

**TUGAS AKHIR**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH  
PENGUNAAN SEMEN POWERMAX TERHADAP  
DAKTILITAS, KEKAKUAN SERTA KUAT LENTUR  
BALOK BETON BERTULANG  
(*EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT  
POWERMAX CEMENT USAGE ON DUCTILITY,  
STIFFNESS, AND FLEXURAL STRENGTH OF  
REINFORCED CONCRETE BEAM*)**

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta untuk  
Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil



**Akhmad Reza Kriswiansyah  
15511071**

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2021**

## TUGAS AKHIR

# STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGUNAAN SEMEN POWERMAX TERHADAP DAKTILITAS, KEKAKUAN SERTA KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG (*EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT POWERMAX CEMENT USAGE ON DUCTILITY, STIFFNESS, AND FLEXURAL STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAM*)

Disusun Oleh

**Akhmad Reza Kriswiansyah**  
**15511071**

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
Untuk memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 22 Oktober 2021

Oleh Dewan Penguji

**Pembimbing**

Novi Rahmayanti, S.T., M.Eng.  
NIK: 155111306

**Penguji I**

Astriaana Hardawati S.T., M.Eng.  
NIK: 165111301

**Penguji II**

Suharyatma, Ir.,M.T.  
NIK: 865110201

Mengesahkan,

**Ketua Program Studi Teknik Sipil**



Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.  
NIK: 885110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk penyelesaian program Sarjana di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah.

Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 22 Oktober 2021

Penulis,



Akhmad Reza Kriswiansyah

15511071

## KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr. Wb.

Alhamdulillah robbil 'alamin Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia-Nya sehingga Tugas Akhir yang berjudul "STUDI EKSPERIMENTAL PENGARUH PENGGUNAAN SEMEN POWERMAX TERHADAP DAKTILITAS, KEKAKUAN SERTA KUAT LENTUR BALOK BETON BERTULANG" ini dapat terselesaikan. Tugas Akhir ini merupakan salah satu syarat akademik dalam menyelesaikan studi tingkat strata satu di Prodi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini banyak hambatan yang dihadapi penulis, namun berkat saran, kritik, serta dorongan semangat dari berbagai pihak, alhamdulillah Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Berkaitan dengan ini, penulis mengucapkan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan kemudahan dalam menjalani dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak, ibu, dan kakak-adik yang senantiasa mendukung dan mendoakan saya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Novi Rahmayanti, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir, terima kasih atas bimbingan, dukungan, dan inspirasi yang diberikan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing penelitian program hibah jurusan, terima kasih atas bimbingan, dukungan, dan inspirasi yang diberikan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Ibu Astriana Hardawati S.T., M.Eng. dan bapak Suharyatma, Ir.,M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan tambahan ilmu serta saran-sarannya.
6. Zainul, Tazka, Ibeng, Alfian, mas Yahya atas bantuan, tenaga, dan waktu yang diluangkan dalam pembuatan sampel Tugas Akhir ini.
7. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

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

Wassalamu'alaikum Wr. Wb

Yogyakarta, 22 Oktober 2021

Penulis,

Akhmad Reza Kriswiansyah

15511071



## DAFTAR ISI

Halaman Judul.....	i
Halaman Pengesahan .....	ii
Halaman Pernyataan.....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR .....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	xi
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN.....	xii
ABSTRAK.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Tujuan Penelitian .....	3
1.4. Manfaat Penelitian .....	3
1.5. Batasan Penelitian.....	4
BAB II STUDI PUSTAKA.....	5
2.1. Penelitian Terdahulu.....	5
2.2. Keaslian Penelitian.....	9
BAB III LANDASAN TEORI.....	10
3.1. Faktor Reduksi Gaya Gempa dan Tingkat Daktilitas .....	10
3.2. Hubungan Antara Simpangan dan Kelengkungan.....	12
3.3. Daktilitas Elemen Struktur Beton .....	16
3.3.1. Kelengkungan leleh ( <i>Yield Curvature</i> ) $\phi_y$ .....	17
3.3.2. Kelengkungan ultimit ( <i>Ultimate Curvature</i> ) $\phi_u$ .....	18
3.3.3. Daktilitas Kelengkungan ( <i>Curvature Ductility</i> ) $\mu_\phi$ .....	18
3.4. Semen Holcim <i>Powermax</i> .....	20
3.5. Kekakuan Balok.....	21
3.6. Kuat Lentur Balok Tulangan Tunggal .....	22

3.7.	Faktor Reduksi Kuat Lentur.....	23
BAB IV METODE PENELITIAN .....		24
4.1.	Gambaran Umum.....	24
4.2.	Mix Design.....	24
4.3.	Benda Uji .....	24
4.4.	Pengujian Balok Beton Bertulang.....	26
4.5.	Analisis Kuat Lentur Balok.....	26
4.6.	Analisis Kekakuan dan Daktilitas Balok.....	27
4.6.1.	Kekakuan Balok Beton Bertulang.....	27
4.6.2.	Daktilitas Simpangan .....	27
4.6.3.	Daktilitas Kurvatur.....	28
4.7.	Diagram Alir Penelitian .....	29
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....		32
5.1.	Kekakuan Balok.....	32
5.2.	Mutu Beton yang Sesungguhnya ( $f_c'$ ) .....	37
5.3.	Faktor Reduksi Kuat Lentur Balok ( $\phi$ ) .....	44
5.4.	Perhitungan Daktilitas Balok .....	48
5.4.1.	Daktilitas Simpangan .....	48
5.4.2.	Daktilitas Kurvatur.....	53
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN .....		67
6.1.	Kesimpulan .....	67
6.2.	Saran .....	67
DAFTAR PUSTAKA .....		69
LAMPIRAN.....		71

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Dilakukan	8
Tabel 3. 1 Tingkat dan Nilai Daktilitas	11
Tabel 5. 1 Tabel Rekapitulasi Kekakuan Balok	37
Tabel 5. 2 Tabel Kekakuan dan Kuat Tekan Sesungguhnya Balok	39
Tabel 5. 3 Alat Bantu Setup Pengujian	40
Tabel 5. 4 Beban Tambahan Tiap Spesimen Balok	40
Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan $M_n$ Percobaan	42
Tabel 5. 6 Hasil Pengolahan Data UPV	43
Tabel 5. 7 Tabel Rekapitulasi Hasil Perhitungan Nilai $\phi$	46
Tabel 5. 8 Perbandingan nilai $\phi$	47
Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Perhitungan Daktilitas Simpangan Balok	51
Tabel 5. 10 Rekapitulasi Nilai $k$ Balok	54
Tabel 5. 11 Rekapitulasi Kurvatur <i>First Yield</i>	58
Tabel 5. 12 Rekapitulasi Kurvatur Ultimit	64
Tabel 5. 13 Tabel Rekapitulasi Daktilitas Kurvatur Balok	65

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3. 1 Hubungan kekuatan yang dibutuhkan dengan daktilitas	11
Gambar 3. 2 Perilaku Sifat Getas dan Daktail	13
Gambar 3. 3 Daktilitas Simpangan	13
Gambar 3. 4 Daktilitas Lengkung dan Daktilitas Simpangan	14
Gambar 3. 5 Hubungan Antara Simpangan dan Kelengkungan	15
Gambar 3. 6 Distribusi regangan-tegangan balok	17
Gambar 3. 7 Daktilitas Lengkung Unconfined Concrete Beam	19
Gambar 3. 8 Grafik Tegangan Regangan Balok Beton	21
Gambar 3. 9 Gaya kopel balok beton bertulang tunggal	22
Gambar 4. 1 Ilustrasi Sampel Benda Uji	25
Gambar 4. 2 Sketsa Penempatan <i>Straingauge</i> Baja dan Beton pada <i>AutoCad</i>	25
Gambar 4. 3 Skema Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang	26
Gambar 4. 4 Grafik Hubungan P vs $\Delta$	27
Gambar 4. 5 Diagram Regangan Balok 3 Kondisi <i>First Yield</i>	28
Gambar 4. 6 Diagram Regangan Beton Balok 3 Kondisi Ultimit	29
Gambar 4. 7 Diagram Alir Penelitian	30
Gambar 5. 1 Letak Kondisi Elastis Balok pada Grafik Hubungan P vs $\Delta$	32
Gambar 5. 2 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 1 (Kondisi Elastis)	33
Gambar 5. 3 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 3 (Kondisi Elastis)	33
Gambar 5. 4 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 4 (Kondisi Elastis)	34
Gambar 5. 5 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 5 (Kondisi Elastis)	34
Gambar 5. 6 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 6 (Kondisi Elastis)	35
Gambar 5. 7 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 7 (Kondisi Elastis)	35
Gambar 5. 8 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 8 (Kondisi Elastis)	36
Gambar 5. 9 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 9 (Kondisi Elastis)	36
Gambar 5. 10 Simple Beam Dengan Beban 2 Titik	38
Gambar 5. 11 Sketsa Setup Pengujian Lentur Balok	40
Gambar 5. 12 Letak Titik Pengujian UPV	43

Gambar 5. 13 Faktor reduksi ( $\phi$ ) elemen lentur	47
Gambar 5. 14 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 1	48
Gambar 5. 15 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 3	49
Gambar 5. 16 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 4	49
Gambar 5. 17 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 6	50
Gambar 5. 18 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 8	50
Gambar 5. 19 Grafik Hubungan P vs $\Delta$ Balok 9	51
Gambar 5. 20 Grafik Daktilitas Simpangan Balok	52
Gambar 5. 21 Diagram Regangan Balok 1 Kondisi <i>First Yield</i>	54
Gambar 5. 22 Diagram Regangan Balok 3 Kondisi <i>First Yield</i>	55
Gambar 5. 23 Diagram Regangan Balok 4 Kondisi <i>First Yield</i>	55
Gambar 5. 24 Diagram Regangan Balok 5 Kondisi <i>First Yield</i>	56
Gambar 5. 25 Diagram Regangan Balok 6 Kondisi <i>First Yield</i>	56
Gambar 5. 26 Diagram Regangan Balok 8 Kondisi <i>First Yield</i>	57
Gambar 5. 27 Diagram Regangan Balok 9 Kondisi <i>First Yield</i>	57
Gambar 5. 28 Diagram Regangan Beton Balok 1 Kondisi Ultimit	58
Gambar 5. 29 Kondisi Balok 1 Setelah Uji Lentur	59
Gambar 5. 30 Diagram Regangan Beton Balok 3 Kondisi Ultimit	59
Gambar 5. 31 Kondisi Balok 3 Setelah Uji Lentur	60
Gambar 5. 32 Diagram Regangan Beton Balok 4 Kondisi Ultimit	60
Gambar 5. 33 Kondisi Balok 4 Setelah Uji Lentur	61
Gambar 5. 34 Diagram Regangan Beton Balok 6 Kondisi Ultimit	61
Gambar 5. 35 Kondisi Balok 6 Setelah Uji Lentur	62
Gambar 5. 36 Diagram Regangan Beton Balok 8 Kondisi Ultimit	62
Gambar 5. 37 Kondisi Balok 8 Setelah Uji Lentur	63
Gambar 5. 38 Diagram Regangan Beton Balok 9 Kondisi Ultimit	63
Gambar 5. 39 Kondisi Balok 9 Setelah Uji Lentur	64
Gambar 5. 40 Grafik Hubungan Antara Daktilitas Kurvatur dengan $F_c'$	66

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 1	72
Lampiran 2 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 3	73
Lampiran 3 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 4	74
Lampiran 4 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 5	75
Lampiran 5 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 6	76
Lampiran 6 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 7	77
Lampiran 7 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 8	78
Lampiran 8 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 9	79



## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

SNI	= Standar Nasional Indonesia
OPC	= <i>Ordinary Portland Cement</i>
PPC	= <i>Portland Pozzolan Cement</i>
PCC	= <i>Portland Composite Cement</i>
SCWB	= <i>Strong Colomn-Weak Beam</i>
$f_c'$	= Kuat tekan beton
$\varepsilon_c$	= Regangan beton
$\varepsilon_{cu}$	= Regangan beton ultimit
$E_c$	= Modulus elastisitas beton
$\mu\Delta$	= Daktilitas Simpangan
$\mu\phi$	= Daktilitas Kurvatur
$\Delta_u$	= Simpangan ultimit
$\Delta_y$	= Simpangan leleh-pertama ( <i>First Yield</i> )
$\phi_u$	= Kurvatur ultimit
$\phi_y$	= Kurvatur leleh-pertama ( <i>First Yield</i> )
P	= Beban
$\Delta$	= Simpangan
$\phi$	= Kurvatur
$\varepsilon_s$	= Regangan baja
$f_y$	= Tegangan leleh baja
$E_s$	= Modulus elastisitas baja
$T_s$	= Gaya tarik baja
$C_c$	= Gaya tekan beton
H	= Tinggi
$A_s$	= Luas penampang baja
$f_s$	= Tegangan baja

$\rho$	= <i>Tension Reinforcement Ratio</i>
$\rho'$	= <i>Compressed Reinforcement Ratio</i>
n	= Angka ekuivalensi
$d'$	= tebal selimut beton
d	= tinggi efektif beton
$\sigma$	= kuat lentur benda uji, MPa
L	= panjang sample, mm
$\Delta L$	= perubahan panjang, mm
b	= lebar sampel, mm
h	= tinggi sampel, mm
LVDT	= <i>Linear Variable Differential Transformer</i>
K	= nilai kekakuan
$M_n$	= Momen nominal atau kuat lentur balok, KNm
$M_w$	= Momen akibat berat sendiri beton, KNm
$\phi$	= faktor reduksi
$R_m$	= Nilai Rata-rata resistance hasil pengujian
$R_n$	= Nilai Rata-rata nominal Hasil teoritis
$V_R$ atau $V_r$	= Koefisien variasi dari resistance
S	= Standar Deviasi
$\bar{x}$	= nilai rata-rata data
$x_i$	= nilai data ke-i
c	= Jarak garis netral terhadap serat tekan beton, mm
E	= Modulus Elastisitas
I	= Momen Inersia
MPa	= Mega Pascal
N	= Newton
KN	= Kilo Newton
m	= meter
cm	= centimeter
mm	= milimeter

$W$  = berat balok, N  
 $\gamma_c$  = massa jenis balok  
 $V$  = Volume  
 $Q_{dl}$  = Gaya berat merata balok



## ABSTRAK

Indonesia berada pada jalur gempa pasifik (*Circum Pasific Earthquake Belt*) dan jalur gempa asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*) membuat Indonesia terletak pada wilayah dengan intensitas gempa yang cukup tinggi. Hal tersebut menyebabkan struktur bangunan yang didirikan di wilayah Indonesia harus dirancang sebagai bangunan tahan gempa. Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang dapat merespon gaya gempa dengan sifat daktilitas dan mampu bertahan dari keruntuhan struktur yang signifikan. Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan plastis secara berulang dan bolak-balik diatas titik leleh pertama dengan mempertahankan sebagian besar dari kemampuan awalnya dalam memikul beban.

Penelitian ini dilakukan dengan pengujian lentur balok beton bertulang dengan variasi mutu rencana beton 20, 23 dan 25 MPa. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi mutu beton terhadap tingkat daktilitas yang dihasilkan. Variasi mutu beton dilakukan dengan penggantian jenis semen holcim serbaguna ke jenis holcim *powermax* dan penambahan proporsi pada semen *powermax*. Pengujian lentur balok beton bertulang dilakukan dengan pembebanan 2 titik dan menggunakan sampel dengan ukuran 150x300x3000 mm.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis daktilitas kurfatur, penggantian semen holcim serbaguna ke holcim *powermax* dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang sedangkan penambahan jumlah semen *powermax* yang digunakan juga dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang. Hasil penelitian sesuai dengan pernyataan bahwa tegangan desak beton mempunyai pengaruh linier terhadap daktilitas lengkung (Widodo,2012). Nilai daktilitas kurvatur akan semakin besar berdasarkan pada nilai  $f_c'$  yang semakin besar.

**Kata kunci:** Daktilitas, Holcim Serbaguna, Holcim *Powermax*

## ABSTRACT

Indonesia is located in the Pacific Earthquake Belt (Circum Pacific Earthquake Belt) and the Asian Earthquake Belt (Trans Asiatic Earthquake Belt), making Indonesia located in an area with a fairly high earthquake intensity. This causes the structure of buildings erected in the Indonesian territory to be designed as earthquake-resistant buildings. Earthquake resistant buildings are buildings that can respond to earthquake forces with ductility and are able to withstand significant structural collapse. Ductility is the ability of a structure to undergo repeated and alternating plastic displacements above the First Yield point while retaining a large part of its initial load bearing capacity.

This research was conducted by testing the flexural strength of reinforced concrete beams with variations in concrete design quality of 20, 23 and 25 MPa. This study aims to determine the effect of variations in the quality of concrete on the level of ductility produced. Variations in the quality of the concrete are carried out by changing the multipurpose holcim cement type to the holcim powermax type and increasing the proportion of the powermax cement. The flexural test of reinforced concrete beams was carried out by 2 points load and using a sample with a size of 150x300x3000 mm.

Based on the results of testing and analysis of curvature ductility, the replacement of multipurpose holcim cement to holcim powermax can increase the curvature ductility of reinforced concrete beams while increasing the amount of powermax cement used can also increase the curvature ductility of reinforced concrete beams. The results of the study are in accordance with the statement that the compressive stress of concrete has a linear effect on bending ductility (Widodo, 2012). The curvature ductility value will be greater based on the greater  $f_c'$  value.

**Keywords:** Ductility, Holcim Multipurpose, Holcim Powermax

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Indonesia berada pada jalur gempa pasifik (*Circum Pasific Earthquake Belt*) dan jalur gempa asia (*Trans Asiatic Earthquake Belt*). Hal ini membuat Indonesia terletak pada wilayah dengan intensitas gempa yang cukup tinggi. Keadaan wilayah Indonesia tersebut membuat bangunan gedung di Indonesia haruslah dirancang untuk tahan terhadap beban gempa khususnya gedung dengan struktur tinggi. Bangunan tahan gempa adalah bangunan yang dapat merespon gaya gempa dengan sifat daktail dan mampu bertahan dari keruntuhan struktur yang signifikan.

Pada umumnya struktur gedung yang dirancang terlalu kuat tidaklah ekonomis, terutama dengan pembebanan gempa yang besar dan berperilaku elastis. Hal ini akan menghasilkan dimensi struktur yang cukup besar yang dapat mengakibatkan terjadinya keruntuhan bangunan secara tiba-tiba. Oleh sebab itu, struktur harus direncanakan secara daktail, agar mampu menunda keruntuhan beton dengan memperlihatkan tanda-tanda kerusakan terlebih dahulu sebelum gedung *collapse*.

Struktur bangunan pada dasarnya terdiri atas kolom, balok, dan pelat. Kolom adalah struktur utama penahan beban dalam suatu bangunan, sedangkan balok berfungsi sebagai pendistribusi beban dari pelat yang menopang beban langsung baik beban hidup maupun beban mati. Pada konsep *capacity design*, daktilitas struktur direncanakan melalui terjadinya sendi plastis pada elemen-elemen balok (*strong coloum weak beam*). Hal ini adalah upaya untuk menjaga stabilitas bangunan secara keseluruhan agar bangunan tidak runtuh (*total collapse*) saat terjadi sendi plastis. Walaupun elemen balok dirancang sebagai elemen yang lemah, akan tetapi balok tersebut harus didesain memiliki sifat daktail yang sangat tinggi agar tidak runtuh total.

Daktilitas adalah kemampuan suatu struktur untuk mengalami simpangan plastis secara berulang dan bolak-balik diatas titik leleh pertama dengan

mempertahankan sebagian besar dari kemampuan awalnya dalam memikul beban. Daktilitas elemen balok secara umum terbagi menjadi daktilitas simpangan (*displacement ductility*) dan daktilitas lengkungan (*curvature ductility*). Daktilitas lengkungan balok adalah rasio antara kelengkungan ultimit (*ultimate curvature*) dan kelengkungan leleh pertama (*yield curvature*).

