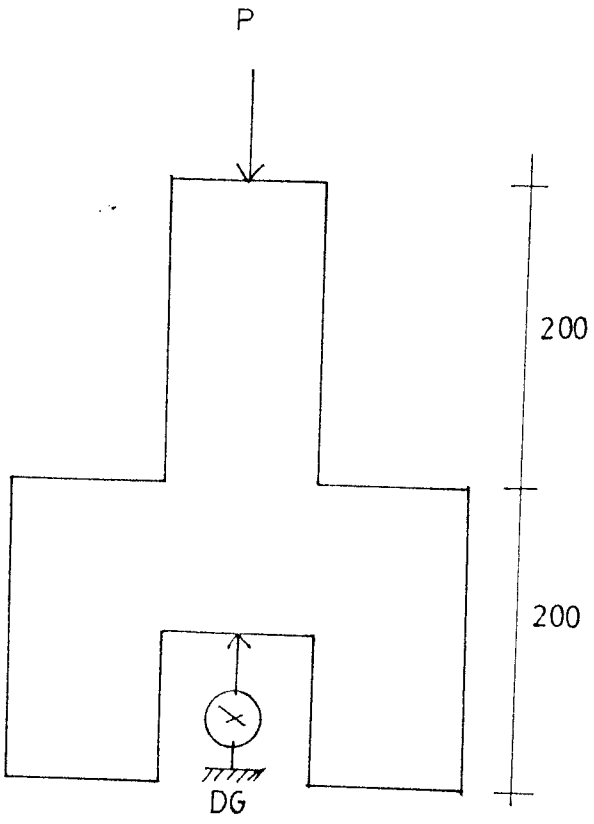
4. Untuk membaca besarnya beban yang diberikan pada balok uji digunakan *load cell* yang diletakkan di atas dongkrak hidrolis pada tempat beban diberikan. Pemberian beban menggunakan pompa hidrolis yang menekan dongkrak dari *load cell*, besar beban terbaca pada transduser yang dihubungkan dengan menggunakan kabel ke *load cell*.

   Beban diberikan secara bertahap dengan penigkatan beban setiap 200 kg. Interval waktu setelah pemberian beban untuk setiap peningkatan beban dibuat sama yaitu digunakan untuk membaca beban, membaca data dari *dial gauge*, mengamati dan mengukur lebar retak serta menandai retak spidol berwarna.

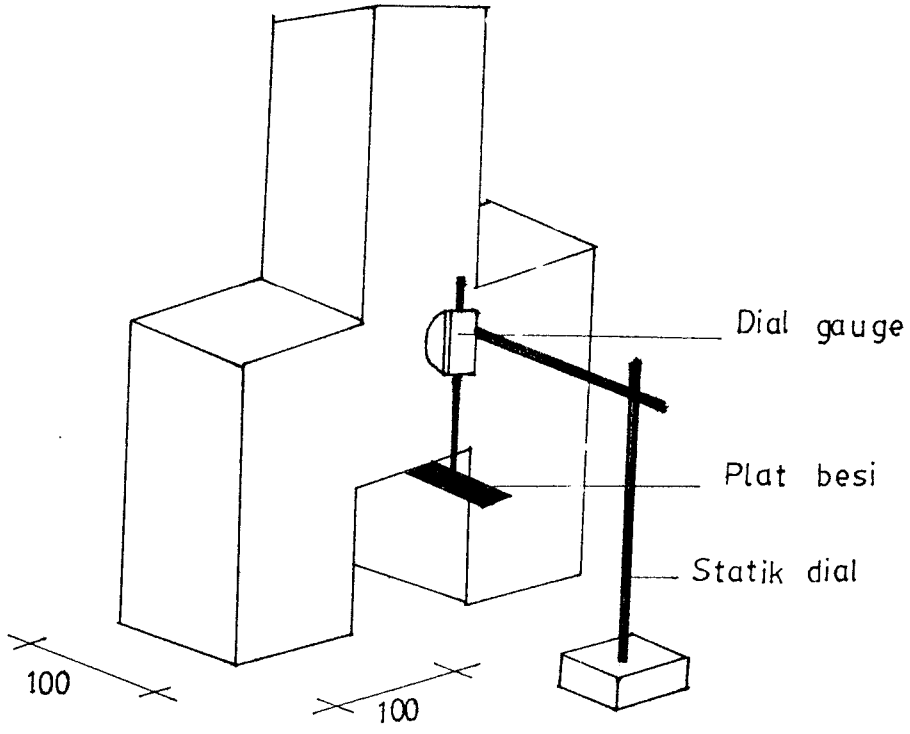
5. Pengamatan retak dilakukan untuk mengamati perambatan retak, pola retak, dan pola runtuh balok. Perambatan retak diperoleh dengan menulis nomer urut retak, sedangkan pola retak dan pola runtuh yang terjadi pada balok diberi tanda berupa garis-garis dengan menggunakan spidol berwarna.



Gambar 4.1. Pengujian kuat geser



(a) Penempatan dial gauge



(b) Detail penempatan dial gauge

Gambar 4.2. Penempatan dial gauge dan detail Benda uji BG-BH-BI

BAB V

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Hasil Penelitian

Setelah semua pelaksanaan penelitian di laboratorium selesai, sebagai hasilnya didapatkan data untuk analisis hasil dan pembahasan meliputi tegangan leleh baja, tegangan desak beton, data pembebanan, pola retak, pola runtuh, kemiringan retak tarik diagonal, regangan beton berdasarkan analisis *strain gauge*, defleksi pada tiap interval pembebanan, dan akhirnya didapat kapasitas geser dan tegangan geser untuk masing-masing benda uji.

5.1.1 Hasil Uji Kuat Tarik Baja

Untuk mengetahui tegangan leleh, tegangan tarik maksimum, dan tegangan baja tulangan dilakukan uji tarik. Pengambilan benda uji dilakukan dengan memotong baja tulangan sepanjang 25 cm dari tiap baja tulangan yang dipakai. Pada penelitian ini diambil tiga sampel untuk diameter pengenal 13 mm dan tiga sampel untuk diameter pengenal 6 mm. Hasil dari kuat tarik baja dapat dilihat pada tabel 5.1. di bawah ini .

Tabel 5.1. Hasil Pengujian Tarik Baja Tulangan

Benda Uji	Diameter Pengenal (mm)	Diameter Nyata (mm)	Tegangan Leleh (Mpa)	Tegangan Tarik Maks (Mpa)	Regangan Leleh (%)	Regangan Maksimum (%)
1	6	5,8	386,625	494,881	6,138	23,733
2	6	6,1	382,47	489,563	7,301	29,205
3	6	6,1	363.909	470,050	7,712	32,991
Rata[2]	6	6	377,668	484,831	7,050	28,643

Benda Uji	Diameter Pengenal (mm)	Diameter Nyata (mm)	Tegangan Leleh (Mpa)	Tegangan Tarik Maks (Mpa)	Regangan Leleh (%)	Regangan Maksimum (%)
4	13	12,8	404,953	626,531	3,92	13,395
5	13	12,8	453,83	703,437	3,222	14,662
6	13	12,8	425,39	630,492	3,064	11,289
Rata[2]	13	12,8	428,057	653,486	3,402	13,115

5.1.2. Hasil Uji Kuat Desak Beton

Benda uji silinder beton dibuat bersamaan dengan balok beton. Setiap satu adukan beton dibuat 4 sampai 10 buah silinder, sehingga seluruhnya terdapat 31 buah. Pengujian kuat tekan silinder dilaksanakan pada umur beton 28 hari. Data hasil pengujian kuat desak beton dapat dilihat pada tabel 5.2. di bawah ini :

Tabel 5.2. Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton

Tipe	Berat (kg)	Luas (mm^2)	Beban Maks (N)		Kuat tekan (Mpa)	
			P. Maks	Rata-rata	Kuat tekan	Rata-rata
A1	12,8	17662,5	980.000		55,485	
A2	12,8	16963,065	920.000		54,235	
A3	12,6	17194,64	960.000		55,83	
A4	12,8	17662,5	950.000	952.500	53,786	84,834
B1	12,8	16963,065	935.000		55,119	
B2	12,8	17662,5	925.000		52,371	
B3	12,8	17194,64	900.000		52,342	
B4	12,8	17194,64	920.000	920.000	53,505	53,334
C1	12,8	17427,785	975.000		55,945	
C2	12,8	16963,065	940.000		55,415	
C3	12,8	17194,64	885.000		51,469	
C4	12,8	17194,64	935.000	933.750	54,377	54,3015
D1	13	17194,64	940.000		54,668	
D2	12,8	17662,5	970.000		54,918	
D3	13	17662,5	890.000		50,389	
D4	12,9	17662,5	940.000		53,22	
D5	12,8	17662,5	870.000		49,257	
D6	12,8	17662,5	930.000		52,654	
D7	13	18136,64	950.000		52,380	
D8	12,8	17194,64	950.000		55,249	
D9	12,8	17662,5	930.000	930.000	52,654	52,821
E1	13	16963,065	920.000		54,235	
E2	13,1	17194,64	980.000		56,995	
E3	13,1	17194,64	940.000		54,668	
E4	13,2	17662,5	900.000		50,955	
E5	13	17662,5	920.000		52,088	
E6	13,2	17662,5	890.000		50,389	
E7	13	17427,785	940.000		53,937	
E8	13,2	17662,5	960.000		54,352	
E9	13,2	17662,5	925.000		52,371	
E10	12,8	17662,5	920.000	929.500	52,088	53,2078

Hasil perhitungan kuat tekan beton karakteristik adalah sebagai berikut :

Tipe A :

	fc	(fc – fcr)	$(fc - fcr)^2$
A1	55,485	0,651	0,4238
A2	54,235	- 0,599	0,3588
A3	55,83	0,996	0,99[illegible]
A4	53,786	- 1,048	1,09[illegible]3
	219,336		2,8729

$$fcr' = \frac{219,336}{4} = 54,834 \text{ Mpa}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{\sum_{1}^{n} (fc - fcr)^2}{N-1}}$$

$$= \sqrt{\frac{2,8729}{4-1}} = 0,9786$$

$m = 1,34 \,.\, Sd$

$= 1,34 \,.\, 0,9786 = 1,3113$

$fcr' = fc' + 1,35.Sd$

$fc' = fcr' - 1,34.Sd$

$= 54,834 - 1,3113 = 53,5227$ Mpa

Tipe B

	Fc	(fc – fcr)	(fc – fcr)²
B1	55,119	1,785	3,186
B2	52,371	- 0,963	0,927
B3	52,342	- 0,996	0,984
B4	53,505	0,171	0,029
	213,337		5,126

$$fcr' = \frac{213,337}{4} = 53,334 \text{ Mpa}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{5,126}{4-1}} = 1,307$$

$m = 1,34 \,.\, Sd$

$= 1,34 \,.\, 1,307 = 1,751$

$fc' = 53,334 - 1,751 = 51,583$ Mpa

Tipe C

	Fc	(fc – fcr)	(fc – fcr)²
C1	55,945	1,6435	2,701
C2	55,415	1,1135	1,2399
C3	51,469	- 2,8325	8,023
C4	54,377	0,0755	0,0057
	217,206		11,9696

$$fcr' = \frac{217,206}{4} = 54,3015 \text{ Mpa}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{11,9696}{4-1}} = 1,9975$$

$$m = 1,34 \cdot 1,9975 = 2,677$$

$$fc' = 54,3015 - 2,677 = 51,6245 \text{ Mpa}$$

Tipe D

	Fc	(fc – fcr)	(fc – fcr)²
D1	54,668	1,847	3,4114
D2	54,918	2,097	4,397
D3	50,389	- 2,432	5,915
D4	53,22	0,399	0,1592
D5	49,257	- 3,564	12,702
D6	52,654	- 0,167	0,0279
D7	52,380	- 0,441	0,1945
D8	55,249	2,428	5,895
D9	55,645	- 0,167	0,0279
	475,389		11,9696

$$fcr' = \frac{475,389}{9} = 52,821 \text{ Mpa}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{32,7299}{9-1}} = 2,0227$$

$$m = 1,34 \cdot 3,0227 = 2,7104$$

$$fc' = 52,821 - 2,7104 = 50,1106 \text{ Mpa}$$

Tipe E

	fc	(fc – fcr)	$(fc - fcr)^2$
E1	54,235	1,0272	1,055
E2	56,995	3,7872	14,343
E3	54,668	1,4602	2,1322
E4	50,955	- 1,2528	5,075
E5	52,088	- 1,1198	1,254
E6	50,389	- 2,8188	7,9456
E7	53,937	0,7292	0,5317
E8	54,352	1,1442	1,3092
E9	52,371	- 0,8368	0,7002
E10	52,088	- 1,1198	1,2539
	532,078		35,5998

$$fcr' = \frac{532,078}{10} = 53,2078 \text{ Mpa}$$

$$Sd = \sqrt{\frac{35,5998}{10-1}} = 1,9889$$

$$m = 1,34 \cdot 1,9889 = 2,665$$

$$fc' = 53,2078 - 2,665 = 50,5428 \text{ Mpa}$$

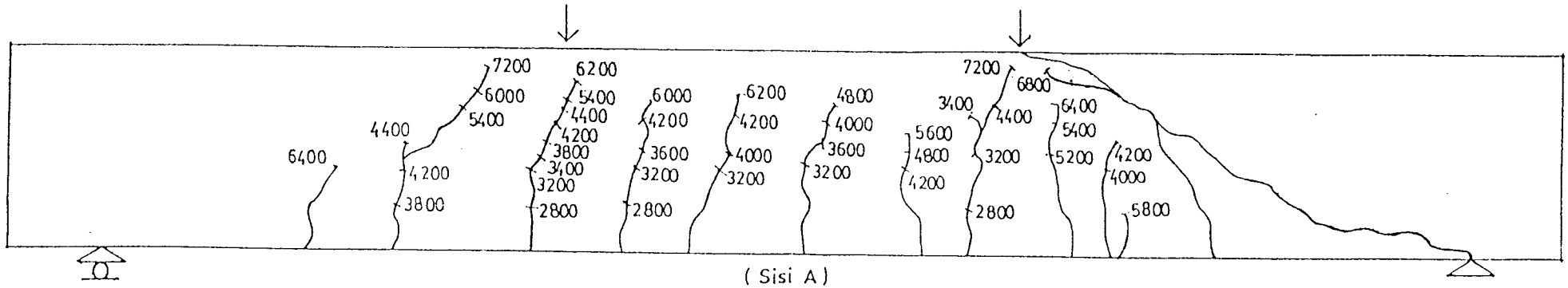
5.1.3. Hasil Uji Kuat Geser

Penelitian dilakukan dengan menggunakan benda uji balok. Hasil penelitian geser dari masing-masing sampel dikelompokkan dalam bentuk tabel yang menunjukkan nilai defleksi pada setiap interval pembebanan serta kuat geser dari masing-masing sampel. Grafik hubungan antara beban dan defleksi, yang dapat dilihat pada gambar lampiran 9,12,13,16,18. Hasil pengujian balok dapat dilihat pada tabel lampiran 8,10,11,15,17. Pola retak yang terjadi pada setiap sampel dapat dilihat pada gambar 5.1, 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, 5.9.

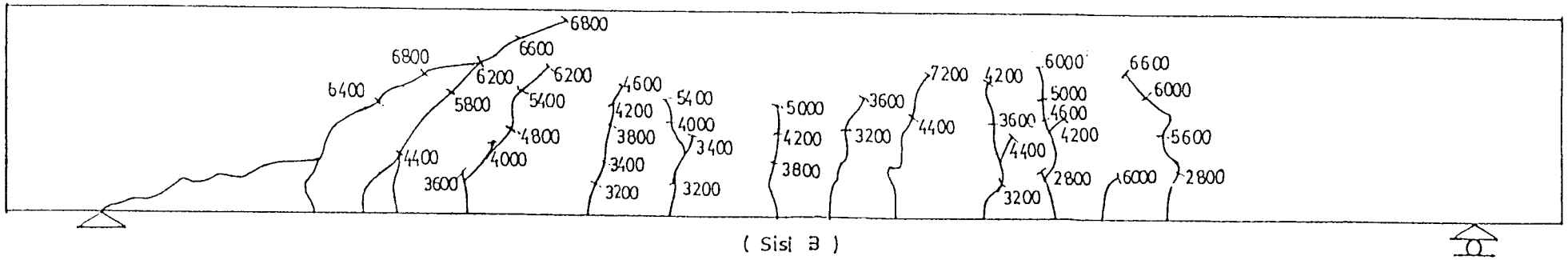
5.1.4. Hasil Pembacaan *Strain Gauge* Beton

Pada penelitian ini, *strain gauge* di pasang di permukaan atas tengah bentang pada balok beton. Maksud dari pemasangan *strain gauge* ini adalah untuk mengetahui secara aktual regangan yang terjadi pada balok beton terutama yang diberi *strain gauge*, ketika balok secara bertahap dibebani hingga runtuh. Pemberia *strain gauge* pada beton terdapat pada balok D,E,F.

Penempatannya pada permukaan balok yang terletak tepat di tengah-tengah bentang balok uji, hal ini atas dasar asumsi awal bahwa balok akan runtuh geser pada lokasi di sekitar bentang geser. Hasil pembacaan strain gauge beton dapat dilihat pada tabel lampiran 18.

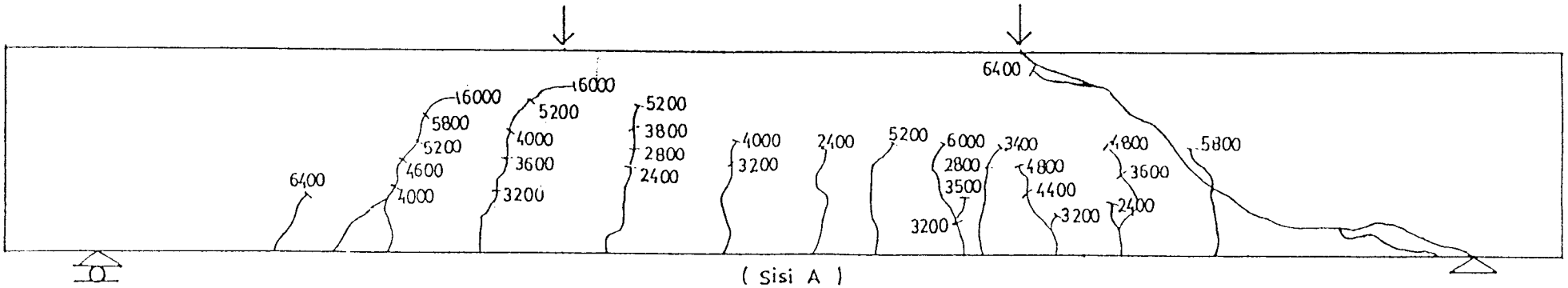


(Sisi A)

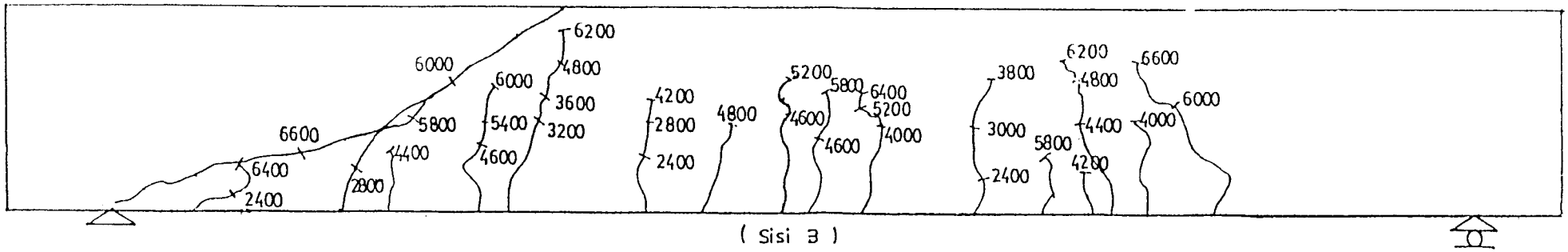


(Sisi B)

Balok BA

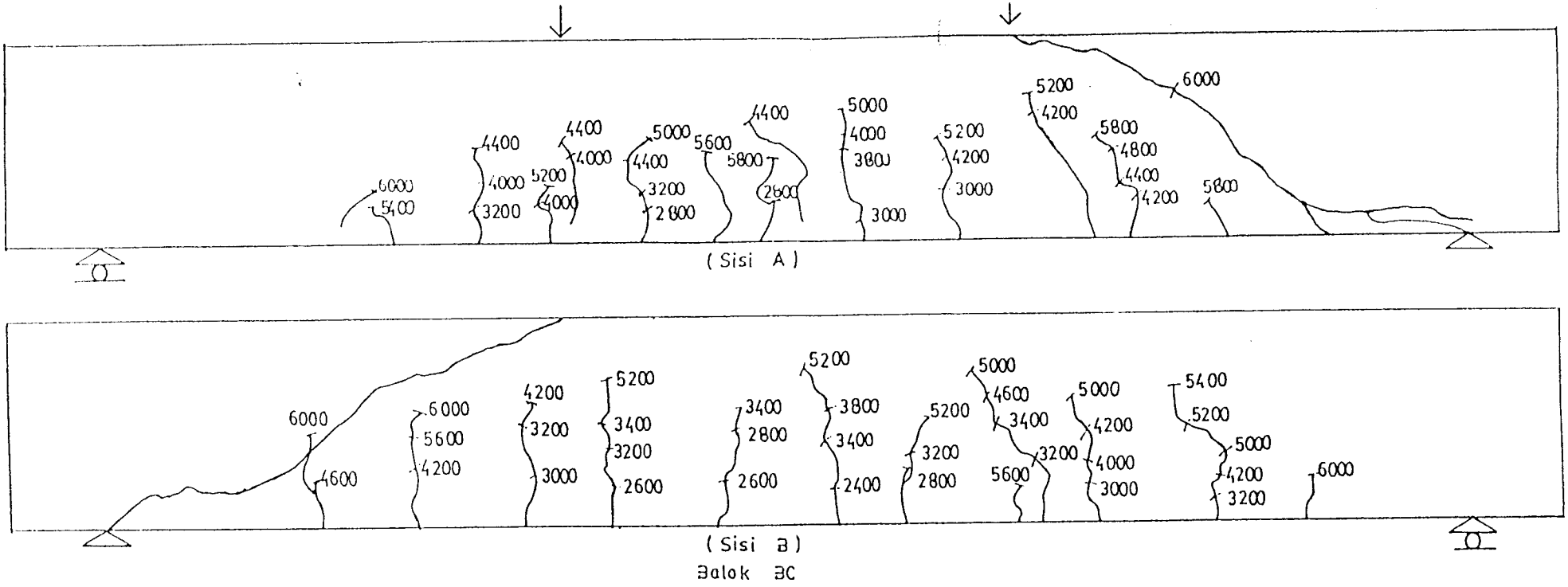


(Sisi A)

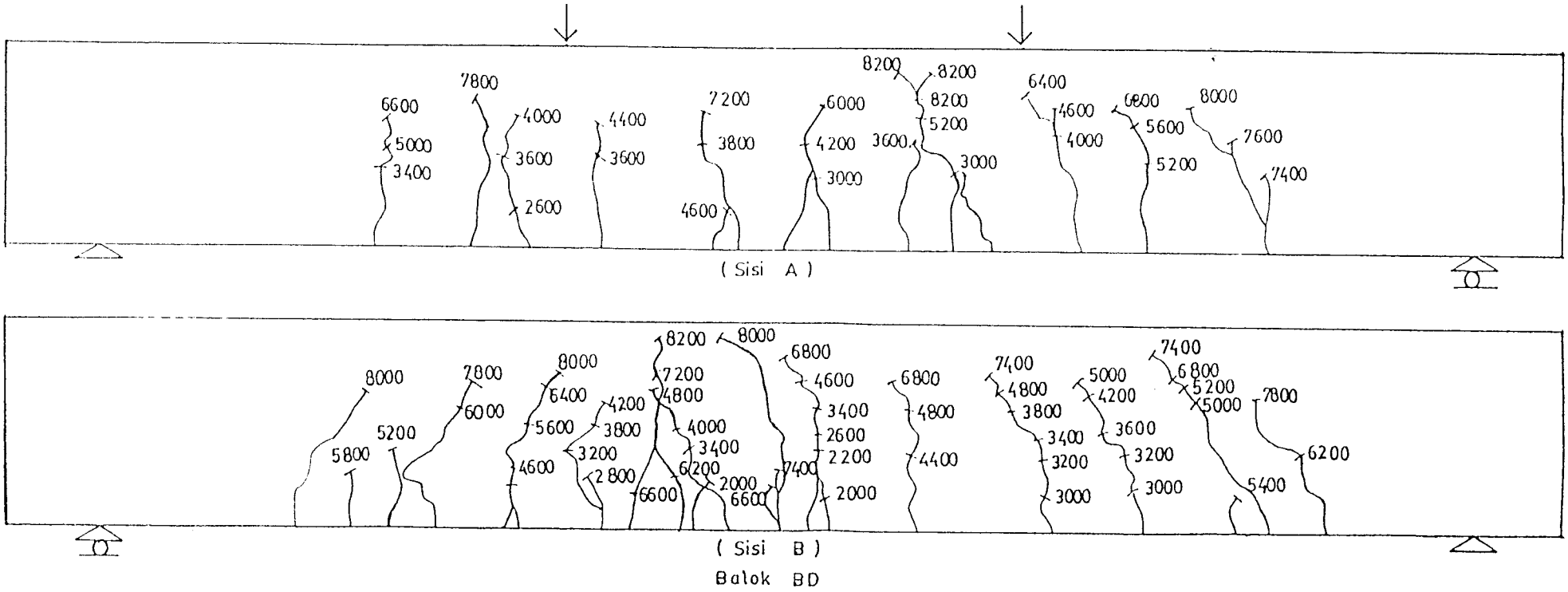


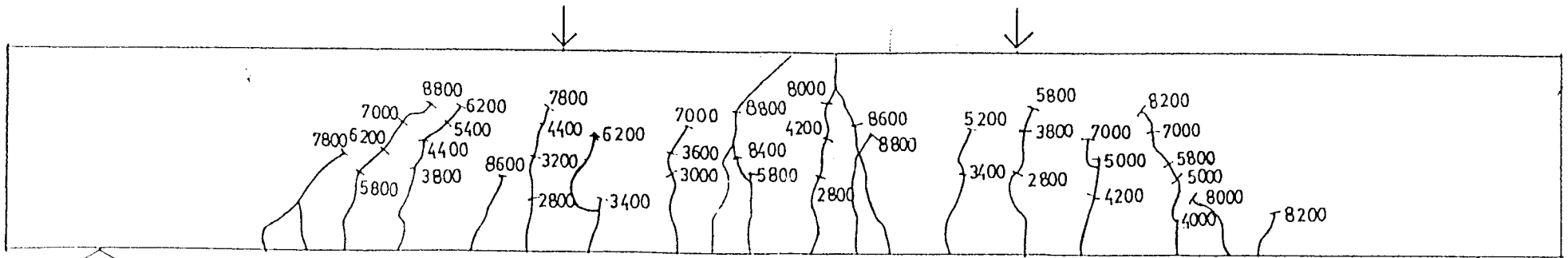
(Sisi B)

Balok BB

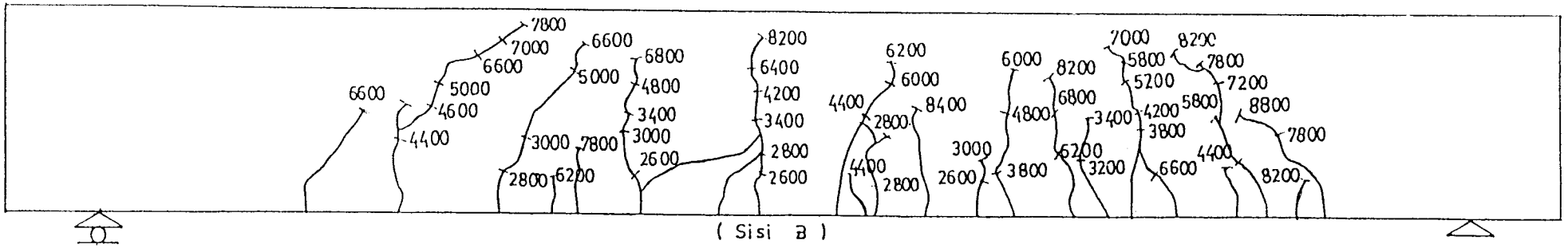


Gambar 5.3. Pola Retak dan Pola runtuh Balok C


6600
5000
3400
7800
4000
3600
2600
4400
3600
7200
3800
4600
6000
4200
3000
8200
8200
8200
5200
3600
3000
6400
4600
4000
6800
5600
5200
8000
7600
7400
(Sisi A)
8000
5800
5200
7800
6000
8000
6400
5600
4600
4200
3800
3200
2800
8200
7200
4800
4000
3400
6200
6600
8000
6800
4600
3400
2600
2200
7400
2000
6800
4800
4400
7400
4800
3800
3400
3200
3000
5000
4200
3600
3200
3000
7400
6800
5200
5000
5400
7800
6200
(Sisi B)
Balok BD