Salah satu faktor yang sangat mempengaruhi nilai daktilitas lengkung adalah kuat tekan beton ( $f_c'$ ) yang memiliki pengaruh linier terhadap daktilitas lengkung. Sedangkan nilai kuat tekan beton akan berpengaruh pada sifat mekaniknya seperti: nilai regangan ultimit beton ( $\epsilon_c$ ) dan modulus elastisitas ( $E_c$ ) yang sangat dipengaruhi oleh material penyusun beton terutama semen.

Semen merupakan bahan pengikat utama dalam adukan beton. Semen yang beredar di Indonesia sampai saat ini ada beberapa macam diantaranya: *Ordinary Portland Cement* (OPC), *Portland Pozzolan Cement* (PPC), serta *Portland Composite Cement* (PCC). Jenis semen yang paling banyak ditemukan dan digunakan di pasaran, terutama di Yogyakarta, yaitu semen jenis PCC dengan berbagai merk salah satunya adalah semen Holcim. PCC sendiri adalah semen Portland yang dicampurkan dengan bubuk bahan organik lain seperti pozzolan dan senyawa silikat. Saat ini PT Holcim sendiri telah memproduksi dua varian semen, yaitu semen PCC serba guna dan *Powermax*. Semen *Powermax* merupakan semen yang memiliki tambahan "*micro filler particle*" dan "*strength agent*" dan diklaim dapat meningkatkan kuat tekan 15%-25% dengan penggunaan semen lebih sedikit dan lebih cepat keras. Adanya varian tersebut, maka diperlukan penelitian mengenai pengaruh dari bahan tambah tersebut terhadap modulus elastisitas ( $E_c$ ) dan regangan ultimitnya ( $\epsilon_c$ ).

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka didapatkan beberapa rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana perbandingan kekakuan balok beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan powermax?
2. Bagaimana perbandingan kuat lentur dan faktor reduksinya pada balok beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan powermax?
3. Bagaimana nilai displacement ductility ( $\mu\Delta$ ) beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan powermax?
4. Bagaimana nilai curvature ductility ( $\mu\phi$ ) beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan powermax?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui perbandingan kekakuan balok beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan *powermax*.
2. Untuk mengetahui perbandingan kuat lentur dan faktor reduksinya pada balok beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan *powermax*.
3. Untuk memperoleh nilai *displacement ductility* ( $\mu\Delta$ ) beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan *powermax*.
4. Untuk memperoleh nilai *curvature ductility* ( $\mu\phi$ ) beton bertulang dengan variasi mutu beton yang dihasilkan dari semen holcim serbaguna dan *powermax*.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dari penulisan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Dapat menjadi acuan penggunaan semen Holcim serbaguna maupun Holcim *Powermax* mengenai metode penggunaan dan pengaruh dari kedua varian semen tersebut.
2. Memberikan referensi pembanding dari penggunaan semen yang beredar di Indonesia.

### 1.5. Batasan Penelitian

Batasan penelitian diperlukan agar penulisan dapat terarah dan terfokus pada tujuan yang akan dicapai. Berikut batasan penelitian yang terdapat dalam penelitian yg dilakukan.

1. Agregat yang digunakan tidak dalam kondisi SSD melainkan menyesuaikan kondisi lapangan dengan menjaga nilai slump  $15 \pm 1$  cm.
2. Air yang digunakan berasal dari Laboratorium Bahan Konstruksi Teknik UII.
3. Varian semen yang akan dibandingkan adalah semen portland PPC Holcim Serbaguna dan Holcim *Powermax*.
4. *Mix design* sesuai acuan SNI 03-2834-2000.
5. Pengujian sampel dilakukan pada umur 28 hari.
6. Kuat tekan beton rencana yang akan dibandingkan adalah 20 MPa, 23 MPa dan 25 MPa.
7. Sampel balok dengan dimensi 15 cm x 30 cm x 300 cm.
8. Agregat yang dipakai berasal dari Merapi daerah Yogyakarta.

## **BAB II**

### **STUDI PUSTAKA**

#### **2.1. Penelitian Terdahulu**

Penelitian ini dilakukan berdasarkan beberapa penelitian yang sudah ada sebagai bahan pertimbangan dan referensi penunjang penelitian. Penelitian yang telah dilakukan antara lain:

Nur (2009) melakukan penelitian yang berjudul “Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurfatur Balok Beton Bertulang”. Peneliti melakukan usaha peningkatan kekuatan, kekakuan, dan daktilitas beton bertulang dengan penambahan tulangan tekan. Adanya penyelidikan tentang hubungan tegangan-regangan beton tak terkekang yang dilakukan oleh *Hognestad*, peneliti dapat menganalisis tentang perilaku daktilitas kurfatur pada beton bertulang yang dilakukan pada penelitian terkait. Studi kasus pada penelitian ini menggunakan model benda uji dengan rasio tulangan tekan dan tulangan tarik yang bervariasi. Sampel yang digunakan adalah balok dengan penampang 300 mm x 600 mm berjumlah 20 sampel dengan variasi luas tulangan tarik dan luas tulangan tekan. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa adanya penambahan tulangan tekan pada balok tidak memberikan tambahan kekuatan pada balok, akan tetapi sangat berdampak pada peningkatan daktilitas kurfatur penampang. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya peningkatan kekuatan pada daerah tekan penampang balok yang memaksa tulangan baja pada daerah tarik untuk leleh lebih cepat. Selain itu, penampang balok yang memiliki luas tulangan tarik lebih sedikit, cenderung mempunyai nilai daktilitas kurvatur yang lebih besar, akan tetapi kekuatannya lebih rendah. Hal ini disebabkan oleh perlemahan pada daerah tarik penampang akibat tulangan yang meleleh lebih cepat.

Tavio, dkk. (2009) melakukan penelitian tentang peningkatan daya dukung dan daktilitas balok beton bertulang dengan menggunakan perkuatan CFRP. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisa peningkatan yang terjadi oleh perkuatan CFRP dibandingkan dengan tanpa CFRP. Penelitian dua layer CFRP terhadap balok

beton bertulang diharapkan untuk meningkatkan nilai daktilitas yang berarti. Berdasarkan dua sampel balok identik berukuran 150 mm x 300 mm didapatkan hasil sedikit lebih besar yang menunjukkan bahwa pengujian sudah mewakili. Hasil penelitian yang didapat menyimpulkan bahwa perkuatan dengan CFRP mengakibatkan peningkatan daktilitas kurfatur hingga rata-rata 265% dan peningkatan momen rata-rata sebesar 45%. Akan tetapi, terjadi keruntuhan bertipe getas.

Priastiwi (2016) menyebutkan bahwa adanya pemberian kekangan pada zona tekan penampang balok berguna dalam meningkatkan tingkat daktilitas balok di sendi plastis. Pembebanan yang dilakukan berupa beban terpusat secara monotonik dan siklik dengan peningkatan pembebanan secara bertahap. Kekangan yang diberikan pada spesimen berupa *hoops* dan *cross-ties* pada zona tekannya yang dibandingkan dengan tanpa kekangan sama sekali. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa adanya pengekangan pada zona tekan dapat meningkatkan daktilitas balok. Balok dengan kekangan didapat lebih daktail dibandingkan dengan tanpa kekangan baik dari beban monotonik maupun siklik. Adanya peningkatan *drift rasio* dan kurfatur pada balok dengan kekangan yang lebih panjang dibandingkan tanpa kekangan. Hal ini disebabkan karena kekangan yang ada pada balok terbukti menunda keruntuhan dalam siklus yang lebih lama yang terjadi pada balok dalam kondisi *under reinforced* meskipun ada penambahan tulangan di zona tekannya.

Nurlina, dkk. (2016) melakukan analisis daktilitas dengan cara menggunakan CFRP dan GFRP yakni perkuatan dengan bahan polimer. CFRP merupakan serat polimer yang terbuat dari matriks plastik yang diperkuat dengan karbon. CFRP sudah banyak diaplikasikan sebagai fungsi perbaikan dan perkuatan struktur beton yang sudah ada. Fungsi perkuatan dengan bahan CFRP dimaksudkan untuk meningkatkan baik kekuatan dan kapasitas lentur, geser, axial maupun daktilitas serta kombinasi diantaranya. Sedangkan GFRP mempunyai fungsi yang sama tetapi dengan menggunakan bahan perkuatan berupa kaca. GFRP memiliki sifat kekuatan yang sedikit lebih rendah, kurang kaku, dan sedikit lebih rapuh dibandingkan CFRP namun memiliki harga pasaran lebih murah. Akan tetapi, kekuatan massal dan sifat

berat dari bahan dasar yg ringan memberikan keuntungan tersendiri dibandingkan logam serta mudah dibentuk dalam proses pencetakannya.

Hasil penelitian menyimpulkan bahwa balok dengan perkuatan GFRP dan CFRP meningkatkan daktilitas dari balok secara signifikan. CFRP meningkatkan daktilitas balok sebanyak 8/7 kali lipat atau sekitar 13,7% dari daktilitas balok tanpa perkuatan. Sedangkan GFRP dapat meningkatkan hingga 4/3 kali atau sekitar 32% dari balok tanpa perkuatan. GFRP meningkatkan tingkat daktilitas balok lebih besar dikarenakan karakteristik bahan yang elastis dan memiliki sifat *elongation* yang lebih besar. Penulis juga menambahkan saran agar menggunakan GFRP atau CFRP pada struktur yang masih dalam keadaan kaku dan belum hancur akan sangat efektif dibandingkan menggunakannya untuk perbaikan struktur yg telah rusak.

Adapun perbandingan dari penelitian terdahulu dengan penelitian yang dilakukan yang tersedia pada Tabel 2.1 sebagai berikut.

**Tabel 2. 1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian yang Dilakukan**

Peneliti	Judul Penelitian	Metodologi	Parameter Penelitian	Hasil penelitian
Nur (2009)	Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurfatur Balok Beton Bertulang	Penambahan tulangan tekan pada balok	Daktilitas Kurfatur	Penambahan tulangan tekan tidak terlalu berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan namun signifikan pada daktilitas kurfaturnya
Tavio dkk. (2009)	PENINGKATAN DAYA DUKUNG DAN DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN PERKUATAN CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER)	Penggunaan perkuataan CFRP	Daktilitas Kurfatur dan Momen	Penggunaan CFRP sangat membantu dalam peningkatan daktilitas kurfatur namun berdampak pada jenis keruntuhan yang menjadi tipe keruntuhan getas
Priastiwi (2016)	PENGARUH PEMBERIAN KEKANGAN PADA ZONA TEKAN TERHADAP PENINGKATAN DAKTILITAS BALOK DI LOKASI SENDI PLASTIS AKIBAT BEBAN MONOTONIK DAN SIKLIK	Pemberian tambahan confinement berupa <i>hoops</i> atau <i>cross-ties</i> pada zona tekannya	Daktilitas Simpangan dan Daktilitas Kurfatur	Balok dengan <i>confinement</i> pada zona tekannya mampu berperilaku lebih daktail dibandingkan dengan yang tidak menggunakan <i>confinement</i> . Terjadinya peningkatan Daktilitas simpangan dan kurfatur pada beban monotonik maupun siklik
Nurlina dkk. (2016)	PERBANDINGAN DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN PERKUATAN CFRP DAN GFRP	Penggunaan perkuataan CFRP dan GFRP	Daktilitas Simpangan	Daktilitas balok dengan perkuataan GFRP mengalami persentase peningkatan sebesar 31,86% dibandingkan balok tanpa perkuataan. Sedangkan daktilitas balok dengan perkuataan CFRP mengalami peningkatan sebesar 13,74%.
Kriswiansyah (2021)	ANALISIS DAKTILITAS BETON BERTULANG DENGAN VARIASI MUTU BETON	Pemakaian semen PPC <i>Powermax</i>	Daktilitas Kurfatur	-

## 2.2. Keaslian Penelitian

Semen *Powermax* merupakan produk baru yang diluncurkan pada tahun 2019. Maka dapat dipastikan penelitian ini terjamin orisinalitasnya. Serta penelitian ini merupakan penelitian hibah dari Jurusan Teknik Sipil FTSP UII.



## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1. Faktor Reduksi Gaya Gempa dan Tingkat Daktilitas**

Gempa merupakan suatu kejadian yang tidak dapat diprediksi akan kejadiannya yang berarti bersifat probabilitas. Namun tetap menjadi prioritas utama pada analisis perhitungan yang dilakukan dalam desain bangunan. Probabilitas gempa yang terjadi diperhitungkan dengan cara dihubungkan dengan satuan waktu yaitu periode ulang gempa rencana. Periode ulang gempa rencana diartikan sebagai seberapa besar kekuatan gempa yang dapat terjadi dalam waktu seminggu, sebulan ataupun puluhan atau ratusan tahun yang akan datang. Sementara itu tingkat kekuatan bangunan untuk mengampu beban gempa dalam kurun waktu tertentu dinamakan masa-layan (*life-time*). Pada umumnya masa-layan dari bangunan yang dibuat berkisar 50-75 tahun. Jadi sebuah bangunan yang didesain harus mampu menahan beban gempa yang kemungkinan terjadi pada 50-75 tahun yang akan datang. Pada umumnya angka probabilitas yang digunakan untuk bangunan biasa adalah 10% dalam masa layan 50 tahun. Tetapi 10% adalah angka yang besar untuk suatu kemungkinan yang terjadi. Karena kala ulang 50 tahun, jika diimplementasikan angka 10% maka probabilitas terjadi gempa tiap tahun hanya ada angka 0,02% sehingga pendekatan tersebut para ahli menyepakati bahwa bangunan tidak perlu dibuat sangat kuat dan kerusakan-kerusakan di level tertentu masih diperbolehkan selama masa layan/umur bangunan.

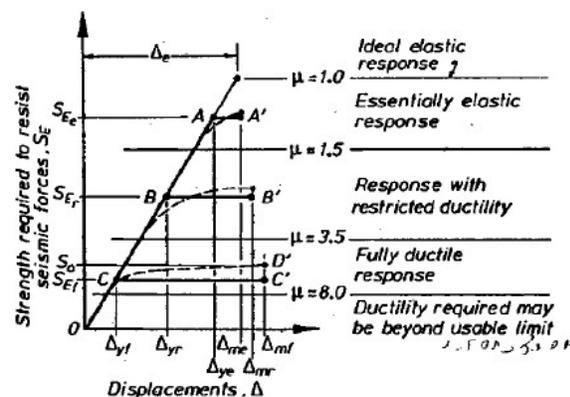
Dengan kekuatan rencana yang tidak terlalu tinggi maka perilaku bangunan masih dapat dibuat inelastik. Oleh karena itu, kekuatan gempa rencana dapat diturunkan sampai nilai tertentu yang disebut sebagai istilah faktor reduksi gaya (*force reduction factor*). Dengan digunakannya faktor reduksi, jika bangunan rencana terkena beban gempa maka hampir dapat dipastikan akan terjadi kerusakan. Namun bangunan harus tetap bertahan dan tidak rubuh terhadap beban gempa yang terjadi. Guna mengatasi masalah tersebut, maka bangunan harus mempunyai sifat

daktail. Guna meningkatkan daktilitas pada struktur bangunan maka elemen balok harus dibuat menjadi suatu elemen yang daktail.

Semakin tinggi tingkat daktilitas suatu elemen maka akan semakin tinggi kemampuannya dalam menahan beban atau dapat dikatakan semakin lama pula kemampuan mendisipasi energi. Paulay dan Priesley (1992) menyajikan suatu hubungan antara kebutuhan kekuatan akibat gempa  $S_E$  dengan nilai dan tingkat daktilitas dengan tabel sebagai berikut.

**Tabel 3. 1 Tingkat dan Nilai Daktilitas**

No.	Tingkat Daktilitas	Daktilitas dan faktor jenis struktur		Keterangan
		PPTGIUG, 1981	SNI-02, 2002	
1	Elastik Penuh	1,0 (K = 4)	1 (R = 1,6)	
2	Daktilitas Terbatas	2,0 (K = 2)	1,5 (R = 2,4)	
			2,0 (R = 3,2)	
			2,5 (R = 4,0)	
			3,0 (R = 4,8)	
			3,5 (R = 5,6)	
			4,0 (R = 6,4)	
			4,5 (R = 7,2)	
3	Daktilitas Penuh	4,0 (K = 1)	5,0 (R = 8,0)	
			5,3 (R = 8,5)	



**Gambar 3. 1 Hubungan kekuatan yang dibutuhkan dengan daktilitas**

Pada gambar diatas dapat diamati bahwa tingkat daktilitas berhubungan langsung dengan kekuatan desain yang dibutuhkan. Tingkatannya terbagi menjadi 3 yakni, elastic penuh (*elastic response*), daktilitas terbatas (*restricted/limited ductility*) dan daktilitas penuh (*fully ductility*). Hubungan antara keduanya bertolak belakang dalam arti jika kita hendak mendesain elemen struktur yang daktail maka kebutuhan kekuatannya relatif kecil. Tetapi jika dibutuhkan kekuatan yang besar maka elemennya akan tidak dapat lebih daktail dari kekuatan dibawahnya.

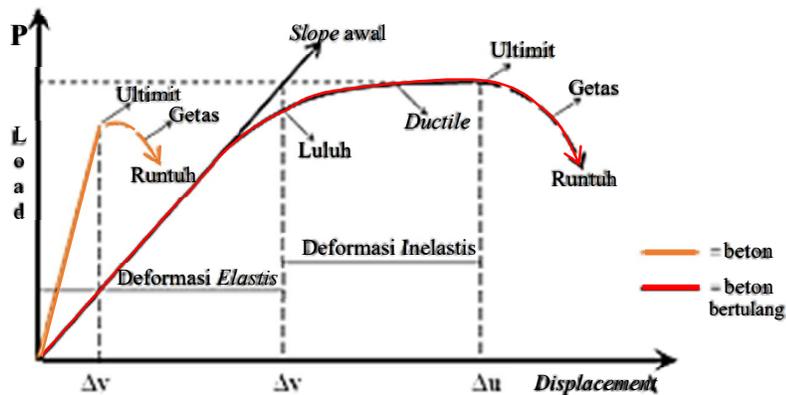
Pada Tabel 3. 1 nilai K adalah nilai yang menunjukkan faktor jenis struktur berdasarkan hubungan antara tingkat daktilitas dan kebutuhan kekuatan akibat beban gempa menurut PPTGIUG, (1981) sedangkan dalam SNI (2002) faktor bersangkutan dibuat lebih rinci pada bagian daktilitas terbatas. Nilai R tersebut didapatkan berdasarkan pada penentuan gaya geser dari beban statik ekuivalen. Dan nilai-nilai tersebut masih dapat berganti-ganti sesuai dengan kebijakan yang berubah seiring bergulirnya waktu.

### **3.2. Hubungan Antara Simpangan dan Kelengkungan**

Pawirodikromo (2012) menyimpulkan bahwa “Daktilitas adalah kemampuan suatu elemen beton untuk berdeformasi inelastik secara berkelanjutan akibat beban siklik tanpa adanya penurunan kekuatan yang berarti”. Yang artinya struktur yang dirancang sebagai struktur yang daktail akan dapat menahan beban pada level tertentu beiringan dengan deformasi inelastik yang terjadi pada struktur tersebut sebelum runtuh. Dengan adanya deformasi yang terjadi maka dapat diamati bahwa struktur tersebut akan mengalami keruntuhan jika beban yang terjadi berkelanjutan. Deformasi tersebut juga dapat memberi tanda kepada orang yang beraktifitas dibawahnya untuk mendapatkan waktu untuk menyelamatkan diri dari runtuh.

Daerah struktur beton bertulang yang paling rawan rusak akibat beban siklik biasa disebut dengan daerah sendi plastis. Daerah inilah yang perlu pertimbangan secara detail dimana harus menjadi titik yang mempunyai sifat daktilitas yang baik. Beban siklik sebagaimana beban gempa mengakibatkan tempat-tempat diujung balok mengalami momen terbesar secara bergantian baik momen positif maupun momen negatif pada regangan-tarik baja tulangan. Pada beban di level tertentu disaat regangan baja sudah sedemikian besar maka dapat dipastikan akan terjadinya

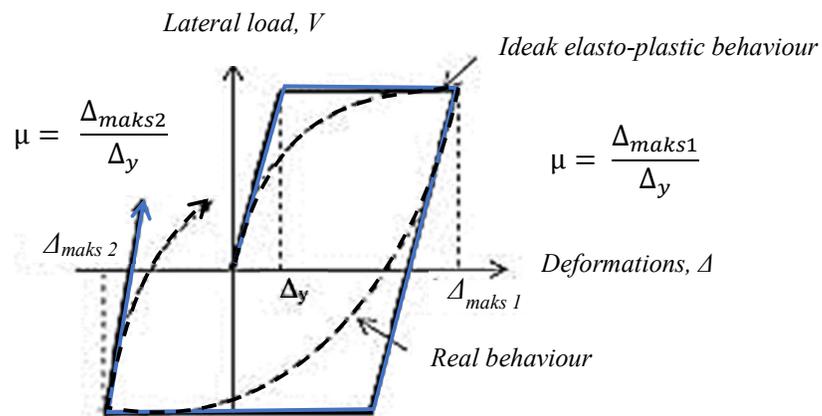
*crack* yang diakibatkan sifat *brittle* dari beton. Maka dari itu desain penulangan pada sendi plastis harus di desain secara khusus untuk tulangan lentur maupun gesernya.



**Gambar 3. 2 Perilaku Sifat Getas dan Duktail**

(Sumber: Opirina, 2016)

Pada Gambar 3. 2 diatas dapat diamati bahwa perilaku pada beton bersifat getas dimana pada saat setelah mencapai kekuatan ultimit beton akan mengalami penurunan secara tajam dan segera runtuh sedangkan pada beton bertulang yang memiliki sifat duktail akan mengalami deformasi secara inelastis yang memungkinkan struktur untuk menahan beban lebih lama dengan simpangan berkelanjutan tanpa adanya penurunan kekuatan secara tajam.



**Gambar 3. 3 Duktilitas Simpangan**

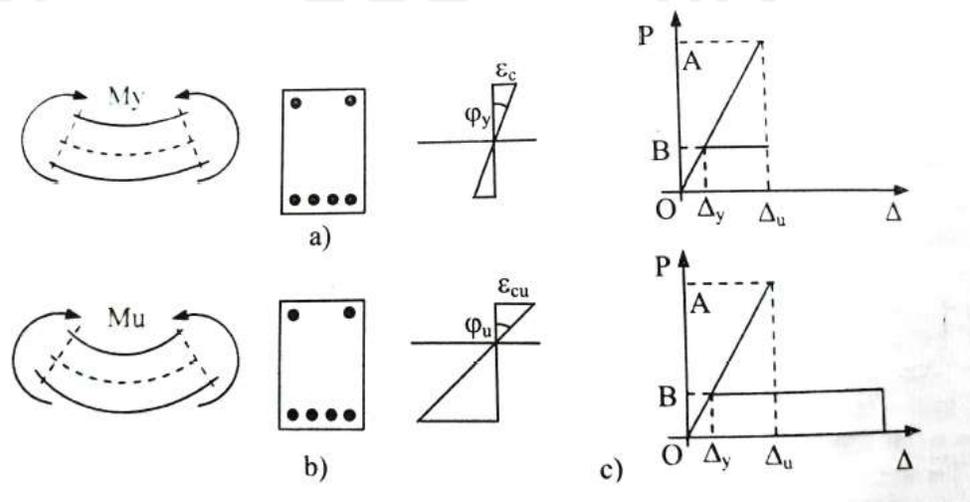
(Sumber: Park, 1984)

Gambar 3. 3 adalah hubungan sejenis akibat beban bolak balik yang diakibatkan oleh beban siklik atau beban gempa. Hubungan tersebut ditunjukkan dengan garis putus-putus yang membentuk suatu siklus tertutup berulang yang disebut sebagai *hysteretic loops*. Menentukan simpangan leleh pada garis lengkung tersebut merupakan suatu kesulitan. Maka dari itu dalam analisis dinamik perilaku non-linier tersebut dimodelkan sebagai model hysteresis elastoplastis.

Daktilitas simpangan adalah rasio dari simpangan ultimit dengan simpangan leleh atau dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Daktilitas yang terjadi pada suatu struktur pada umumnya terdapat 2 macam, yakni daktilitas simpangan (*displacement ductility*) dan daktilitas lengkung (*curvature ductility*). Daktilitas simpangan merupakan rasio dari simpangan ultimit  $\Delta_u$  dan simpangan leleh pertama  $\Delta_y$ . Sedangkan daktilitas lengkung adalah perbandingan antara sudut rotasi per unit panjang (kelengkungan)  $\phi_u$  pada kondisi ultimit dan pada kondisi leleh pertama  $\phi_y$ .



**Gambar 3. 4 Daktilitas Lengkung dan Daktilitas Simpangan**

Sumber: Pawirodikromo (2012)

Gambar 3. 4 a) dan Gambar 3. 4 b) berturut-turut menunjukkan daktilitas lengkung pada kondisi leleh pertama dan dalam kondisi ultimit, sedangkan Gambar

3. 4 c) menunjukkan daktilitas simpangan pada plot P- $\Delta$ . Dengan demikian didapatkan rumus,

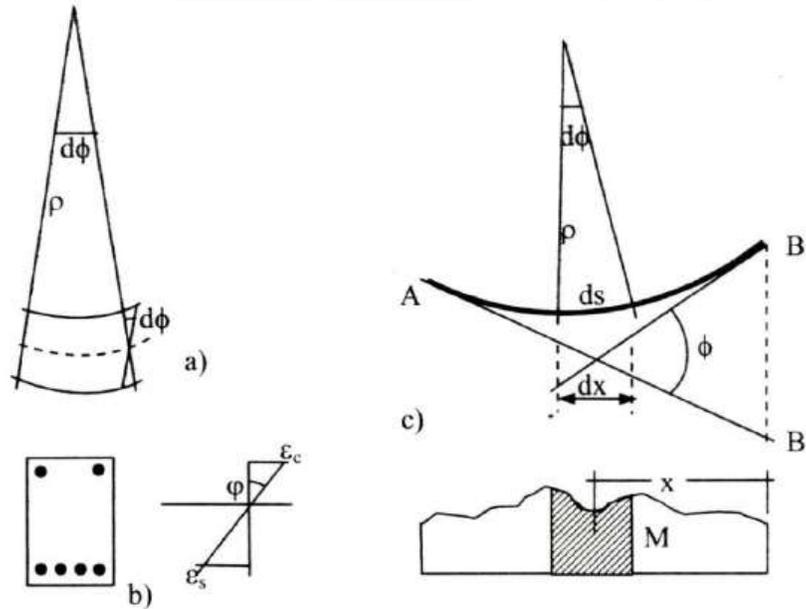
$$\mu_{\phi} = \frac{\phi u}{\phi y}$$

Untuk daktilitas lengkung dan,

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y}$$

Untuk daktilitas simpangan.

Dalam ilmu statika, hubungan antara simpangan dan kelengkungan dapat dijelaskan dengan Gambar 3. 5 berikut.



**Gambar 3. 5 Hubungan Antara Simpangan dan Kelengkungan**

Sumber: Pawirodikromo (2012)

Berdasarkan Gambar 3. 5 a) dapat dijelaskan rumus dari kelengkungan  $\phi$  dengan rumus sebagai berikut,

$$\phi = \frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

Dan berdasarkan Gambar 3. 5 c) diperoleh hubungan,

$$dx = \rho d\phi, \quad d\phi = \frac{1}{\rho} dx, \text{ padahal } \frac{1}{\rho} = \varphi, \text{ maka } \frac{d\phi}{dx} = \varphi$$

Dari persamaan diatas dapat dijelaskan bahwa kelengkungan merupakan sudut rotasi per satuan panjang, dengan demikian didapatkan rumus dari  $\phi$  adalah sebagai berikut,

$$\phi = \int_A^B \varphi dx$$

Dari Gambar 3. 5 c) dan persamaan diatas diperoleh simpangan ujung garis B akan relative terhadap tangen arah ujung garis A. sehingga diperoleh rumus baru yakni,

$$BB' = \phi x$$

$$BB' = \int_A^B \varphi x dx$$

Dengan gambar dan persamaan-persamaan yang telah tersedia diatas dapat disimpulkan bahwa adanya hubungan antara simpangan dan kelengkungan. Dari persamaan BB' diatas dapat dijelaskan bahwa simpang dari salah satu ujung garis relative terhadap ujung garis lain dapat diperoleh dengan menghitung static momen kelengkungan sepanjang batang yang bersangkutan terhadap ujung batang yang dimaksud. Prinsip inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung simpangan total struktur.

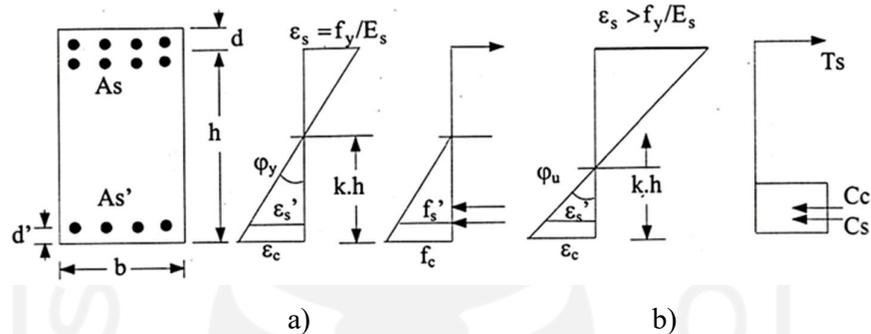
### 3.3. Daktilitas Elemen Struktur Beton

Pada penjelasan diatas telah dipaparkan tentang definisi serta penjabaran rumus dari simpangan dan kelengkungan serta macam-macam daktilitas yang terdiri dari daktilitas simpangan dan daktilitas kelengkungan. Namun pada dasarnya keduanya memiliki makna yang sama yaitu kemampuan suatu elemen untuk mempertahankan bentuknya atau berdeformasi berkelanjutan tanpa adanya pengurangan kekuatan yang berarti akibat beban siklik.

Daktilitas simpangan adalah perbandingan antara simpangan ultimit dengan simpangan leleh pertama, sedangkan daktilitas kurvatur adalah perbandingan antara kelengkungan ultimit dengan kelengkungan leleh pertama (*yield curvature*).

### 3.3.1. Kelengkungan leleh (*Yield Curvature*) $\varphi_y$

*Yield Curvature* atau kelengkungan leleh pertama adalah nilai kelengkungan pada kondisi baja tarik mengalami leleh pertama. Sebagai contoh untuk mempermudah memahami tentang *yield curvature*, berikut potongan balok tulangan rangkap dan diagram tegangan regangan pada saat kondisi leleh pertama dan ultimit pada Gambar 3. 6.



**Gambar 3. 6 Distribusi regangan-tegangan balok**

a) saat leleh pertama, b) saat ultimit

Sumber: (Pawirodikromo, 2012)

Park dan Paulay (1975) menyatakan bahwa jika tegangan desak beton masih kurang dari  $0.7 f'_c$  maka diagram tegangan regangan desak beton masih dalam keadaan elastik pada saat baja tulangan mulai leleh pertama. Dalam keadaan tersebut dapat dicari letak garis netral menggunakan prinsip elastik. Pada gambar dapat diamati letak garis netral adalah nilai  $k$  dikalikan dengan tinggi efektif dari balok. Nilai  $k$  itu sendiri dapat dicari dengan menggunakan prinsip analisis tampang balok beton secara elastik dengan rumus sebagai berikut.

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

$$\rho' = \frac{As'}{b \cdot h'} \quad , \quad \rho = \frac{As}{b \cdot h}$$

$$n = \frac{Es}{Ec}$$

$\rho$  = Tension Reinforcement Ratio

$\rho'$  = Compressed Reinforcement Ratio

- n = Angka Ekuivalensi  
 d' = Tebal selimut beton  
 d = Tinggi efektif beton

Nilai *curvature* saat leleh pertama adalah sudut yang dibentuk oleh diagram tegangan regangan pada Gambar 3. 6 a) yang dirumuskan sebagai berikut.

$$\varphi_y = \frac{\varepsilon_s}{(1 - k).h} = \frac{f_y/E_s}{(1 - k).h}$$

yangmana  $f_y$  adalah tegangan leleh baja dan  $E_s$  adalah modulus elastisitas baja.

### 3.3.2. Kelengkungan ultimit (*Ultimate Curvature*) $\varphi_u$

*Ultimate Curvature* atau Kelengkungan ultimit adalah nilai kelengkungan beton dengan tegangan yang telah melampaui  $0.7 f'_c$  yang pada saat itu garis netral akan naik akibat baja tulangan yg leleh secara berlanjut. Pada saat itu tegangan desak beton akan mencapai titik puncak batas kekuatannya. Distribusi tegangannya akan berbentuk parabola dengan puncak tertentu atau beton sudah mencapai kuat-batas (*ultimate strength*). Ekuivalen blok tegangan segi empat akan menghasilkan nilai a dengan rumus

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

Dimana:

- $f'_c$  = Kuat desak beton umur 28 hari  
 b = Lebar balok

nilai *Ultimate Curvature* berdasarkan gambar 3. 7 b) yang dimana sudut yang dibentuk oleh diagram regangan dirumuskan sebagai berikut.

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_c}{c} = \frac{\varepsilon_c \beta_1}{a}$$

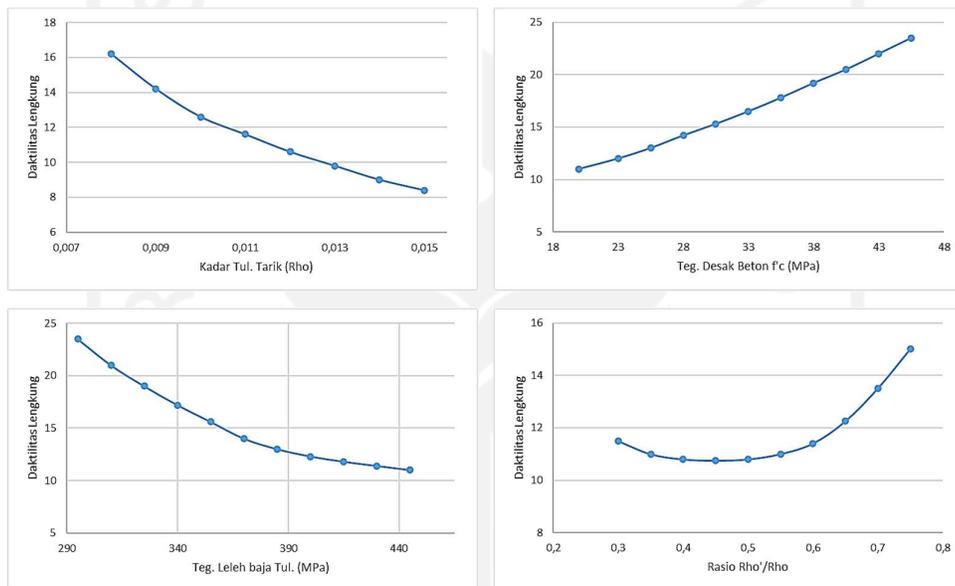
Dimana  $\beta_1$  adalah ratio dari a dan c sedangkan  $\varepsilon_c$  adalah regangan desak beton.

### 3.3.3. Daktilitas Kelengkungan (*Curvature Ductility*) $\mu_\phi$

*Curvature Ductility* adalah ratio dari *ultimate curvature* dengan *yield curvature* yang telah dijelaskan sebelumnya. Untuk memperoleh nilai *curvature ductility* dapat digunakan rumus sebagai berikut dengan catatan baja dalam kondisi telah leleh.

$$\frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{0,85 \cdot f_c \cdot \varepsilon_c \cdot \beta_1 \cdot E_s}{f_y (\rho - \rho') f_y} \left\{ 1 + (\rho + \rho') n - \left[ (\rho + \rho')^2 n^2 + 2 \left\{ \rho + \frac{\rho' d'}{h} \right\} n \right]^{\frac{1}{2}} \right\}$$

Untuk kondisi baja belum leleh maka nilai curvature ductility akan dipengaruhi oleh regangan beton yang terjadi dan perhitungan akan sedikit lebih panjang. Dalam literatur Park dan Paulay (1975) nilai *curvature ductility* kondisi baja yang belum leleh tersaji grafik yang menghubungkan nilai *curvature* lawan *tension steel content* seperti gambar berikut.



**Gambar 3. 7 Daktilitas Lengkung Unconfined Concrete Beam**

Sumber: Pawirodikromo (2012)

Dari beberapa gambar diatas dapat diamati beberapa hal yakni:

3. Kadar tulangan tarik akan mempengaruhi nilai daktilitas lengkung pada beton. Pada gambar 3. 8 a) menunjukkan bahwa semakin besar kadar tulangan tarik akan mengakibatkan daktilitas lengkung menurun. karena dengan banyaknya kadar tulangan tarik maka nilai k akan sedikit menurun dan nilai a yang membesar akan tetap menghasilkan kurfatur yang kecil.
4. Untuk kadar tulangan desak mempunyai pengaruh parabolik pada nilai k, begitu juga dengan kombinasi yang dialami nilai a tetapi nilai a akan semakin kecil. Pengaruh kombinasinya akan mencapai nilai  $\rho'$  terendah pada  $\approx 0.45 \rho$  dan akan kembali naik pada  $0.4 > \rho' > 0.5$ .

5. Dari rumus daktilitas lengkung diatas tegangan leleh baja merupakan pembagi persamaan yang akan sangat berpengaruh pada nilai kelengkungan itu sendiri. Pada grafik dapat diamati bahwa semakin besar tegangan leleh baja akan mengakibatkan semakin kecil nilai daktilitas ultimit  $\phi_u$ .
6. Sedangkan tegangan desak beton akan berpengaruh linier pada daktilitas lengkung. Jika semakin besar tegangan desak beton maka nilai  $\phi_u$  akan semakin besar selaku bilangan penyebut dalam rumus daktilitas lengkung. Dan dapat disimpulkan bahwa semakin besar  $f'_c$  pada beton rencana maka semakin tinggi nilai daktilitas lengkungnya.
7. Regangan desak beton  $\epsilon_c$  juga berperan sebagai penyebut pada rumus daktilitas lengkung diatas. Maka semakin besar regangan desak beton rencana akan meningkatkan nilai daktilitas lengkungnya.

Dari beberapa poin diatas dapat disimpulkan bahwa beton bertulang *unconfined concrete* akan semakin daktail dengan menggunakan mutu beton yang semakin tinggi, mutu dan jumlah baja yang minimal, tulangan desak dengan jumlah banyak, dan regangan desak beton yang relative besar sesuai dengan kemungkinan yang ada.

Untuk perhitungan balok beton lentur gaya aksial umumnya diabaikan. Dalam kondisi tersebut maka daktilitas lengkung dapat dihitung dengan sederhana berdasarkan *flexure* yangmana dapat dihitung melalui properti potongan balok (luas tampang, baja tulangan dan tegangan bahan).

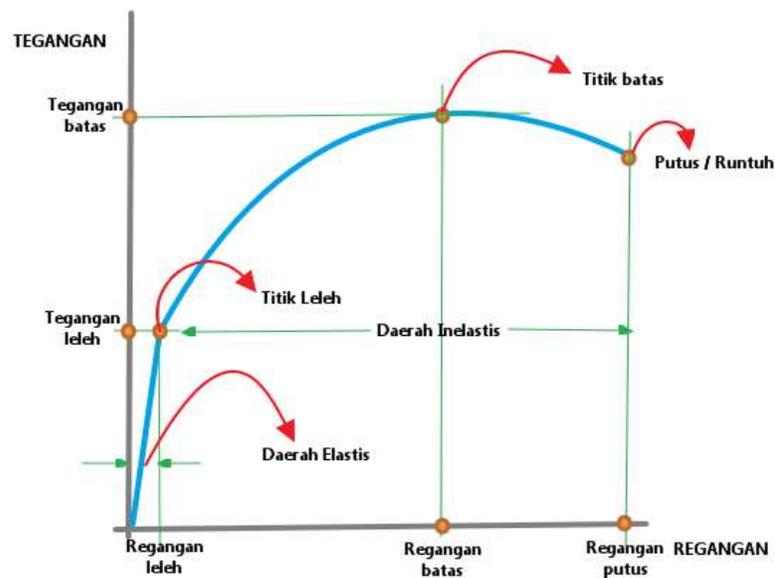
### 3.4. Semen Holcim *Powermax*

Semen Holcim *Powermax* merupakan salah satu jenis semen PCC yang di produksi oleh PT. Holcim Indonesia. Semen ini merupakan produk baru yang diluncurkan pada awal 2019. Produk ini diproduksi untuk mengatasi masalah struktur yang keropos dan tidak cepat keras yang akan berdampak pada efisiensi kerja maupun biaya. Dengan *micro filler particle* dan *strength agent* yang ditambahkan menjadi salah satu fitur andalan dari semen ini. Produk ini diclaim mampu meningkatkan kuat tekan dari beton sebesar 25% walaupun membutuhkan semen dan air yg lebih sedikit. Dan juga membuat adonan lebih pulen dan cepat keras dari beton biasa.