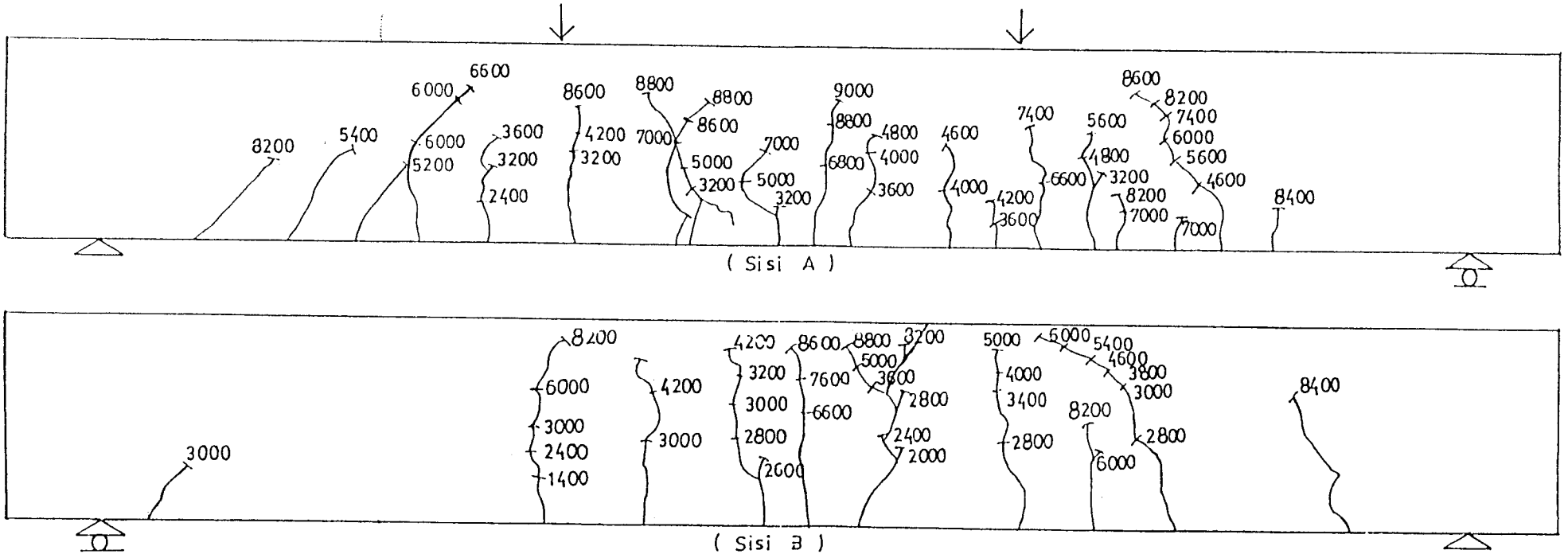


(Sisi A)

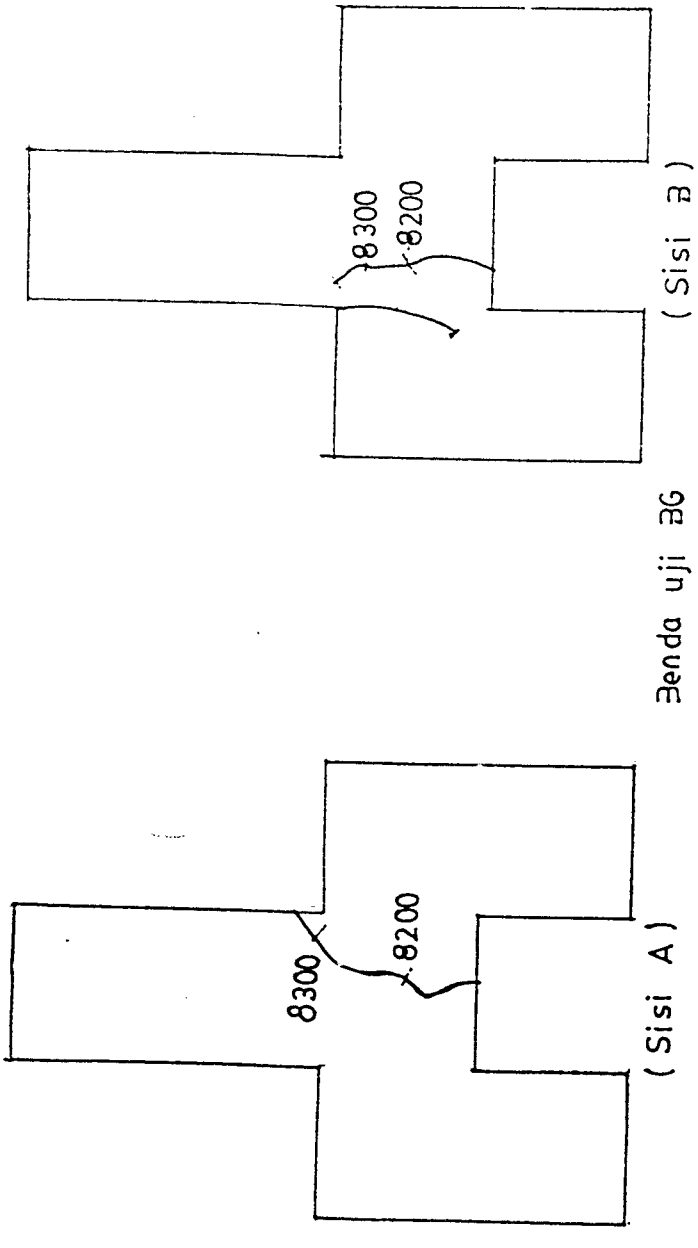


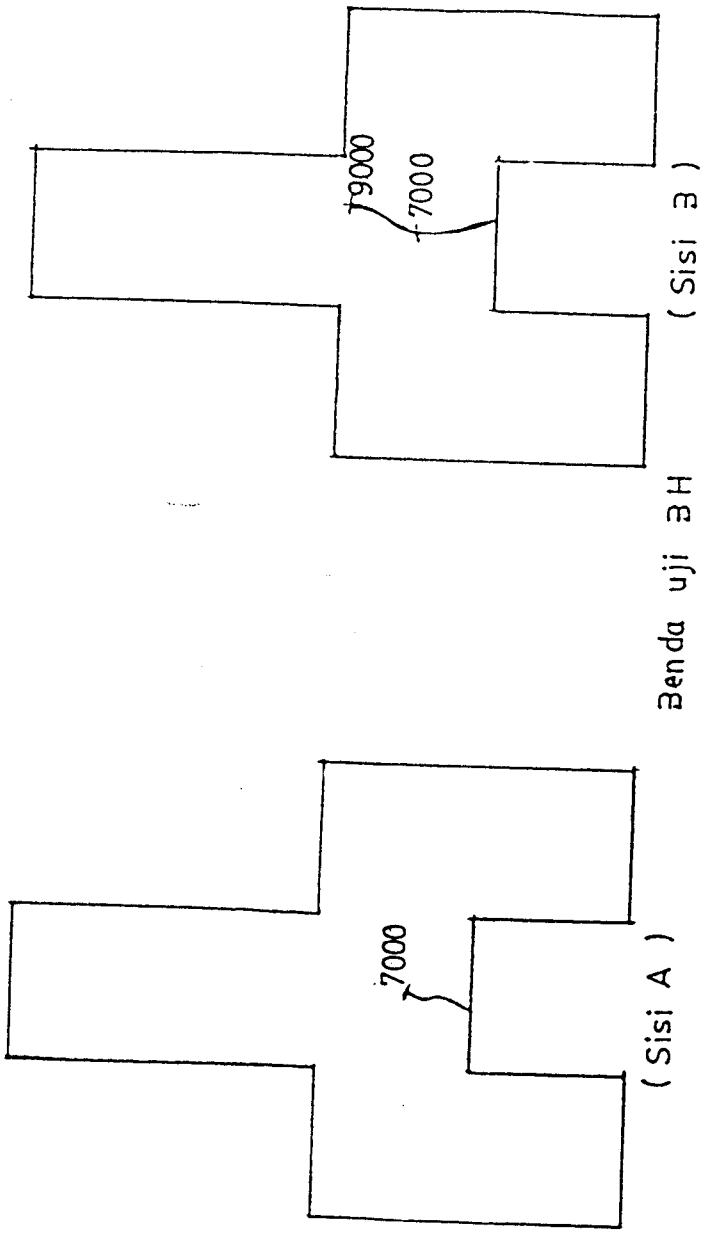
(Sisi B)

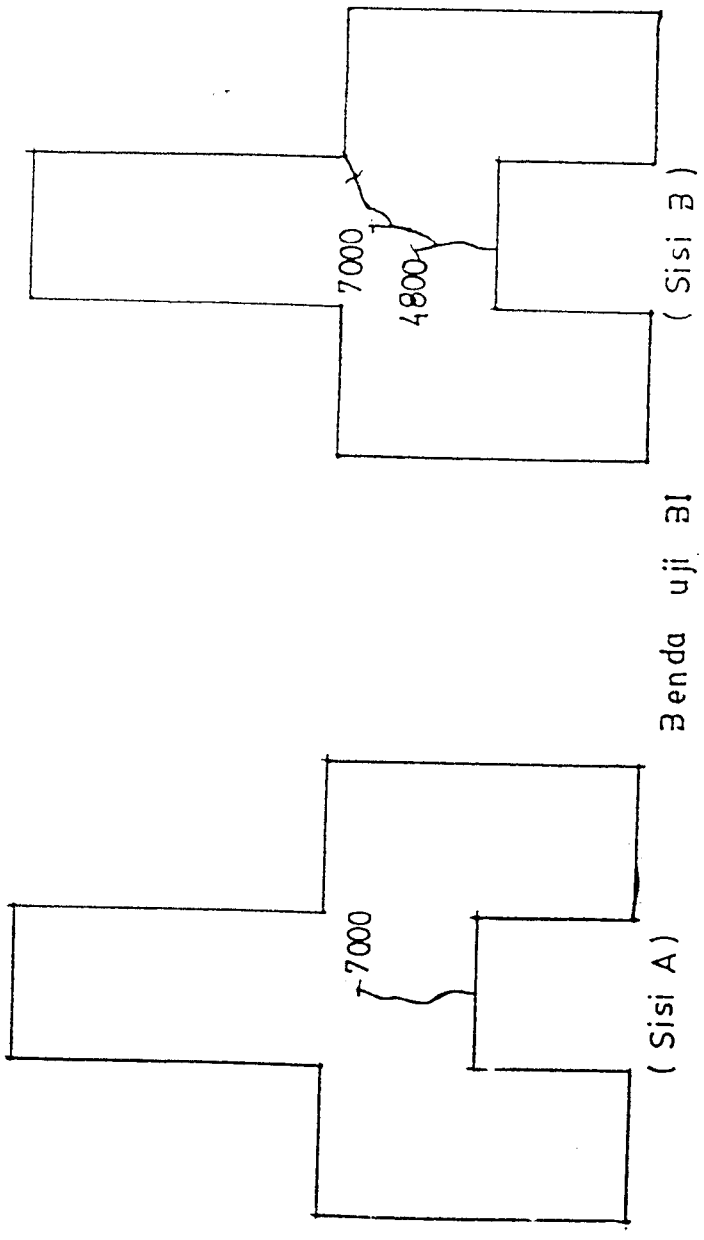
Balok BE


8200
5400
6600
6000
6000
5200
3600
3200
2400
8600
4200
3200
8800
8800
7000
8600
7000
5000
3200
7000
5000
3200
9000
8800
6800
4800
4000
3600
4600
4000
7400
4200
3600
6600
8600
8200
7400
5600
4800
6000
5600
3200
4600
8200
7000
7000
8400
(Sisi A)
3000
8400
6000
3000
2400
1400
4200
3000
4200
3200
3000
2800
2600
8600
7600
6600
8800
3200
5000
3600
2800
2400
2000
5000
5000
5400
4600
4000
3800
3400
3000
8200
2800
2800
6000
8400
(Sisi B)

Balok BF


8300
8200
(Sisi B)
Benda uji BG
8300
8200
(Sisi A)


9000
7000
(Sisi B)
Benda uji BH
7000
(Sisi A)


7000
4800
(Sisi B)
Benda uji BI
7000
(Sisi A)

5.2. Pembahasan

Pembahasan ini didasarkan pada hasil yang didapat dari percobaan. Data dari hasil ini dapat diamati dan diteliti pengaruh pemakaian tulangan geser dan tanpa tulangan geser terhadap kemampuan balok beton bertulang mutu tinggi dalam menerima gaya geser serta perilaku geser yang terjadi pada benda uji.

5.2.1. Kuat Tekan Beton

Kekuatan desak ditentukan dengan uji silinder beton ukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm yang dibuat bersaamaan dengan balok beton dan dirawat dengan cara merendam di dalam bak air. Pengujian kuat tekan silinder dilaksanakan pada umur beton 28 hari. Kuat tekan beton yang disyaratkan pada umur 28 hari adalah 45 Mpa.

Dari tabel 5.2. terlihat bahwa kuat tekan silinder beton rata-rata terutama yang mewakili balok BB sampai BI berada di atas kuat tekan rencana yaitu sebesar 45 Mpa dan lebih kecil dari kuat tekan rata-rata tujuan (*target mean strength*), hal ini terjadi kemungkinan karena nilai slump dari adukan beton berbeda-beda, yaitu berkisar antara 2,5 ; 3; dan 5 cm. Walaupun secara keseluruhan nilai slump untuk semua variasi memenuhi shump rencana seperti yang direkomendasikan dalam metode ACI untuk beton mutu tinggi yaitu antara 2,5 - 5 cm. Nilai *shump* yang berbeda-beda disebabkan karena kadar air dalam pencampuran beton dan kekurang teraturan kelecakan beton.

5.2.2. Pola Retak Balok Beton Bertulang

Data pengamatan pada pengujian balok terdiri dari dua bagian, yaitu data pengamatan yang didapat secara visual meliputi rambatan retak, pola retak, pola runtuh balok, retak lentur awal, retak miring awal serta beban pada saat retak dan beban maksimum yang dapat didukung oleh balok.

Data pengamatan yang lain diperoleh dengan menggunakan alat ukur dial gauge yaitu lendutan yang terjadi pada balok uji, sedangkan pengukuran regangan beton menggunakan alat bantu *strain gauge*.

1. Retak Lentur Awal

Pada awal pembebanan hingga beban yang diperkirakan terjadi retak/balok bebas dari retak. Retak pertama merupakan retak lentur yang terjadi pada sisi serat tarik daerah momen terbesar yaitu di tengah bentang balok, dimana daerah ini diperkirakan terjadi lendutan maksimum. Untuk itu pengamatan retak dipusatkan pada kedua daerah yaitu pada daerah momen maksimum dan pada daerah bentang geser. Pada masing-masing daerah pengamatan retak, retak lentur terjadi pada beberapa tempat dengan jumlah dan jarak retak berbeda untuk masing-masing balok uji. Hal ini tampaknya dipengaruhi oleh jumlah tulangan geser yang terdapat dalam balok, sedangkan peningkatan retak sejalan dengan peningkatan beban, namun tidak menambah panjang retak tetapi juga menimbulkan retak baru. Retak miring sebagai retak geser merupakan pertanda bahwa tarik diagonal mulai terjadi dan seluruhnya merupakan kelanjutan dari retak lentur.

2. Penyebaran Pola Retak

Perambatan retak yang digambarkan dengan besar beban yang menyebabkan retak dimulai ketika retak lentur awal terjadi sampai dengan retak yang menyebabkan keruntuhan balok. Dari gambar 5.1,5.2,5.3 pola retaknya semua menggambarkan pola retak yang hampir sama/di mana pada awal pembebanan, terjadi retak rambut yang arahnya vertikal arah tinggi balok yang dinamakan retak lentur.

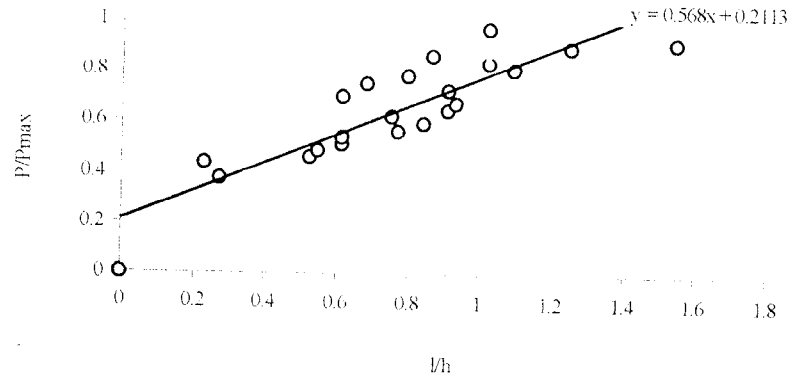
Sejalan dengan peningkatan beban, arah retak rambut membelok horisontal, saat inilah permulaan terjadinya retak miring. Beban ditingkatkan lagi maka terjadilah keruntuhan secara tiba-tiba dan arahnya membentuk diagonal bidang tinggi balok, atau melintasi daerah tekan daan inilah yang dinamakan runtuh geser.

Pada Gambar 5.4, 5.5 dan 5.6 berbeda dari gambar sebelumnya. Pada awalnya pola retaknya sama yaitu terjadi retak rambut yang arahnya vertikal arah tinggi balok, tetapi arah retak sebagian ada yang terus menuju arah vertikal dan sebagian lagi ada yang membelok horisontal. Pertambahan retak dari keduanya terus meningkat seiring penambahan beban, tetapi yang arah vertikal lebih cepat daripada yang membelok arah horisontal.

Setelah mencapai beban runtuh, yakni letak lentur mencapai sisi atas atau ketinggian balok dan tidak terjadi pembelokan arah retakan, yang akhirnya hanya terjadi runtuh lentur. Runtuhnya terjadi tidak secara tiba-tiba, hanya ditandai dengan retakan mencapai ketinggian balok dan sudah tidak dapat meningkat lagi penambahan bebannya.

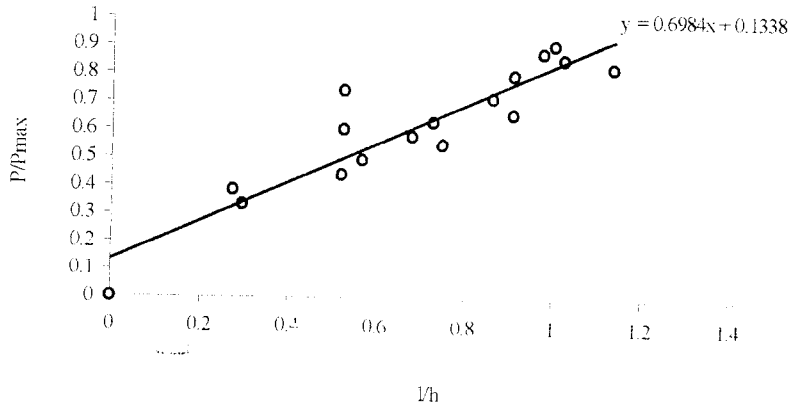
Untuk Gambar 5.7, 5.8, dan 5.9 retak yang terjadi pada benda uji berupa retak vertikal, dengan peningkatan beban, arah vertikal ini membelok horisontal menjadi retak miring. Pada penambahan beban yang lebih besar terjadi runtuh secara tiba-tiba dan arahnya membentuk diagonal bidang badan benda uji, sehingga keruntuhan ini membagi benda uji menjadi dua bagian.

Grafik Hubungan P/Pmax dengan l/h BA



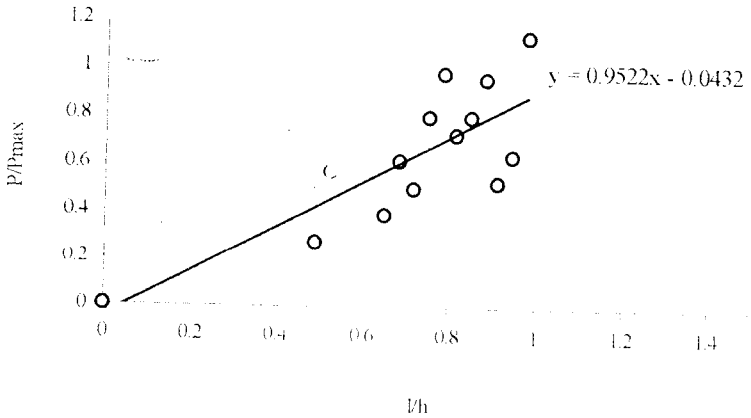
Gambar 5.10. Grafik Regresi Linear BA

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BB



Gambar 5.11. Grafik Regresi Linear BB

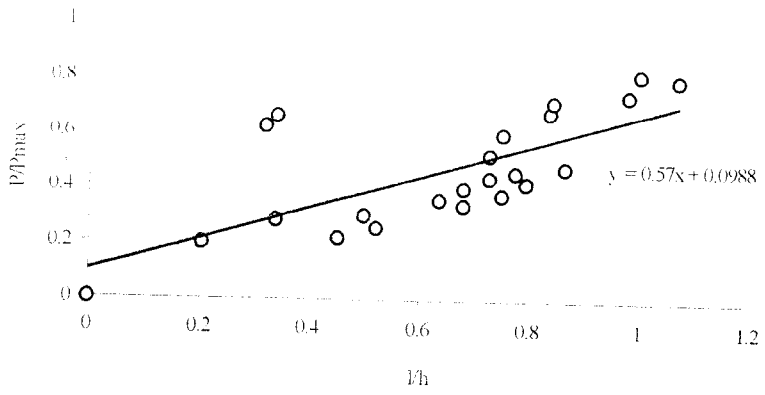
Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BC



Gambar 5.12. Grafik Regresi Linear BC

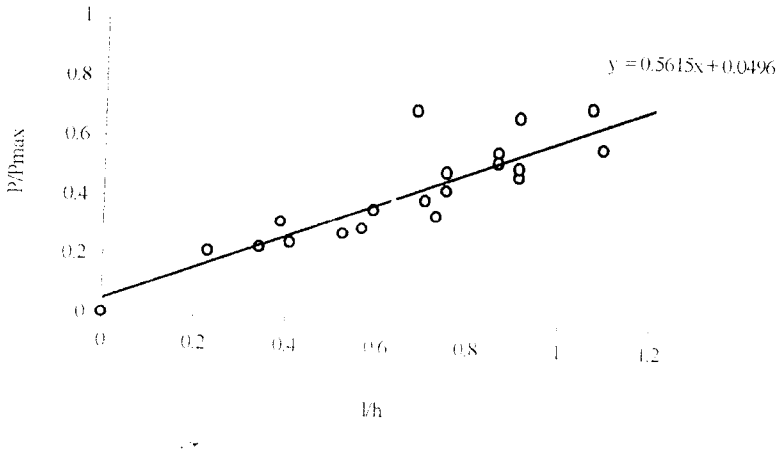
Dari ke-3 grafik di atas yang tanpa menggunakan tulangan geser terlihat bahwa perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok berkecenderungan meningkat secara linear. Hal ini disebabkan setelah retak miring pertama terbentuk pada salah satu sisi daerah retak, yaitu dekat sendi, peningkatan beban berikutnya menyebabkan retak miring semakin masuk ke daerah tekan dengan panjang retak semakin besar.

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BD



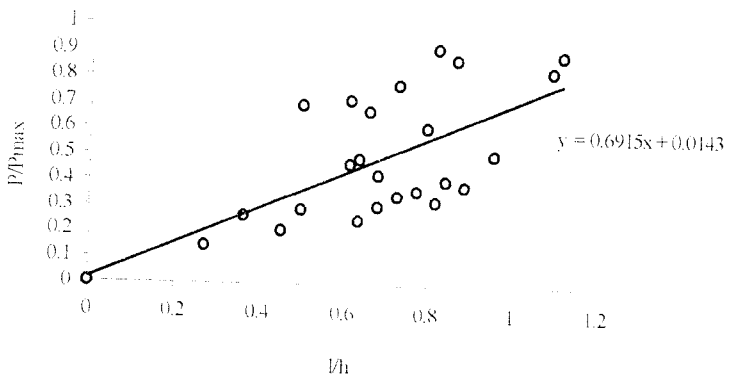
Gambar 5.13. Grafik Regresi Linear BD

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BE



Gambar 5.14. Grafik Regresi Linear BE

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BF

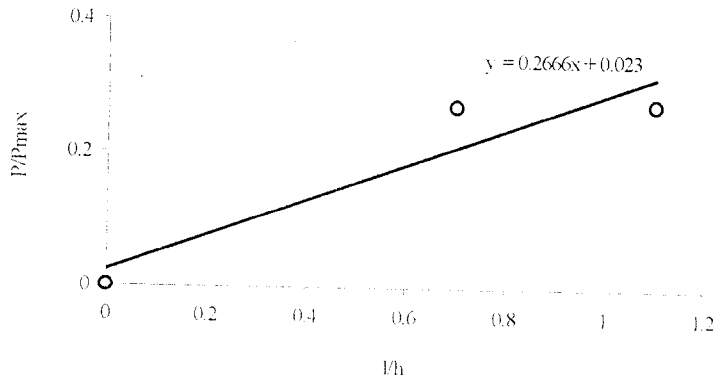


Gambar 5.15. Grafik Regresi Linear BF

Dari ke-3 grafik di atas yang menggunakan tulangan geser terlihat bahwa perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok berkecenderungan meningkat secara linear. Setelah retak miring pertama terbentuk pada daerah bentang geser, peningkatan beban berikutnya menyebabkan retak miring semakin bertambah

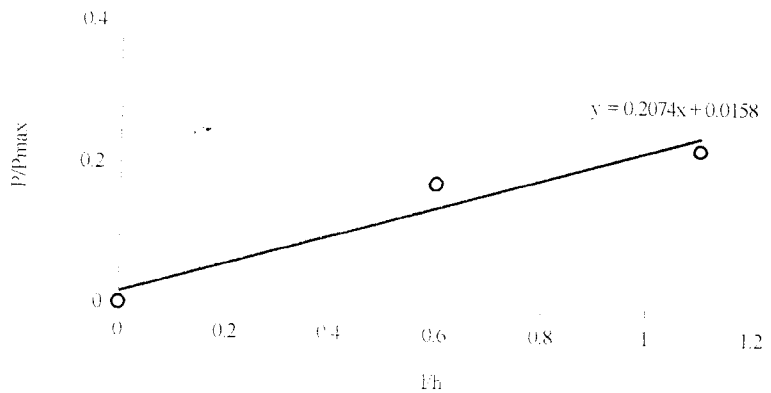
dengan panjang retak semakin besar, sementara retak pada daerah tengah bentang masih melanjutkan retak lentur. Dengan adanya tulangan tekan dan tulangan geser pada daerah bentang geser yang dapat meningkatkan kemampuan daya dukung balok terhadap keruntuhan geser, terlihat bahwa peningkatan beban yang menyebabkan bertambahnya panjang retak, semakin terjadi di tengah bentang.

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BG

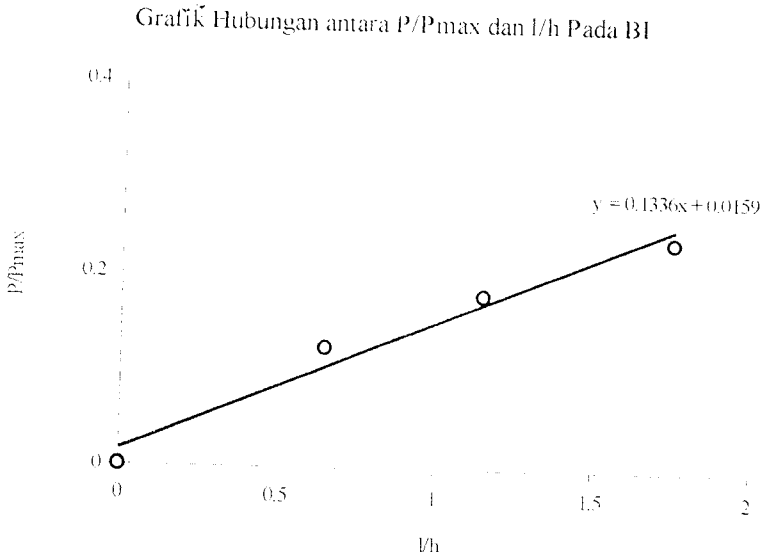


Gambar 5.16. Grafik Regresi Linear BG

Grafik Hubungan antara P/Pmax dan l/h Pada BH



Gambar 5.17. Grafik Regresi Linear BH



Gambar 5.18. Grafik Regresi Linear BI

Dari gambar grafik benda uji BG,BH,BI perbandingan beban retak miring dengan beban maksimum mengalami peningkatan secara linear terhadap perbandingan panjang retak dengan tinggi balok. Dengan peningkatan beban, menyebabkan retak miring semakin menuju kepermukaan tekan dengan panjang retak semakin bertambah.

3. Keruntuhan Balok

Balok A, B, C sebagai balok uji tanpa tulangan geser dijadikan kontrol untuk melihat perilaku balok terhadap geser tanpa diberi tulangan geser. Balok dengan bentang geser 50 cm runtuh dalam geser, di daerah bentang geser dari tumpuan yang ditandai oleh rambatan dan melebarnya retak miring.

Balok A, B, C sebagai balok uji tanpa tulangan geser dijadikan kontrol untuk melihat perilaku balok terhadap geser tanpa diberi tulangan geser. Balok

dengan geser 50 cm runtuh dalam geser, di daerah bentang geser dari tumpuan yang ditandai oleh rambatan dan melebarnya retak miring.

Balok D, E, F sebagai balok dengan tulangan geser mengalami keruntuhan di tengah bentang yaitu runtuh lentur. Keruntuhan lentur yang terjadi menampakkan daktilitas yang tinggi. Balok runtuh lentur setelah mengalami deformasi yang cukup besar, yaitu dengan lendutan lebih dari 8 mm pada tempat pembebanan.

Runtuh geser yang terjadi pada benda uji G, H, I, menunjukkan bahwa retak miring yang akan menyebabkan runtuh geser adalah kelanjutan dari retak vertikal yang menuju pada benda uji.

5.2.3. Kuat Lentur Balok

Balok beton bertulang direncanakan bertulangan sebelah dan bertulangan rangkap. Pada penelitian ini balok direncanakan kuat terhadap lentur, tetapi masih memiliki sifat *under reinforced* dan daktilitas yang terjadi diusahakan tidak terlalu rendah/maka perbandingan luas tarik (As) terhadap luas penampang efektif (b.d) berada di bawah 75% dari perbandingan tulangan seimbang (ρb).

Tabel 5.3. Kuat Lentur Balok

Tipe Balok	ρ	ρb	ρ/ρb %	Kuat tekan Beton fc' (Mpa)	Tegangan Baja tekan fs' (Mpa)	Kapasitas Momen Nominal (kNm)	Kapasitas gaya geser nominal (kN)
A	0,01246	0,0466	26,74	53,5227		20,5779	41,1558
B	0,01246	0,0453	27,5	51,583		20,5299	41,0598
C	0,01246	0,0454	27,4	51,6245		20,531	41,062
D	0,02479	0,044	63,4	50,1106	313,5598	21,0765	42,153
E	0,02479	0,0446	62,6	50,5428	311,5479	21,093	42,186
F	0,02479	0,0446	62,6	50,5428	311,5479	21,093	42,186

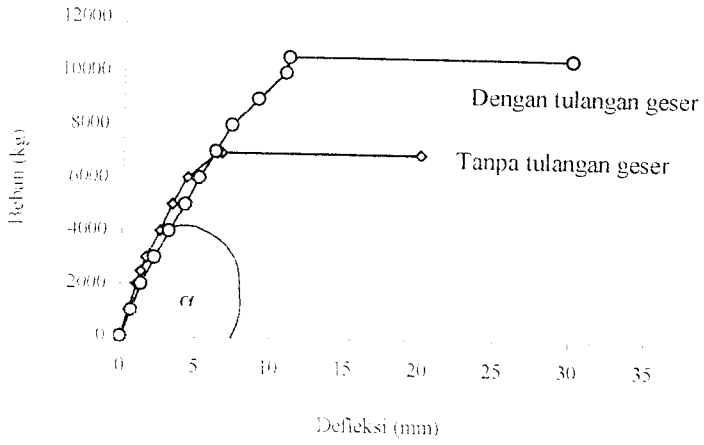
Dari tabel di atas memperlihatkan balok A, B, C mempunyai rasio luas penampang tulangan tarik terhadap luas efektif penampang balok (ρ) lebih kecil dari 75% rasio tulangan seimbang (ρb).