Semen PCC adalah semen hidrolis yang merupakan hasil pencampuran antara bubuk semen Portland dengan bubuk bahan anorganik lain seperti terak tanur tinggi (*blast furnace slag*), pozzolan, senyawa silikat dan batu kapur (BSN, 2004). Menurut Syarif (2010) dalam (Yulianto, Mustofa, & Yahya, 2020) terak tanur tinggi mempunyai unsur dominan berupa oksida silika ( $\text{SiO}_2$ ) (37-45%) dan kalsium oksida (24-38%), serta sedikit aluminat ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

### 3.5. Kekakuan Balok

Kekakuan balok diperoleh berdasarkan beban ( $P$ ) dan lendutan ( $\Delta$ ) yang terjadi pada saat balok beton bertulang masih dalam kondisi elastis. Kondisi elastis merupakan kondisi saat balok masih dapat kembali ke bentuk semula tanpa mengalami perubahan bentuk setelah dibebani.



**Gambar 3. 8 Grafik Tegangan Regangan Balok Beton**

Daerah elastis pada Gambar 3. 8 ditandai dengan garis yang linear. Berikut rumus dari kekakuan balok.

$$K = \frac{P}{\Delta}$$

K = Kekakuan Balok (N/mm)

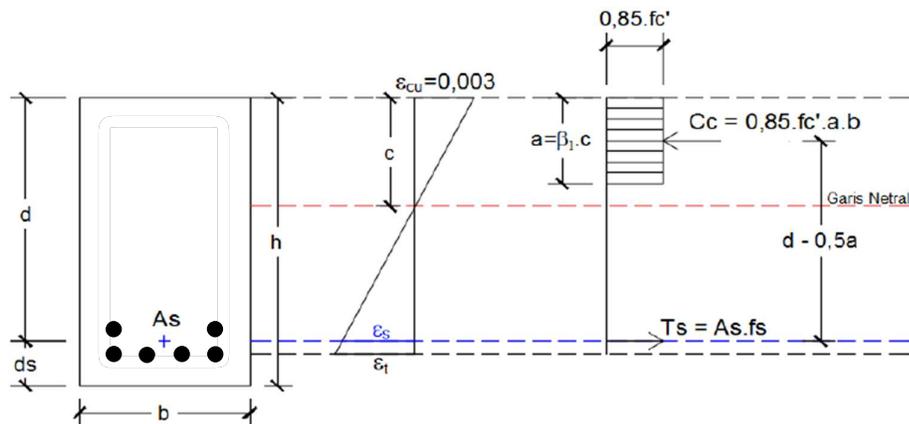
P = Beban (N)

$\Delta$  = Lendutan (mm)

Berdasarkan rumus diatas, kekakuan balok akan dibandingkan pada tiap mutu rencana.

### 3.6. Kuat Lentur Balok Tulangan Tunggal

Kuat lentur balok beton bertulang tunggal dihasilkan dari kopel gaya antara gaya tekan (yang ditahan beton) dan gaya tarik (yang ditahan baja tulangan). Kopel gaya ini terjadi akibat kelengkung lentur balok yang menghasilkan tegangan tekan pada sisi atas dan tegangan tarik pada sisi bawah (jika menahan momen positif). Ilustrasi kopel gaya tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. 9.



**Gambar 3. 9 Gaya kopel balok beton bertulang tunggal**

Sumber: (Pawirodikromo, 2012)

Berdasarkan kopel gaya tersebut maka diperoleh kapasitas momen tulangan tunggal

$$M_n = 0,85 \times f'_c \times a \times b \times (d - \frac{1}{2}a)$$

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

dengan:

$f'_c$  = kuat tekan beton rencana (MPa)

$b$  = Lebar balok (mm)

$d$  = tinggi efektif balok (mm)

$a$  = tinggi blok tekan ekuivalen (mm)

$A_s$  = luas tulangan tarik ( $\text{mm}^2$ )

$f_y$  = tegangan leleh baja tulangan (MPa)

### 3.7. Faktor Reduksi Kuat Lentur

Faktor reduksi kekuatan balok diperoleh dari perbandingan antara perhitungan hasil percobaan dengan perhitungan teoritis. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui kredibilitas nilai kuat lentur percobaan terhadap teori yang digunakan untuk kebutuhan desain struktur. Kredibilitas tersebut biasa disimbolkan dengan nilai  $\phi$ .

Selanjutnya dilakukan perhitungan analisis statistik untuk mencari pendekatan dari persebaran data yang didapat. Hal ini dilakukan dengan cara menghitung standar deviasi dari tiap data.

Menurut Ravindra dan Galambos (1978) dalam Yulianto (2021), Faktor reduksi kekuatan dirumuskan dengan persamaan berikut

$$\phi = \frac{R_m}{R_n} e^{-0.55\beta V_R}$$

$$V_R = \frac{S}{\bar{x}}$$

$R_m$  = Nilai Rata-rata resistance hasil pengujian

$R_n$  = Nilai Rata-rata nominal Hasil teoritis

$\beta$  = Safety Index (3,00)

$V_R$  = Koefisien variasi dari resistance

$S$  = Standar Deviasi

$\bar{x}$  = Nilai rata-rata data

## **BAB IV**

### **METODE PENELITIAN**

#### **4.1. Gambaran Umum**

Penelitian diawali dengan pembuatan *mix design* dan perangkaian tulangan dan bekisting balok. Mutu beton divariasikan dengan  $f_c'$  20 MPa, 23 MPa, dan 25 MPa. Untuk mutu 20 MPa digunakan semen Holcim serba guna yang beredar di pasaran, sedangkan untuk yang 23 dan 25 MPa digunakan Holcim *Powermax*. Benda uji dibuat sejumlah 9 buah dengan ukuran  $300 \times 150 \times 3000$  mm. Pada benda uji juga akan dilakukan perawatan dengan cara *curing*.

Pengujian hasil *mix design* akan diuji slump terlebih dahulu sebelum proses pengecoran. Benda uji balok beton bertulang akan di uji lentur yang dilengkapi dengan *load cell*, LVDT, serta *strain gauge* pada beton dan baja tulangan untuk memperoleh beban-regangan dan beban-lendutannya.

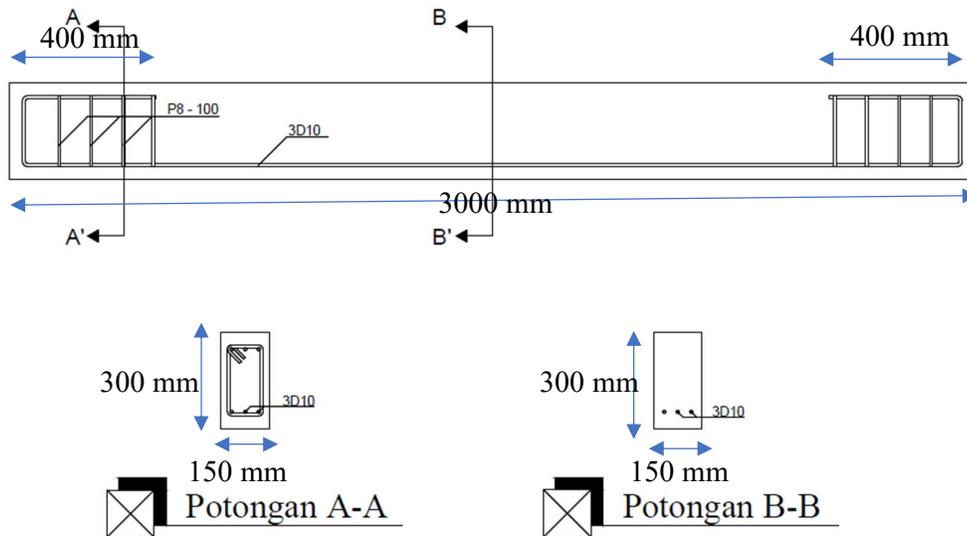
Hasil data pengujian lentur balok akan diolah sehingga didapat nilai kekakuan lentur balok, *yield curvature*, dan *ultimate curvature* untuk diperoleh nilai *curvature ductility* dari balok beton bertulang. Setelah dilakukan pengolahan data, maka akan dilakukan analisis mengenai pengaruh variasi jenis semen dan sifat-sifat mekaniknya serta pengaruh variasi mutu beton terhadap *curvature ductility* yang menjadi tujuan utama penelitian ini.

#### **4.2. Mix Design**

Pembuatan *mix design* dilakukan sesuai dengan standart SNI 03-2834-2000 (Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal) tetapi menggunakan semen *Portland Composite Cement* (PCC). Agregat halus yang digunakan berasal dari Merapi.

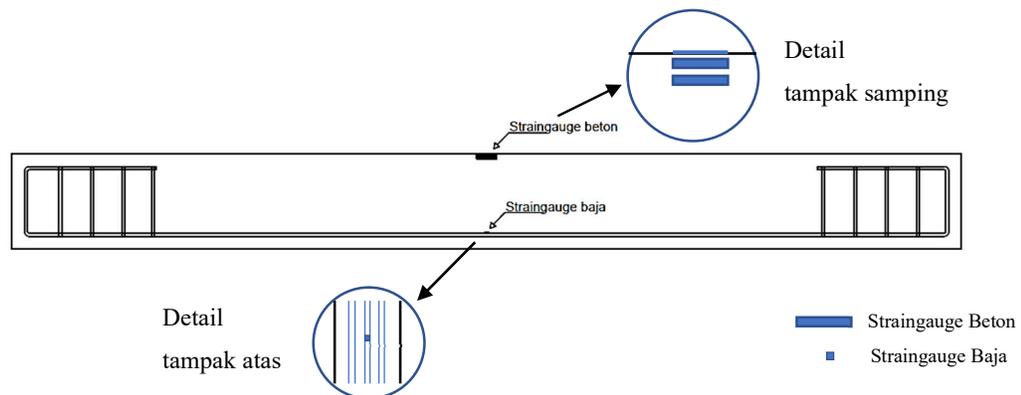
#### **4.3. Benda Uji**

Bentuk benda uji yang digunakan dalam penelitian ini adalah balok berukuran tinggi 300 mm, lebar 150 mm, dan panjang 3000 mm. Jumlah benda uji yang digunakan sebanyak 9 balok dengan rincian 3 balok dengan mutu 20 MPa, 3 balok dengan mutu 23 MPa dan 3 balok dengan mutu 25 MPa.



**Gambar 4. 1 Ilustrasi Sampel Benda Uji**

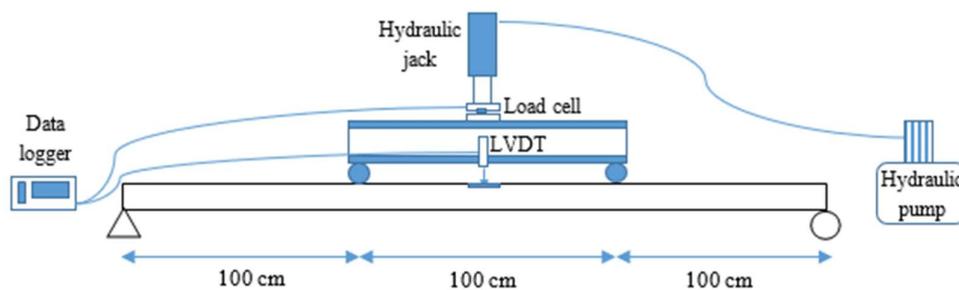
Seperti yang dapat diamati pada gambar diatas, digunakan ukuran baja tulangan yaitu tulangan lentur ukuran diameter 10 mm. Tiap sampel balok akan dipasang *straingauge* baja pada tulangan lentur tengah bentang guna mengamati regangan yang terjadi pada baja tulangan. Sampel yang siap diuji akan dipasang *straingauge* beton pada permukaan beton tepat di titik tengah sampel (0mm, 20mm 40mm). Hal ini dilakukan untuk mengamati regangan beton. Peletakan *straingauge* dapat diamati pada Gambar 4. 2 sebagai berikut:



**Gambar 4. 2 Sketsa Penempatan *Straingauge* Baja dan Beton pada *AutoCad***

#### 4.4. Pengujian Balok Beton Bertulang

Balok beton bertulang yang telah berumur 28 hari diuji lentur di Lab Mekanika Rekayasa Struktur UII. Pengujian lentur dilakukan dengan beberapa perlengkapan seperti *Loadcell*, LVDT dan TML *Data Logger* untuk pengambilan data regangan dan beban yang teraplikasi pada balok. Pemasangan LVDT ditempatkan pada tengah sisi memanjang sampel guna mengamati lendutan yang terjadi pada saat proses pengujian. Berikut ilustrasi dari pengujian lentur balok yang dapat dilihat pada **Error! Reference source not found.**



**Gambar 4. 3 Skema Pengujian Lentur Balok Beton Bertulang**

Pada saat proses pengujian dilakukan pemetaan retakan yang terjadi pada balok seiring dengan beban yang diterapkan. Pembebanan dilakukan hingga melebihi beban ultimit dan atau hingga balok rusak/patah. LVDT digunakan untuk mengetahui penurunan yang terjadi. Sedangkan *data logger* digunakan untuk mengetahui beban dan regangan yang terjadi baik pada beton maupun baja yang terpasang *straingauge*.

#### 4.5. Analisis Kuat Lentur Balok

Kuat lentur balok dihitung berdasarkan beban pada kondisi leleh pertama (beban yang digunakan pada titik leleh dalam **Error! Reference source not found.**). Rumus yang digunakan dalam menghitung kuat lentur balok adalah sebagai berikut.

$$Mn \text{ Percobaan} = \frac{1}{2} \times P \times a + Md$$

Mn = Kuat Lentur (KNm)

P = Beban (KN)

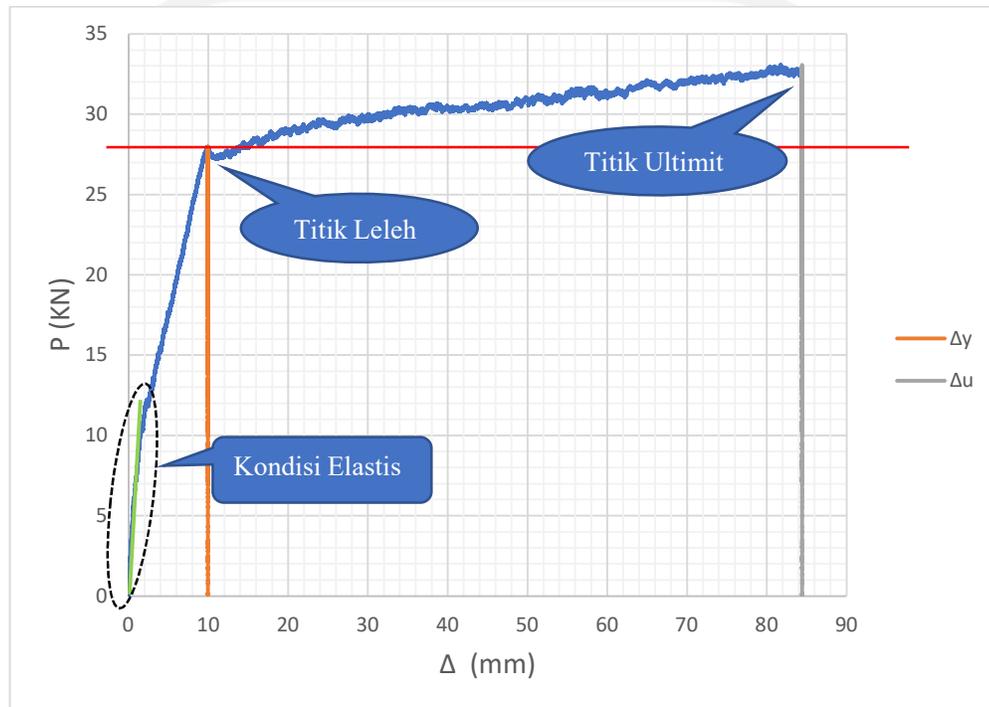
a = Lengan beban (m)

$M_w$  = Momen akibat berat sendiri balok (KNm)

Berdasarkan hasil perhitungan rumus diatas, kuat lentur kemudian dibandingkan pada tiap mutu rencananya.

#### 4.6. Analisis Kekakuan dan Daktilitas Balok

##### 4.6.1. Kekakuan Balok Beton Bertulang



**Gambar 4. 4 Grafik Hubungan P vs Δ**

Nilai kekakuan dapat diperoleh dari hasil data hubungan P dan Δ pada kondisi elastis. Kondisi elastis merupakan kondisi dimana grafik yang dihasilkan pada saat pengujian berbentuk linear. Berdasarkan rumus kekakuan, nilai kekakuan merupakan kemiringan dari grafik hasil pembagian antara beban (P) dan lendutan yang dihasilkan (Δ).

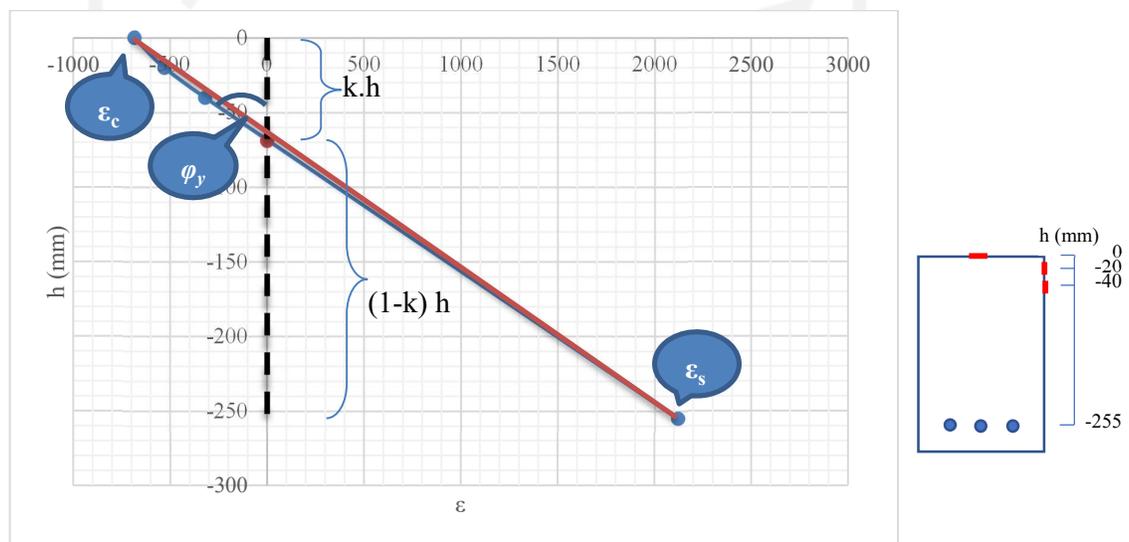
##### 4.6.2. Daktilitas Simpangan

Daktilitas simpangan adalah rasio antara simpangan ultimit dengan simpangan saat leleh pertama (*First Yield*). Kedua simpangan tersebut diperoleh dari hasil pengujian kuat lentur balok. Titik leleh dan titik ultimit dapat diamati pada Gambar 4. 4.

Berdasarkan hasil pengujian serta analisis akan ditinjau pengaruh penggantian jenis semen dan penambahan proporsi semen *powermax* terhadap daktilitas simpangan yang dihasilkan.