Untuk balok D, E, F mempunyai ρ tidak terlalu kecil, tetapi dekat dengan 75%, sehingga balok akan bersifat *under reinforced* dan daktilitas yang terjadi tidak terlalu rendah.

5.2.4. Lendutan Balok

Secara teoritis dengan analisis mekanika teknik, jika beban yang diberikan pada balok uji semakin besar, lendutan yang terjadi pada model balok juga semakin besar sehingga akan mengalami satu mode lendutan yang terjadi di tengah-tengah bentang. Lendutan pada balok A, B, C sejak awal pembebanan sampai beban maksimum memiliki kecenderungan yang semakin besar terutama di dekat tumpuan. Membesarnya lendutan ini kemungkinan disebabkan pengaruh semakin membesarnya retak miring pada daerah itu.

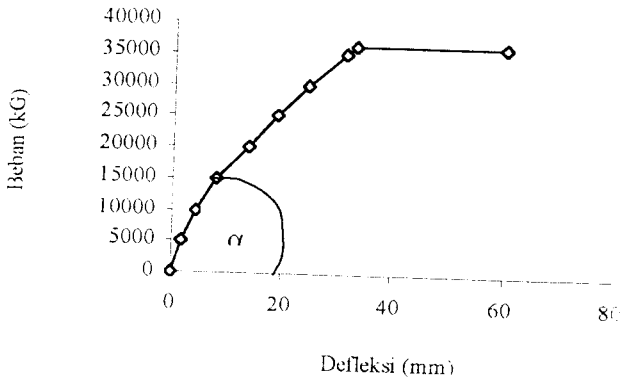
Sedangkan untuk balok D, E, F dengan semakin meningkatnya beban, lendutan semakin bertambah dan terjadi di tengah bentang. Bertambahnya lendutan ini mungkin disebabkan retak vertikal pada daerah ini semakin melebar. Pada benda uji BG, BH, BI, dari hasil pengamatan dengan bertambahnya beban, semakin meningkat lendutan di tengah benda uji. Hal ini menunjukkan bahwa benda uji mengalami retak dan runtuh pada daerah tengah benda uji tersebut.



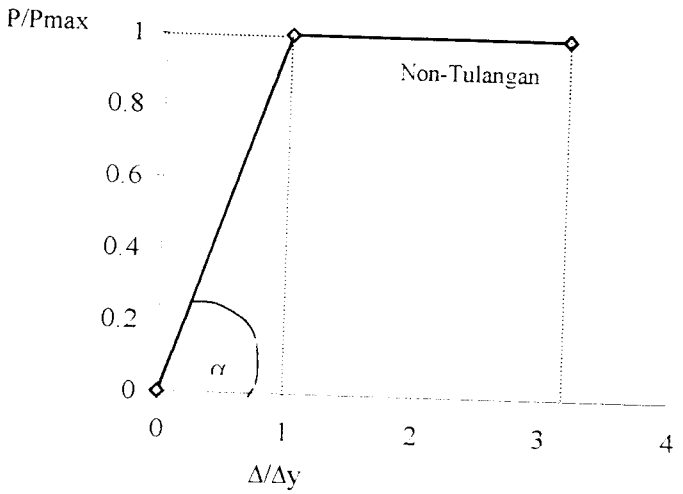
Gambar. 5.19 Grafik hubungan Beban Defleksi di tengah bentang

Dari grafik hubungan beban-defleksi di tengah bentang untuk balok tanpa tulangan geser dan balok dengan tulangan geser menunjukkan bahwa balok dengan tulangan geser lebih kaku dari balok tanpa tulangan geser. Kekakuan balok tanpa tulangan geser 71,9 % dari kekakuan balok dengan tulangan geser.

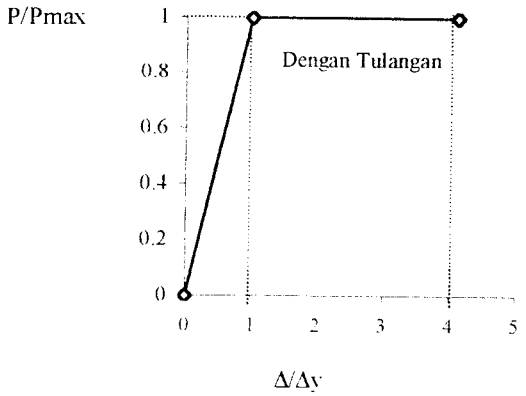
Hal ini menunjukkan penggunaan tulangan geser pada balok menampakkan daktilitas yang tinggi. Pada beban yang sama balok dengan tulangan geser perbandingan beban terhadap defleksi (tg α) lebih besar daripada tanpa tulangan geser, berarti tulangan geser lebih kaku, sehingga kelengkungan atau sudut rotasi (θ) yang dibentuk akibat beban pada balok dengan tulangan geser lebih kecil daripada balok tanpa tulangan geser.



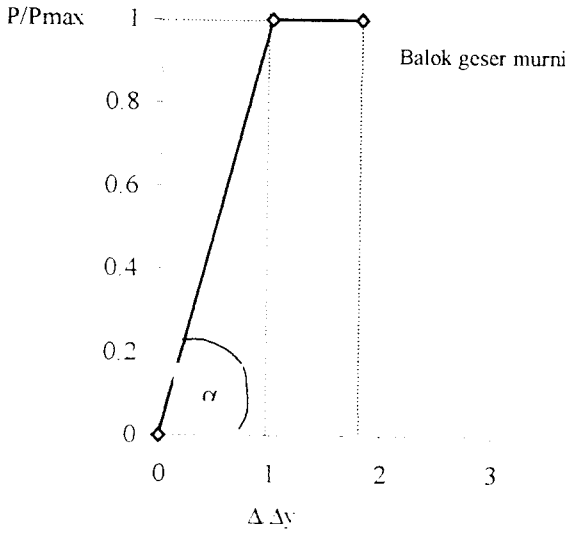
Gambar 5.20 Grafik Beban-Defleksi BG-BI



Gambar 5.21. Kurva non-dimensional balok tanpa tulangan geser

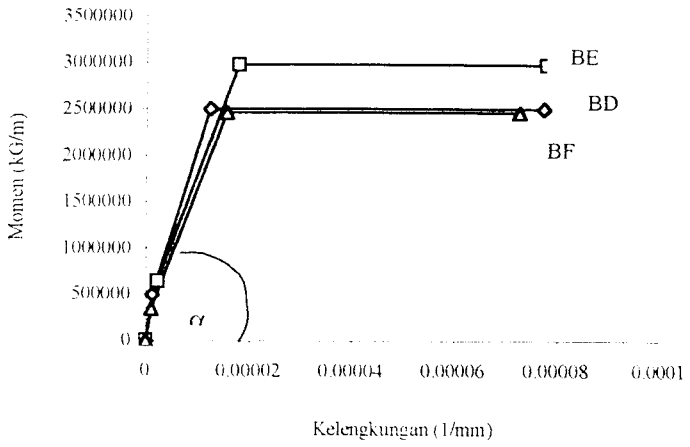


Gambar 5.22. Kurva non-dimensional balok dengan tulangan geser



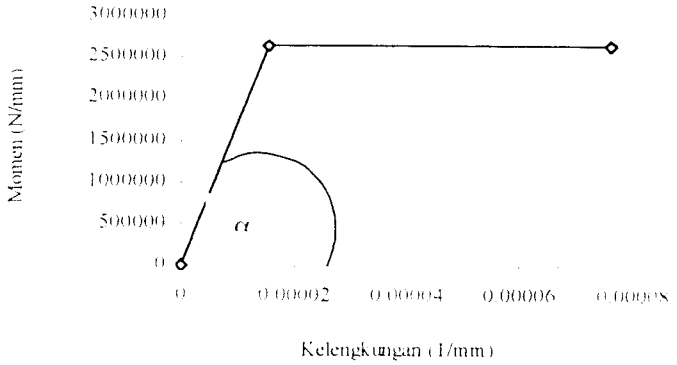
Gambar 5.23. Kurva non-dimensional benda uji geser murni

Dari grafik kekakuan gambar di atas dinyatakan dalam bentuk format kurva non-dimensional yang menyatakan P/Pmax versus $\Delta/\Delta y$. Dari grafik tersebut dapat dicari *displacement ductility*

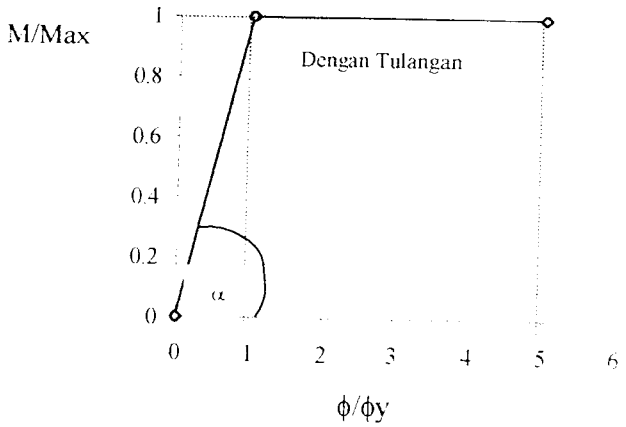


Gambar 5.24. Grafik Momen kelengkungan BD-BF

Dari grafik Momen-kelengkungan balok dengan tulangan geser di atas menghasilkan kurva linear M-ϕ pada momen yang besarnya sama dengan kelengkungan yang hampir sama dari ketiga balok. Setelah baja leleh terjadi peningkatan kelengkungan yang besar pada momen yang hampir konstan.



Gambar 5.25. Grafik Momen Kelengkungan Rata-rata Dengan Tulangan Geser



Gambar 5.26. Kurva non-dimensional

Dari grafik kekakuan gambar di atas dinyatakan dalam bentuk fomat kurva non-dimensional yang menyatakan M/Mmax versus $\phi/\phi y$. Dari grafik tersebut dapat dicari *curvature ductility*.

5.2.5. Kuat Geser

1. Gaya Geser Pada Retak Miring Pertama

Dari gambar pola retak, secara umum seluruh balok memiliki pola retak yang hampir sama, yaitu permulaan retak berupa retak lentur kemudian dilanjutkan retak miring yang terjadi di daerah bentang geser. Sebagai pedoman untuk menentukan retak miring pertama yaitu retak yang membentuk sudut 45° atau lebih kecil terhadap sumbu horisontal dan terjadi masih dibawah garis netral. Secara umum dapat dikatakan retak geser pertama akan terjadi pada daerah yang memiliki momen terkecil atau mendekati rol. Hasil pengukuran beban retak miring pertama dari semua benda uji disajikan dalam Tabel 5.4.

Tabel 5.4. Beban Retak Miring Pertama

Benda Uji	Berdasarkan pola retak		Beban Maksimum	Persen terhadap Beban Maks
	No. Retak	Beban (kN)	(kN)	%
BA	10	48	74	64,9
BB	11	46	72,46	63,5
BC	10	44	61,4	71,7
BD	8	36	100	36
BE	11	46	119	38,6
BF	7	32	98,4	32,5
BG	2	83	300	27,6
BH	2	90	400	22,5
BI	2	70	390	17,9

Dari Tabel 5.4. terlihat bahwa balok masih mempunyaai kuat sisa walaupun telah terjadi retak miring pertama sebelum rentuh gesernya. Gaya geser retak miring pertama pada balok BA, BB, BC tercapai pada beban 63,5% sampai 71,7% dari kapasitas runtuhnya. Sedang untuk balok BD, BE, BF tercapai pada beban 32,5% sampai 38,6% dari kapasitas runtuhnya.

Tabel 5.5. Tegangan Geser berdasarkan gaya geser pengujian

Benda Uji	Vc (N)	Tegangan Geser (N/mm²) $V = \frac{3V}{2b.h}$
BA	24.000	1,4875
BB	23.000	1,4255
BC	22.000	1,3635
BD	18.000	1,115
BE	23.000	1,4255
BF	16.000	0,9915
BG	41.500	6,225
BH	45.000	6,75
BI	35.000	5,25

Tabel 5.6. Gaya Geser Pada Retak Miring Pertama

Benda Uji	Gaya Geser Pengujian (kN)	Rumus SNI		Nilai Perbandingan	
		Pers. (2.69)	Pers. (2.68)	½	1/3
	1	2	3	4	5
BA	24	25,953	24,004	0,925	0,999
BB	23	25,478	23,598	0,903	0,975
BC	22	25,488	23,607	0,863	0,932
BD	18	24,333	24,556	0,739	0,733
BE	23	24,438	24,646	0,941	0,933
BF	16	24,438	24,646	0,655	0,649

Benda Uji	Gaya Geser Pengujian (kN)	Vc = 1/6 $\sqrt{fc'}$.b.d	Vc = 1/3 fc'.b.d	Nilai Perbandingan	
				½	1/3
	1	2	3	4	5
BG	41,5	11,798	23,596	3,517	1,758
BH	45	11,798	23,596	3,814	1,907
BI	35	11,798	23,596	2,966	1,483

Dari Tabel 5.6. seluruh balok uji dari balok A sampai F menunjukkan kapasitas geser nominal pengamatan lebih kecil daripada hasil perhitungan dengan persamaan-persamaan pendekatan. Memperhatikan hasil perhitungan kedua persamaan tersebut, memberikan hasil yang relatif dekat dengan hasil pengamatan, sehingga persamaan tersebut dapat digunakan untuk memprediksikan kapasitas geser saat retak miring pertama pada balok. Jadi seluruh balok uji tersebut mempunyai kuat geser menyamai kapasitas retak miring pertama. Sedangkan untuk benda uji BG, BH, dan BI menunjukkan kapasitas geser nominal pengamatan lebih besar daripada hasil perhitungan gaya geser ijin.

2. Gaya Geser Ultimit/Runtuh

Penentuan beban runtuh didasarkan pada struktur patah/runtuh atau struktur sudah tidak dapat menahan peningkatan beban lagi. Yang ditandai hancurnya beton atau lelehnya tulangan baja. Dari hasil ini dibandingkan dengan kuat geser

pada retak miring pertama, untuk melihat masih berapa persen kemampuan geser pada saat runtuh, setelah terjadi retak miring pertama. Hasil analisis nilai banding kuat lentur atau momen nominal rencana, gaya geser total (Vn) berdasarkan jumlah Vc dan Vs serta gaya geser hasil pengamatan dapat dilihat pada tabel 5.7.

Tabel 5.7. nilai banding kuat batas, geser nominal, dan hasil pengamatan.

Tipe Balok	Mn Rencana (kNm)	Vn Rencana (kNm)	Vc Per. (2.69) (kNm)	Vs Per.(2.70) (kNm)	Vn Per.(2.67) (kNm)	Penga-matan (kN)	Nilai Banding		
							6/3	7/3	7/6
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
BA	20,5779	41,1558	25,953	-	25,953	37	0,63	0,899	1,425
BB	20,529	41,0598	25,478	-	25,478	36,23	0,62	0,882	1,422
BC	20,531	41,062	25,488	-	25,488	30,7	0,62	0,747	1,204
BD	21,076	42,153	25,333	48,22	72,553	50	1,726	1,186	0,689
BE	21,093	42,186	25,438	48,22	72,658	59,5	1,727	1,41	0,819
BF	21,093	42,186	25,438	48,22	72,658	49,2	1,727	1,166	0,677

Nilai banding kuat geser yang tersaji pada kolom 8 menunjukkan kesesuaian dengan rencana awal bahwa balok diharapkan tidak runtuh lentur melainkan runtuh geser (kapasitas lentur lebih besar dari kapasitas geser), hal ini terjadi pada balok A, B dan C (balok bertulang tanpa tulangan geser). Sedangkan untuk balok D, E, dan BF (balok bertulang dengan tulangan geser) menunjukkan kapasitas lentur lebih kecil dari kapasitas gesernya, sehingga balok tersebut mengalami runtuh lentur.

Pada kolom 9, balok A, B, dan C memperlihatkan kuat geser yang terjadi lebih kecil dari kuat geser rencana. Sedang untuk balok D, E, dan F kuat geser yang terjadi lebih besar dari kuat geser rencana. Untuk kolom 10 memperlihatkan balok A, B, dan C mempunyai nilai banding lebih dari satu, ini berarti kuat gesernya secara efektif memberikan andil terhadap kekuatan geser balok dan tulangan tarik yang dilalui retak diperkirakan telah melampauai tegangan

lelehnya. Sedangkan balok D, E, dan F memiliki nilai banding yang relatif sama dan dibawah nilai satu, ini menunjukkan pengaruh pengempatan tulangan geser yang terdapat pada balok tersebut belum memberikan kontribusi yang berarti terhadap kekuatan geser balok, tetapi sudah mampu mencegah kegagalan balok di daerah bentangan geser.

Tabel 5.8. Nilai banding kuat geser nominal, dan hasil pengamatan

Benda uji	Vc = 1/3 $\sqrt{fc'}$.b.d	Vs (KN)	Vn = Vc (kN)	Pengamatan (kN)
BG	23,596	-	23,596	150
BH	23,596	-	23,596	200
BI	23,596	-	23,596	195

Pada tabel di atas benda uji BG, BH, dan BI memperlihatkan kuat geser pengujian lebih besar dari kuat geser ijin, ini berarti kuat gesernya secara efektif memberikan andil yang lebih besar dari kekua·an geser ijin benda uji.

5.2.6. Pengaruh Tulangan Geser

Pada balok A, B, dan C dimana balok tidak diberi tulangan geser, keruntuhan geser terjadi pada daerah bentang geser, sehingga sesuai dengan anggapan awal. Untuk balok D, E, F (balok dengan tulangan geser), keruntuhan yang terjadi pada daerah momen maksimum di sekitar tengah bentang. Maka retak diagonal dan lokasi keruntuhan yang terjadi pada balok tersebut memiliki hubungan dengan tulangan geser.

1. Pergeseran lokasi retak akibat pemberian tulangan geser.

Pada balok A, B, dan C balok tanpa tulangan geser pada dasarnya balok ini runtuh di daerah bentang geser. Lokasi retak geser membentang dari dukungan

sendi sampai mendekati titik pembebanan. Membentuk garis diagonal. Balok D, E, dan F secara fisik pola retaknya mirip dengan balok A, B, dan C, namun keruntuhan balok tersebut telah dipengaruhi adanya tulangan geser, ini dapat diketahui berdasarkan lokasi keruntuhan balok terjadi di tengah bentang, sehingga dengan demikian lokasi runtuh balok mengalami pergeseran tempat.

2. Pengaruh Letak tulangan geser

Dari hasil pengujian, seluruh balok yang diberi tulangan geser tidak mengalami kegagalan geser. Ini menunjukkan bahwa pada lokasi terlemah dari balok yang dibebani beban terpusat dapat dicegah terjadinya keruntuhan geser dengan menempatkan tulangan geser di sekitar bentang geser. Balok A, B, dan C seluruhnya mengalami keruntuhan dalam geser dan terletak dekat tumpuan, sedangkan panjang retak geser terhadap proyeksi sumbu horisontal semakin panjang dengan bertambahnya beban yang diberikan pada balok dan sudut kemiringan retak pada pola runtuh geser semakin curam, terutama sudut bukaan retak diagonal yang menuju ke arah titik pembebanan. Sudut kemiringan retak miring pertama dan sudut kemiringan retak saat beban runtuh serta panjang retak disajikan dalam Tabel 5.9.

Tabel 5.9. Sudut kemiringan retak miring pertama dan retak pada saat beban runtuh

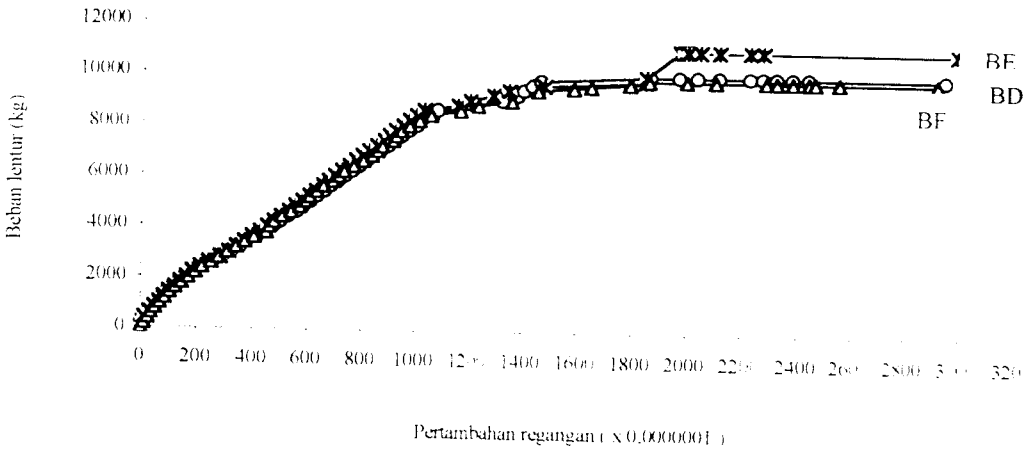
Benda Uji	Sudut Kemiringan retak miring pertama (°)	Sudut kemiringan retak saat beban runtuh (°)		Panjang retak saat beban maksimum (mm)
		Membuka ketumpuan	membuka ke tengah bentang	
BA	44°	18°		555
BB	49°	33°		540
BC	45°	8°		550
BD	47°		46°	220
BE	44°		49°	270
BF	46°		38°	255
BG	52°	52°		130
BH	68°	68°		110
BI	54°	45°		175

Pengaruh penempatan tulangan geser terhadap besar beban retak miring pertama memiliki kecenderungan meningkat. Hal ini menunjukkan daktilitas balok semakin baik untuk balok yang diberi tulangan penuh. Balok tanpa tulangan geser (A, B, dan C), setelah retak miring pertama terjadi, penambahan beban berikutnya menyebabkan balok kehilangan daya dukungnya dengan kuat sisa yang dimiliki sebelum mencapai beban maksimum rata-rata sebesar 33,3%. Peningkatan beban pada balok D, E, dan F dibanding dengan balok A, B, dan C menunjukkan peran tulangan geser dalam mendukung beban/retak miring pertama terjadi pada beban antara 32,5% sampai 38,6% terhadap beban maksimumnya. Dengan demikian balok masih memiliki kekuatan sisa kira-kira 64,3% setelah terjadi retak miring pertama. Hal ini memberikan indikasi adanya mekanisme dimana tulangan longitudinal tekan memberikan andil terhadap kekuatan balok.

5.2.7. Analisis data *strain gauge* beton

Dari hasil pengujian/data pembacaan regangan strain gauge pada beton di tengah-tengah bentang yang terjadi relatif kecil dan menyusut/regangannya negatif. Dilihat dari bentuk grafik pertambahan regangan, ada kecenderungan untuk benda uji yang mengalami runtuh lentur, regangannya negatif atau menyusut, seperti yang terjadi pada balok D, E, dan F.

Hubungan beban dan regangan untuk masing-masing balok uji ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada Gambar 5.27.



Gambar. 5.27. Grafik hubungan Beban-Regangan dari pembacaan *stram indicator*

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut ini :

1. Berdasarkan mekanisme retak, retak awal yang terjadi berupa retak-retak lentur di sekitar momen terbesar, sedangkan retak geser merupakan kelanjutan dari retak lentur, hal ini membuktikan terjadinya retak geser lentur.
2. Kegagalan balok A, B, dan C, seluruhnya runtuh geser, ini sesuai dengan perencanaan awal bahwa balok dengan a/d sebesar 2,584 bila rusak geser, maka tipe keruntuhannya geser lentur.
3. Kegagalan balok D, E, dan F, seluruhnya runtuh lentur, ini terjadi karena saat beban bekerja pada balok, retak vertikal terbentuk pada serat tarik pada daerah momen maksimum.
4. Beberapa persamaan empirik yang digunakan sebagai pembanding dalam penenetuan kuat geser saat retak miring pertama menunjukkan kedekatan hasil dengan pengamatan. Pada balok D, E, F oleh adanya tulangan geser penuh pada bentangan geser menyebabkan peningkatan kuat geser hingga mencapai 24,9% sampai dengan 39,2%.

5. Pola retak yang menyebabkan keruntuhan balok A, B, C memiliki kemiringan yang landai membentuk garis retak diagonal dari tumpuan ke sepertiga bentang, sedangkan balok D, E, F kemiringan retak lebih curam, sudut kemiringan retak miring awal rata-rata 45° saat menjelang beban runtuh, retak vertikal merambat ke atas sesuai peningkatan beban.
6. Penggunaan beton mutu tinggi akan meningkatkan kekuatan geser nominal pada balok.
7. Penggunaan tulangan geser menunjukkan balok lebih kaku daripada tanpa tulangan geser, berarti menampakkan daktilitas yang tinggi. Kekakuan balok tanpa tulangan geser 71.9% dari balok dengan tulangan geser.

6.2. Saran

Saran-saran yang dapat disampaikan dari hasil penelitian, pembahasan, dan kesimpulan adalah sebagai berikut ini :

1. Untuk lebih mengetahui perilaku tulangan geser di dalam balok ketika memberikan andil terhadap kekuatan geser, perlu dipasang *strain gauge* pada tulangan geser/terutama pada lokasi yang diperkirakan runtuh geser.
2. Perlu penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi bahan admixture terhadap tegangan dan regangan yang terjadi pada beton.
3. Perlu penelitian lebih lanjut tentang pengaruh beban terpusat pada perilaku geser struktur beton bertulang dengan variasi jarak tulangan geser dan rasio tulangan yang lebih tinggi atau lebih rendah dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

---------, 1991, **Tata Cara Perhitungan Struktur Beton Untuk Bangunan Gedung**, SK SNI T-15-1991-03, Departemen Pekerjaan Umum, Bandung.

Istimawan Dipohusoso, 1994, **Struktur Beton Bertulang**, PT. Gramedia Pustaka Utama Jakarta.

Kardiyono Tjokrodimulya, ME,Ir, 1992, **Teknologi Beton**, Jurusan Teknik Sipil, UGM, Yogyakarta.

Laurentius Wahyudi, Syahril A. Rahim, 1997, **Struktur Beton Bertulang**, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Murdock, L.J, 1991, **Bahan dan Praktek Beton**, Edisi keempat, Erlangga, Jakarta.

Nawy, Edward G, 1990, **Beton Bertulang Suatu Pendekatan Dasar**, PT. Eresco, Bandung.

Phil M. Ferguson, 1986, **Dasar-Dasar Beton Bertulang**, Edisi Keempat, Erlangga, Jakarta.

F.X. Supartono, **Beton Mutu Sangat Tinggi Dengan Menggunakan Mikro Silika**, Presentasi Ilmiah Beton Mutu Tinggi, Universitas Indonesia, 20 Februari 1991.

F.X. Supartono, **Beton Berkinerja Tinggi Keunggulan dan Permasalahannya**, Seminar HAKI, Jakarta, 25 Agustus 1998.

Suwandojo Siddiq, **Perencanaan Campuran Beton Mutu Tinggi dan Beton Berpenampilan Tinggi Untuk Struktur Bangunan Gedung Bertingkat Tinggi**, Diskusi Teknologi Beton, FISP UII, 27 Januari 2000.

Ashraf H. Elzanaty, Arthur H-Nilson, dan Floyd O. State, **Shear Capacity of Reinforced Concrete Beams Using High-Strength Concrete**, ACI Journal, Maret-April 1986.

Shuaib H. Ahmad, A.R. Khaloo, dan A. Poveda, **Shear Capacity of Reinforced High Strength Concrete Beams,** ACI Journal, Maret-April 1986.

Wisnumurti, 1996, **Pola Retak dan Pola Runtuh Geser Balok Beton Bertulang Oleh Momen Lentur Yang Dikerjakan Pada Ujung-ujungnya**, Tesis S-2, Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta.