#### 4.6.3. Daktilitas Kurvatur

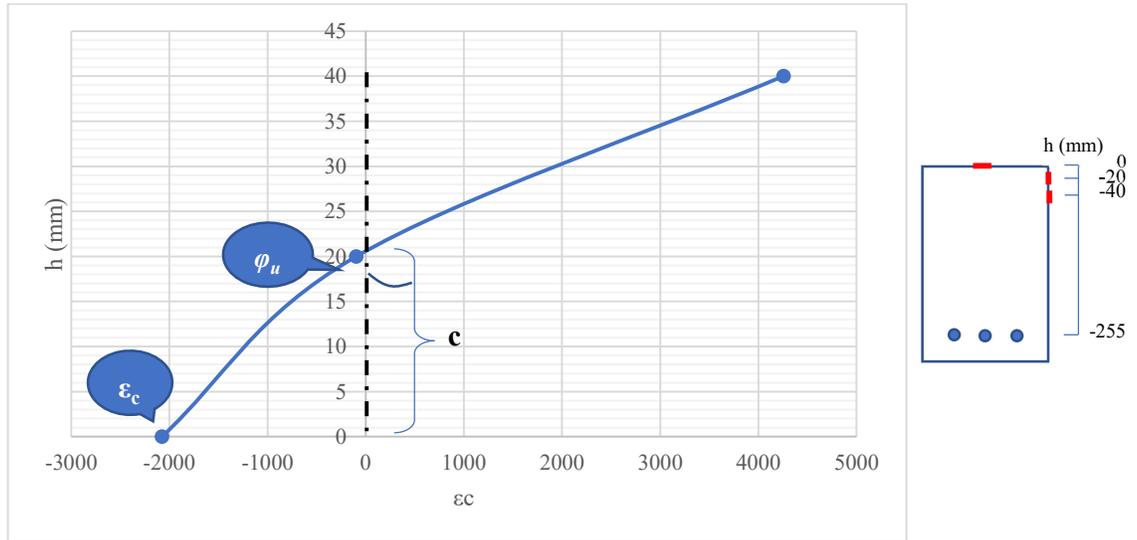
Daktilitas kurvatur adalah rasio antara kurvatur ultimit dengan kurvatur leleh pertama. Kurvatur leleh dapat diperoleh berdasarkan data regangan baja atau regangan beton pada titik leleh. Berikut contoh diagram regangan pada kondisi *first yield* yang dapat diamati pada Gambar 4. 5.



**Gambar 4. 5 Diagram Regangan Balok 3 Kondisi *First Yield***

Berdasarkan grafik diatas dapat diperoleh nilai  $\phi_y$  dengan membagi antara regangan beton ( $\epsilon_c$ ) dan  $kh$ .

Pada dasarnya cara pengambilan data kurvatur ultimit sama dengan kurvatur leleh pertama. Namun pada kondisi ultimit data regangan baja tidak dapat dipastikan akurat karena *straingauge* baja kemungkinan sudah putus. Oleh karena itu, data regangan yang dipakai adalah regangan beton pada titik ultimit. Berikut contoh diagram regangan beton pada kondisi ultimit.



**Gambar 4. 6 Diagram Regangan Beton Balok 3 Kondisi Ultimit**

Berdasarkan grafik diatas dapat diperoleh nilai  $\phi_u$  dengan membagi antara regangan beton ( $\epsilon_c$ ) dan  $c$ .

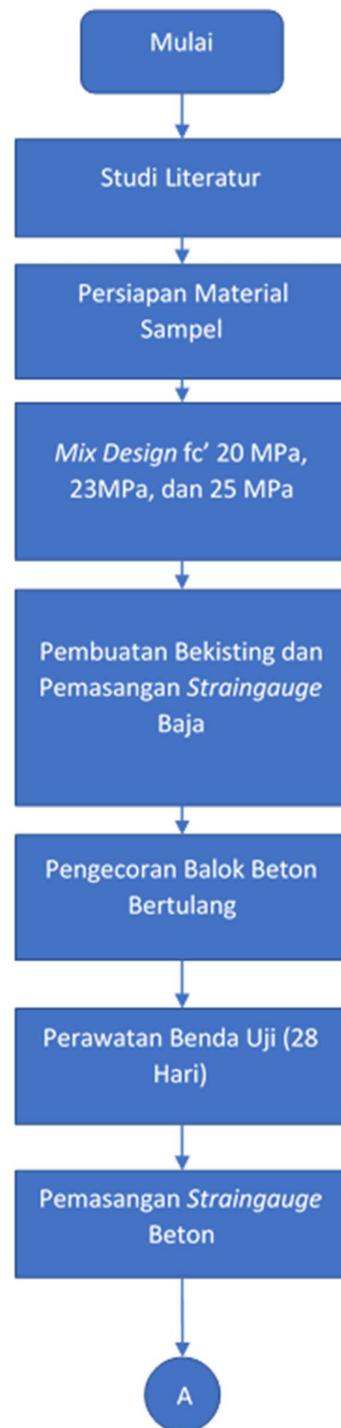
Dengan demikian dapat dihitung daktilitas kurvatur dengan rumus sebagai berikut.

$$\mu\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}$$

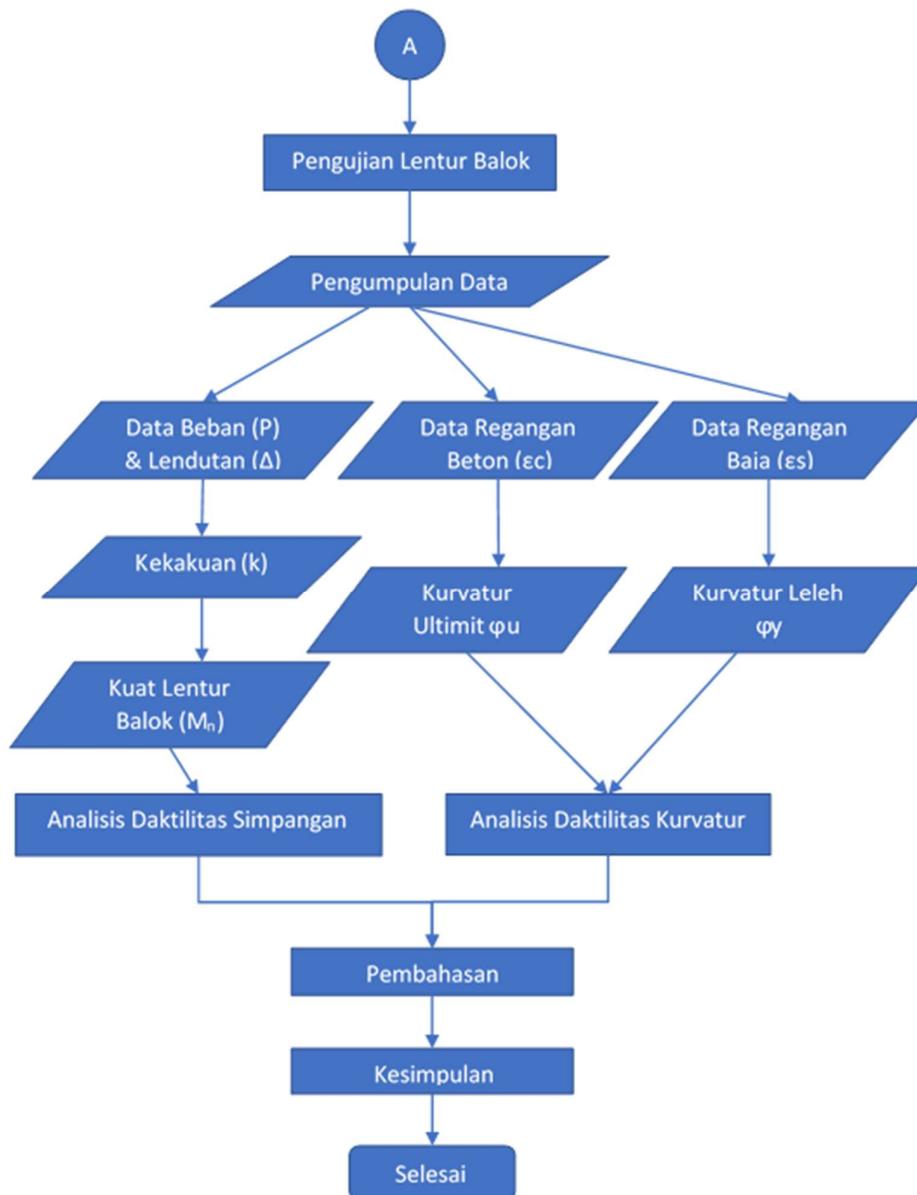
Berdasarkan hasil perhitungan akan ditinjau pengaruh penggantian jenis semen dan penambahan proporsi semen *powermax* terhadap daktilitas kurvatur yang dihasilkan.

#### 4.7. Diagram Alir Penelitian

Berikut diagram alir yang dapat dilihat pada Gambar 4. 7.



**Gambar 4. 7 Diagram Alir Penelitian**



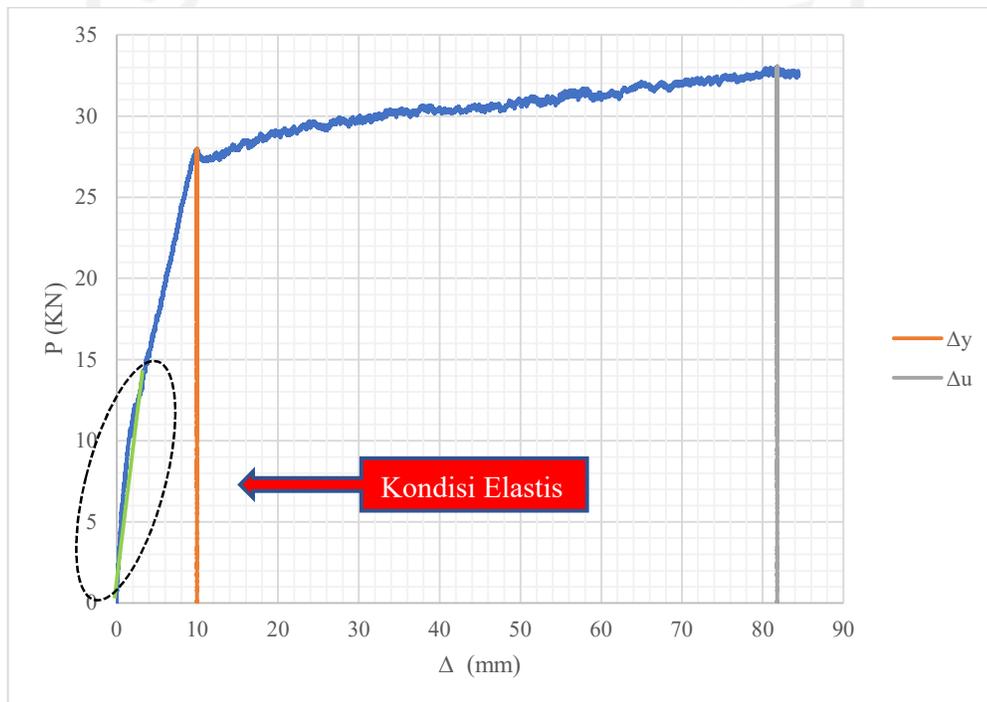
Lanjutan Gambar 4. 7 Diagram Alir Penelitian

## BAB V

### ANALISIS DAN PEMBAHASAN

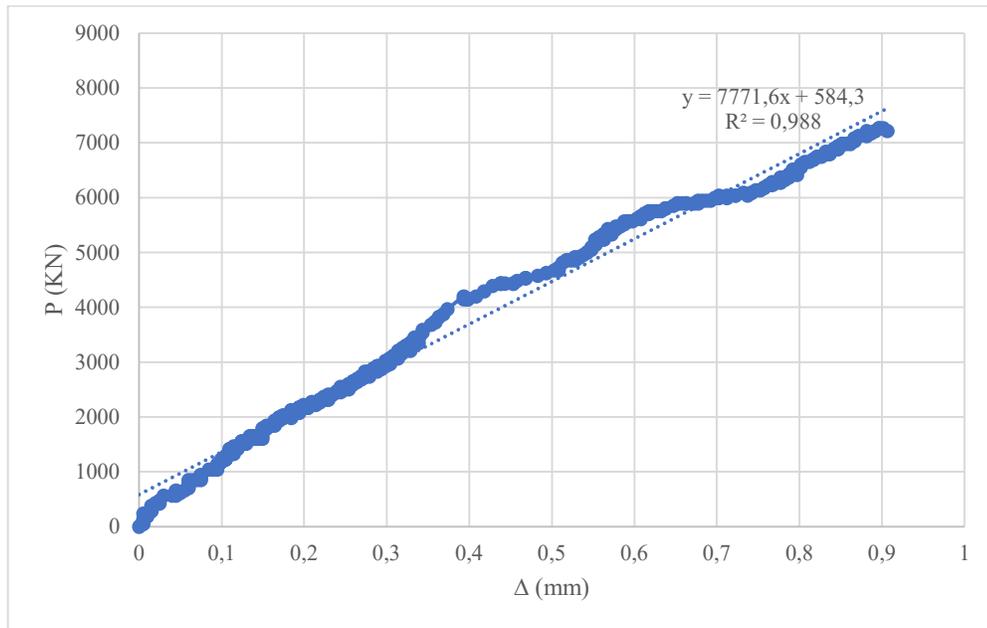
#### 5.1. Kekakuan Balok

Kekakuan balok diperoleh berdasarkan beban ( $P$ ) dan lendutan ( $\Delta$ ) yang terjadi pada saat balok beton bertulang masih dalam kondisi elastis. Berikut letak kondisi elastis pada grafik beban lendutan balok.

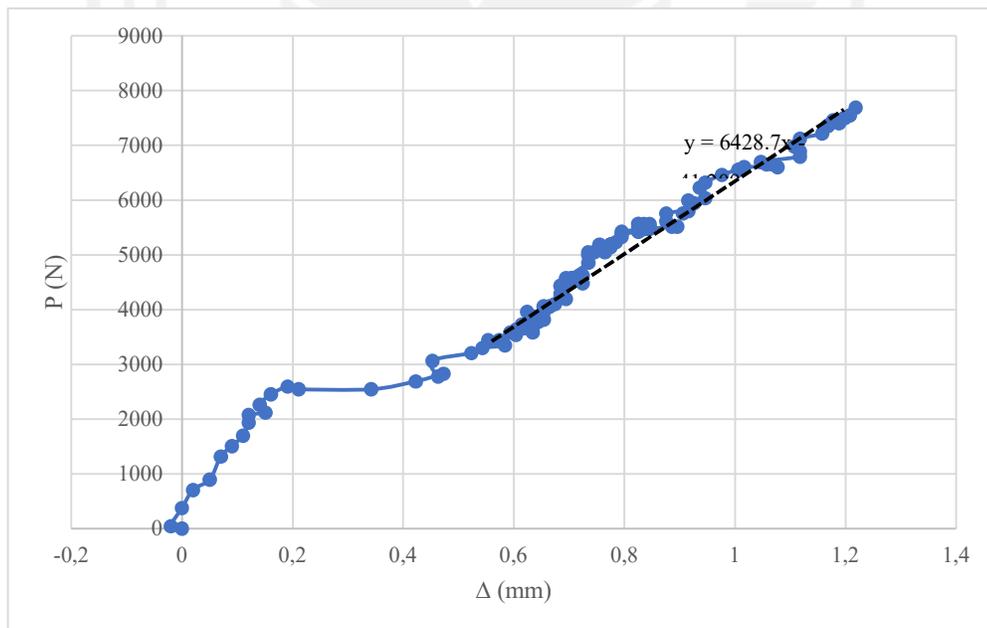


**Gambar 5.1 Letak Kondisi Elastis Balok pada Grafik Hubungan  $P$  vs  $\Delta$**

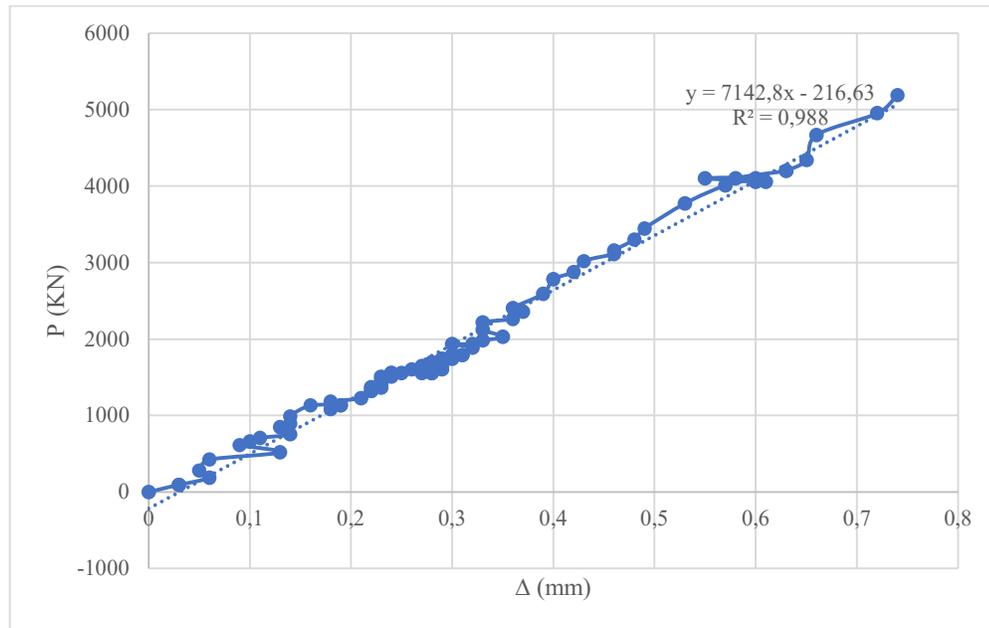
Berdasarkan letak kondisi elastis yang relatif sama, hasil grafik yang diperoleh dari masing masing balok adalah sebagai berikut.