LAMPIRAN

HASIL PEMERIKSAAN BERAT JENIS PASIR

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat pasir jenuh kering muka, gram (B_0)	500	500,3	500,15
Berat piknometer berisi air dan pasir, gram (B_1)	994	993,8	993,9
Berat pasir kering mutlak, gram (B_2)	487,5	488,3	487,9
Berat piknometer berisi air (B_3)	675	675	675
Berat jenis, gr / cm^3	2,683	2,69	2,6945
Berat jenis kering muka air, gr / cm^3	2,762	2,756	2,759
Penyerapan air (pasir jenuh kering muka), %	2,564	2,457	2,5105

HASIL PEMERIKSAAN BERAT JENIS KERIKIL/BATU PECAH

Uraian	Sampel 1	Sampel 2	Rata-rata
Berat batu pecah kering mutlak, gram (B_1)	4920	4932	4926
Berat batu pecah jenuh kering muka, gram (B_2)	5000	4997,9	4998,9
Berat batu pecah dalam air, gram (B_3)	3150	3154	3152
Berat jenis, gr / cm^3	2,6595	2,6747	2,6671
Berat jenis jenuh kering muka, gr / cm^3	2,7027	2,7105	2,7066
Penyerapan air (jenuh kering muka), %	1,6260	1,336	1,481

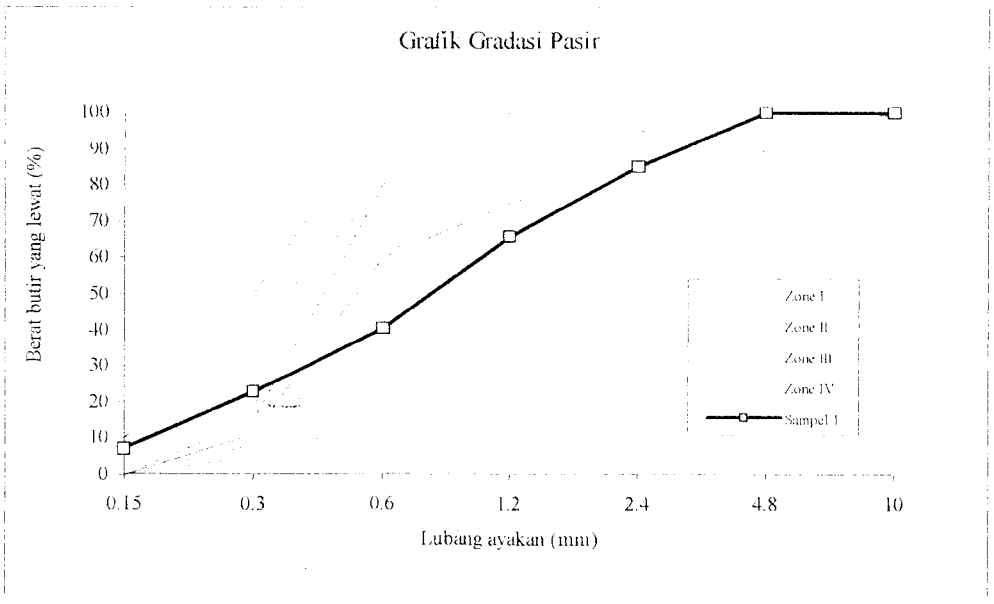
HASIL PEMERIKSAAN GRADASI PASIR

Sampel 1

Lubang ayakan (%)	Berat tinggal (gr)	Persen tinggal (%)	Persen kumulatif (%)	Persen kumulatif lewat ayakan (%)
4,8	0	0	0	100
2,4	130	15,002	15,002	84,998
1,2	168,5	19,446	34,448	65,552
0,6	219	25,274	59,722	40,278
0,3	151,9	17,449	77,171	22,829
0,15	137	15,81	92,981	7,019
sisa	60,5	6,982	-	-
	866,5	99,963 %	279,324	

$$Mhb = \frac{279,324}{100} = 2,79$$

Daerah II



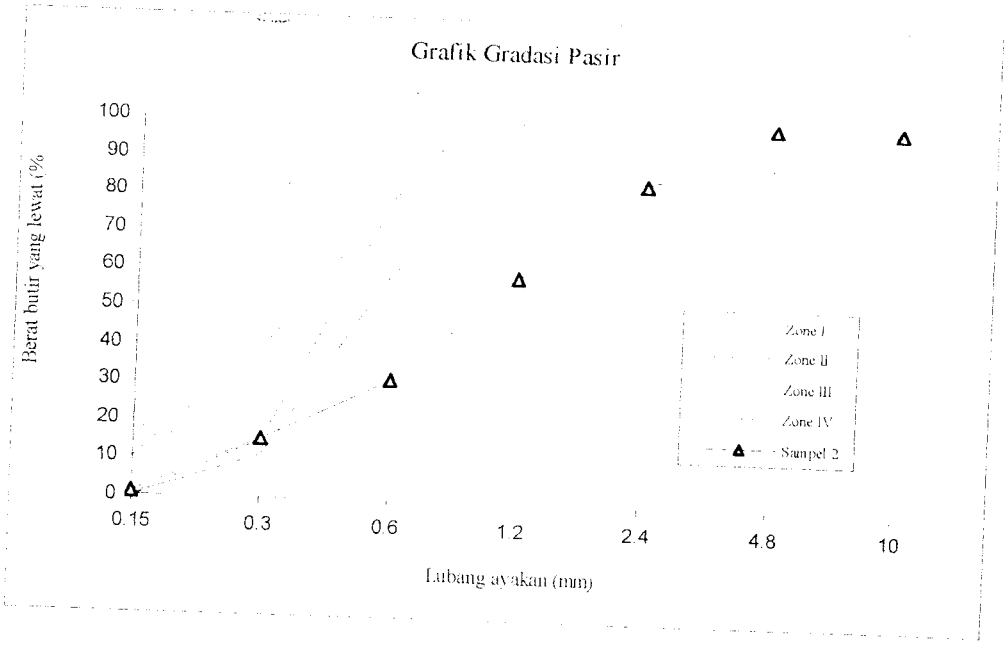
Sampel 2

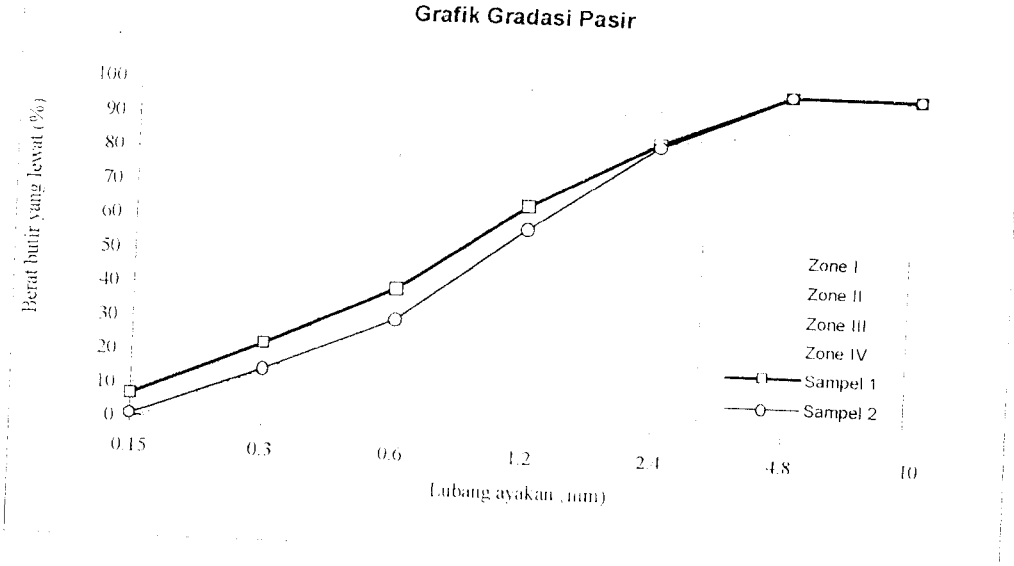
Lubang ayakan (%)	Berat tinggal (gr)	Persen tinggal (%)	Persen kumulatif (%)	Persen kumulatif lewat ayakan (%)
4,8	0	0	0	100
2,4	1560	15,813	15,813	84,187
1,2	248,5	25,19	41,003	58,997
0,6	273	27,167	68,673	31,327
0,3	156	15,813	84,486	15,514
0,15	143	14,4956	98,9816	1,0184
sisa	10	1,0137	-	-
	986,5	99,9953 %	308,9566	

$$Mhb = \frac{308,9566}{100} = 3,08$$

Daerah I

$$Mhb\ rata-rata = \frac{2,79+3,08}{2} = 2,935$$




Grafik Gradasi Pasir
Berat butir yang lewat (%)
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
0.15
0.3
0.6
1.2
2.4
4.8
10
Lubang ayakan (mm)
Zone I
Zone II
Zone III
Zone IV
Sampel 1
Sampel 2

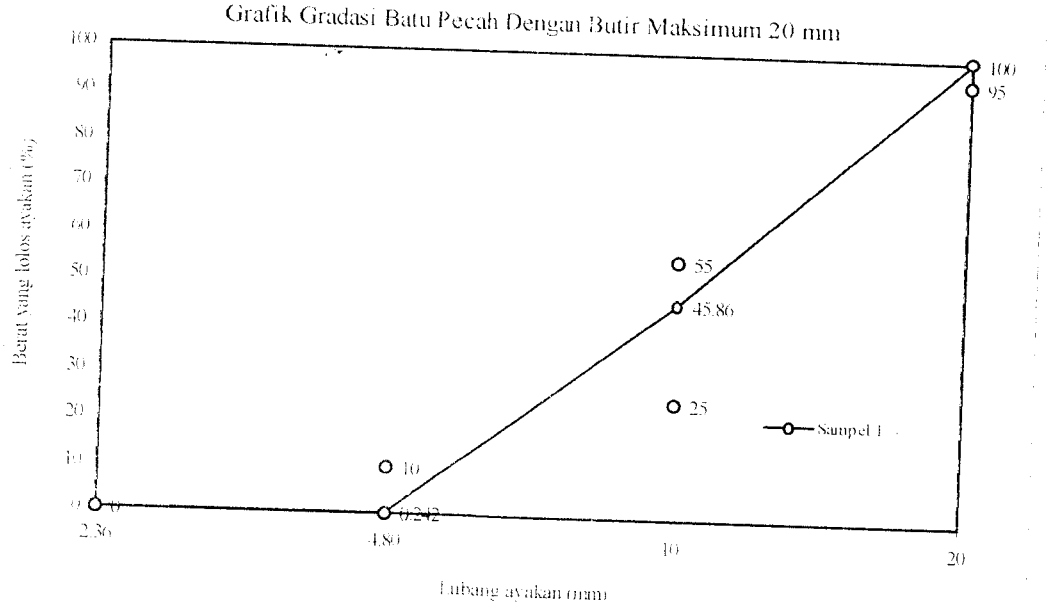
HASIL PEMERIKSAAN GRADASI BATU PECAH

Sampel 1

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat komulatif (%)	Berat komulatif Lewat ayakan (%)
40	0	0	0	-
20	0	0	0	100
10	2699,5	54,14	54,14	45,86
4,8	2274,5	45,618	99,758	0
2,4	12	0,24	99,998	0
1,2	0	0	100	0
0,6	0	0	100	0
0,3	0	0	100	0
0,15	0	0	100	0
sisa	0	0	100	0
	4986	99,998 %	753,896	

$$Mhb = \frac{753,896}{100} = 7,53896$$

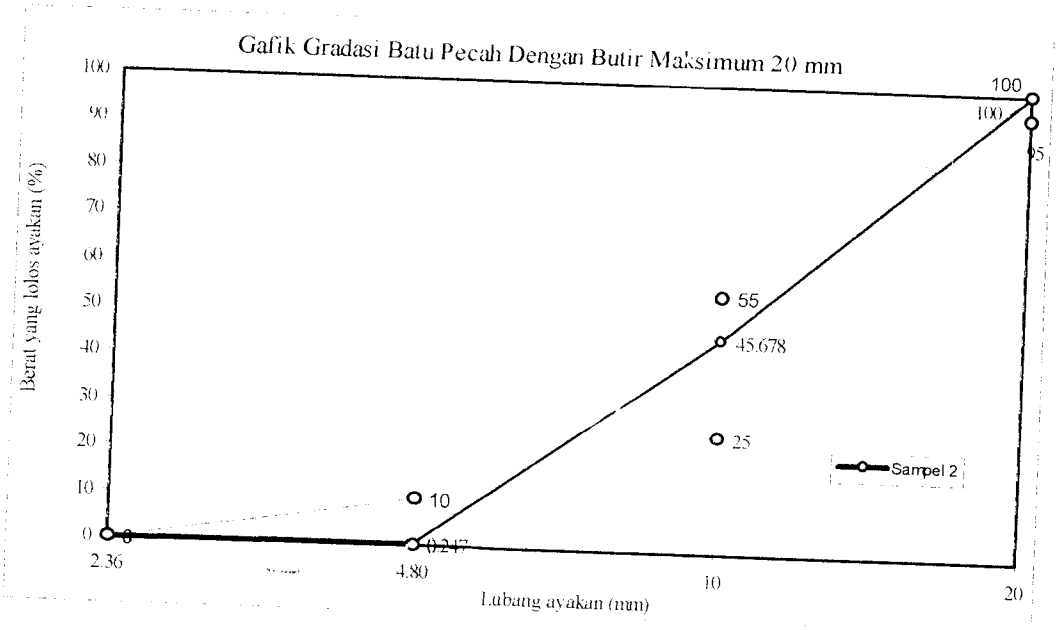
Grafik Gradasi Batu Pecah Dengan Butir Maksimum 20 mm



Sampel 2

Lubang ayakan (mm)	Berat tertinggal (gram)	Berat tertinggal (%)	Berat komulatif (%)	Berat komulatif Lewat ayakan (%)
40	0	0	0	-
20	0	0	0	100
10	2749,5	54,3218	54,322	45,678
4,8	2299,5	45,4312	99,753	0,247
2,4	12,5	0,2469	100	0
1,2	0	0	100	0
0,6	0	0	100	0
0,3	0	0	100	0
0,15	0	0	100	0
sisa	0	0	100	0
	5061,5	99,99 %	754,075	

$$Mhb = \frac{754{,}0748}{100} = 7{,}54075$$



TABEL HASIL UJI TARIK BAJA

Benda uji	Diameter pengenal (mm)	Diameter nyata (mm)	Tegangan leleh baja (Mpa)	Tegangan tarik maks (Mpa)	Regangan leleh (%)	Regangan maksimum (%)
1	6	5,8	386,625	494,881	6,138	23,733
2	6	6,1	382,47	489,563	7,301	29,205
3	6	6,1	363,909	470,050	7,712	32,991
Rata-rata	6	6	377,484	484,831	7,050	28,643

Benda uji	Diameter pengenal (mm)	Diameter nyata (mm)	Tegangan leleh baja (Mpa)	Tegangan tarik maks (Mpa)	Regangan leleh (%)	Regangan maksimum (%)
4	13	12,8	404,953	626,531	3,92	13,395
5	13	12,8	453,83	703,437	3,222	14,662
6	13	12,8	425,39	630,492	3,064	11,289
Rata-rata	13	12,8	428,057	653,486	3,402	13,115

DATA HASIL UJI TEKAN SILINDER BETON

Tipe	Tanggal Cor	Tanggal Uji	Berat (Kg)	Diameter (cm)	Tinggi (cm)	Volume (cm)	Slump (cm)	Berat Volume (t/m3)		Beban Maks (KN)		Kuat Tekan (Mpa)	
								Berat Vol	Rata2	P. maks	Rata2	Kuat tekan	Rata2
A1	1-4-2000	29-4-2000	12,8	15	29,8	5263,425	5	2,432		980		55,485	
A2	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,7	30,2	5122,846	5	2,498		920		54,235	
A3	1-4-2000	29-4-2000	12,6	14,8	29,8	5124,003	5	2,459		960		55,83	
A4	1-4-2000	29-4-2000	12,8	15	29,8	5263,43	5	2,432	2,455	950	952,5	53,786	54,834
B1	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,7	29,8	5054,99	3	2,532		935		55,119	
B2	1-4-2000	29-4-2000	12,8	15	30	5298,75	3	2,416		925		52,371	
B3	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,8	29,8	5124,003	3	2,498		900		52,342	
B4	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,8	30	5185,52	3	2,481	2,482	920	920	53,505	53,334
C1	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,9	30,2	5263,19	2,5	2,432		975		55,945	
C2	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,7	30,1	5105,88	2,5	2,507		940		55,415	
C3	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,8	30,2	5192,78	2,5	2,465		885		51,469	
C4	1-4-2000	29-4-2000	12,8	14,8	30	5158,39	2,5	2,48	2,471	935	933,75	54,377	54,302
D1	10-4-2000	8-5-2000	13	14,8	30	5158,39	5	2,520		940		54,668	
D2	10-4-2000	8-5-2000	12,8	15	30	5298,75	5	2,415		970		54,918	
D3	10-4-2000	8-5-2000	13	15	30	5298,75	5	2,453		890		50,389	
D4	10-4-2000	8-5-2000	12,9	15	30	5298,75	5	2,435		940		53,22	
D5	10-4-2000	8-5-2000	12,8	15	30	5298,75	5	2,415		870		49,257	
D6	10-4-2000	8-5-2000	12,8	15	30	5298,75	5	2,415		930		52,654	
D7	10-4-2000	8-5-2000	13	15,2	30,1	5459,128	5	2,381		950		52,380	
D8	10-4-2000	8-5-2000	12,8	14,8	30	5158,392	5	2,481		950		52,249	
D9	10-4-2000	8-5-2000	12,8	15	30	5298,75	5	2,415	2,437	930	930	52,654	52,821

Lanjutan

E1	10-4-2000	8-5-2000	13	14,7	30,1	5105,88	3,5	2,546		920		54,235	
E2	10-4-2000	8-5-2000	13,1	14,8	30	5158,392	3,5	2,539		980		56,995	
E3	10-4-2000	8-5-2000	13,1	14,8	30	5158,392	3,5	2,539		940		54,668	
E4	10-4-2000	8-5-2000	13,2	15	30	5298,75	3,5	2,491		900		50,955	
E5	10-4-2000	8-5-2000	13	15	30	5298,75	3,5	2,453		920		52,088	
E6	10-4-2000	8-5-2000	13,2	15	30	5298,75	3,5	2,491		890		50,389	
E7	10-4-2000	8-5-2000	13	14,9	30	5228,335	3,5	2,486		940		53,937	
E8	10-4-2000	8-5-2000	13,2	15	30	5298,75	3,5	2,491		960		54,352	
E9	10-4-2000	8-5-2000	13,2	15	30	5298,75	3,5	2,491		925		52,371	
E10	10-4-2000	8-5-2000	12,8	15	30	5298,75	3,5	2,415	2,494	920	9[illegible]5	52,088	53,208

PERENCANAAN PROPORSI CAMPURAN BETON

Merencanakan beton mutu tinggi untuk balok, di mana ditetapkan persyaratan sebagai berikut :

1. Kuat tekan fc' = 45 Mpa, umur 28 hari
2. *Slump* = 7,5 - 15 cm, diperlukan untuk balok struktur
3. Diameter agregat dibatasi maksimum 20 mm
4. Menggunakan BPKA (bahan pengurang kandungan air = *high range water reducer*)
5. Tidak tersedia data (pengalaman) tentang beton mutu tinggi
6. Data Pasir (Lab. Test) adalah :
   a. Modulus kehalusan = 2,94
   b. Berat jenis SSD = 2,76
   c. Berat kompak = 1650 kg/m3
   d. Penyerapan air = 2,51
7. Data kerikil (Lab. Test) adalah :
   a. Penampang butir maks = 20 mm
   b. Berat jenis SSD = 2,70
   c. Berat kompak = 1618 kg/m3
   d. Penyerapan air = 1,481

Perencanaan campuran adukan beton mutu tinggi adalah sebagai berikut :

1. Memilih slump dan kuat tekan beton

Karena menggunakan bahan pengurang kandungan air (BPKA), maka dipilih kuat tekan berdasarkan *slump* 25-50 mm terlebih dulu sebelum

penambahan BPKA. Karena tidak tersedia data bentang campuran BMT, maka harus digunakan campuran coba laboratorium untuk mendesain campuran BMT.

f'cr = (fc' + 27,6) / 0,90

= (45 + 27,6) / 0,90

= 80, 67 Mpa

2. Menetapkan ukuran maksimum butir agregat

Dipilih batu pecah dengan penampang maksimum 20 mm.

3. Memilih kandungan agregat kasar

Dari tabel 2.3 rasio fraksi (rasio volume kerikil terhadap beton) = 0,72.

Berat kerikil (kering) dalam beton (kg/m^3) = 0,72 x 16,8

= 1165 kg/m^3

4. Menghitung air pencampur dan kandungan udara

Dari tabel 2.5, perkiraan awal air campuran yang diperlukan adalah 168 kg/m^3 beton, dan kandungan udara bila digunakan BPKA adalah 1,5%

v (%) = [1 - (W.Kop) / (Bj . SSD x 1000)] x 100

$$= \left[1 - \frac{1650}{2,76 x 1000}\right] x 100\%$$

= 40, 217% ≈ 40%

Modifikasi (penyesuaian) kandungan air :

Air = 4,7 (40 - 35) = 23,5

Maka jumlah air campuran (w) :

w = 168 + 23,5 = 191,5 kg/m^3 beton

5. Menentukan rasio air / bahan perekat

Nilai dalam tabel 2.6 dan 2.7 adalah nilai kuat rata-rata di lapangan. Karena itu kuat tekan f 'cr berdasarkan nilai w / (c + p) yang harus dihitung, sesuai tabel 2.1 adalah

f 'cr = 45 + 9,7 = 54,7 Mpa

Dari tabel 2.7 untuk ukuran agregat 20 mm, maka nilai rasio w / (c + p) yang disarankan adalah (interpolasi) :

$$w/(c+p) = 0{,}4 + \frac{(55-54{,}7)}{(55-48)} x\,(0{,}45-0{,}4)$$

$$= 0{,}402$$

$$\approx 0{,}4$$

6. Menghitung bahan perekat

Dari hasil (langkah 4), berat air = 191,5 kg/m^3

maka

$$c+p = \frac{w}{rasio\ w/(c+p)} = \frac{191{,}5}{0{,}4} = 478{,}75\ kg$$

$$\approx 479 \text{ kg}$$

7. Proporsi campuran dasar dengan cement saja (campuran beton tanpa *silica fume*)

Volume dari semua bahan kecuali pasir per m^3 beton, sebagai berikut :

Semen = 479 / (3,15 x 1000)	=	0,152 m^3
Split = 1165 / (2,7 x 1000)	=	0,43 m^3
Air = 191,5 / (1 x 1000)	=	0,1915 m^3
Udara = 0,015 x 1,0	=	0,015 m^3
Volume total tanpa pasir	=	0,7885 m^3

Volume pasir per m^3 beton :

Volume pasir = 1 - 0,7885 = 0,2115 m^3

Konversi volume kepada berat pasir :

w pasir = 0,2115 x 2,76 x 1000 = 583,74 kg

≈ 584 kg

Proporsi campuran dalam berat untuk beton tanpa *silica fume* menjadi :

Semen = 479 kg

Pasir = 584 kg

Kerikil = 1165 kg

Air = 191,5 kg

Berat bahan untuk 1 m^3 beton = 2419,5 kg

8. Proporsi bahan campuran pelengkap menggunakan *cement* dan *silica fume*

Menggunakan SF dengan *bulk density* = 2,2 dan campuran coba dengan *dossage* 3% - 10%. Dalam penelitian ini campuran coba dipakai SF 5% dari berat semen sehingga kandungan *silica fume* = 0,05 x 479 = 23,95 kg

≈ 24 kg

Untuk campuran coba dengan SF 5%, komponen setiap 1 m^3 campuran beton, berat semennya menjadi = 479 - 24 = 455 kg

Maka volume per 1 m^3 beton tanpa bahan pasir menjadi sbb :

Semen =	455 / (3,15 x 1000)	=	0,144 m^3
SF =	24 / (2,2 x 1000)	=	0,0109 m^3
Split =	1165 / (2,7 x 1000)		0,43 m^3
Air =	191,5 / (1 x 1000)	=	0,1915 m^3
Udara =	0,015 x 1,0	=	0,015 m^3

Volume tanpa pasir = 0,7914 m^3

Volume pasir = 1 - 0,7914 = 0,2086 m^3

w. pasir = 0,2086 x 2,76 x 1000

575,736 kg ≈ 576 kg

Proporsi campuran dalam berat untuk 1 m^3 beton dengan *silica fume* menjadi :

Semen = 455 kg

Pasir = 576 kg

Split = 1165 kg

Air = 191,5 kg

SF = 24 kg

Dalam campuran beton ini digunakan BPKA (Bahan Pengurang Kandungan Air) yaitu *superplasticizer* dengan *dossage* yang disarankan 0,5 - 1,0 liter per 100 kg semen. Campuran beton ini menggunakan *superplasticizer* 1 liter per 100 kg semen. Dalam 1 m^3 beton ada 455 kg semen, sehingga digunakan *superplasticizer* sebanyak 4,55 liter.

PERENCANAAN BALOK BETON BERTULANG

Bentang balok direncanakan 1.5 m dengan tumpuan sendi - rol.

L = 8 m, sehingga dipakai h = 1/12 L s/d 1/16L

= 1/12 . 1,5 = 0,125 m ≈ 12,5 cm

dipakai h = 220 mm

perbandingan h/b = 1,5 - 2,5 , diambil h/b = 2

b = 220/2 = 110 mm

Balok beton direncanakan dengan fc' = 45 Mpa

fy = 300 Mpa --> fy = 390 Mpa

Tulangan polos ∅ 6 mm

Tulangan deform ∅ 13 mm

selimut beton, Pb = 20 mm

$$N = \frac{bw - 2Pb - 2Ds - N.Dp}{(N-1)} \geq 25$$

$$= bw - 2Pb - 2Ds - N.Dp \geq 25N - 25$$

$$= bw - 2Pb - 2Ds + 25 \geq (25 + Dp).N$$

$$N \leq \frac{bw - 2Pb - 2Ds + 25}{(25 + Dp)}$$

$$N \leq \frac{110 - 2.20 + 25}{(25+13)} = 2{,}5 \; (untuk \; tulangan \; sebelah \; non \; sengkang)$$

$$--> dipakai \; tulangan \; tarik \; 2 \; tulangan \; D13$$

$$N \leq \frac{110 - 2.20 - 2.6. + 25}{(25+13)} = 2{,}18 \; (untuk \; tulangan \; rangkap \; dengan \; sengkang)$$

$$--> dipakai \; tulangan \; tarik \; 2 \; tulangan \; D13$$

Supaya jarak antar tulangan terpenuhi ,maka :

Cheks jarak tulangan : * untuk tulangan sebelah :

$$X = \frac{b - 2Pb - N.Dp}{(N-1)} > 25mm$$

$$= \frac{110 - 40 - 2.13}{(2-1)} = 44 > 25mm \text{ ---> ok}$$

* Untuk tulangan tarik dengan sengkang :

$$X = \frac{b - 2Pb - 2Ds - N.Dp}{(N-1)} > 25\ mm$$

$$= \frac{110 - 40 - 2.6 - 2.13}{(2-1)} = 32 > 25 \text{ ---> ok}$$

1. Perencanaan balok dengan tulangan sebelah tanpa sengkang

a. Rasio Tulangan Seimbang

$$\rho b = \frac{\alpha 1.f'c}{fy}.\beta 1.\left(\frac{600}{600+fy}\right)$$

dengan nilai :

$$\alpha_1 = 0,85 - \frac{f'c}{800} \geq 0,725$$

$$= 0,85 - \frac{45}{800} = 0,7937 \geq 0,725$$

$$\beta_1 = 0,95 - \frac{f'c}{400} \geq 0,70$$

$$= 0,95 - \frac{45}{400} = 0,8375 \geq 0,70$$

$$\rho.b = \frac{0,3937 \ .45}{390} x\, 0,8375 \left(\frac{600}{600+390}\right)$$

$$= 0,0465$$

$\rho maks = 0,75.\rho b = 0,75.0,0465 = 0,03486$

$$\rho min = \frac{1,4}{fy} = \frac{1,4}{390} = 0,003589$$

b.Rasio Tulangan Kaksimum

c. Rasio Tulangan Minimum

*Kapasitas Geser Penampang

f_c' = 45 Mpa

b = 110 mm --> d = h - Pb - 1/2 D

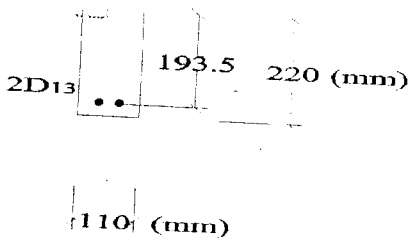
= 220 - 20 - 1/2. 13 = 193,5 mm

$V_c = 1/6 . \sqrt{f_c'} . b. d$

$= 1/6 . \sqrt{45} . 110. 193,5$

= 23, 797 kN ≈ 2,3797 ton.

*Kapasitas Lentur Penampang



$As = 2. 1/4 \Pi.13^2 = 265,33 mm^2$

$$\rho = \frac{As}{b.d} = \frac{265,33}{110.193,5} = 0,01246 < \rho maks - - > ok$$

Kontrol Mn :

C = T

$\alpha_1 . f_c' . b. a = As . f_y$

$$a = \frac{As.f_y}{\alpha_1.fc'.b}$$

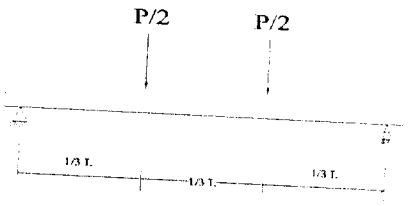
$$= \frac{265,33.390}{0,7937.45.110} = 26,3384\,mm$$

$$Mn = As.fy\left(d - \frac{a}{2}\right)$$

$$= 265,33.390\left(193,5 - \frac{26,3384}{2}\right) = 18,66\,kNm$$

Direncanakan pembebanan dengan dua titik pembebanan (*third point loading*) dengan bentang balok 1,5 m, bentang geser (a) yang dipakai dicoba, a = 1/3L = 50 cm. Perencanaan dimensi balok dihitung untuk balok biasa, dan diharapkan akan terjadi runtuh geser dengan kekuatan gesernya menyamai kekuatan retak miring, sehingga diambil 2,5 < a/d < 6

a/d = 50/19,35 = 2,584 --> ok



Berat balok sendiri (q) = 0,11 . 0,22 . 24

= 0,5808 kN/m

$$Mu = \frac{1}{8}.q.L^2 + \frac{P}{2}.a$$

$$= \frac{1}{8}.q.L^2 + \frac{1}{6}.P.L$$

$$= \frac{1}{8}.0,5808.1,5^2 + \frac{1}{6}.p.1,5$$

$$= 0,16335 + 0,25.P$$

$$Mn = \frac{Mu}{\phi} \rightarrow Mu.\phi = 18{,}66.0{,}8 = 14{,}928\ kNm$$

14,928 = 0,16335 + 0,25. P

P = 59,0586 kN = 5,90586 Ton

Balok beton bertulang direncanakan sedemikian rupa, agar keruntuhan yang terjadi adalah runtuh geser. Sehingga tulangan lentur direncanakan kuat menahan lentur, dan tidak terjadi runtuh lentur --> kapasitas lentur lebih besar dari kapasitas geser balok.

2. Perencanaan balok dengan tulangan rangkap dengan sengkang

* Kapasitas geser penampang

fc' = 45 Mpa

b = 110 mm --> d = h -Pb - Ds - 1/2Dp = 220 - 20 - 6 -1/2.13 = 187,5 mm

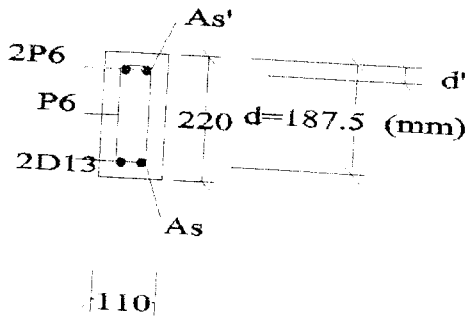
h = 220 mm

Vc = 1/6 . $\sqrt{fc'}$. b. d

= 1/6 . $\sqrt{45}$. 110. 187,5

= 23, 059 kN ≈ 2,3059 ton.