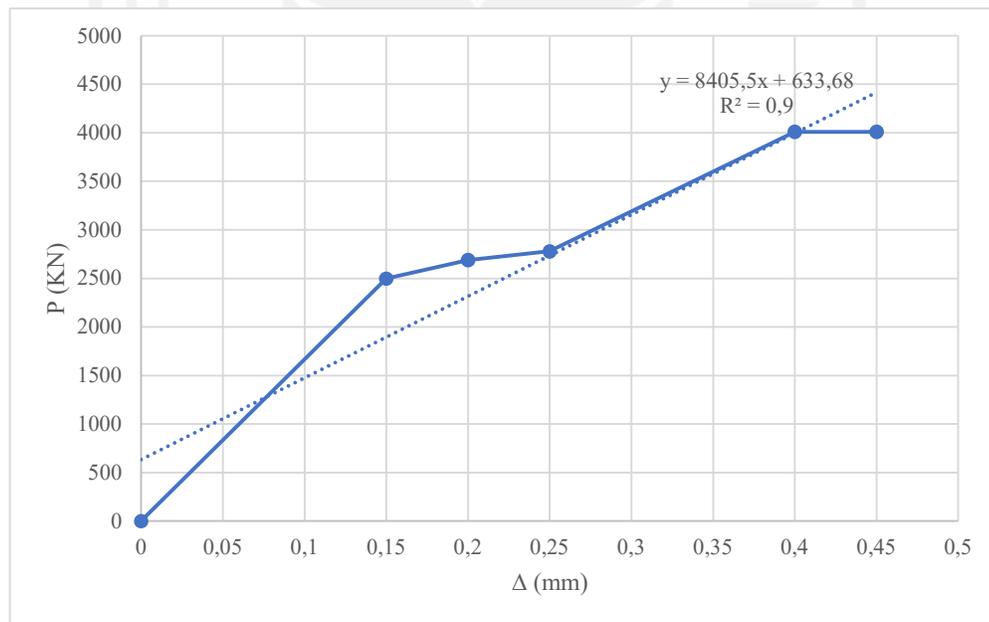
**Gambar 5. 2 Grafik Hubungan P vs Δ Balok 1 (Kondisi Elastis)**



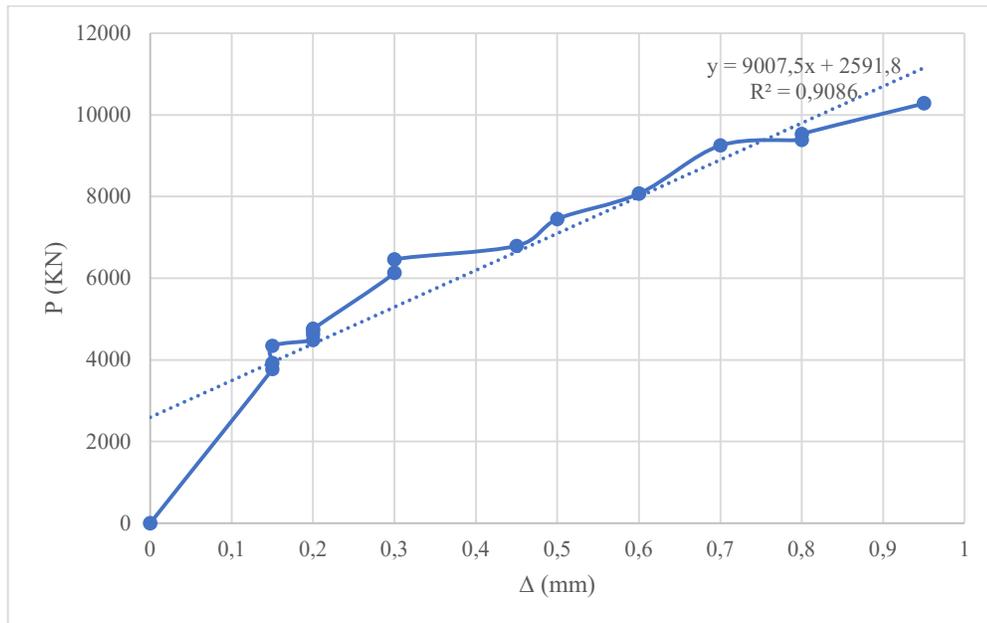
**Gambar 5. 3 Grafik Hubungan P vs Δ Balok 3 (Kondisi Elastis)**



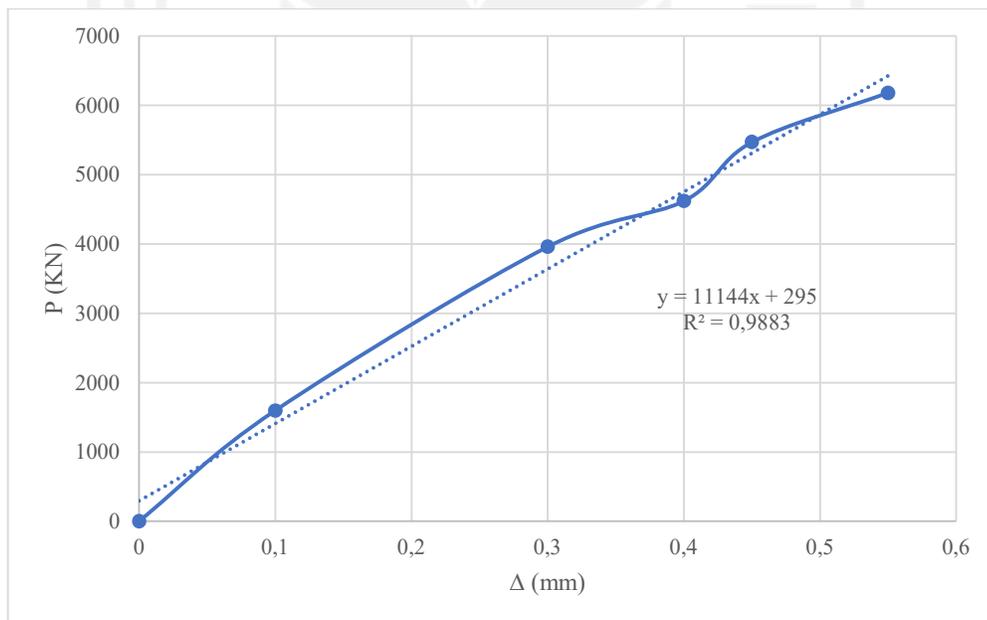
**Gambar 5. 4 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 4 (Kondisi Elastis)**



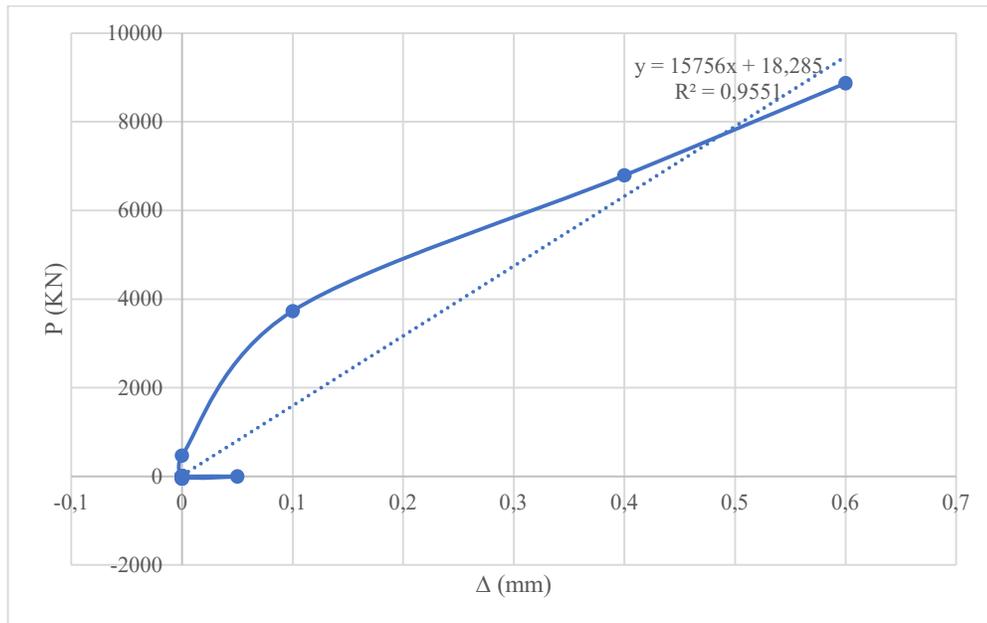
**Gambar 5. 5 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 5 (Kondisi Elastis)**



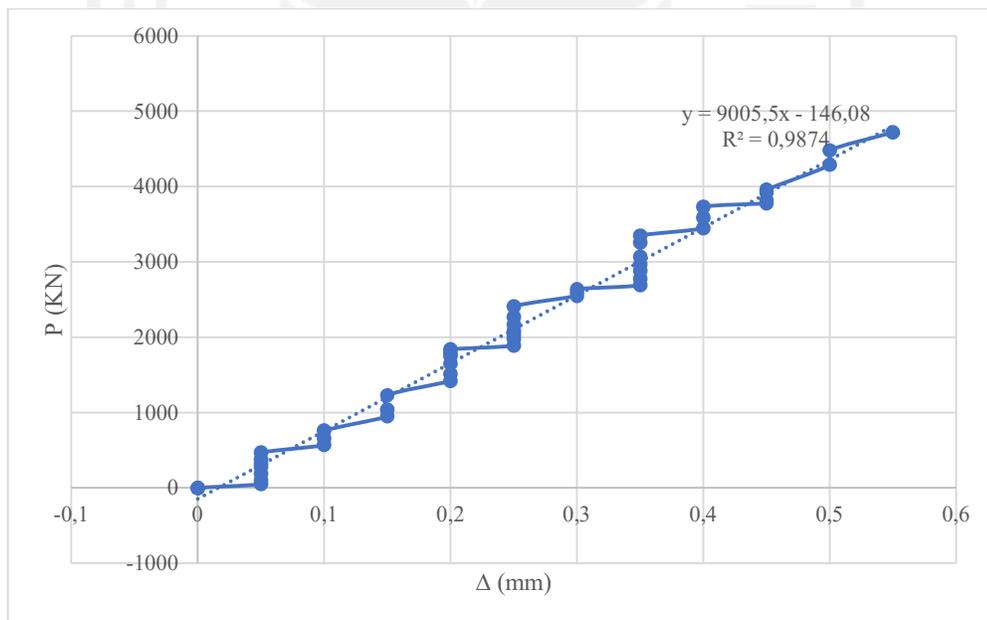
**Gambar 5. 6 Grafik Hubungan P vs Δ Balok 6 (Kondisi Elastis)**



**Gambar 5. 7 Grafik Hubungan P vs Δ Balok 7 (Kondisi Elastis)**



**Gambar 5. 8 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 8 (Kondisi Elastis)**



**Gambar 5. 9 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 9 (Kondisi Elastis)**

Berdasarkan grafik tersebut diperoleh kekakuan balok dengan rekapitulasi sebagai berikut. Kekakuan balok ( $K$ ) merupakan gradien yang dibentuk oleh grafik hubungan beban ( $P$ ) dan lendutan ( $\Delta$ ). Dengan demikian kekakuan dari masing-masing balok dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5. 1 Tabel Rekapitulasi Kekakuan Balok**

Spesimen Balok	K (N/mm)	Krata-rata (N/mm)	fc' rencana	Material Semen
Balok 1	7771,6	7100,15	20	Holcim Serbaguna
Balok 3	6428,7			
Balok 4	7142,8	8185,27	20	Holcim Powermax
Balok 5	8405,5			
Balok 6	9007,5			
Balok 7	11144	11968,50	25	Holcim Powermax
Balok 8	15756			
Balok 9	9005,5			

Data dari balok 2 tidak dapat ditampilkan karena terjadinya error pada pembacaan data logger sehingga data beban, lendutan serta regangan dari beton dan baja tidak dapat diperoleh. Oleh karena itu urutan dari spesimen balok untuk balok 2 dilewati.

Berdasarkan Tabel 5. 1 sampel dengan  $f_c'$  rencana yang sama (20 MPa) campuran beton yang menggunakan semen *powermax* menghasilkan nilai kekakuan yang lebih besar yaitu 8185,27 N/mm dibandingkan dengan merek holcim serbaguna yakni 7100,15 N/mm (15,3%). Selain itu, peningkatan proporsi semen *powermax* sebanyak 11,62% pada campuran mutu rencana 25 MPa juga dapat meningkatkan nilai kekakuan balok beton secara signifikan dari 8185,27 N/mm hingga 11968,5 N/mm (46,2%).

## 5.2. Mutu Beton yang Sesungguhnya ( $f_c'$ )

Mutu beton yang sesungguhnya pada balok beton bertulang dapat diketahui melalui modulus elastisitas balok beton. Sedangkan modulus elastisitas dipengaruhi oleh tingkat kekakuan balok. Modulus elastisitas diperoleh berdasarkan nilai kekakuan beton menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\Delta \max = \frac{Pa}{24EI} (3L^2 - 4a^2)$$

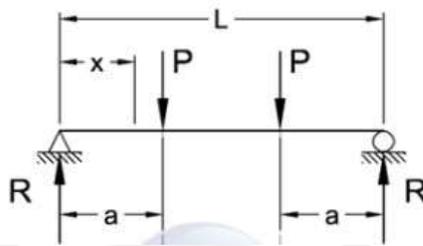
$$K = \frac{P}{\Delta}$$

Berdasarkan rumus diatas diketahuin bahwa  $\frac{P}{\Delta}$  adalah nilai kekakuan K. Maka rumus dapat disimpulkan rumus modulus elastisitas adalah sebagai berikut.

$$E = \frac{P}{\Delta} \times \frac{a}{24I} (3L^2 - 4a^2)$$

$$E = K \times \frac{a}{24I} (3L^2 - 4a^2)$$

Nilai L adalah panjang balok sedangkan a adalah lengan gaya dari tumpuan ke pusat beban yang diberikan pada balok. Penjelasan tersebut dapat diamati pada **Gambar 5.10** sebagai berikut.



**Gambar 5. 10 Simple Beam Dengan Beban 2 Titik**

Dengan demikian perhitungan modulus elastisitas balok 1 yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} E &= \frac{Pa}{24I\Delta} (3L^2 - 4a^2) \\ &= \frac{P}{\Delta} \times \frac{a(3L^2 - 4a^2)}{24I} \\ &= K \times \frac{a(3L^2 - 4a^2)}{24I} \\ &= 7771,6 \times \frac{1000(3 \times 3000^2 - 4 \times 1000^2)}{24(\frac{1}{12} \times 150 \times 300^3)} \end{aligned}$$

$$E = 22068 \text{ N/mm}^2$$

Setelah modulus elastisitas balok (E) diketahui maka mutu beton ( $f_c'$ ) dapat dihitung dengan cara sebagai berikut:

$$E = 4700\sqrt{f_c'}$$

$$F_c' = \left(\frac{E}{4700}\right)^2$$

$$= \left(\frac{22068}{4700}\right)^2$$

$$F_c' = 22,05 \text{ MPa}$$

Berdasarkan perhitungan yang sama maka diperoleh hasil rekapitulasi  $f_c'$  sampel balok sebagai berikut.

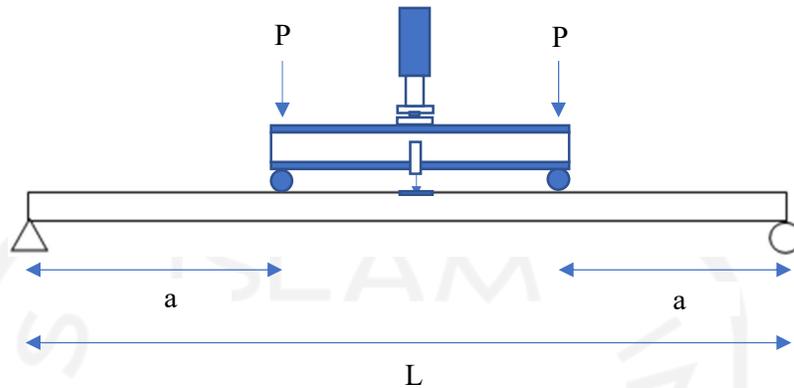
**Tabel 5. 2 Tabel Kekakuan dan Kuat Tekan Sesungguhnya Balok**

Spesimen Balok	K (N/mm)	E (MPa)	$f_c'$ (MPa)	$f_c'$ Rerata (MPa)
Balok 1	7771,6	22068	22,045	18,56
Balok 3	6428,7	18254	15,085	
Balok 4	7142,8	20282	18,622	25,79
Balok 5	8405,5	23867	25,788	
Balok 6	9007,5	25577	29,614	
Balok 7	11144	31643	45,329	42,99
Balok 8	15756	52433	124,457	
Balok 9	9005,5	29969	40,658	

Dengan campuran yang sama, balok 8 menghasilkan nilai  $f_c'$  yang tidak rasional, hal ini karena data  $P-\Delta$  yang dimiliki pada fase elastis terlalu sedikit sehingga menghasilkan nilai regresi dan kekakuan yang menyimpang jauh dibandingkan balok 7 dan 9. Oleh karena itu, data  $f_c'$  balok 8 tidak valid.

Dengan  $f_c'$  yang sama (20 MPa) campuran yang menggunakan semen *powermax* menghasilkan kuat tekan yang lebih tinggi dengan dibandingkan dengan merek holcim serbaguna yaitu sebesar 38,91%. Nilai ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan klaim holcim yang menyebutkan beton dengan semen *powermax* menghasilkan kuat tekan 15-25% (PT Holcim, 2019). Selain itu, peningkatan proporsi semen *powermax* sebanyak 11,62% pada campuran mutu rencana 25 MPa juga dapat meningkatkan nilai  $f_c'$  beton sebesar 66,7% terhadap semen *powermax* 20 MPa.

Kuat lentur balok dapat diperoleh berdasarkan beban pada kondisi ultimit. Berikut gambaran setup yang dilakukan untuk pengujian kuat lentur balok.



**Gambar 5. 11 Sketsa Setup Pengujian Lentur Balok**

Adapun penambahan beban diatas disebabkan oleh beban peralatan yang digunakan pada saat pengujian untuk memenuhi kebutuhan alat uji. Berikut alat bantu yang digunakan untuk setup pengujian.

**Tabel 5. 3 Alat Bantu Setup Pengujian**

Nama Alat	Berat (kg)	W (N)
Tumpuan 1	28,5	279,59
H. Jack Enerpac	23,7	232,50
Profil Baja	11,2	109,87
Plat biru	6	58,86
H. Jack Biru	24,3	238,38
Plat merah	14,1	138,32
Tumpuan 2	17	166,77
Sendi biru	6	58,86

Dengan demikian total beban tambahan pada masing-masing balok dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5. 4 Beban Tambahan Tiap Spesimen Balok**

Spesimen Balok	W (KN)
Balok 1	0,680814
Balok 3	0,680814
Balok 4	0,766161
Balok 5	0,680814
Balok 6	0,680814
Balok 7	0,680814

Balok 8	0,567999
Balok 9	0,567999

Perbedaan terjadi pada setiap spesimen balok disebabkan oleh penggunaan alat yang dapat digunakan ditempat. Pada setup pengujian spesimen balok 8 dan 9 menggunakan beban tambahan yang lebih ringan karena perbedaan tumpuan yang digunakan pada setup awal (Pengujian spesimen balok 1 sampai 7) menggunakan tumpuan 1 yang memiliki dimensi dan berat yang lebih besar dibandingkan setup pengujian setelah perpendekan jarak beban (pada pengujian spesimen balok 8 dan 9).

Kuat lentur balok dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$Mn \text{ Percobaan} = \frac{1}{2} \times P \times a + Md$$

Berdasarkan rumus diatas lengan gaya (a) memiliki pengaruh terhadap kuat lentur balok.

Perhitungan kuat lentur diawali dengan menghitung berat sendiri balok (W). Berat sendiri balok dihitung berdasarkan massa jenis balok ( $\gamma_c$ ) dikalikan dengan volume balok (V). Perhitungan berat sendiri dapat diamati sebagai berikut:

$$\begin{aligned} W &= \gamma_c \times V \\ &= 24 \times (0.15 \times 0.3 \times 3) \\ &= 3.24 \text{ KN} \end{aligned}$$

Berat sendiri balok mengakibatkan adanya gaya yang bekerja sepanjang balok ( $Q_{dl}$ ). Gaya berat merata balok ( $Q_{dl}$ ) dihitung dengan membagi berat sendiri dengan panjang balok (L) seperti pada perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} Q_{dl} &= W / L \\ &= 3.24 / 3 \\ &= 1.08 \text{ KN/m} \end{aligned}$$

Dengan diperoleh gaya berat merata balok, maka momen akibat berat sendiri balok dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_w &= (1/8) \times Q_{dl} \times L^2 \\ &= (1/8) \times 1.08 \times 3^2 \\ M_w &= 1.215 \quad \text{KNm} \end{aligned}$$

Berdasarkan data diatas maka kuat lentur balok 1 dapat dihitung dengan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} M_n \text{ Percobaan} &= (1/2) \times P \times a + M_w \\ &= (1/2) \times (33.07 + 0.68) \times 1 + 1.215 \\ &= 18.09 \quad \text{KNm} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan rumus di atas didapatkan rekapitulasi dari kuat lentur masing-masing balok yang dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5. 5 Rekapitulasi Hasil Perhitungan Mn Percobaan**

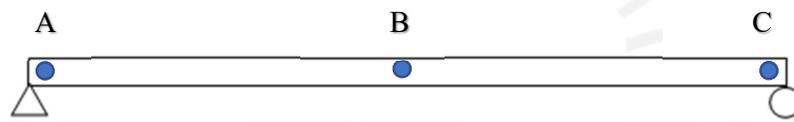
Spesimen Balok	Pmaks (kN)	Lengan Beban (m)	Mw (kNm)	Mn Percobaan (kNm)	Mn Percobaan rata-rata (kNm)
Balok 1	33,07	1	1,22	18,09	19,03
Balok 3	36,84	1	1,22	19,98	
Balok 4	34,20	1	1,22	18,70	18,64
Balok 5	33,92	1	1,22	18,52	
Balok 6	34,29	1	1,22	18,70	
<del>Balok 7</del>	<del>28,58</del>	<del>1</del>	<del>1,22</del>	<del>15,85</del>	
Balok 8	27,69	1,45	1,22	21,70	22,09
Balok 9	28,77	1,45	1,22	22,49	

Pada pengujian yang dilakukan adanya perubahan lengan gaya pada balok 8 dan balok 9 akibat terjadinya gagal geser pada balok 7. Terjadinya gagal geser pada sampel menyebabkan data dari balok 7 tidak dapat dipakai untuk menghitung daktilitas kurvatur yang mana menjadi fokus utama pada penelitian ini.