*Kapasitas Lentur Penampang



$As = 2.\ 1/4\ \Pi.13^{2} = 265{,}33\ mm^{2}$

$As' = 2.\ 1/4\ \Pi.6^{2} = 56{,}52\ mm^{2}$

$$\rho = \frac{As}{b.d} = \frac{265{,}33}{110.187{,}5} = 0{,}01286$$

$$\rho' = \frac{As'}{b.d} = \frac{56{,}52}{110.187{,}5} = 0{,}00274$$

$d' = Pb + Ds + 1/2.Dp = 20 + 6 + 1\ \ 2.6 = 29mm$

$Mn = Mn_1 + Mn_2$

$= 14{,}8496 + 3{,}0896 = 17{,}9392\ kNm$

Kontrol Mn

$$\rho_1 = \rho - \rho' = \frac{265{,}33 - 56{,}52 =}{110.187{,}5} = 0{,}010124 < \rho maks$$

$\rho_1 = \rho - \rho' = 0{,}6.\rho.b = 0{,}6.0{,}0465 = 0{,}0279 < \rho maks \text{ - - - > } dipakai \rho_1 = 0{,}0279$

$$f's = 600\left(1 - \frac{0{,}7937.fc'.\beta\ .d'}{(\rho - \rho^{1}).fy.d}\right)$$

$$= 600\left(1 - \frac{0{,}7937.45.0{,}8375.29}{0{,}0279.390.187{,}5}\right)$$

$= 344{,}887Mpa < fy = 390Mpa$

$dipakai\ 's = 344{,}887Mpa$

$$a = \frac{As.fy - A's.f's}{\alpha 1.f'c.b}$$

$$= \frac{265{,}33.390 - 56{,}52.344{,}887}{0{,}7937.45.110}$$

$= 21{,}377mm$

$Mn_1 = (As.fy - A's.f's).(d - a/2)$

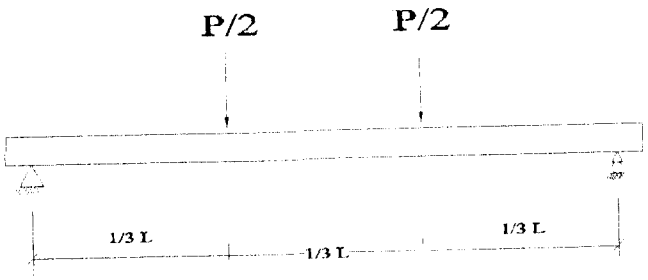
$= (265{,}33.390 - 56{,}52.344{,}887)(187{,}5 - \frac{21{,}377}{2})$

$= 14{,}8496\ kNm$

$Mn_2 = As'.f's.(d - d')$

$= 56{,}52.344{,}887.(187{,}5 - 29)$

$= 3{,}0896 kNm$



$$Mu = \frac{1}{8}.q.L^2 + \frac{P}{2}.a$$

$$= \frac{1}{8}.q.L^2 + \frac{1}{6}.P.L$$

$$= \frac{1}{8}.0{,}5808.1{,}5^2 + \frac{1}{6}.p.1{,}5$$

$$= 0{,}16335 + 0{,}25.P$$

$$q = 0{,}11.0{,}22.24 = 0{,}5808\ kN/m$$

$$Mn = \frac{Mu}{\Phi} --> Mu = Mn.\Phi$$

$$17{,}9392.0{,}8 = 0{,}16335 + 0{,}25P$$

$$14{,}3513 = 0{,}16335 + 0{,}25P$$

$$P = 56{,}752\ kN$$

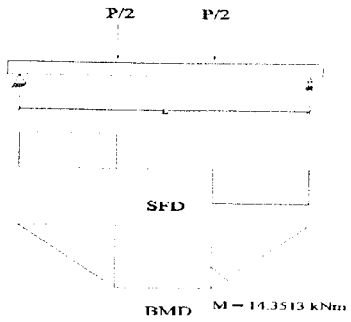
$= 5{,}6752\ ton --> kapasitas\ lentur\ lebih\ besar\ dari\ kapasitas\ geser\ penampang$

$Bentang\ geser\ (a) = 1/3L = 50\ cm$

$harus\ terpenuhi\ 2{,}5 < a/d < 6$

$a/d = 500/187{,}5 = 2{,}667 --> ok$

3. Perencanaan tulangan geser



$$V = \frac{M}{a} = \frac{14,3513}{0,5} = 28,7026\,kN$$

$Vu = 1/2.q.L + 1/2.P$

$= 1/2.0,5808.1,5 + 1/2.56,752$

$= 28,8116\,kN$

--> gaya geser maks. pada tumpuan

Gaya geser beton :

$Vc = 1/6 \cdot \sqrt{fc'} \cdot b \cdot d$

$= 1/6 \cdot \sqrt{45} \cdot 110 \cdot 187,5$

$= 23,059$ kN $\approx 2,3059$ ton.

$Vs\ min = (1/3\ Mpa).b.d$

$= 1/3.110.187,5$

$= 6875$ N $= 6,875$ kN

$\phi.Vc = 0,6 \cdot 23,059 = 13,8354$ kN

$\phi\,(Vc + Vs\ min) = 0,6\,(23,059 + 6,875) = 17,9604$ kN

$\phi \cdot 3Vc = 0,6 \cdot 3 \cdot 23,059 = 41,5062$ kN

karena :

$\phi\,(Vc + Vs\ min) < Vu < \phi \cdot 3Vc$

17,9604 < 28,8116 <41,5062, maka perlu tulangan geser dengan jarak :

$$S \le \frac{Av.f_y.d}{\left(\frac{V_u}{\phi} - V_c\right)}$$

$$S \le \frac{2.1/4.\pi.6^2.390.187,5}{\left(\frac{28,8116}{0,6} - 23,059\right).10^3} = \frac{41133025}{24,96.10^3}$$

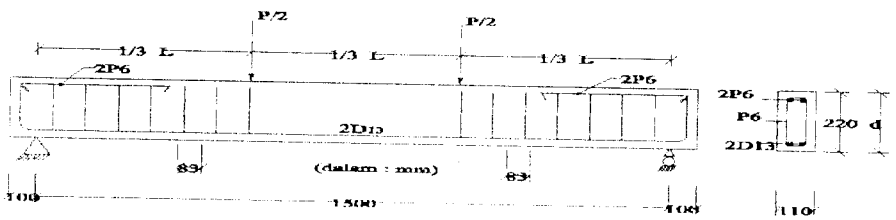
$S \le 165,586mm$

$S \le 600mm$

$S \le d/2 = 187,5/2 = 93,75 \ mm$

dipakai jarak tulangan geser $P_6 - 83$ mm

---> pada setiap bentang geser digunakan 7 tulangan geser/badan.



Balok A (Balok dengan tulangan sebelah tanpa tulangan geser)

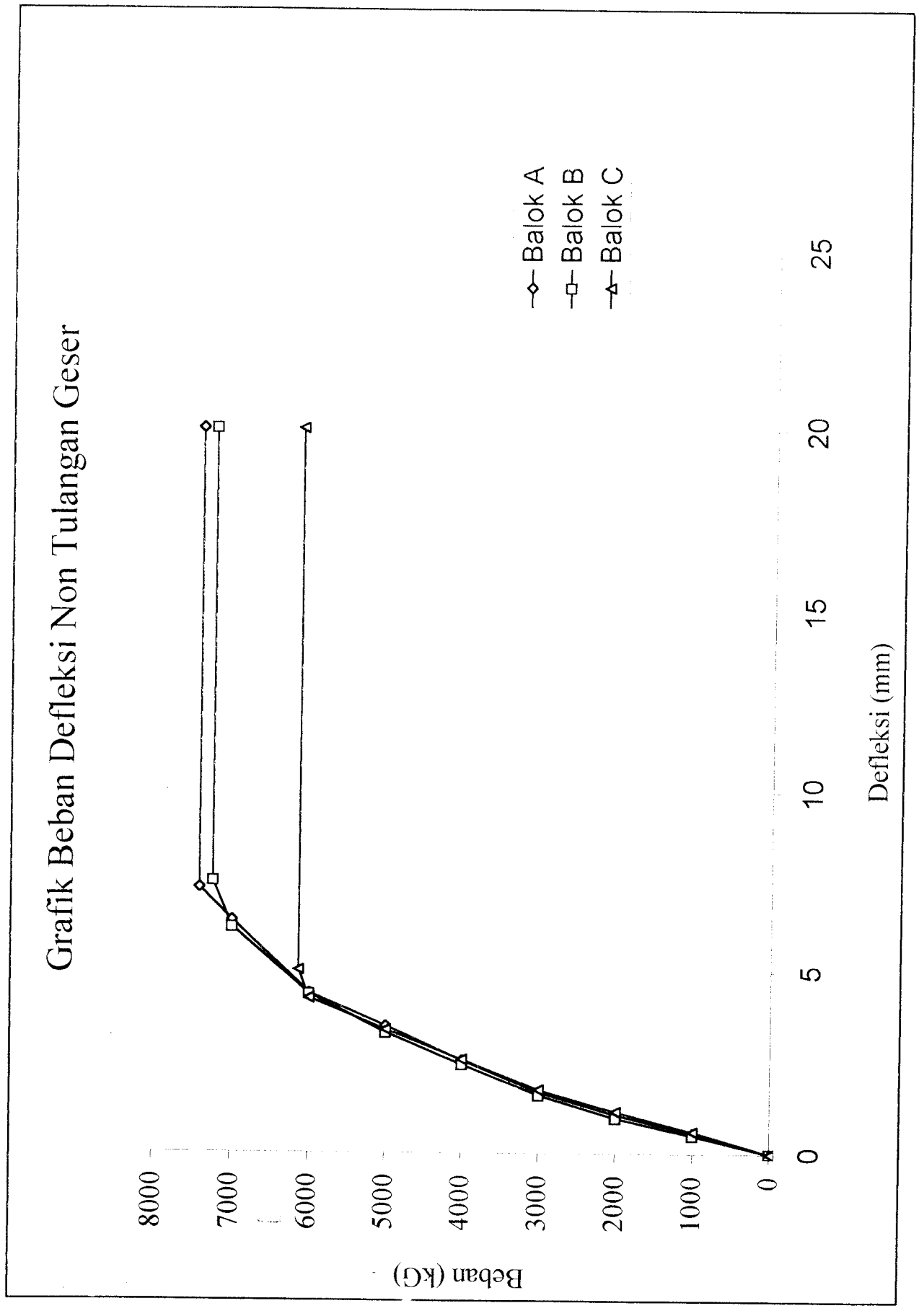
No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak	No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak
1	200	0.06	0.13	0.11		25	5000	2.83	3.47	3.47	Retak ke-12
2	400	0.15	0.24	0.2		26	5200	3	3.65	3.67	Retak ke-13
3	600	0.23	0.36	0.3		27	5400	3.15	3.83	3.85	Retak ke-14
4	800	0.3	0.46	0.39		28	5600	3.35	4.05	4.08	Retak ke-15
5	1000	0.4	0.56	0.5		29	5800	3.49	4.21	4.24	Retak ke-16
6	1200	0.48	0.67	0.59		30	6000	3.63	4.37	4.41	Retak ke-17
7	1400	0.55	0.76	0.68		31	6200	3.79	4.54	4.6	Retak ke-18
8	1600	0.64	0.86	0.78		32	6400	3.93	4.7	4.77	Retak ke-19
9	1800	0.71	0.95	0.87		33	6600	4.1	4.9	4.96	Retak ke-20
10	2000	0.8	1.06	0.98		34	6800	4.37	5.45	5.47	
11	2200	0.89	1.17	1.08		35	7000	5.1	6.4	6.36	Retak ke-21
12	2400	0.98	1.29	1.19		36	7200	5.38	6.94	6.7	
13	2600	1.08	1.41	1.31	Retak awal	37	7400	5.53	7.2	6.8	
14	2800	1.18	1.52	1.48		38	7420	5.65	7.3	7	Beban maksimum
15	3000	1.3	1.67	1.58	Retak ke-2	39	7420	5.98	7.8	7.4	
16	3200	1.43	1.83	1.76	Retak ke-3	40	7420	6.3	8.3	7.8	
17	3400	1.58	2.01	1.95	Retak ke-4	41	7420	6.8	8.7	8.3	
18	3600	1.74	2.19	2.14	Retak ke-5	42	7420	7.3	9.2	8.9	
19	3800	1.89	2.37	2.32	Retak ke-6	43	7420	7.6	9.7	9.21	
20	4000	2.03	2.54	2.51	Retak ke-7	44	7420	7.9	10.2	9.5	
21	4200	2.18	2.71	2.7	Retak ke-8	45	7420	8.3	10.6	9.8	
22	4400	2.33	2.87	2.86	Retak ke-9	46	7420	8.7	11.1	10.4	
23	4600	2.5	3.06	3.06	Retak ke-10	47	7420	9.3	11.8	10.8	
24	4800	2.67	3.26	3.26	Retak ke-11	48	7420	10.4	20	11.4	

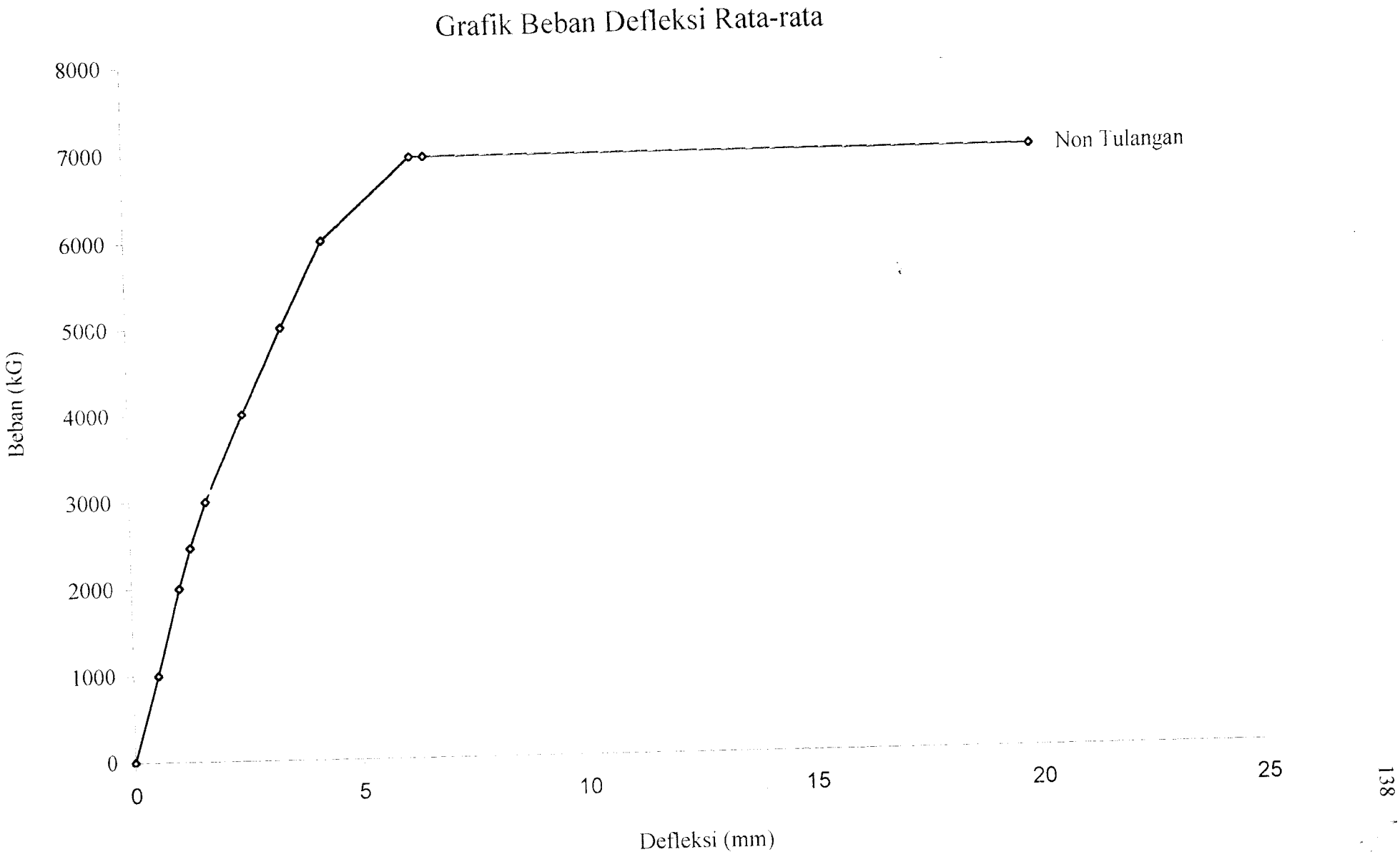
Balok B (Balok dengan tulangan sebelah tanpa tulangan geser)

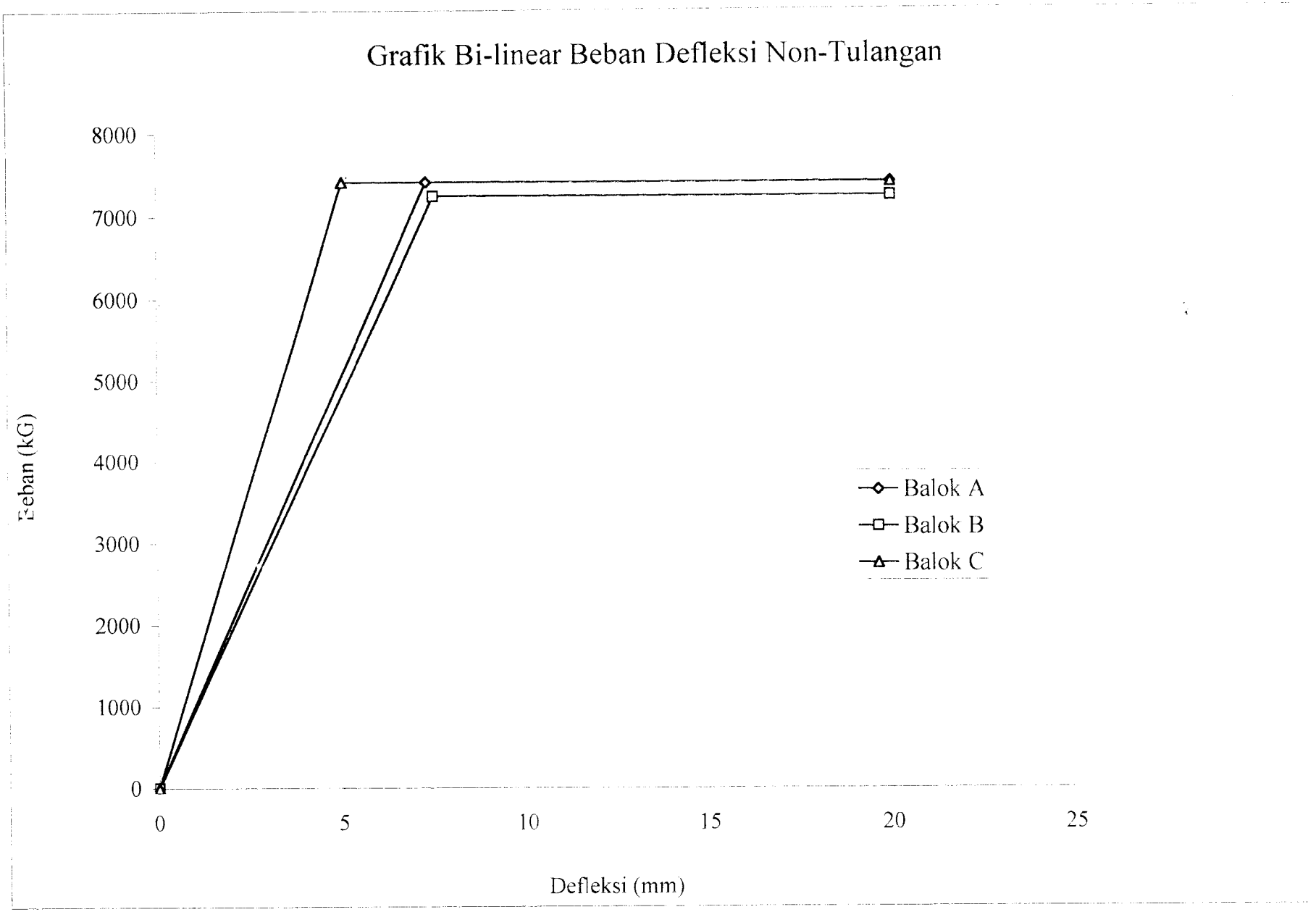
No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak	No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak
1	200	0.06	0.12	0.09		25	5000	2.85	3.28	3.41	
2	400	0.12	0.26	0.2		26	5200	2.96	3.4	3.54	Retak ke-13
3	600	0.2	0.41	0.29		27	5400	3.12	3.56	3.71	Retak ke-14
4	800	0.26	0.49	0.37		28	5600	3.25	3.72	3.88	
5	1000	0.35	0.5	0.45		29	5800	3.44	3.9	4.08	Retak ke-15
6	1200	0.43	0.59	0.53		30	6000	3.61	4.35	4.12	Retak ke-16
7	1400	0.6	0.69	0.63		31	6200	3.72	4.54	4.39	Retak ke-17
8	1600	0.58	0.75	0.7		32	6400	3.89	4.68	4.53	Retak ke-18
9	1800	0.53	0.85	0.77		33	6600	4.2	5.32	4.96	Retak ke-19
10	2000	0.71	0.96	0.89		34	6800	4.56	5.67	5.22	
11	2200	0.82	1.08	1.03		35	7000	4.78	6.21	5.76	
12	2400	0.9	1.18	1.12	Retak awal	36	7200	5.22	7	6.33	
13	2600	1.05	1.31	1.27		37	7246	5.87	7.5	6.78	Beban maksimum
14	2800	1.15	1.47	1.42	Retak ke-2	38	7246	6.32	7.9	7.43	
15	3000	1.26	1.59	1.55	Retak ke-3	39	7246	6.78	8.2	7.77	
16	3200	1.4	1.76	1.72	Retak ke-4	40	7246	6.9	8.43	7.9	
17	3400	1.58	1.95	1.94	Retak ke-5	41	7246	7.32	8.9	8.22	
18	3600	1.78	2.25	2.17	Retak ke-6	42	7246	7.6	9.2	8.96	
19	3800	1.93	2.31	2.36	Retak ke-7	43	7246	7.98	9.6	9.32	
20	4000	2.03	2.43	2.47	Ketak ke-8	44	7246	8.33	10.3	9.86	
21	4200	2.16	2.51	2.62	Retak ke-9	45	7246	8.95	10.45	10.23	
22	4400	2.35	2.75	2.83	Retak ke-10	46	7246	9.23	10.89	10.78	
23	4600	2.53	2.94	3.04	Retak ke-11	47	7246	9.48	20	10.97	
24	4800	2.7	3.12	3.24	Retak ke-12						

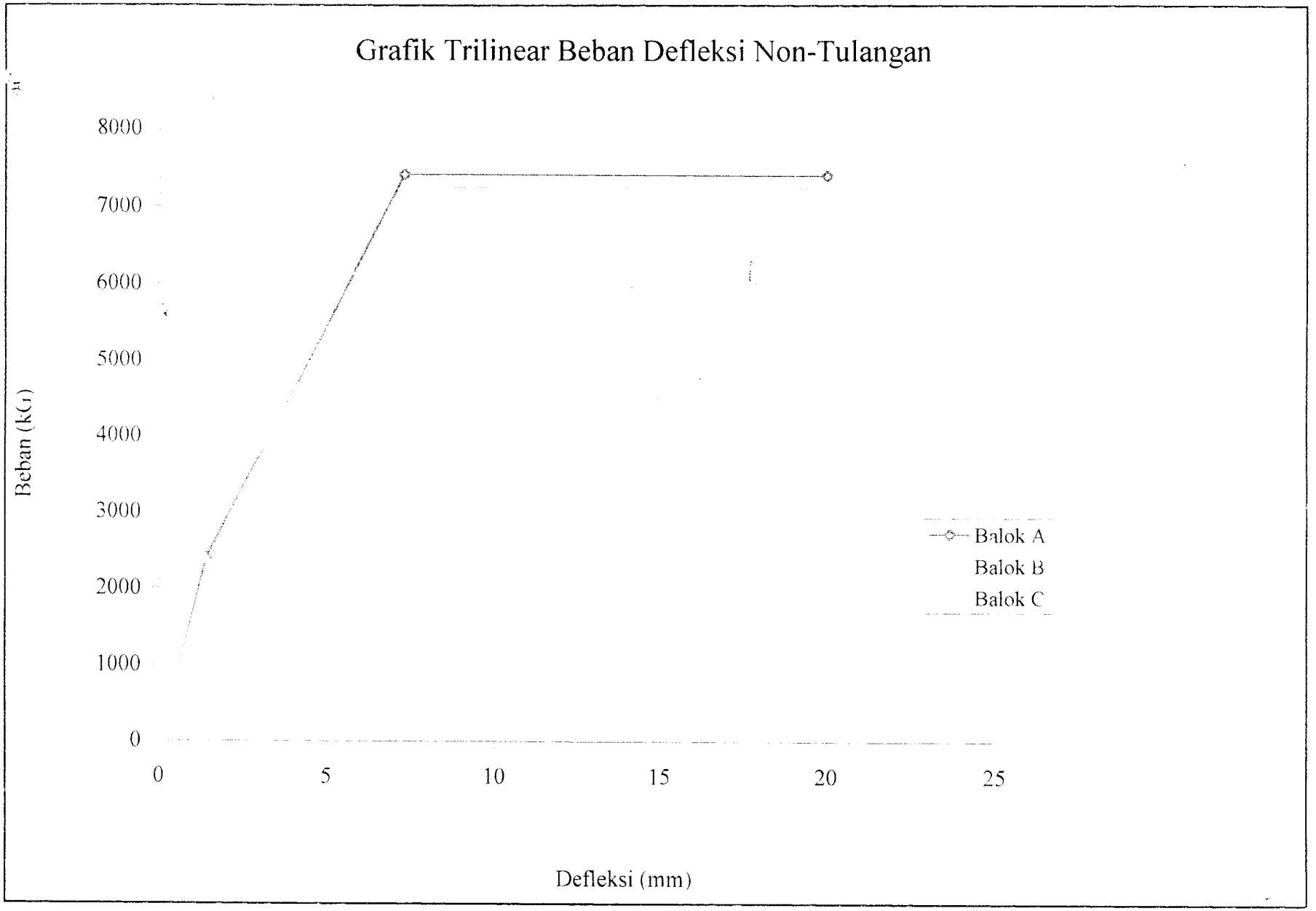
Balok C (Balok dengan tulangan sebelah tanpa tulangan geser)

No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak	No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Nomor Retak
1	200	0.03	0.12	0.06		22	4400	2.5	2.9	2.97	Retak ke-10
2	400	0.09	0.29	0.15		23	4600	2.64	3.05	3.14	Retak ke-11
3	600	0.2	0.41	0.29		24	4800	2.78	3.21	3.3	Retak ke-12
4	800	0.3	0.5	0.39		25	5000	2.93	3.36	3.45	Retak ke-13
5	1000	0.4	0.6	0.5		26	5200	3.07	3.52	3.61	Retak ke-14
6	1200	0.49	0.7	0.6		27	5400	3.23	3.68	3.8	Retak ke-15
7	1400	0.57	0.78	0.7		28	5600	3.37	3.83	3.97	Retak ke-16
8	1600	0.67	0.89	0.82		29	5800	3.54	4.02	4.15	Retak ke-17
9	1800	0.8	1.01	0.98		30	6000	3.71	4.23	4.35	Retak ke-18
10	2000	0.89	1.14	1.06		31	6140	3.82	5.02	4.53	Beban maksimum
11	2200	0.98	1.25	1.18		32	6140	4.32	5.4	4.9	
12	2400	1.06	1.34	1.28	Retak awal	33	6140	4.87	5.9	5.21	
13	2600	1.15	1.45	1.4	Retak ke-2	34	6140	5.22	6.3	5.87	
14	2800	1.28	1.6	1.55	Retak ke-3	35	6140	5.67	6.97	6.43	
15	3000	1.42	1.74	1.72	Retak ke-4	36	6140	5.98	7.23	6.8	
16	3200	1.57	1.9	1.89	Retak ke-5	37	6140	6.12	7.98	7.43	
17	3400	1.74	2.08	2.09	Retak ke-6	38	6140	6.54	8.32	7.87	
18	3600	1.88	2.23	2.25		39	6140	6.97	8.77	8.43	
19	3800	2.03	2.41	2.43	Retak ke-7	40	6140	7.21	9.22	8.88	
20	4000	2.18	2.57	2.6	Retak ke-8	41	6140	7.9	20	9.54	
21	4200	2.32	2.73	2.78	Retak ke-9						


Grafik Beban Defleksi Non Tulangan Geser
Beban (kG)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok A
Balok B
Balok C


Grafik Beban Defleksi Rata-rata
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Non Tulangan


Grafik Bi-linear Beban Defleksi Non-Tulangan
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok A
Balok B
Balok C


Grafik Trilinear Beban Defleksi Non-Tulangan
Beban (kG)
8000
7000
6000
5000
4000
3000
2000
1000
0
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok A
Balok B
Balok C

Balok D (Balok dengan tulangan rangkapdengan tulangan geser)