Berdasarkan Tabel 5. 5 balok 3 memiliki kuat lentur paling tinggi dibandingkan balok dengan campuran yang sama (balok 1, balok 4, balok 5 dan balok 6). Sedangkan berdasarkan  $f_c'$  rencana seharusnya balok 4, balok 5 dan balok 6 seharusnya menghasilkan kuat lentur yang lebih tinggi. Hal tersebut diperkirakan disebabkan oleh 2 kemungkinan.

Kemungkinan pertama, tingginya kuat lentur ( $M_n$ ) balok 3 disebabkan oleh tinggi efektif balok ( $d$ ) dari balok 3 yang dihasilkan tidak sesuai dengan sampel balok dengan variasi mutu sama. Hal ini mempengaruhi jarak pusat sumbu tekan beton terhadap tulangan ( $d - \frac{1}{2}a$ ) yang dihasilkan.

Kemungkinan kedua, tingginya kuat lentur ( $M_n$ ) balok 3 disebabkan oleh tingkat kepadatan yang tinggi dibandingkan sampel dengan campuran yang sama ( $f_c' 20 \text{ MPa}$ ). Pengujian UPV dilakukan pada 3 titik tiap spesimen balok yakni, 2 titik pada ujung bentang dan 1 titik pada tengah bentang. Letak titik uji pada spesimen balok dapat diamati pada gambar berikut.



**Gambar 5. 12 Letak Titik Pengujian UPV**

Hasil uji kepadatan dari tiap sampel balok dapat dilihat pada tabel sebagai berikut.

**Tabel 5. 6 Hasil Pengolahan Data UPV**

Varian	Spesimen Balok	Titik Uji	t ( $\mu\text{s}$ )	s (m)	v (m/s)	v rata-rata (m/s)	
						Spesimen	Varian
20 Mpa	Balok 1	A	35,1	0,156	4444,44	4290,39	4460,63
		B	36,7	0,155	4223,43		
		C	36,4	0,153	4203,30		
	Balok 2	A	34,9	0,146	4183,38	4522,85	
		B	33,7	0,151	4480,71		
		C	31,4	0,154	4904,46		
	Balok 3	A	35,9	0,164	4568,25	4630,86	
		B	36,2	0,16	4419,89		
		C	31,4	0,154	4904,46		
Powermax 20 Mpa	Balok 4	A	33,7	0,155	4599,41	4595,54	4552,16
		B	35,4	0,158	4463,28		
		C	32,6	0,154	4723,93		
	Balok 5	A	32,9	0,144	4376,90	4514,35	
		B	33,9	0,157	4631,27		
		C	34,4	0,156	4534,88		
	Balok 6	A	34,7	0,156	4495,68	4546,60	

Powermax 25 Mpa		B	32,9	0,154	4680,85		
		C	35,4	0,158	4463,28		
	Balok 7	A	37,4	0,158	4224,60	4289,49	
		B	36,9	0,158	4281,84		
		C	33,7	0,147	4362,02		
	Balok 8	A	35,1	0,158	4501,42	4538,58	
		B	33,9	0,156	4601,77		
		C	35,9	0,162	4512,53		
	Balok 9	A	35,9	0,159	4428,97	4373,30	
		B	37,9	0,159	4195,25		
		C	34,7	0,156	4495,68		
							4400,45

Berdasarkan Tabel 5. 6 balok 3 menghasilkan tingkat cepat rambat paling tinggi dibandingkan balok dengan campuran yang sama (balok 1, balok 4, balok 5 dan balok 6). Dengan demikian balok 3 menghasilkan kuat lentur ( $M_n$ ) yang paling tinggi pada Tabel 5. 5 diantara balok 1 hingga balok 6.

Berdasarkan Tabel 5. 5 diketahui bahwa dengan campuran yang sama (20 MPa) kuat lentur yang dihasilkan oleh campuran menggunakan semen *powermax* yaitu 18,64 KNm lebih kecil 2,07% dibandingkan kuat lentur yang dihasilkan oleh campuran semen holcim serbaguna yaitu 19,03 KNm. Akan tetapi penambahan proporsi semen *powermax* sebanyak 11,62% pada campuran 25 MPa dapat meningkatkan kuat lentur balok dari 18,64 KNm hingga 22,18 KNm atau dapat dikatakan mengalami kenaikan sebanyak 18,98%. Dengan demikian campuran mutu 25 MPa merupakan sampel yang paling tepat untuk mendapatkan kuat lentur paling optimal.

### 5.3. Faktor Reduksi Kuat Lentur Balok ( $\phi$ )

Faktor reduksi kekuatan balok diperoleh dari perbandingan antara perhitungan hasil percobaan dengan perhitungan teoritis. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui kredibilitas nilai kuat lentur percobaan terhadap teori yang digunakan untuk kebutuhan desain struktur. Kredibilitas tersebut biasa disimbolkan dengan nilai  $\phi$ .

Berikut data hasil uji tekan beton dan uji tarik baja. Data berikut dibutuhkan untuk menghitung kuat lentur beton teoritis.

$$f'_c = 18,56 \quad \text{MPa}$$

$$\begin{aligned}
 f'c &= 25,79 && \text{MPa} \\
 f'c &= 42,99 && \text{MPa} \\
 fy &= 377,16 && \text{MPa} \\
 \text{diameter tulangan} &= 9,8 && \text{mm}
 \end{aligned}$$

Berikut contoh perhitungan kuat lentur teoritis.

$$\begin{aligned}
 ds &= sb + (0.5 \times \phi_s) \\
 &= 40 + (0.5 \times 9.8) \\
 &= 44,9 \text{ mm} \\
 d &= h - ds \\
 &= 300 - 44,9 \\
 &= 255,1 \text{ mm} \\
 Ts &= As \times fy \\
 &= (3 \times 0,25\pi \times 9,8^2) \times 377,16 \\
 &= 85347 \text{ N} \\
 a &= Ts / (0.85 \times f'c \times b) \\
 &= 85347 / (0.85 \times 18,56 \times 150) \\
 &= 36,1 \text{ mm} \\
 Mn &= Ts \times (d - a/2) \\
 &= 85347 \times (255,1 - 36,1/2) \\
 &= 20233352,6 \text{ Nmm} \\
 &= 20,2334 \text{ KNm}
 \end{aligned}$$

Berdasarkan cara perhitungan yang sama didapatkan kuat lentur untuk masing-masing mutu rencana 23 adalah 20,66 KNm dan 25 MPa dan 21,11 KNm. Selanjutnya dilakukan perhitungan analisis statistik untuk mencari pendekatan dari persebaran data yang didapat. Langkah perhitungan dapat dilihat sebagai berikut.

Mutu 18,56 MPa

$$\begin{aligned}
 \bar{x} &= (18,09 + 19,98)/2 \\
 &= 19,03
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (x_{i1} - \bar{x})^2 &= (18,09 - 19,03)^2 \\
 &= 0,89
 \end{aligned}$$

$$(x_{i2} - \bar{x})^2 = (19,98 - 19,03)^2$$

$$\begin{aligned}
 &= 0,89 \\
 s &= \sqrt{\sum(x_i - x_r)^2 / (n-1)} \\
 &= \sqrt{((0,89+0,89)/(2-1))} \\
 &= 1,3342
 \end{aligned}$$

Berdasarkan nilai standar deviasi yang didapat dilakukan perhitungan nilai  $\phi$  dengan rumus sebagai berikut.

$$\begin{aligned}
 V_r &= s / \bar{x} \\
 &= 1,3342 / 19,03 \\
 &= 0,070 \\
 \Phi &= (R_m / R_n) \times e^{-0,55 \times \beta \times V_r} \\
 &= (19,03 / 20,23) \times e^{-0,55 \times 3 \times 0,07} \\
 &= 0,84
 \end{aligned}$$

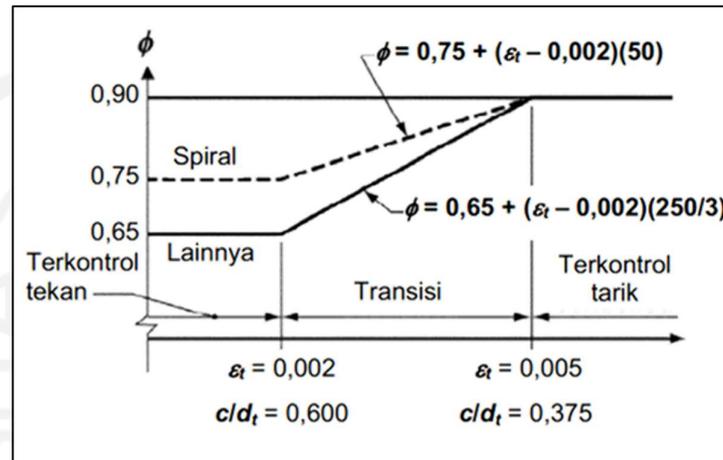
Perhitungan di atas diterapkan pada variasi mutu 25,79 dan 42,99 MPa. Berikut rekapitulasi hasil perhitungan nilai  $\phi$ .

**Tabel 5. 7 Tabel Rekapitulasi Hasil Perhitungan Nilai  $\phi$**

Spesimen Balok	Mn Percobaan (kNm)	Mn Teoritis (kNm)	fc' (MPa)	(xi-xr) <sup>2</sup>	StDev	Rm/Rn	Vr	Ø
Balok 1	18,09	20,23	18,56	0,89	1,33	0,94	0,07	0,84
Balok 3	19,98	20,23	18,56	0,89				
Rata-rata	19,03	20,23						
Balok 4	18,70	20,66	25,79	0,00	0,11	0,90	0,01	0,89
Balok 5	18,52	20,66	25,79	0,01				
Balok 6	18,70	20,66	25,79	0,00				
Rata-rata	18,64	20,66						
Balok 7	15,85	21,11	42,99	39,04	0,55	1,05	0,03	1,00
Balok 8	21,70	21,11	42,99	0,15				
Balok 9	22,49	21,11	42,99	0,15				
Rata-rata	22,09	21,11						
							Ø Rerata	0,91

Berdasarkan Tabel 5. 7 diperoleh nilai  $\phi$  rata-rata hasil pengujian lentur balok beton bertulang dari setiap variasi mutu 18,56; 25,79 dan 42,99 MPa adalah 0,91.

Secara teoritis nilai  $\phi$  menurut SNI 2847-2019 dapat dihitung melalui pembacaan grafik pada Gambar 5. 13 dengan menghitung nilai regangan baja tarik teoritis berdasarkan prinsip tulangan tunggal. **Error! Reference source not found..**



**Gambar 5. 13 Faktor reduksi ( $\phi$ ) elemen lentur**  
Sumber: (BSN, 2019)

Rekapitulasi perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 5. 8 Perbandingan nilai  $\phi$**

Spesimen Balok	$f_c'$ (MPa)	Regangan tulangan baja teoritis	$\phi_{\text{teoritis}}$	$\phi_{\text{pengujian}}$
Balok 1	18,56	0,0246	0,9	0,84
Balok 3	18,56	0,0246	0,9	0,84
Balok 4	25,79	0,0326	0,9	0,89
Balok 5	25,79	0,0326	0,9	0,89
Balok 6	25,79	0,0326	0,9	0,89
Balok 7	42,99	0,0269	0,9	1,00
Balok 8	42,99	0,0269	0,9	1,00
Balok 9	42,99	0,0269	0,9	1,00

Berdasarkan Tabel 5. 8 dapat terlihat bahwa hanya balok 1, 3, 4, 5 dan 6 yang memiliki nilai  $\phi$  lebih rendah daripada nilai  $\phi$  teoritis berdasarkan SNI 2847-2019. Adapun balok lainnya memiliki nilai  $\phi$  yang lebih tinggi dari nilai  $\phi$  teoritis. Hal ini berarti nilai  $\phi$  SNI 2847-2019 baru kompatibel dengan balok beton bertulang yang menggunakan semen Power Max dengan mutu rencana 25 MPa.

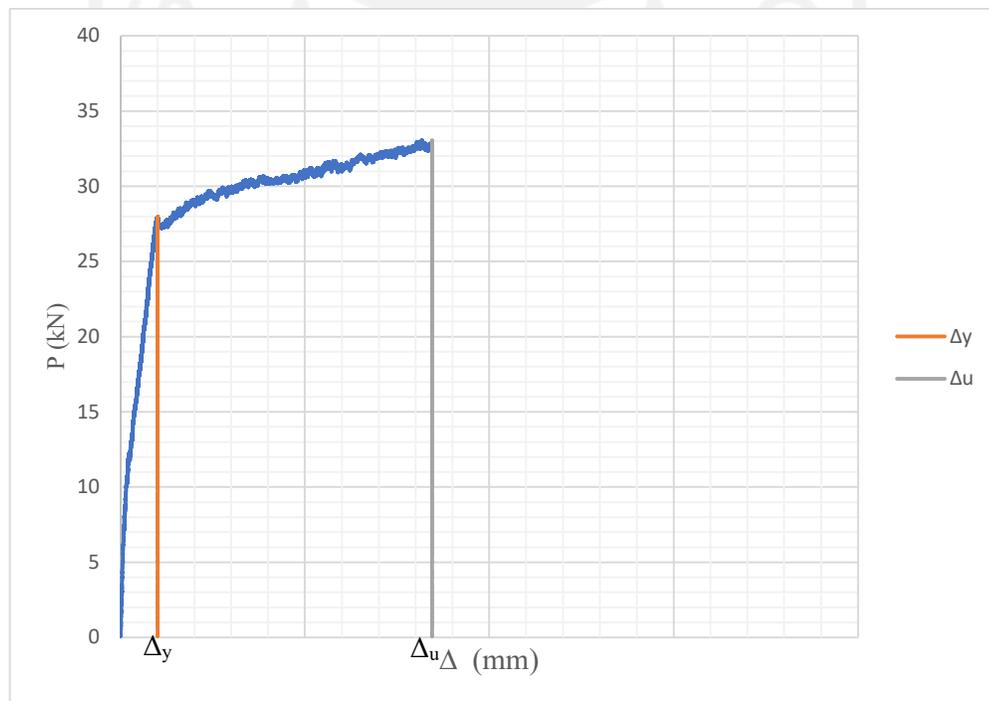
Adapun balok 1, 3, 4, 5 dan 6 menghasilkan nilai  $\phi$  yang belum kompatibel dengan SNI 2847-2019. Hal ini terjadi karena kuat tekan beton yang menggunakan semen jenis PCC memiliki nilai dengan deviasi yang cukup lebar (Yulianto, 2021) sehingga menghasilkan nilai ketidakpastian kuat lentu balok yang cukup lebar pula.

Dengan nilai kuat tekan beton yang berdeviasi cukup lebar, maka ketidakpastian kuat lentur dari struktur yang menggunakan beton tersebut juga lebih tinggi sehingga nilai faktor reduksinya lebih rendah dari SNI.

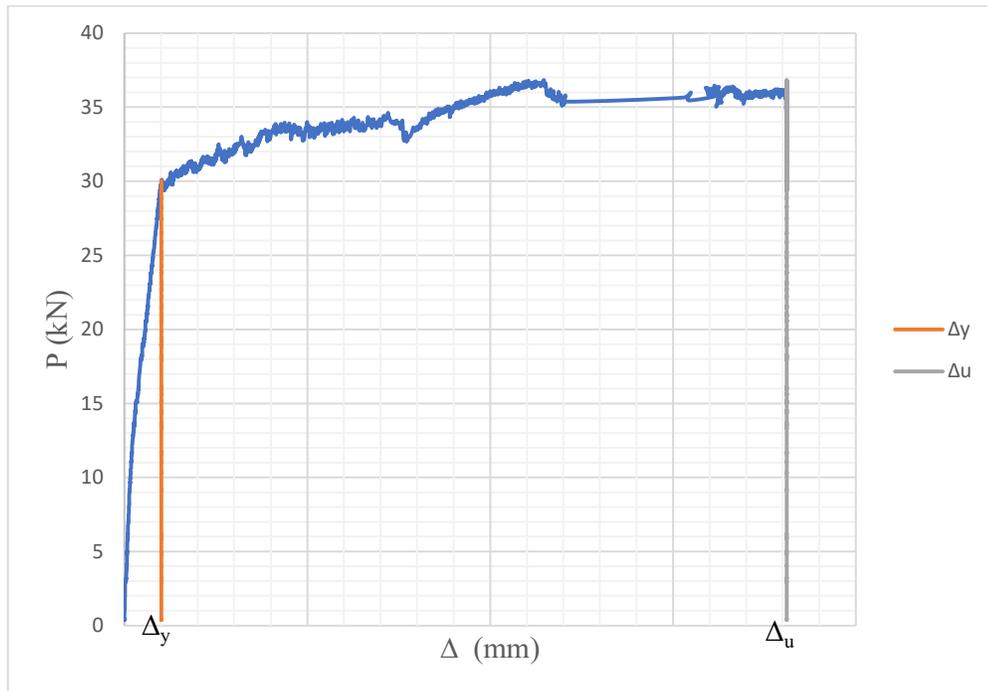
#### 5.4. Perhitungan Daktilitas Balok

##### 5.4.1. Daktilitas Simpangan

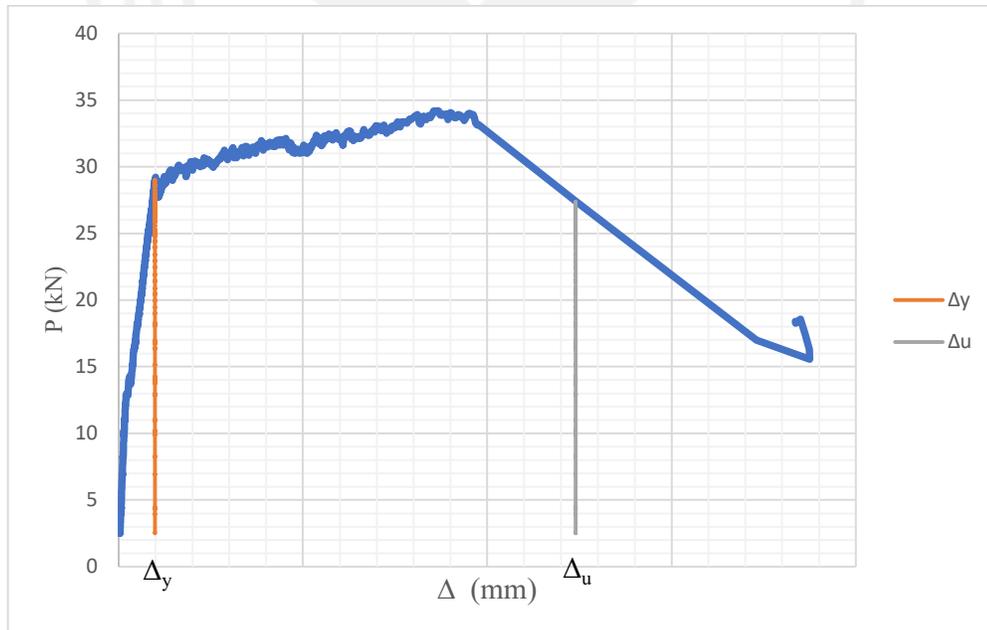
Daktilitas simpangan adalah rasio antara simpangan ultimit dengan simpangan saat leleh pertama (*First Yield*). Berdasarkan pengujian kuat lentur balok grafik hubungan  $P$  vs  $\Delta$  dari masing-masing balok adalah sebagai berikut.