No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen (N/mm)	Kelengkungan (1/mm)	Nomor Retak
0	0	0	0	0	0	0	
1	200	0.08	0.1	0.08	50000	0.00000008	
2	400	0.15	0.18	0.18	100000	0.00000024	
3	600	0.26	0.31	0.28	150000	0.00000028	
4	800	0.35	0.42	0.4	200000	0.00000048	
5	1000	0.45	0.53	0.5	250000	0.00000052	
6	1200	0.54	0.64	0.61	300000	0.00000068	
7	1400	0.63	0.75	0.73	350000	0.00000088	
8	1600	0.72	0.84	0.83	400000	0.00000092	
9	1800	0.81	0.96	0.94	450000	0.00000112	
10	2000	0.9	1.08	1.03	500000	0.00000124	Retak awal
11	2200	1.03	1.22	1.18	550000	0.00000136	Retak ke-2
12	2400	1.15	1.36	1.32	600000	0.00000152	
13	2600	1.3	1.54	1.49	650000	0.00000172	Retak ke-3
14	2800	1.4	1.69	1.6	700000	0.00000196	Retak ke-4
15	3000	1.55	1.87	1.75	750000	0.00000208	Retak ke-5
16	3200	1.69	2.05	1.94	800000	0.00000244	Retak ke-6
17	3400	1.85	2.27	2.15	850000	0.00000288	Retak ke-7
18	3600	2	2.46	2.32	900000	0.00000312	Retak ke-8
19	3800	2.15	2.64	2.49	950000	0.00000332	Retak ke-9
20	4000	2.25	2.82	2.64	1000000	0.00000384	Retak ke-10
21	4200	2.32	2.85	2.82	1050000	0.00000412	Retak ke-11
22	4400	2.55	3.15	2.99	1100000	0.00000416	Retak ke-12
23	4600	2.73	3.34	3.18	1150000	0.00000424	Retak ke-13
24	4800	2.86	3.5	3.31	1200000	0.00000436	Retak ke-14
25	5000	3	3.66	3.46	1250000	0.00000448	Retak ke-15
26	5200	3.15	3.84	3.64	1300000	0.00000472	Retak ke-16
27	5400	3.3	4.01	3.81	1350000	0.00000488	Retak ke-17
28	5600	3.43	4.16	3.96	1400000	0.00000504	Retak ke-18
29	5800	3.57	4.34	4.12	1450000	0.00000528	Retak ke-19
30	6000	3.7	4.5	4.29	1500000	0.00000556	Retak ke-20
31	6200	3.84	4.68	4.43	1550000	0.00000572	Retak ke-21
32	6400	3.96	4.83	4.57	1600000	0.00000592	Retak ke-22
33	6600	4	4.98	4.6	1650000	0.00000632	Retak ke-23
34	6800	4.2	5.15	4.87	1700000	0.00000648	Retak ke-24
35	7000	4.33	5.29	5.01	1750000	0.00000656	Retak ke-25

No	Beban (kG)	DG1(mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen	Kelengkungan	No.Retak
36	7200	4.45	5.43	5.15	1800000	0.00000672	Retak ke-26
37	7400	4.58	5.59	5.29	1850000	0.00000688	Retak ke-27
38	7600	4.71	5.74	5.45	1900000	0.00000708	Retak ke-28
39	7800	4.84	5.92	5.62	1950000	0.00000744	Retak ke-29
40	8000	4.99	6.14	5.81	2000000	0.00000788	Retak ke-30
41	8200	5.86	7.5	6.23	2050000	0.00000804	Retak ke-31
42	8400	6.08	7.58	6.9	2100000	0.00000928	
43	8600	6.39	8.12	7	2150000	0.00000936	
44	8800	6.57	8.54	7.32	2200000	0.00001088	
45	9000	6.85	8.83	7.55	2250000	0.00001072	
46	9200	7.67	9.5	8.57	2300000	0.00001092	
47	9400	7.98	9.77	8.96	2350000	0.00001108	
48	9600	8.21	10	9.35	2400000	0.00001172	
49	9800	8.33	10.33	9.35	2450000	0.00001208	
50	10000	8.98	10.95	10.08	2500000	0.00001228	Beban maksimum
51	10000	9.32	11	10.85	2500000	0.00001284	
52	10000	9.65	11.67	10.87	2500000	0.00001284	
53	10000	9.88	11.85	11.17	2500000	0.00001296	
54	10000	10	11.95	11.33	2500000	0.00001304	
55	10000	10.23	12.34	11.43	2500000	0.00001312	
56	10000	10.57	12.88	11.58	2500000	0.00001324	
57	10000	10.75	13.25	11.58	2500000	0.00001328	
58	10000	11.2	13.78	11.98	2500000	0.00001332	
59	10000	11.43	13.95	12.34	2500000	0.00001344	
60	10000	11.64	20	12.65	2500000	0.00001372	

Balok E (Balok dengan tulangan rangkap dengan tulangan geser)

No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen (N/mm)	Kelengkungan (1/mm)	Nomor Retak
0	0	0	0	0	0	0	
1	200	0.1	0.17	0.13	50000	0.0000004	
2	400	0.19	0.28	0.21	100000	0.00000044	
3	600	0.36	0.5	0.4	150000	0.00000072	
4	800	0.45	0.6	0.54	200000	0.00000096	
5	1000	0.65	0.8	0.76	250000	0.00000104	
6	1200	0.75	1.01	0.78	300000	0.00000116	
7	1400	0.91	1.14	1.06	350000	0.00000152	
8	1600	1.04	1.29	1.2	400000	0.00000164	
9	1800	1.16	1.45	1.3	450000	0.00000172	
10	2000	1.28	1.55	1.45	500000	0.00000176	
11	2200	1.4	1.7	1.58	550000	0.00000192	
12	2400	1.52	1.85	1.71	600000	0.00000208	
13	2600	1.66	2.06	1.83	650000	0.00000228	Retak awal
14	2800	1.82	2.22	2.03	700000	0.00000244	Retak ke-2
15	3000	1.96	2.39	2.16	750000	0.00000252	Retak ke-3
16	3200	2.11	2.49	2.37	800000	0.00000256	Retak ke-4
17	3400	2.25	2.59	2.58	850000	0.00000268	Retak ke-5
18	3600	2.4	2.81	2.68	900000	0.00000276	Retak ke-6
19	3800	2.56	2.95	2.88	950000	0.00000284	Retak ke-7
20	4000	2.72	3.25	2.91	1000000	0.00000288	Retak ke-8
21	4200	2.86	3.4	3.06	1050000	0.00000296	Retak ke-9
22	4400	2.95	3.45	3.22	1100000	0.00000308	Retak ke-10
23	4600	3.15	3.75	3.39	1150000	0.00000336	Retak ke-11
24	4800	3.32	4.1	3.47	1200000	0.00000372	Retak ke-12
25	5000	3.47	4.48	3.45	1250000	0.00000396	Retak ke-13
26	5200	3.62	4.45	3.8	1300000	0.00000404	Retak ke-14
27	5400	3.99	5.1	4.04	1350000	0.00000464	Retak ke-15
28	5600	4.01	5.13	4.13	1400000	0.00000496	Retak ke-16
29	5800	4.07	5.23	4.18	1450000	0.00000508	Retak ke-17
30	6000	4.23	5.5	4.25	1500000	0.00000516	Retak ke-18
31	6200	4.37	5.65	4.4	1550000	0.00000524	Retak ke-19
32	6400	4.55	6	4.58	1600000	0.00000592	Retak ke-20
33	6600	4.7	6.34	4.73	1650000	0.00000668	Retak ke-21
34	6800	4.86	6.45	5	1700000	0.00000692	Retak ke-22
35	7000	5.03	6.65	5.24	1750000	0.00000732	Retak ke-23

No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen (N/mm)	Kelengkungan (1/mm)	Nomor Retak
36	7200	5.14	6.79	5.37	1750000	0.00000732	Retak ke-24
37	7400	5.35	7.27	5.74	1800000	0.00000752	
38	7600	5.43	7.45	5.8	1850000	0.00000924	
39	7800	5.55	7.73	6.06	1900000	0.00000956	Retak ke-25
40	8000	5.73	8.23	6.21	1950000	0.00001076	Retak ke-26
41	8200	5.88	8.5	6.43	2000000	0.00001192	Retak ke-27
42	8400	6.21	8.85	6.75	2050000	0.00001268	Retak ke-28
43	8600	6.43	9.15	6.92	2100000	0.00001272	Retak ke-29
44	8800	6.87	9.45	7.53	2150000	0.00001284	Retak ke-30
45	9000	6.97	9.65	7.6	2200000	0.00001296	
46	9200	7.31	9.75	8.35	2250000	0.00001324	
47	9400	7.35	9.82	8.39	2300000	0.00001392	
48	9600	7.88	10.35	8.95	2350000	0.00001404	
49	9800	8.2	10.75	9.24	2400000	0.00001416	
50	10000	8.25	10.86	9.35	2450000	0.00001436	
51	10200	8.55	11.22	9.65	2500000	0.00001484	
52	10400	8.62	11.35	9.75	2550000	0.00001508	
53	10600	8.65	11.46	9.8	2600000	0.00001544	
54	10800	8.87	11.5	10.22	2650000	0.00001584	
55	11000	8.95	11.76	10.25	2700000	0.00001592	
56	11200	9.45	12.43	10.65	2750000	0.00001644	
57	11400	9.48	12.5	10.7	2800000	0.00001672	
58	11600	9.58	12.62	10.8	2850000	0.00001696	
59	11800	9.64	12.74	10.85	2900000	0.00001704	
60	11900	9.87	12.88	11.3	2950000	0.00001724	Beban maksimum
61	11900	10.06	12.95	11.65	2975000	0.00001776	
62	11900	10.18	13	11.87	2975000	0.00001792	
63	11900	10.65	13.55	12.28	2975000	0.00001804	
64	11900	10.75	13.98	12.25	2975000	0.00001812	
65	11900	10.93	14	12.6	2975000	0.00001892	
66	11900	11.1	14.25	12.76	2975000	0.00001896	
67	11900	11.25	14.48	12.85	2975000	0.00001924	
68	11900	11.35	14.56	13	2975000	0.00001932	
69	11900	11.6	14.6	13.54	2975000	0.00001944	
70	11900	12.21	20	13.9	2975000	0.00001976	

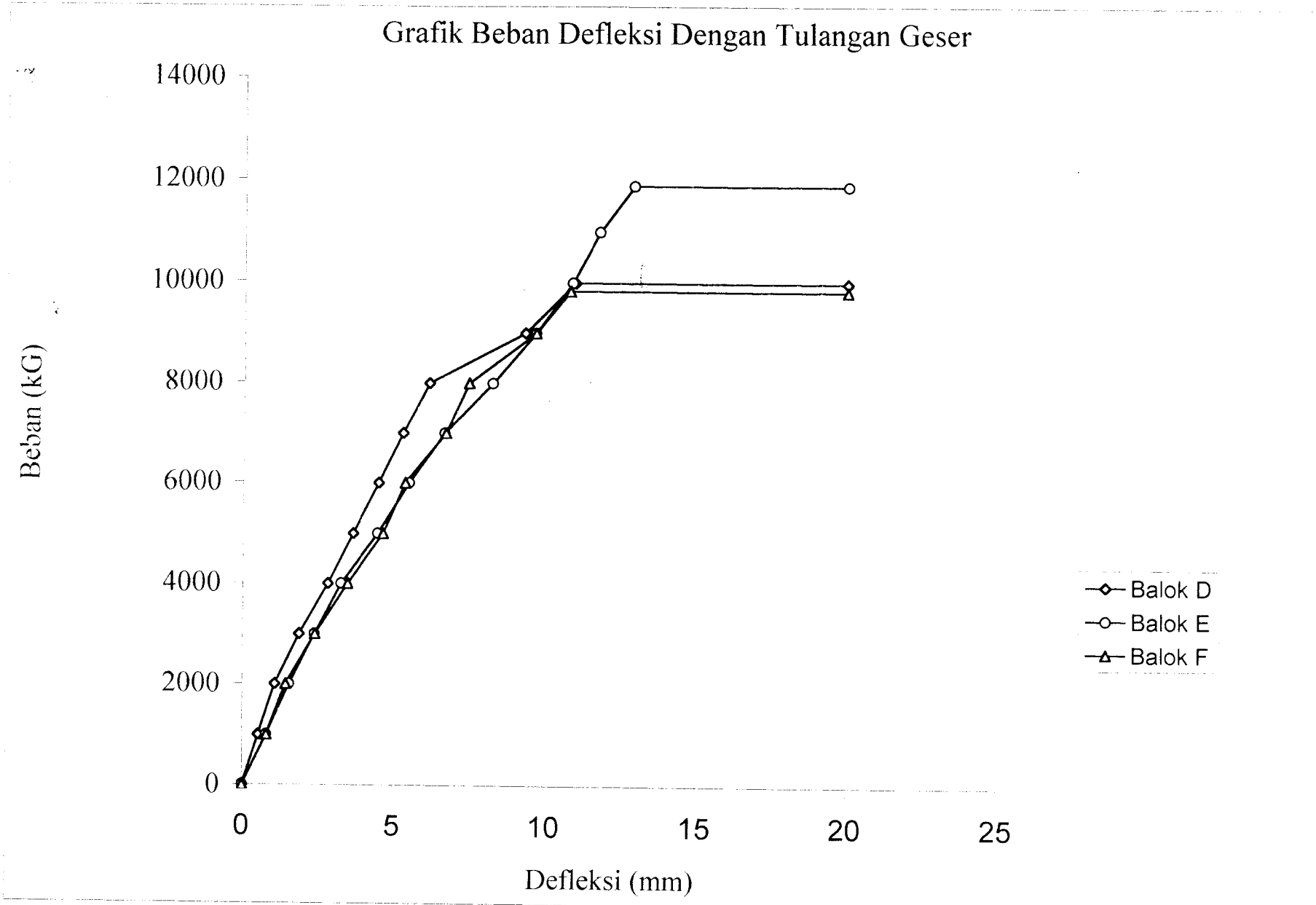
Balok F (Balok dengan tulangan rangkapdengan tulangan geser)

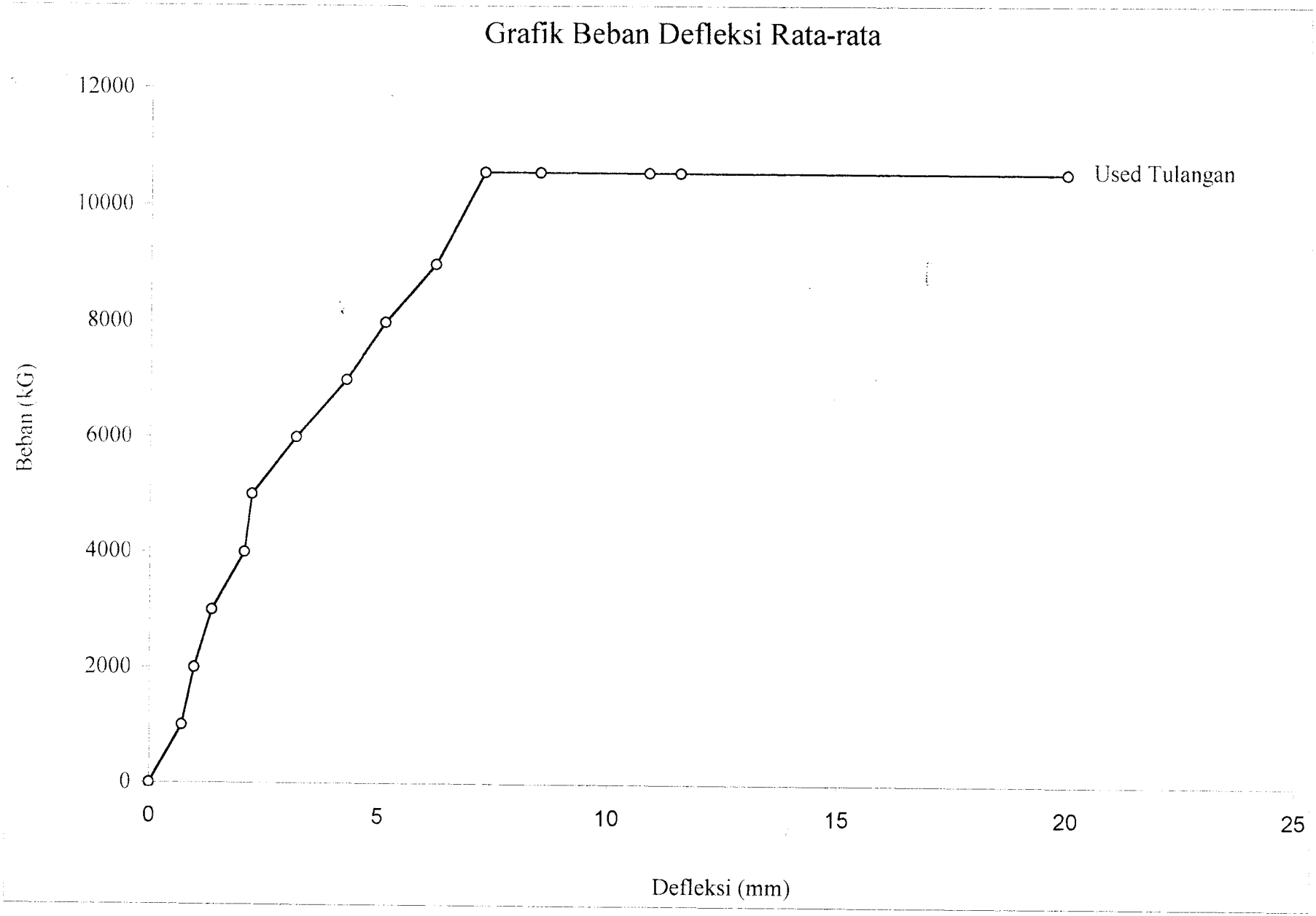
No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen (N/mm)	Kelengkungan (1/mm)	Nomor Retak
0	0	0	0	0	0	0	
1	200	0.17	0.19	0.18	50000	0.00000012	
2	400	0.3	0.37	0.31	100000	0.00000032	
3	600	0.41	0.51	0.43	150000	0.00000048	
4	800	0.54	0.65	0.59	200000	0.00000064	
5	1000	0.67	0.79	0.74	250000	0.00000076	
6	1200	0.78	0.92	0.85	300000	0.00000084	
7	1400	0.8	0.98	0.9	350000	0.00000112	Retak awal
8	1600	1.02	1.24	1.11	400000	0.00000124	
9	1800	1.1	1.3	1.27	450000	0.00000148	
10	2000	1.2	1.44	1.4	500000	0.00000176	Retak ke-2
11	2200	1.35	1.59	1.58	550000	0.00000188	
12	2400	1.51	1.75	1.75	600000	0.00000192	Retak ke-3
13	2600	1.74	1.99	1.98	600000	0.00000192	Retak ke-4
14	2800	1.91	2.18	2.17	650000	0.00000196	Retak ke-5
15	3000	2.1	2.4	2.37	700000	0.00000212	Retak ke-6
16	3200	2.31	2.8	2.4	750000	0.00000228	Retak ke-7
17	3400	2.49	2.9	2.67	800000	0.00000232	Retak ke-8
18	3600	2.65	3.09	2.85	850000	0.00000236	Retak ke-9
19	3800	2.96	3.37	3.31	900000	0.00000256	Retak ke-10
20	4000	3.04	3.48	3.41	950000	0.00000304	Retak ke-11
21	4200	3.18	3.65	3.55	1000000	0.00000324	Retak ke-12
22	4400	3.33	3.85	3.69	1050000	0.00000336	
23	4600	3.58	4.3	3.93	1100000	0.00000352	Retak ke-13
24	4800	3.77	4.45	4.25	1150000	0.00000428	Retak ke-14
25	5000	3.91	4.65	4.38	1200000	0.00000464	Retak ke-15
26	5200	3.98	4.75	4.48	1250000	0.00000484	Retak ke-16
27	5400	4.13	4.85	4.65	1300000	0.00000508	Retak ke-17
28	5600	4.25	5.15	4.84	1350000	0.00000496	Retak ke-18
29	5800	4.32	5.25	5.06	1400000	0.00000596	
30	6000	4.45	5.37	5.25	1450000	0.00000668	Retak ke-19
31	6200	4.55	5.47	5.37	1500000	0.00000688	
32	6400	4.75	5.79	5.55	1550000	0.00000696	
33	6600	4.8	6.03	5.5	1600000	0.00000736	Retak ke-20
34	6800	5.43	6.47	6.35	1650000	0.00000772	Retak ke-21
35	7000	5.46	6.69	6.25	1700000	0.00000784	Retak ke-22

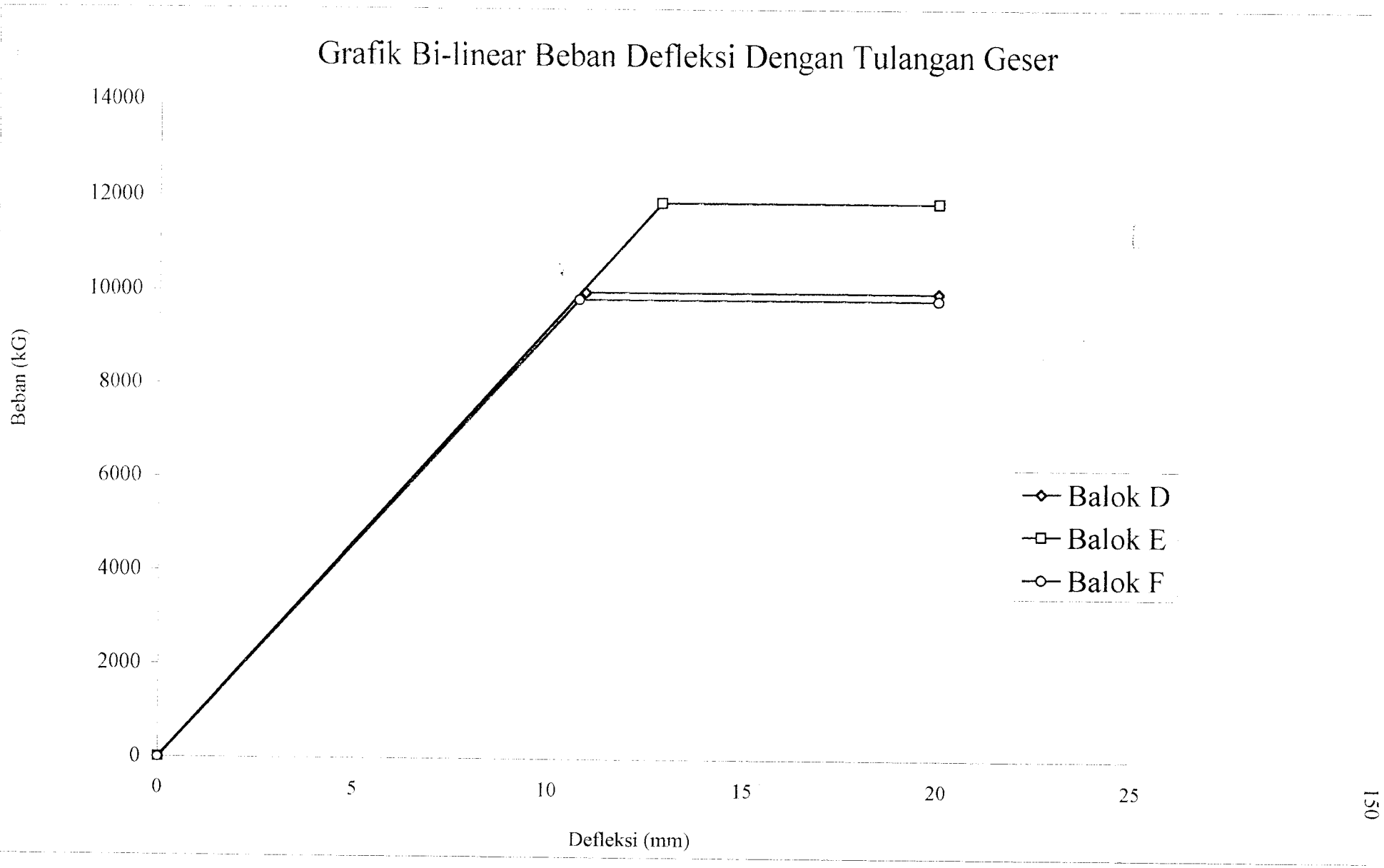
No	Beban P (kG)	DG1 (mm)	DG2 (mm)	DG3 (mm)	Momen (N/mm)	Kelengkungan (1/mm)	Nomor Retak
36	7200	5.5	6.58	6.45	1750000	0.00000808	
37	7400	5.65	6.81	6.55	1800000	0.00000812	Retak ke-23
38	7600	5.72	6.84	6.72	1850000	0.00000824	Retak ke-24
39	7800	5.91	7.25	6.78	1900000	0.00000848	
40	8000	6.24	7.45	7.25	1950000	0.00000884	
41	8200	6.4	7.8	7.36	2000000	0.00000888	Retak ke-25
42	8400	6.7	8.36	7.45	2050000	0.00000944	Retak ke-26
43	8600	6.9	8.67	7.55	2100000	0.00000964	Retak ke-27
44	8800	7.32	9.22	8	2150000	0.00000968	Retak ke-28
45	9000	7.55	9.65	8.11	2200000	0.00001032	Retak ke-29
46	9200	7.6	9.56	8.45	2250000	0.00001064	
47	9400	7.75	9.87	8.84	2300000	0.00001124	
48	9600	7.86	10.26	8.95	2350000	0.00001284	
49	9800	7.95	10.4	9.21	2400000	0.00001396	
50	9840	8.1	10.78	9.3	2450000	0.00001484	Beban maksimum
51	9840	8.35	10.95	9.67	2460000	0.00001552	
52	9840	8.45	11.32	9.84	2460000	0.00001568	
53	9840	9.28	12.15	10.89	2460000	0.00001704	
54	9840	9.3	12.37	10.95	2460000	0.00001792	
55	9840	9.57	12.89	10.98	2460000	0.00001888	
56	9840	10.21	13.45	11.35	2460000	0.00001892	
57	9840	10.3	13.98	11.45	2460000	0.00001752	
58	9840	10.76	14.75	11.85	2460000	0.00001932	
59	9840	10.85	14.86	12.4	2460000	0.00002032	
60	9840	12.34	20	12.87	2460000	0.00002224	

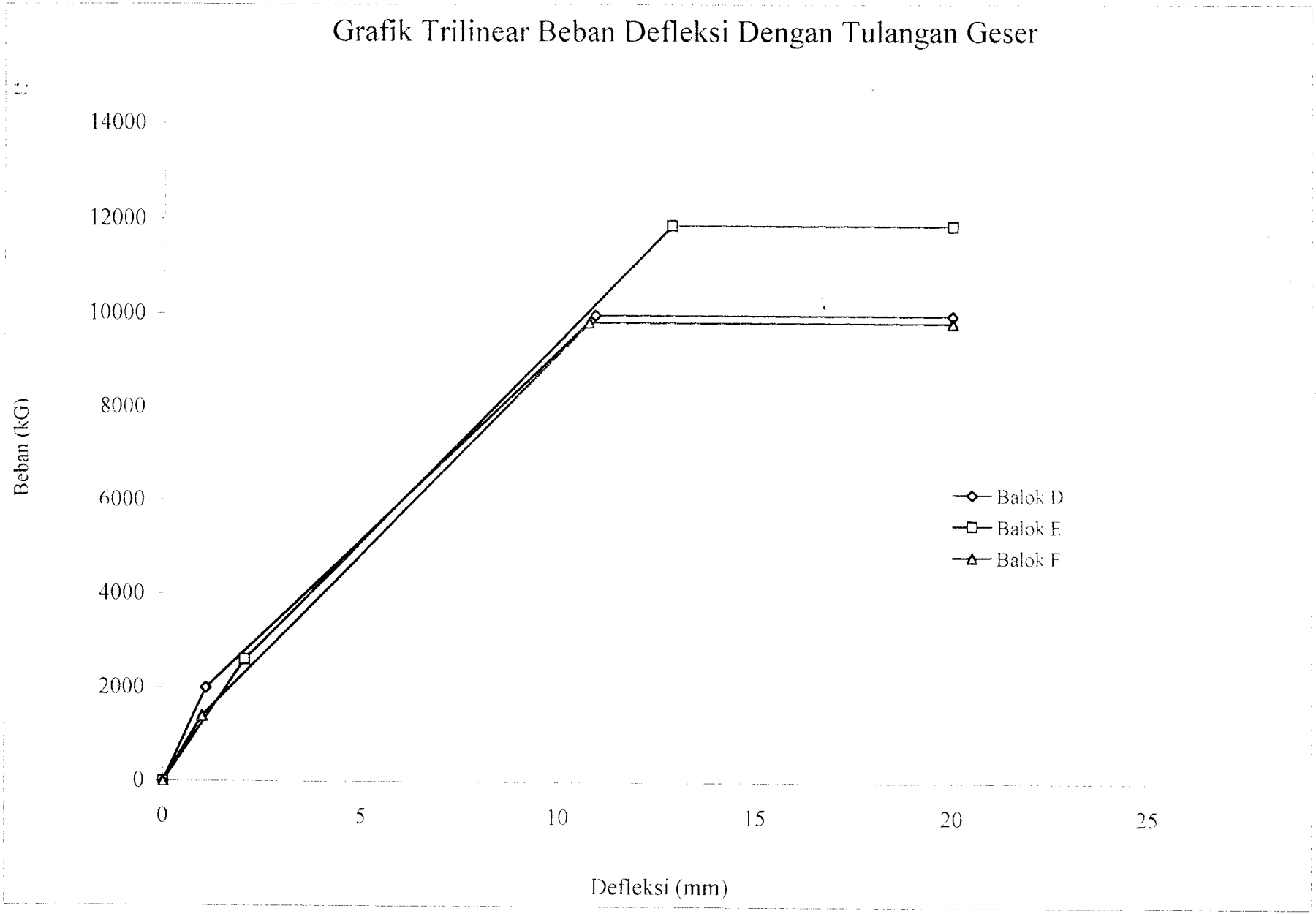
Balok menggunakan tulangan sebelah tanpa tulangan geser							
BA		BB		BC		Nilai Rata-rata	
Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.56	1000	0.5	1000	0.6	1000	0.55
2000	1.06	2000	0.96	2000	1.14	2000	1.05
2466.6667	1.41	2400	1.18	2400	1.34	2422.222233	1.31
3000	1.67	3000	1.59	3000	1.74	3000	1.67
4000	2.54	4000	2.43	4000	2.57	4000	2.51
5000	3.47	5000	3.28	5000	3.36	5000	3.37
6000	4.37	6000	4.35	6000	4.23	6000	4.32
6935.333	6.4	7000	6.21	0	0	4645.111	6.31
6935.333	7.3	7246	7.5	6140	5.02	6773.777667	6.61
6935.333	20	7246	20	6140	20	6773.777667	20

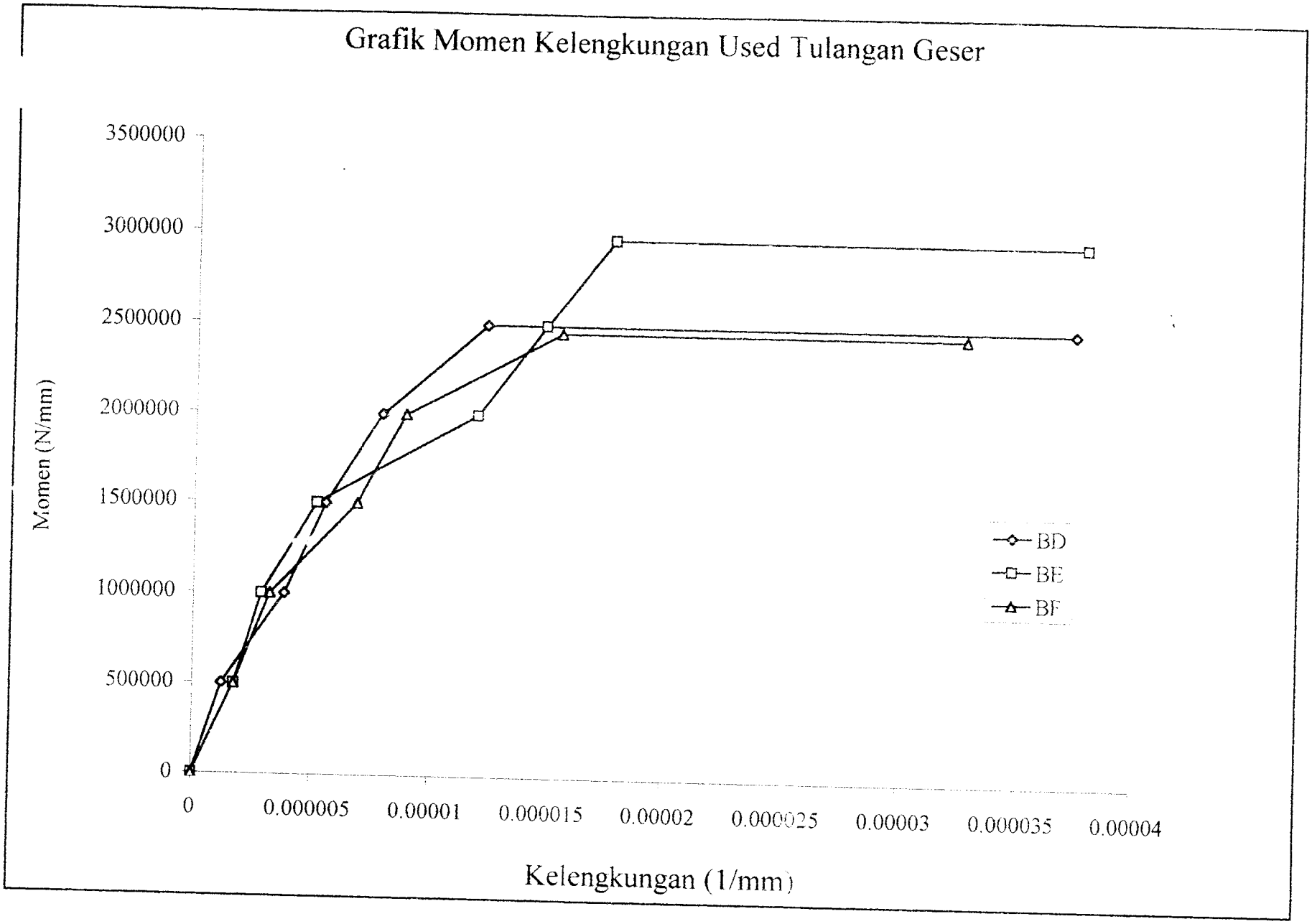
Balok menggunakan tulangan rangkap dengnan tulangan geser							
BD		BE		BF		Nilai Rata-rata	
Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.53	1000	0.8	1000	0.79	1000	0.706666667
2000	0	0	0	1400	0.98	1133.333333	0.98
3000	1.08	2000	1.55	2000	1.44	2333.333333	1.356666667
4000	0	2600	2.06	0		2200	2.06
5000	1.87	3000	2.39	3000	2.4	3666.666667	2.22
6000	2.82	4000	3.25	4000	3.48	4666.666667	3.183333333
7000	3.66	5000	4.48	5000	4.65	5666.666667	4.263333333
8000	4.5	6000	5.5	6000	5.37	6666.666667	5.123333333
9000	5.29	7000	6.65	7000	6.69	7666.666667	6.21
10580	6.14	8000	8.23	8000	7.45	8860	7.273333333
10580	6.14	9000	9.65	9000	9.65	9526.666667	8.48
10580		10000	10.86	0	0	6860	10.86
10580	10.95	11900	12.88	9840	10.78	10773.33333	11.53666667
10580	20	11900	20	9840	20	10773.33333	20

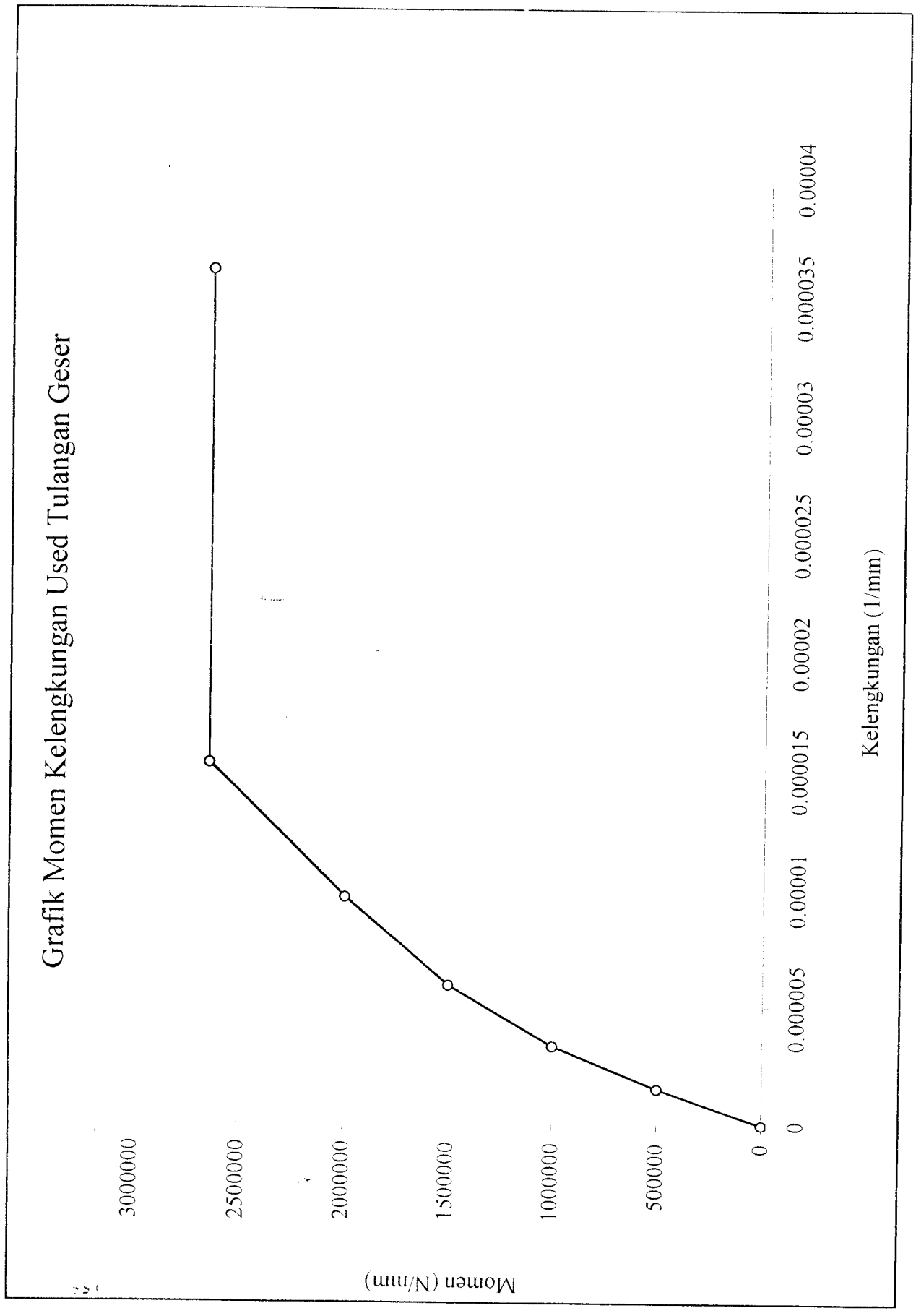

Grafik Beban Defleksi Dengan Tulangan Geser
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok D
Balok E
Balok F

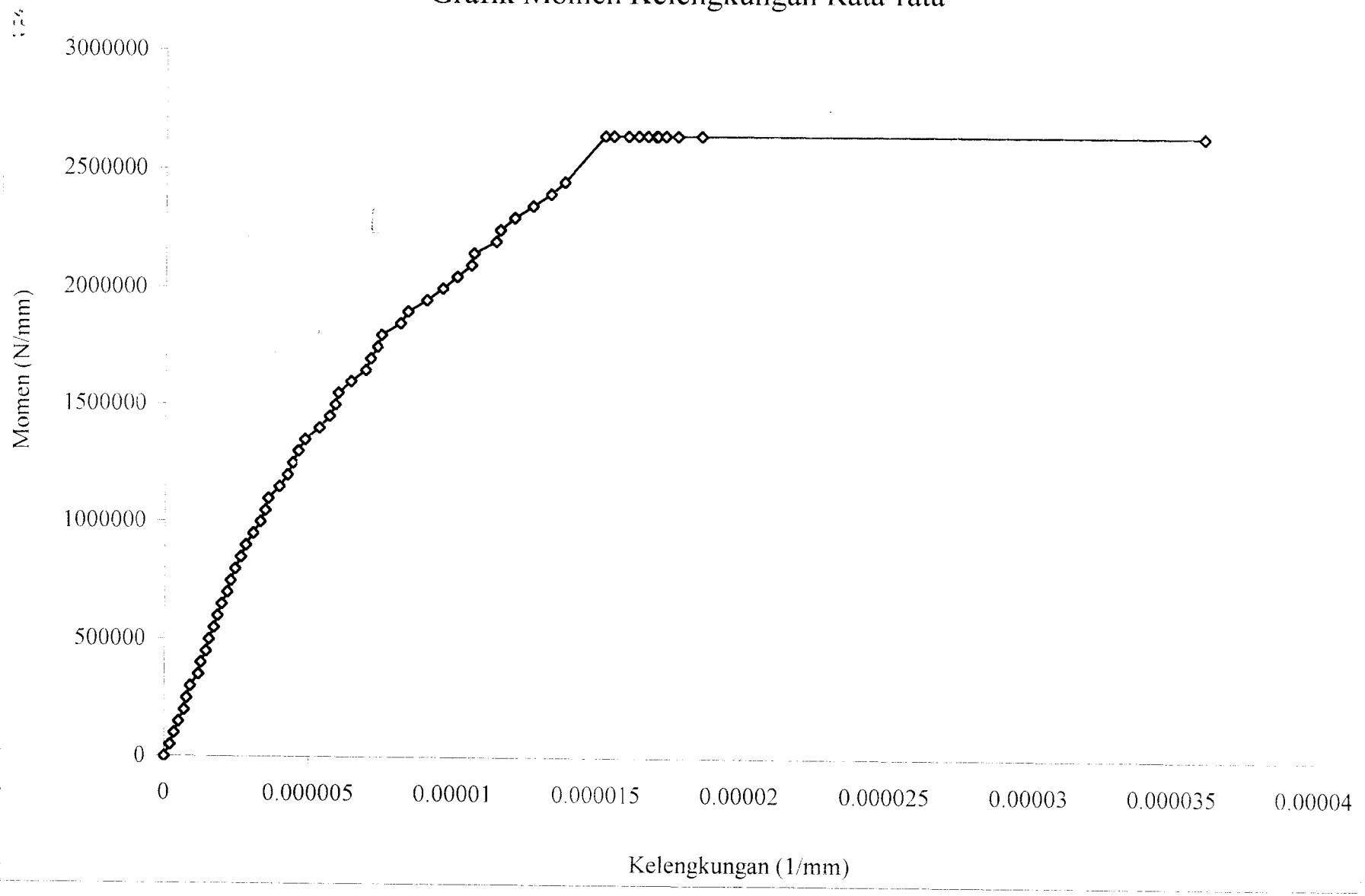

Grafik Beban Defleksi Rata-rata
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Used Tulangan


Grafik Bi-linear Beban Defleksi Dengan Tulangan Geser
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok D
Balok E
Balok F

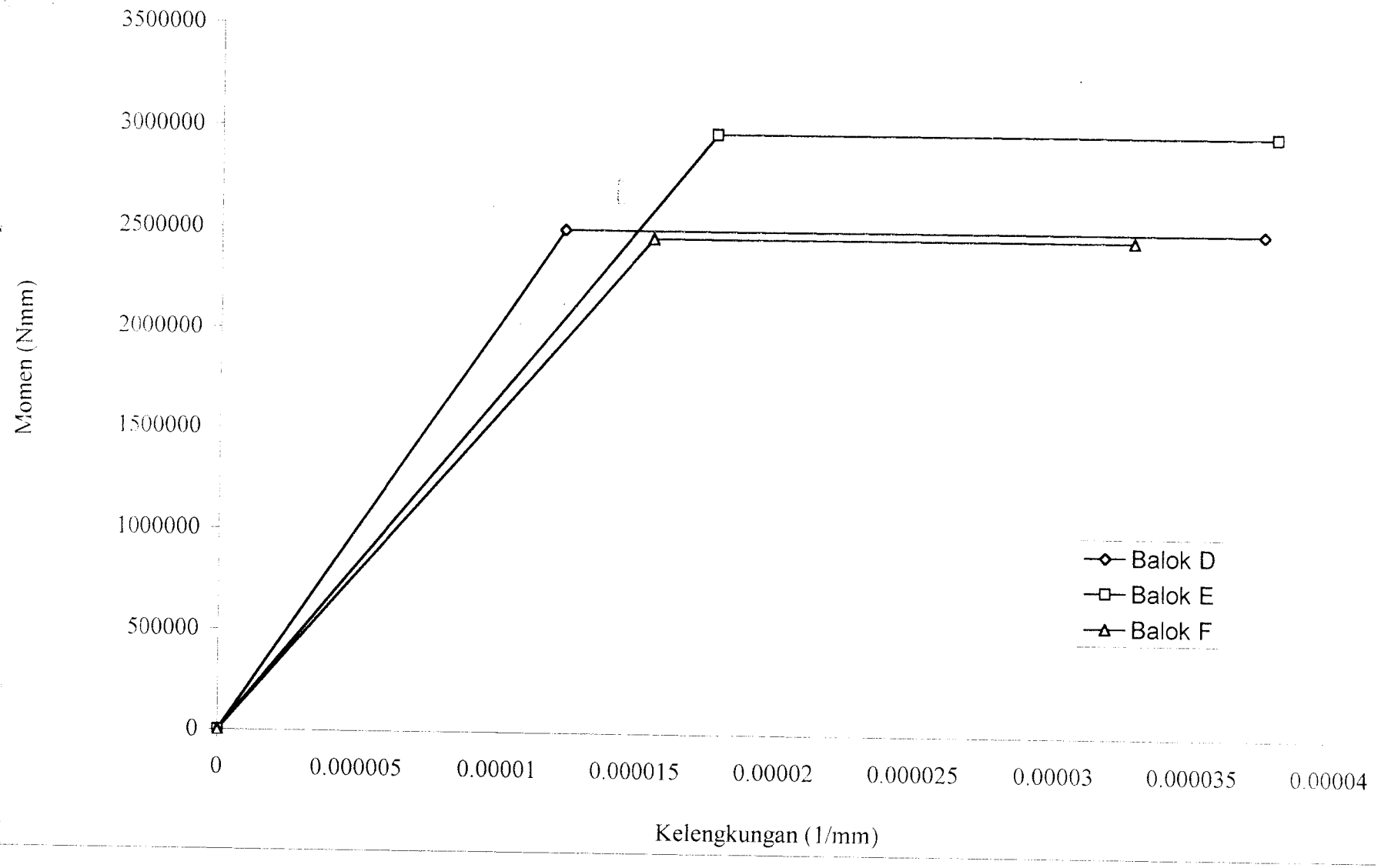

Grafik Trilinear Beban Defleksi Dengan Tulangan Geser
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
Defleksi (mm)
Balok D
Balok E
Balok F

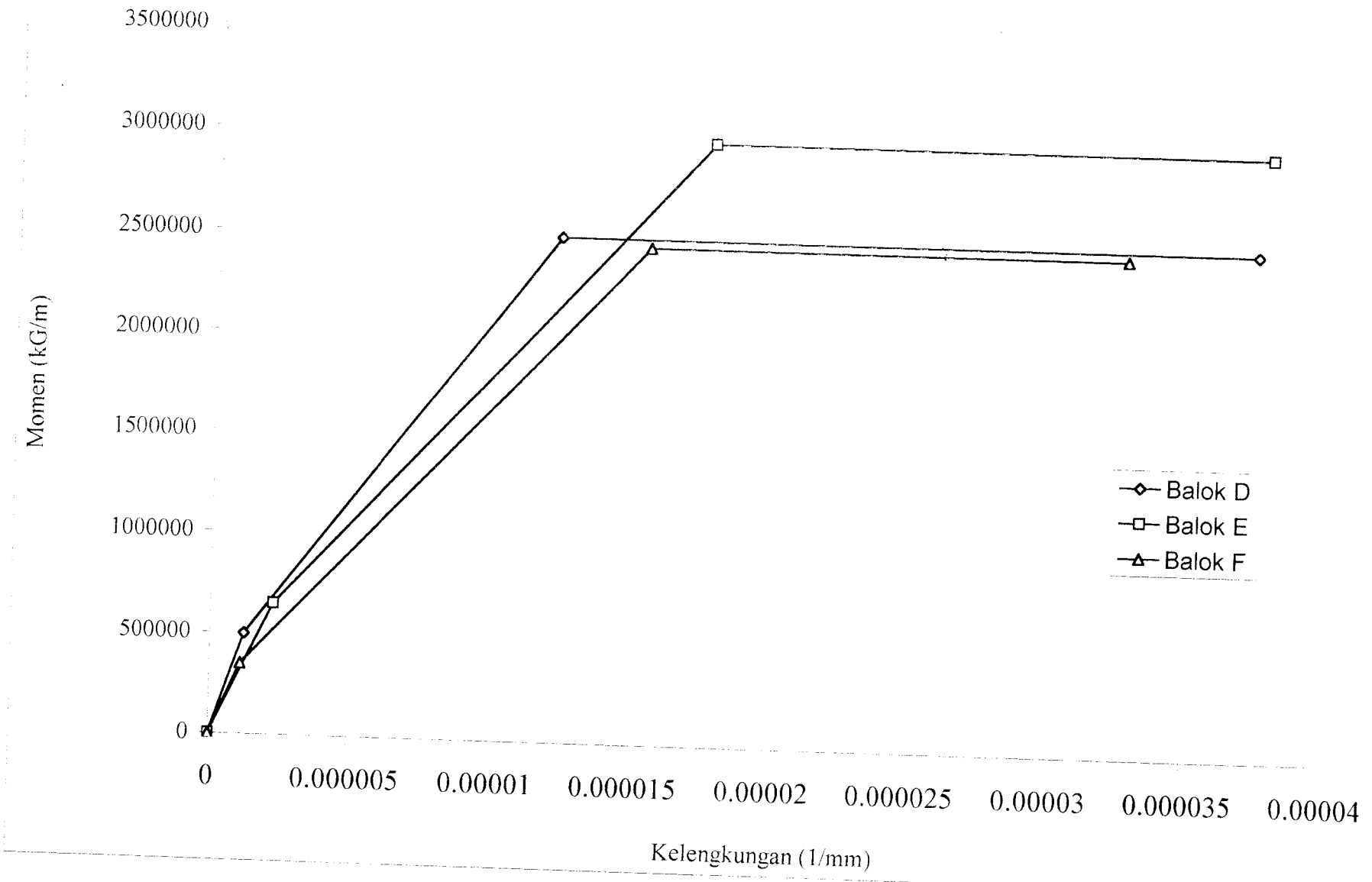

Grafik Momen Kelengkungan Used Tulangan Geser
3500000
3000000
2500000
2000000
1500000
1000000
500000
0
Momen (N/mm)
0
0.000005
0.00001
0.000015
0.00002
0.000025
0.00003
0.000035
0.00004
Kelengkungan (1/mm)
BD
BE
BF


Grafik Momen Kelengkungan Used Tulangan Geser
Momen (N/mm)
3000000
2500000
2000000
1500000
1000000
500000
0
0
0.000005
0.00001
0.000015
0.00002
0.000025
0.00003
0.000035
0.00004
Kelengkungan (1/mm)


Grafik Momen Kelengkungan Rata-rata
Momen (N/mm)
3000000
2500000
2000000
1500000
1000000
500000
0
0
0.000005
0.00001
0.000015
0.00002
0.000025
0.00003
0.000035
0.00004
Kelengkungan (1/mm)

Grafik Bilinear Momen Kelengkungan Dengan Tulangan Geser



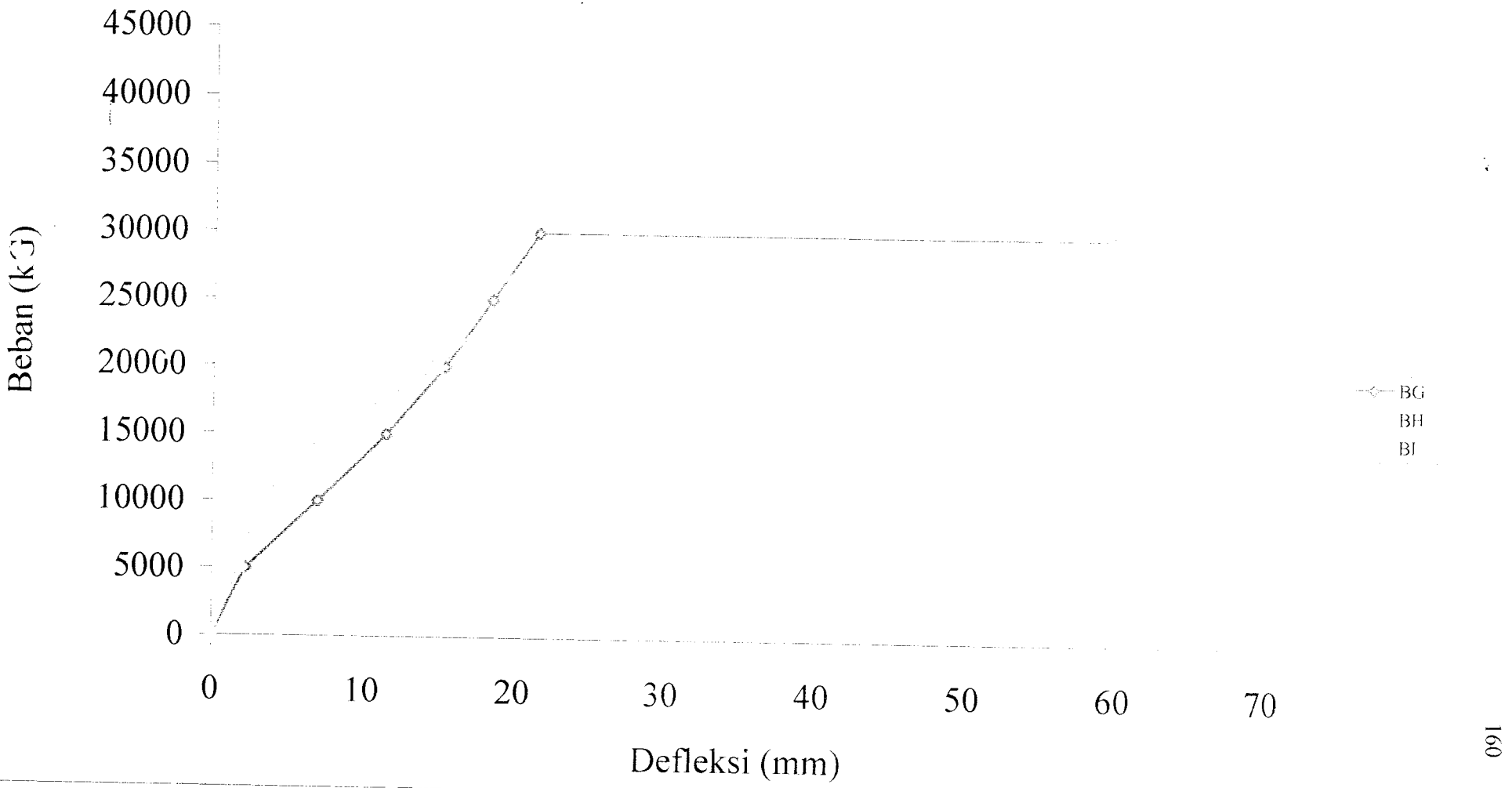

Grafik Trilinear Momen Kelengkungan Dengan Tulangan Geser
3500000
3000000
2500000
2000000
1500000
1000000
500000
0
Momen (kG/m)
0
0.000005
0.00001
0.000015
0.00002
0.000025
0.00003
0.000035
0.00004
Kelengkungan (1/mm)
Balok D
Balok E
Balok F

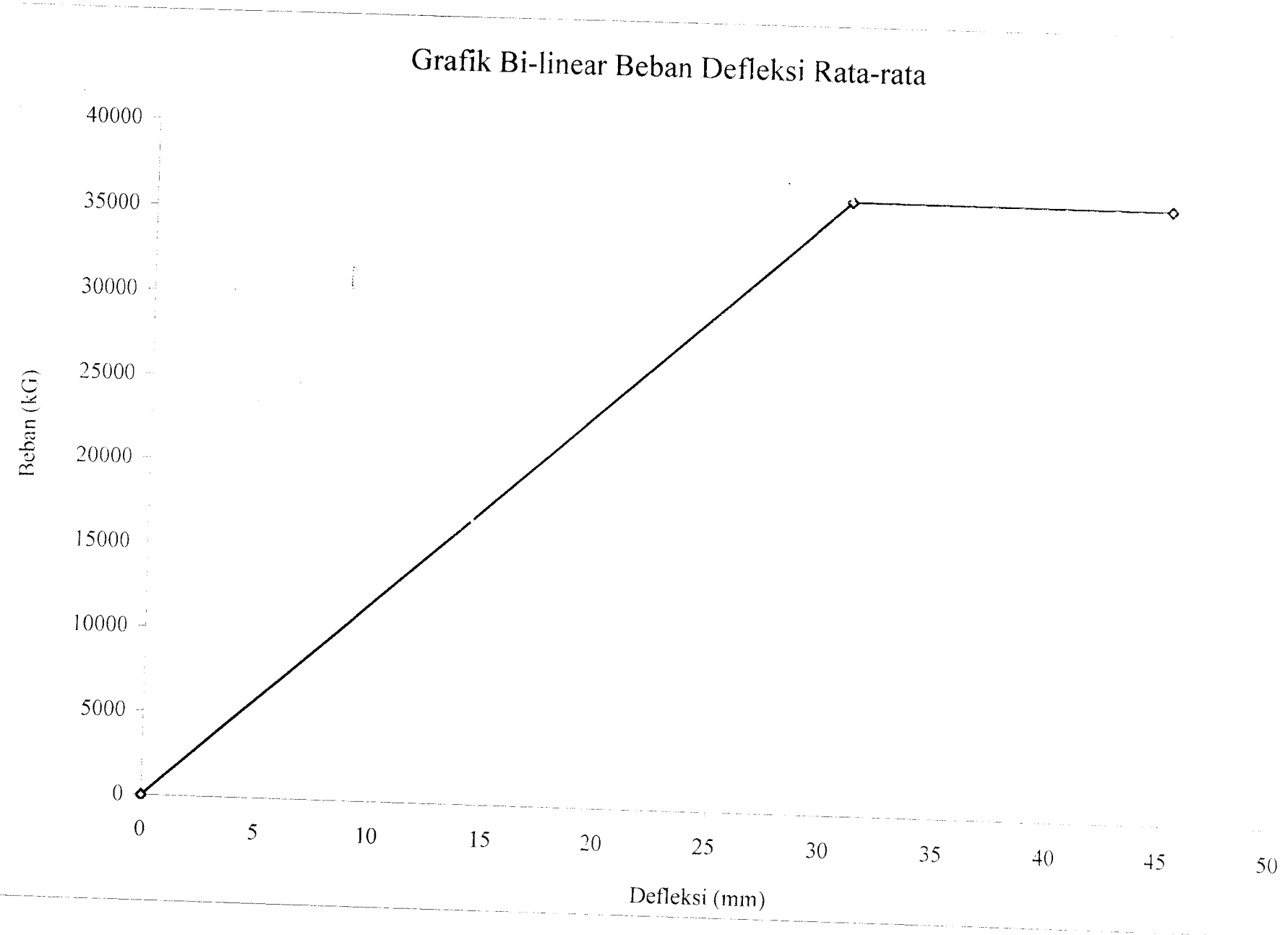
Grafik Beban Defleksi Rata-rata
Beban (kG)
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
0
10
20
30
40
50
60
70
Defleksi (mm)
Rata-rata

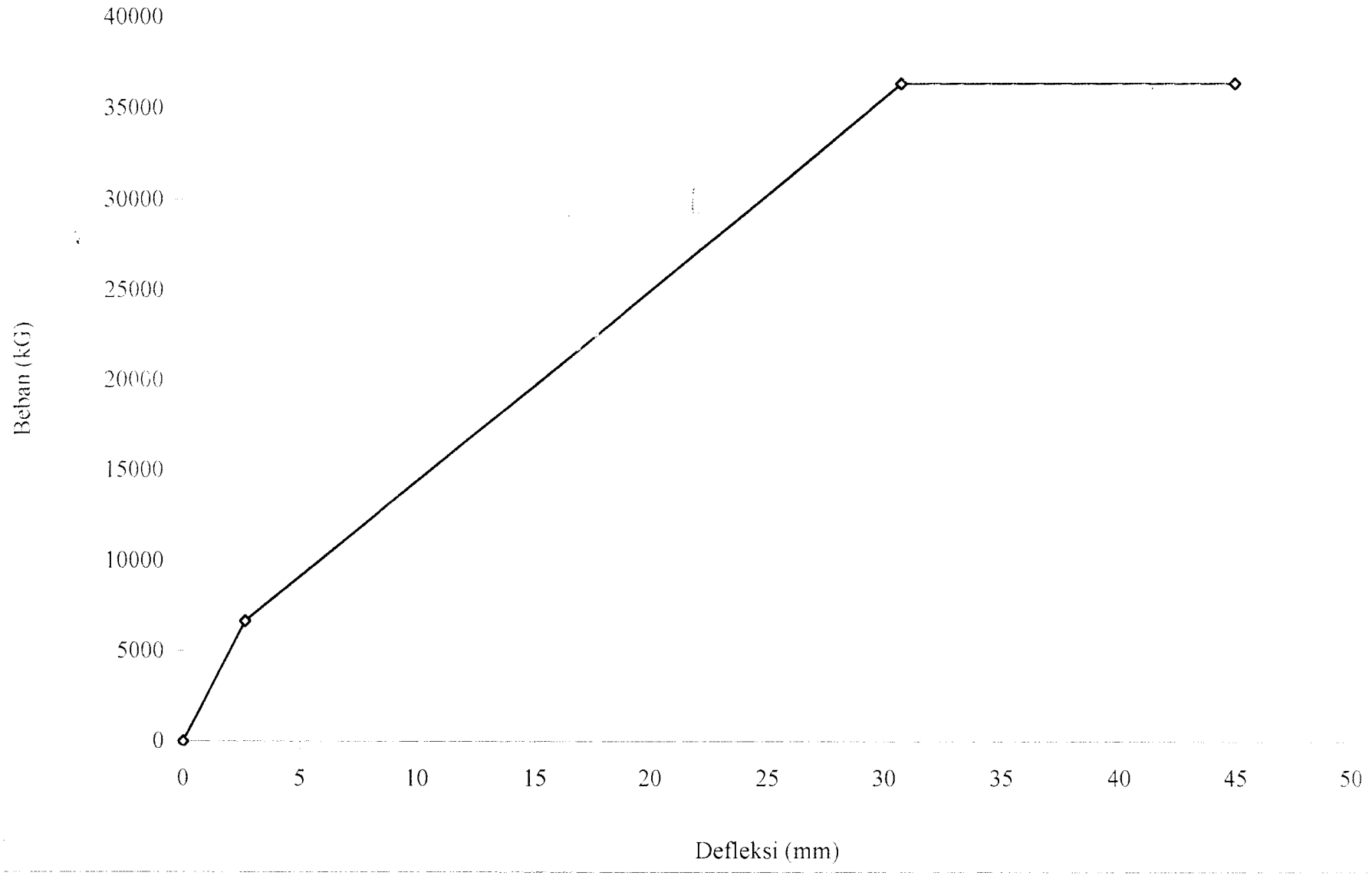
Benda Uji Geser Murni							
BG		BH		BI		Nilai Rata-rata	
Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.45	1000	0.26	1000	0.28	1000	0.33
2000	0.93	2000	0.66	2000	0.45	2000	0.68
3000	1.57	3000	1.27	3000	0.57	3000	1.136666667
4000	1.77	4000	1.66	4000	0.65	4000	1.36
5000	2.24	5000	1.8	4800	1.04	5000	1.693333333
6000	2.59	6000	2.01	5000	1.1	6000	1.9
7000	3.25	7000	2.1	6000	1.52	6666.6667	2.29
8000	4.87	8000	2.19	7000	1.73	7000	2.93
8200	4.93	9000	2.28	8000	1.85	8000	3.02
9000	5.97	10000	3.05	9000	2.05	9000	3.69
10000	6.95	11000	3.56	10000	2.13	10000	4.213333333
11000	7.86	12000	4.32	11000	2.34	11000	4.84
12000	8.56	13000	5.21	12000	2.56	12000	5.443333333
13000	9.67	14000	6.32	13000	3.31	13000	6.433333333
14000	10.57	15000	7.45	14000	3.75	14000	7.256666667
15000	11.48	16000	8.21	15000	4.8	15000	8.163333333
16000	12.34	17000	9.56	16000	5.57	16000	9.156666667
17000	13.11	18000	11.11	17000	6.65	17000	10.29
18000	13.96	19000	13.43	18000	7.67	18000	11.68666667
19000	14.65	20000	14.8	19000	8.78	19000	12.74333333
20000	15.33	21000	16.01	20000	10.33	20000	13.89
21000	16.02	22000	16.78	21000	12.62	21000	15.14
22000	16.51	23000	17.67	22000	13.63	22000	15.93666667
23000	17.21	24000	18.47	23000	15.2	23000	16.96
24000	17.89	25000	19.25	24000	16.26	24000	17.8
25000	18.43	26000	20.8	25000	17.24	25000	18.82333333
26000	19.03	27000	22.5	26000	17.93	26000	19.82
27000	19.56	28000	24.5	27000	18.75	27000	20.93666667
28000	20.34	29000	25.92	28000	19.65	28000	21.97
29000	21.15	30000	26.54	29000	21.7	29000	23.13
30000	21.47	31000	28.18	30000	23.8	30000	24.48333333

Benda Uji Geser Murni							
BG		BH		BI		Nilai Rata-rata	
Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)	Beban (kG)	Defleksi (mm)
30000	60	32000	29.13	31000	25.3	31000	38.14333333
		33000	29.86	32000	26.15	32000	18.67
		34000	30.75	33000	27.25	33000	19.33333333
		35000	31.67	34000	28.65	34000	20.19666667
		36000	32.88	35000	29.39	35000	20.75666667
		37000	33.97	36000	30.15	36000	21.37333333
		38000	35.21	37000	30.97	36333.3333	22.06
		39000	36.34	38000	31.92	36333.3333	22.75333333
		40000	37.35	39000	33.45	36333.3333	23.6
		40000	60	39000	60	36333.3333	60

Grafik Beban Defleksi




Grafik Bi-linear Beban Defleksi Rata-rata
Beban (kG)
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Defleksi (mm)


Grafik Trilinear Beban Defleksi Rata-rata
40000
35000
30000
25000
20000
15000
10000
5000
0
Beban (kG)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
45
50
Defleksi (mm)

Balok BA

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
1	2800	6	0.378	0.273
2	3200	5	0.432	0.227
3	3400	11.5	0.459	0.522
4	3600	12	0.486	0.545
5	3800	13.5	0.513	0.614
6	4000	13.5	0.54	0.614
7	4200	17	0.567	0.772
8	4400	18.5	0.595	0.841
9	4600	16.5	0.621	0.75
10	4800	20	0.648	0.909
11	5000	20.5	0.675	0.932
12	5200	13.5	0.702	0.614
13	5400	20	0.729	0.909
14	5600	15	0.756	0.682
15	5800	17.5	0.783	0.795
16	6000	24	0.81	1.091
17	6200	22.5	0.838	1.023
18	6400	19	0.865	0.864
19	6600	27.5	0.899	1.25
20	6800	34	0.919	1.545
21	7200	22.5	0.973	1.023

Balok BB

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
1	2400	6.5	0.331	0.295
2	2800	6	0.386	0.273
4	3200	11.5	0.442	0.522
6	3600	12.5	0.497	0.568
8	4000	16.5	0.552	0.75
9	4200	15	0.579	0.68
10	4400	11.5	0.607	0.523
11	4600	16	0.635	0.727
12	4800	20	0.662	0.909
13	5200	19	0.717	0.864
14	5400	11.5	0.745	0.523
15	5800	20	0.8	0.909
16	6000	25	0.828	1.136
17	6200	22.5	0.855	1.023
18	6400	21.5	0.883	0.977
19	6600	22	0.911	1

Balok BC

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
4	3000	6	0.488	0.273
5	3200	12.5	0.521	0.568
8	4000	8.5	0.651	0.386
9	4200	13.5	0.684	0.614
10	4400	11	0.717	0.5
11	4600	17.5	0.749	0.795
12	4800	21.5	0.782	0.977
13	5000	16	0.814	0.727
14	5200	17.5	0.847	0.795
15	5400	21	0.879	0.955
16	5600	11.5	0.912	0.523
17	5800	14	0.945	0.636
18	6000	25	0.977	1.136

Balok BD

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
1	2000	4.5	0.2	0.204
2	2200	10	0.22	0.454
3	2600	11.5	0.26	0.523
4	2800	7.5	0.28	0.34
5	3000	11	0.3	0.5
7	3400	15	0.34	0.68
8	3600	14	0.36	0.636
9	3800	16.5	0.38	0.75
10	4000	15	0.4	0.68
11	4200	17.5	0.42	0.795
12	4400	16	0.44	0.727
13	4600	17	0.46	0.773
14	4800	19	0.48	0.864
16	5200	16	0.52	0.727
20	6000	16.5	0.6	0.75
21	6200	7	0.62	0.318
23	6600	7.5	0.66	0.34
24	6800	19.5	0.68	0.836
26	7200	18.5	0.72	0.841
27	7400	21.5	0.74	0.977
30	8000	23.5	0.8	1.068
31	8200	22	0.82	1

Balok BE

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
1	2600	5	0.218	0.227
2	2800	7.5	0.235	0.34
3	3000	9	0.252	0.409
5	3400	11.5	0.286	0.523
6	3600	12.5	0.302	0.568
7	3800	8.5	0.319	0.386
9	4200	16	0.353	0.727
10	4400	13	0.369	0.59
12	4800	15.5	0.403	0.705
14	5200	16.5	0.437	0.75
17	5800	20	0.487	0.909
18	6000	16.5	0.504	0.75
19	6200	20	0.521	0.909
20	6400	19	0.538	0.863
22	6800	19	0.571	0.863
23	7000	24	0.588	1.09
25	7800	26.5	0.655	1.205
27	8200	20	0.689	0.909
28	8400	15	0.706	0.682
29	8600	23.5	0.723	1.068
30	8800	26.5	0.739	1.205

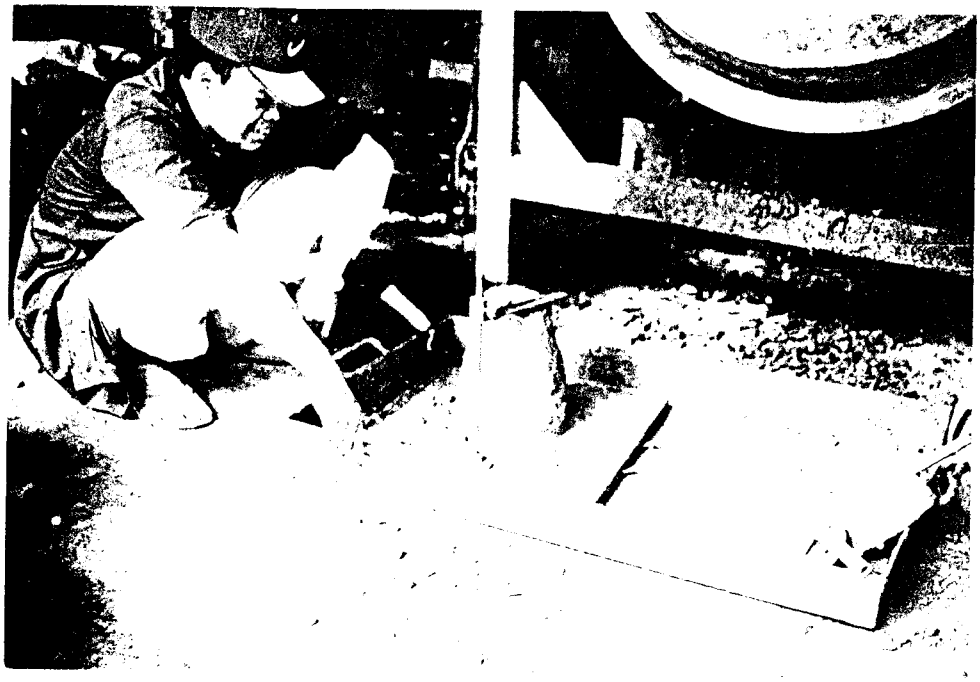
Balok BF

No. Retak	P (kG)	Panj. Retak(cm)	P/Pmax	l/h
0	0	0	0	0
1	1400	6	0.142	0.272
2	2000	10	0.203	0.455
3	2400	14	0.244	0.636
3	2600	8	0.264	0.364
4	2800	11	0.285	0.5
5	3000	15	0.305	0.682
6	3200	18	0.325	0.818
7	3400	16	0.345	0.727
8	3600	17	0.366	0.773
9	3800	19.5	0.386	0.886
10	4000	18.5	0.407	0.84
11	4200	15	0.427	0.682
12	4600	13.5	0.467	0.614
13	4800	14	0.487	0.636
14	5000	21	0.508	0.955
15	6000	17.5	0.609	0.795
19	6600	14.5	0.67	0.659
20	6800	11	0.691	0.5
21	7000	13.5	0.711	0.614
22	7600	16	0.772	0.727
24	8200	24	0.833	1.091
27	8600	19	0.873	0.864
28	8800	24.5	0.894	1.114
29	9000	18	0.915	0.818

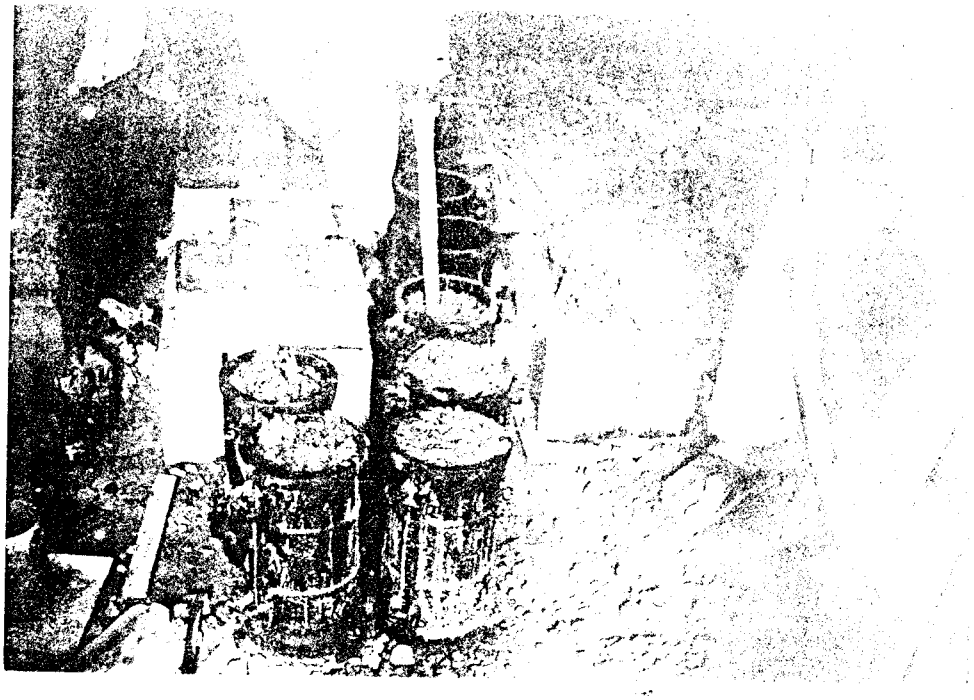
Starin Gauge Beton yang menggunakan tulangan rangkap dgn tulangan geser

Beban P (kG)	SG Beton BD	Beban P (kG)	SG Beton BE	Beban P (kG)	SG Beton BF	Beban P (kG)	SG Beton Rerata
200	-8	200	-8	200	-11	200	-9
400	-16	400	-13	400	-24	400	-17.66666667
600	-32	600	-34	600	-35	600	-33.66666667
800	-47	800	-49	800	-50	800	-48.66666667
1000	-64	1000	-67	1000	-67	1000	-66
1200	-80	1200	-83	1200	-85	1200	-82.66666667
1400	-96	1400	-100	1400	-102	1400	-99.33333333
1600	-117	1600	-123	1600	-122	1600	-120.6666667
1800	-137	1800	-140	1800	-145	1800	-140.6666667
2000	-158	2000	-163	2000	-169	2000	-163.3333333
2200	-183	2200	-185	2200	-192	2200	-186.6666667
2400	-218	2400	-214	2400	-217	2400	-216.3333333
2600	-256	2600	-241	2600	-250	2600	-249
2800	-289	2800	-283	2800	-277	2800	-283
3000	-321	3000	-313	3000	-307	3000	-313.6666667
3200	-352	3200	-341	3200	-338	3200	-343.6666667
3400	-376	3400	-369	3400	-369	3400	-371.3333333
3600	-412	3600	-396	3600	-402	3600	-403.333333?
3800	-443	3800	-425	3800	-446	3800	-438
4000	-472	4000	-450	4000	-456	4000	-459.3333333
4200	-499	4200	-475	4200	-475	4200	-483
4400	-526	4400	-501	4400	-503	4400	-510
4600	-558	4600	-528	4600	-535	4600	-540.3333333
4800	-583	4800	-552	4800	-567	4800	-567.3333333
5000	-608	5000	-578	5000	-590	5000	-592
5200	-632	5200	-604	5200	-604	5200	-613.3333333
5400	-660	5400	-628	5400	-630	5400	-639.3333333
5600	-685	5600	-652	5600	-655	5600	-664
5800	-711	5800	-675	5800	-690	5800	-692
6000	-734	6000	-697	6000	-710	6000	-713.6666667
6200	-761	6200	-722	6200	-731	6200	-738
6400	-788	6400	-749	6400	-766	6400	-767.6666667
6600	-814	6600	-773	6600	-801	6600	-796
6800	-831	6800	-798	6800	-834	6800	-821
7000	-866	7000	-821	7000	-853	7000	-846.6666667
7200	-891	7200	-849	7200	-870	7200	-870

Beban P (kG)	SG Beton BD	Beban P (kG)	SG Beton BE	Beban P (kG)	SG Beton BF	Beban P (kG)	SG Beton Rerata
7400	-918	7400	-877	7400	-910	7400	-901.6666667
7600	-943	7600	-896	7600	-922	7600	-920.3333333
7800	-971	7800	-919	7800	-940	7800	-943.3333333
8000	-999	8000	-945	8000	-969	8000	-971
8200	-1015	8200	-969	8200	-1007	8200	-997
8400	-1059	8400	-995	8400	-1050	8400	-1034.666667
8600	-1074	8600	-1023	8600	-1158	8600	-1085
8800	-1212	8800	-1149	8800	-1225	8800	-1195.333333
9000	-1319	9000	-1194	9000	-1354	9000	-1289
9200	-1375	9200	-1283	9400	-1449	9266.666667	-1369
9400	-1398	9400	-1840	9520	-1579	9440	-1605.666667
9600	-1429	9600	-1842	9600	-1643	9600	-1638
9800	-1459	9800	-1962	9700	-1783	9766.666667	-1734.666667
10000	-1857	11900	-2041	9840	-1853	10580	-1917
10000	-1964	11900	-2112	9840	-1992	10580	-2022.666667
10000	-2032	11900	-2221	9840	-2099	10580	-2117.333333
10000	-2112	11900	-2267	9840	-2279	10580	-2219.333333
10000	-2221	11900	-2315	9840	-2315	10580	-2283.666667
10000	-2267	11900	-2373	9840	-2373	10580	-2337.666667
10000	-2315	11900	-2432	9840	-2432	10580	-2393
10000	-2373	11900	-2483	9840	-2455	10580	-2437
10000	-2432	11900	-2543	9840	-2543	10580	-2506
10000	-2943	11900	-2895	9840	-2912	10580	-2916.666667

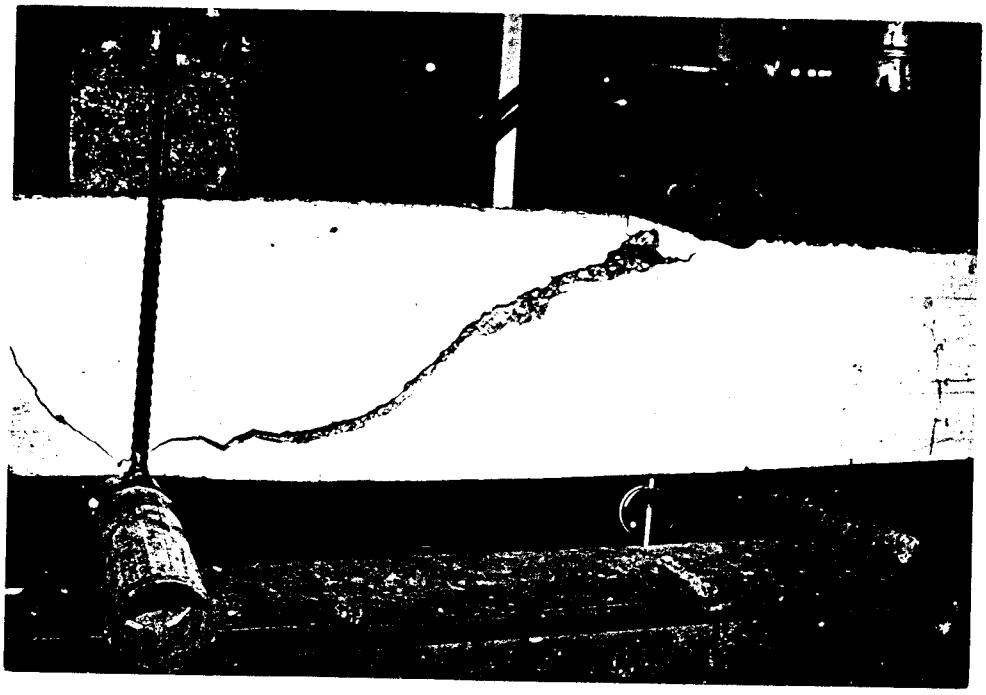


Gambar Pengujian Slump

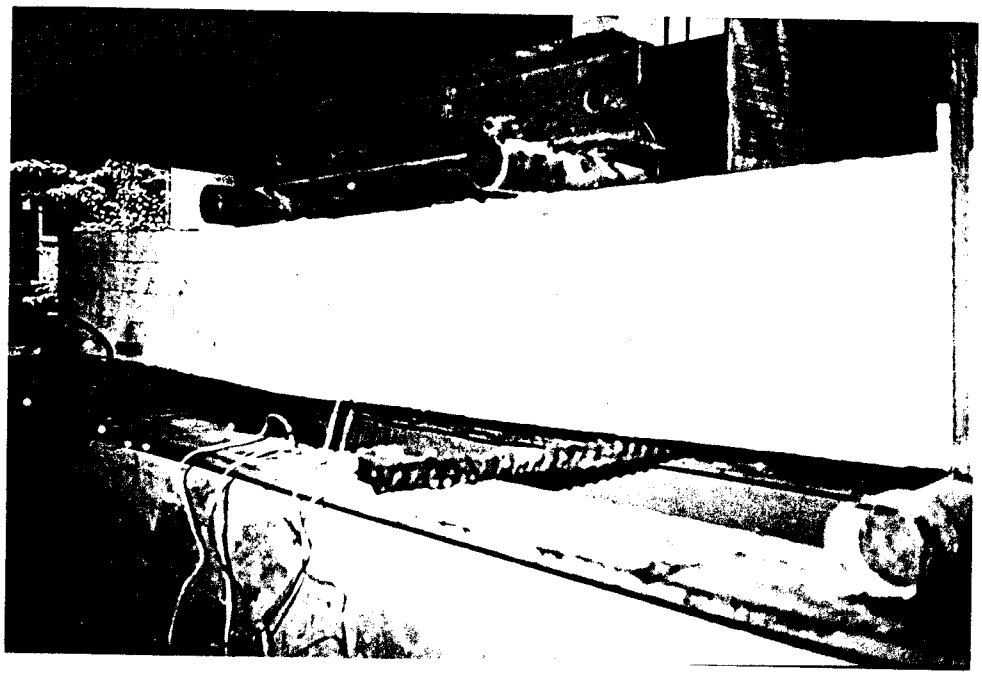


Gambar Pelaksanaan Pengecoran dan Pemadatan

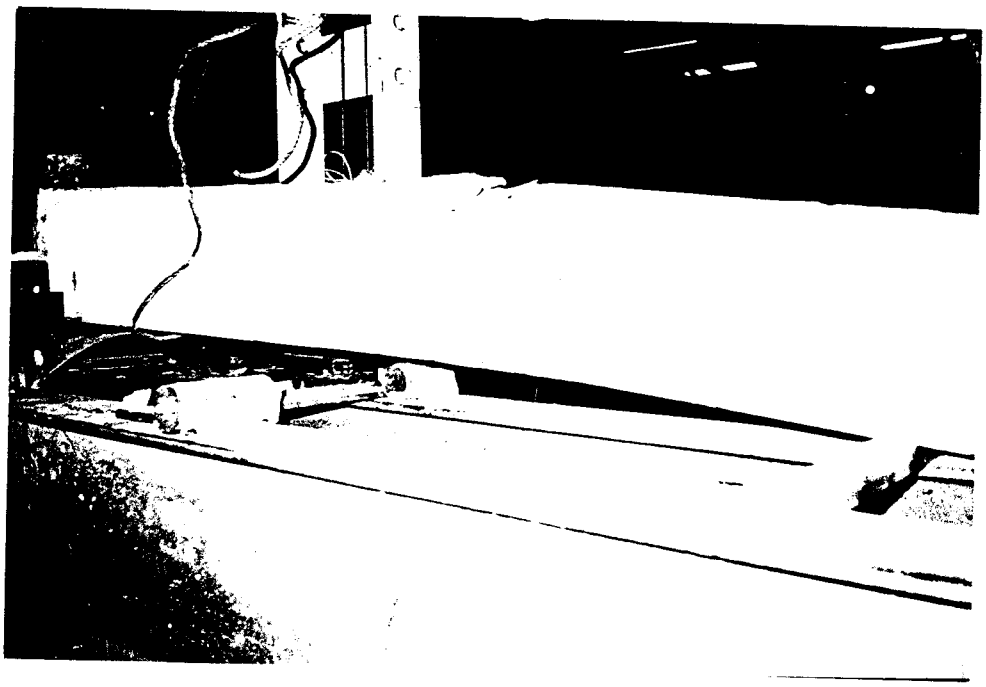
Gambar Persiapan Pengujian Balok



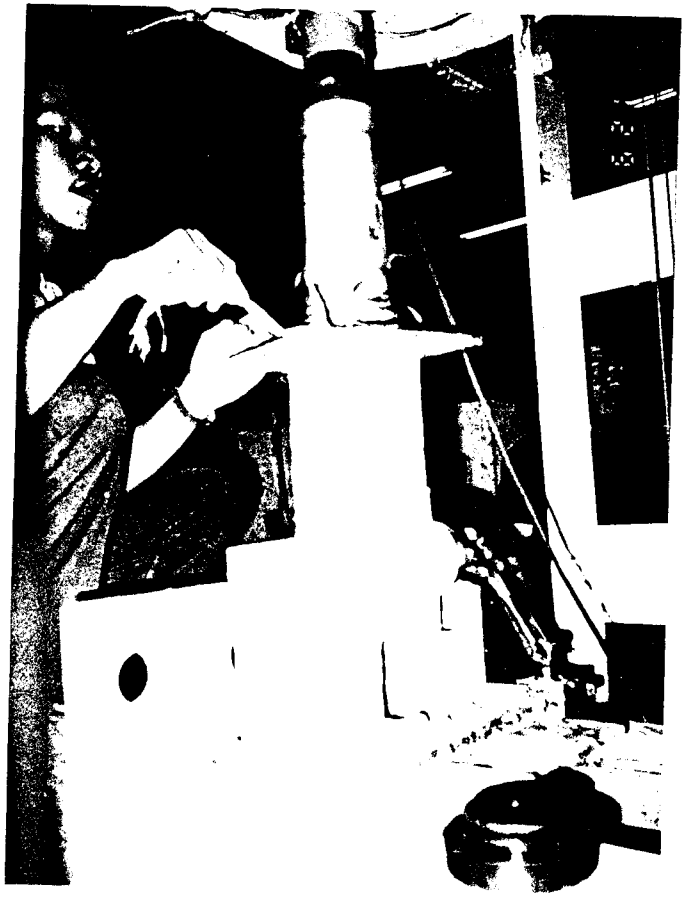
Gambar Keadaan balok tanpa tulangan geser setelah pengujian



Gambar Keadaan Balok dengan tulangan geser saat Pengujian

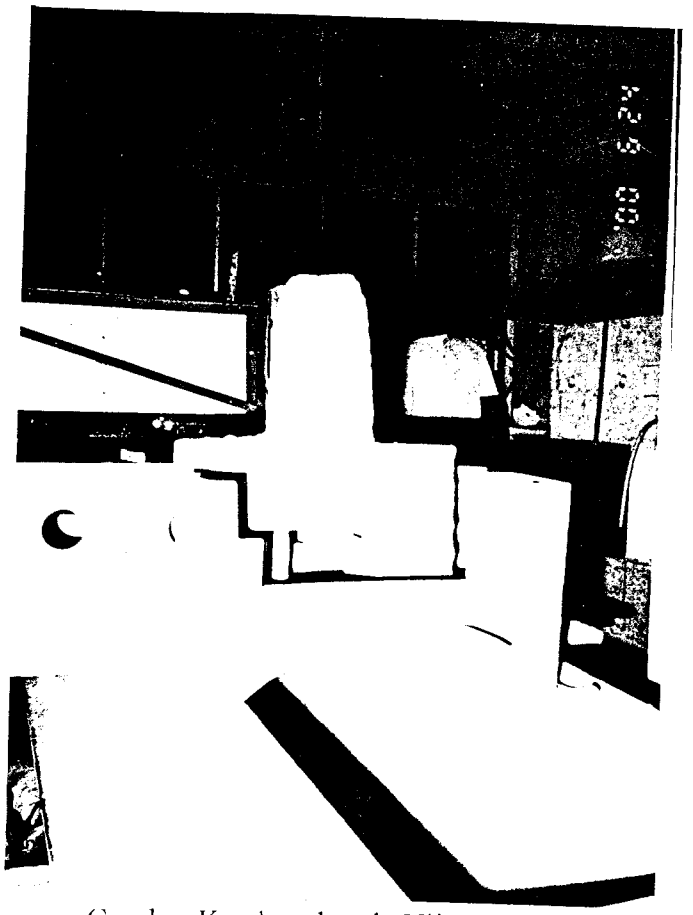


Gambar Keadaan Balok dengan tulangan geser setelah pengujian



Gambar Persiapan Pengujian

Benda Uji BG - BI



Gambar Keadaan benda Uji BG - BI

Setelah Pengujian

Balok BG

No. retak	Panj. retak	P/Pmax	l/h
0	0	0	0
1	7	0.273	0.7
2	11	0.276	1.1

P maks = 30000 kG

Balok BH

No. retak	Panj. retak	P/Pmax	l/h
0	0	0	0
1	6	0.175	0.6
2	11	0.225	1.1

P maks = 40000 kG

Balok BI

No. retak	Panj. retak	P/Pmax	l/h
0	0	0	0
1	6.5	0.123	0.65
2	11.5	0.179	1.15
3	17.5	0.236	1.75

P maks = 39000 kG