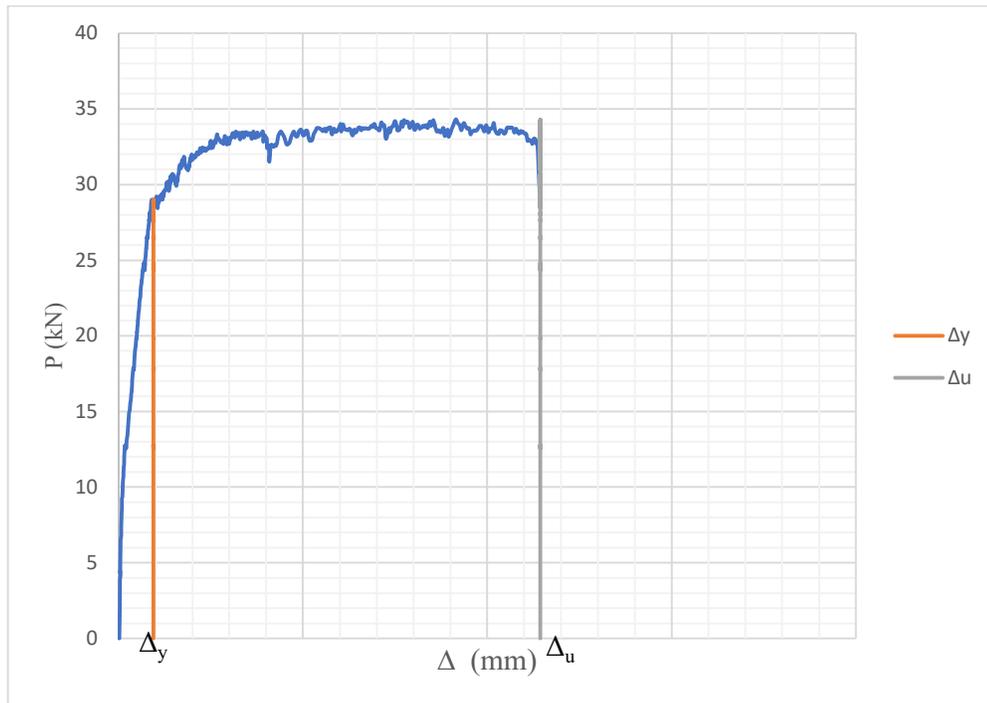
**Gambar 5. 14 Grafik Hubungan P vs Δ Balok 1**



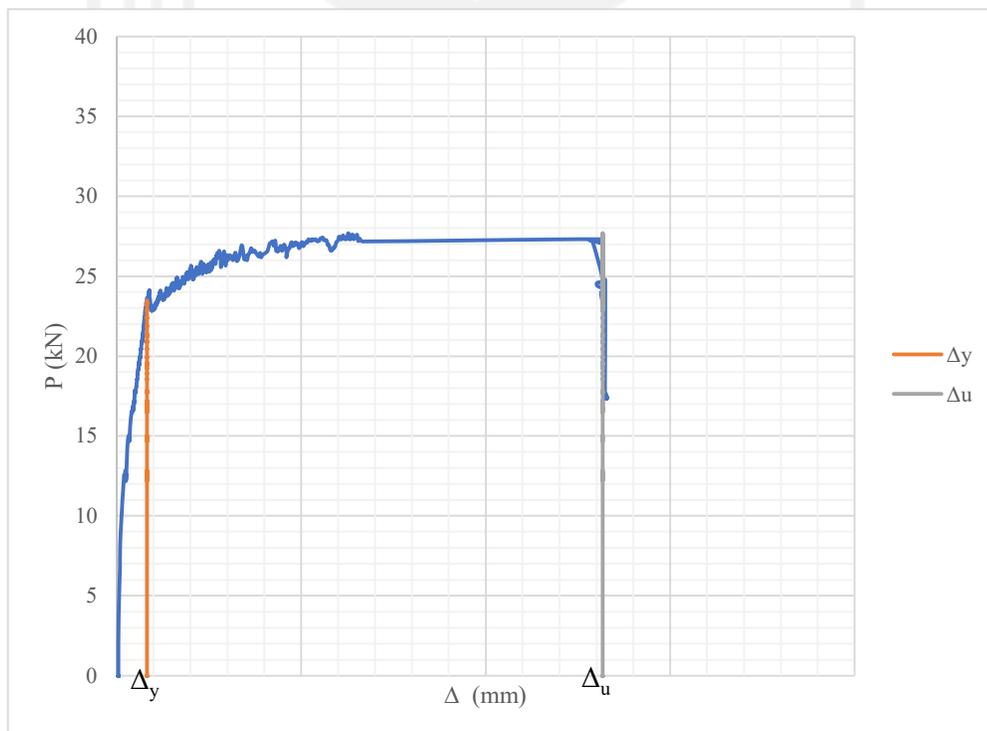
**Gambar 5. 15 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 3**



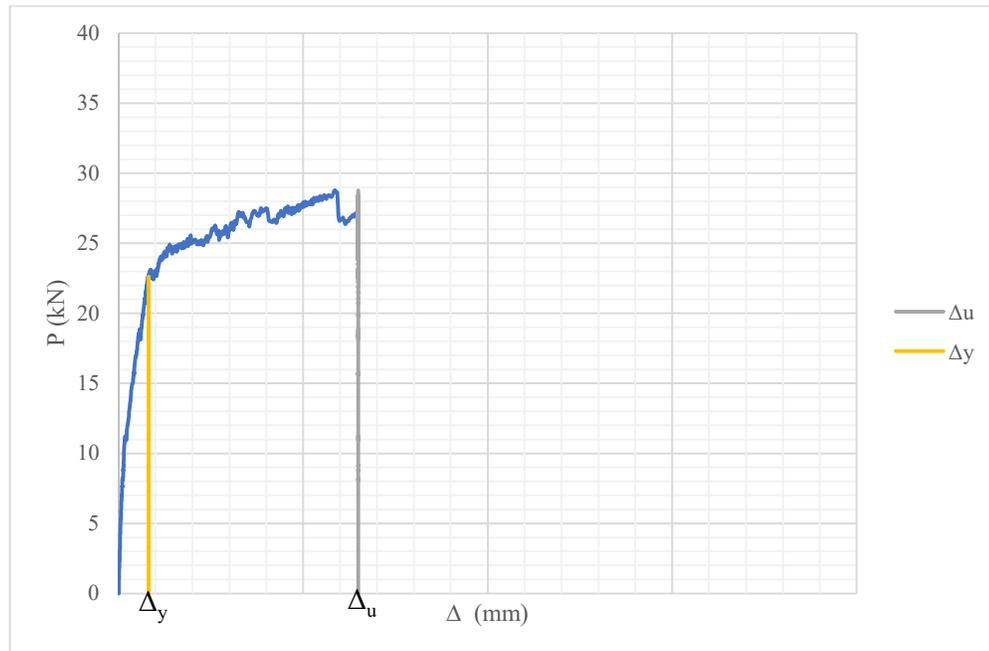
**Gambar 5. 16 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 4**



**Gambar 5. 17 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 6**



**Gambar 5. 18 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 8**



**Gambar 5. 19 Grafik Hubungan P vs  $\Delta$  Balok 9**

Berdasarkan Gambar 5. 14 hingga Gambar 5. 19 terdapat data simpangan ultimit dan simpangan *First Yield* pada grafik hubungan P vs  $\Delta$  sehingga dapat diperoleh daktilitas simpangan dari masing-masing balok. Daktilitas simpangan dapat dilihat pada contoh perhitungan balok 1 sebagai berikut.

$$\Delta_y = 9,97 \text{ mm}$$

$$\Delta_u = 84,44 \text{ mm}$$

$$\mu\Delta = \Delta_u / \Delta_y$$

$$\mu\Delta = 84,44 / 9,97$$

$$= 8,47$$

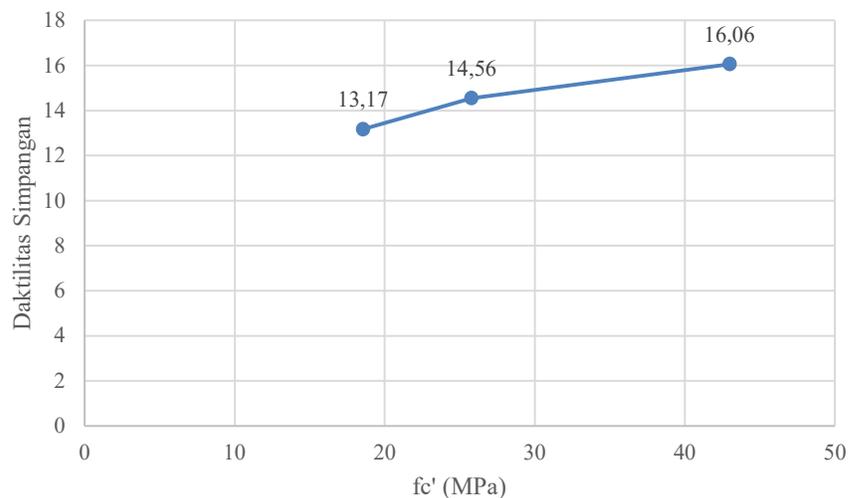
Perhitungan diatas diimplementasikan pada setiap balok dan diperoleh hasil rekapitulasi daktilitas simpangan tiap balok adalah sebagai berikut.

**Tabel 5. 9 Hasil Rekapitulasi Perhitungan Daktilitas Simpangan Balok**

Spesimen Balok	$f_c'$ (MPa)	$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_u$ (mm)	$\mu\Delta$
Balok 1	18,56	9,97	84,44	8,47
Balok 3	18,56	10,13	181,11	17,87
			$\mu\Delta$ rerata	13,17
Balok 4	25,79	9,87	124,00	12,56

Balok 5	25,79	9,55	181,45	19,00
Balok 6	25,79	9,45	114,40	12,11
			$\mu\Delta$ rerata	14,56
<del>Balok 7</del>	<del>42,99</del>	<del>13,60</del>	<del>24,95</del>	<del>1,83</del>
Balok 8	42,99	8,20	131,70	16,06
<del>Balok 9</del>	<del>42,99</del>	<del>8,10</del>	<del>64,95</del>	<del>8,02</del>
			$\mu\Delta$ rerata	16,06

Data dari balok 7 tidak digunakan dalam analisis daktilitas simpangan karena terjadinya gagal geser, sedangkan data lendutan balok 9 tidak akurat karena terjadinya tundaan pada saat pengujian lentur. Hasil perhitungan daktilitas simpangan diatas digambarkan dengan grafik daktilitas simpangan yang dapat dilihat sebagai berikut.



**Gambar 5. 20 Grafik Daktilitas Simpangan Balok**

Berdasarkan Gambar 5. 20 dapat diamati bahwa dengan campuran beton yang sama, penggantian semen holcim serbaguna ke holcim *powermax* dapat meningkatkan tingkat daktilitas simpangan balok beton bertulang sebesar 10,51%. Penambahan proposi jumlah semen *powermax* yang digunakan juga meningkatkan daktilitas simpangan balok beton bertulang sebesar 10,34%. Grafik diatas menunjukkan bahwa daktilitas simpangan meningkat seiring dengan tinggi mutu beton yang dihasilkan.

#### 5.4.2. Daktilitas Kurvatur

##### 1. Kurvatur *First Yield*

Nilai kurvatur leleh pertama merupakan sudut yang dibentuk oleh diagram regangan pada saat baja tulangan mengalami kondisi leleh pertama. Sudut tersebut dapat diperoleh dari hasil bagi antara regangan yang terjadi pada beton dan jarak garis netral terhadap permukaan beton. Berikut nilai regangan leleh baja secara teoritis.

$$\begin{aligned}\varepsilon_s &= (f_y / E_s) \\ &= (377 / 200000) \\ &= 0,001886\end{aligned}$$

Hasil perhitungan di atas menjadi titik acuan untuk nilai regangan baja percobaan yang berarti jika nilai regangan baja percobaan di atas 0,001886 maka bisa dipastikan baja sudah leleh. Jarak permukaan beton ke garis netral disimbolkan dengan nilai  $c$ . Secara teoritis nilai  $c$  dapat dihitung berdasarkan nilai  $k$  yang dikalikan dengan tinggi efektif balok. Berikut contoh perhitungan nilai  $c$  teoritis pada tiap variasi balok.

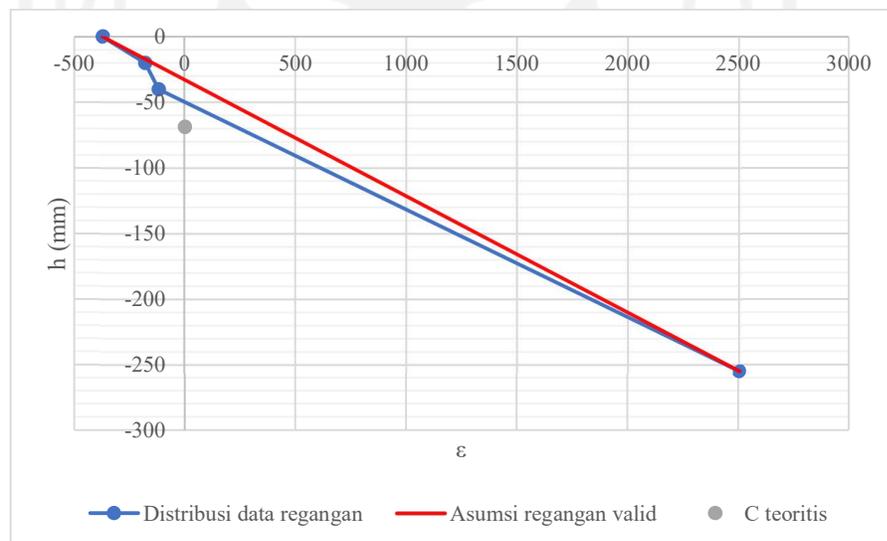
$$\begin{aligned}k &= (\rho^2 n^2 + 2 \rho n)^{1/2} - \rho n \\ \rho &= A_s / b.h \\ &= (3 \times 0,25\pi \times 9,8^2) / 150 \cdot 300 \\ &= 0,005 \\ n &= E_s / E_c \\ &= 200000 / 20160,92 \\ &= 9,92 \\ k &= (0,005^2 \times 9,92^2 + 2 \times 0,005 \times 9,92)^{1/2} - 0,005 \times 9,92 \\ &= 0,27 \\ c &= k \cdot h \\ &= 0,27 \times 255,1 \\ &= 68,85 \text{ mm}\end{aligned}$$

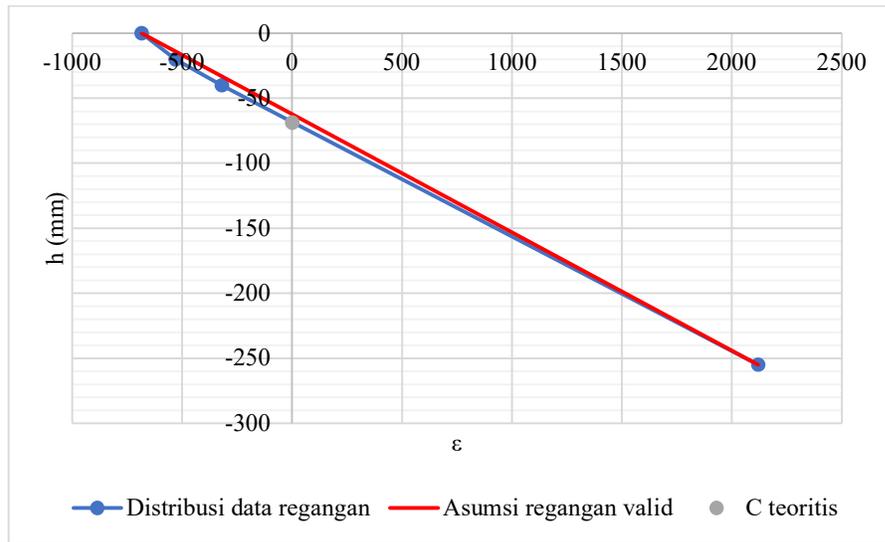
Berdasarkan perhitungan diatas diperoleh rekapitulasi nilai  $c$  teoritis dari masing-masing balok adalah sebagai berikut.

Tabel 5. 10 Rekapitulasi Nilai k Balok

Spesimen Balok	$\rho$	$E_c$ (MPa)	n	k	c teoritis (mm)
Balok 1	0,005	20160,92	9,92	0,270	68,85
Balok 3	0,005	20160,92	9,92	0,270	68,85
Balok 4	0,005	23242,12	8,61	0,254	64,81
Balok 5	0,005	23242,12	8,61	0,254	64,81
Balok 6	0,005	23242,12	8,61	0,254	64,81
Balok 7	0,005	30806,16	6,49	0,225	57,39
Balok 8	0,005	30806,16	6,49	0,225	57,39
Balok 9	0,005	30806,16	6,49	0,225	57,39

Berikut grafik pembacaan nilai c kondisi *First Yield* pada masing-masing balok.

Gambar 5. 21 Diagram Regangan Balok 1 Kondisi *First Yield*



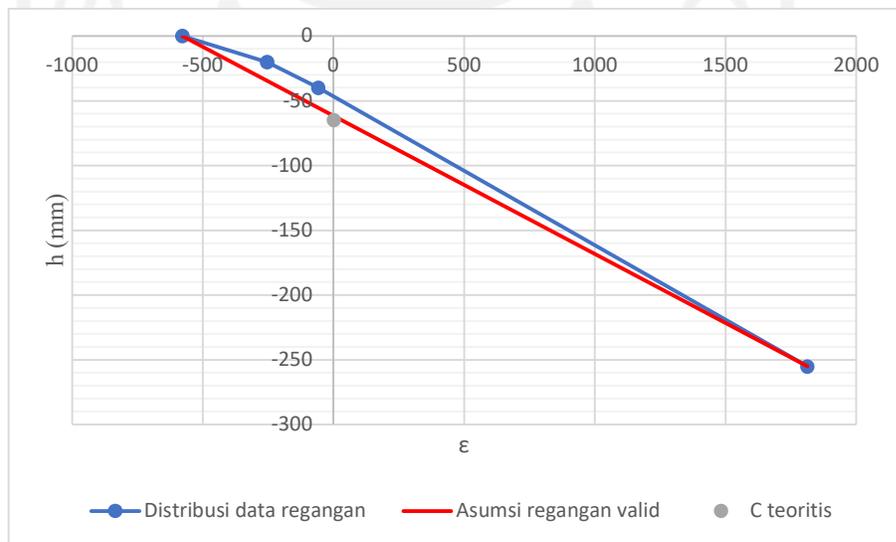
**Gambar 5. 22 Diagram Regangan Balok 3 Kondisi *First Yield***



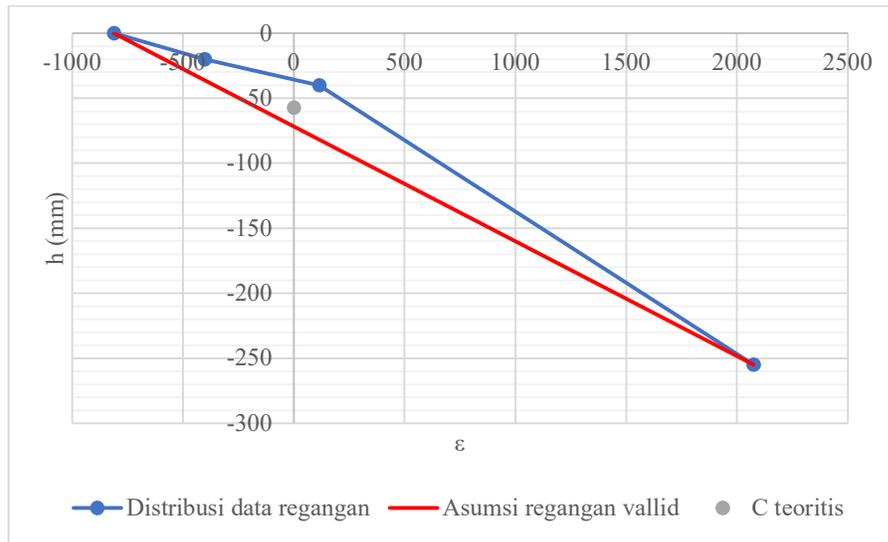
**Gambar 5. 23 Diagram Regangan Balok 4 Kondisi *First Yield***



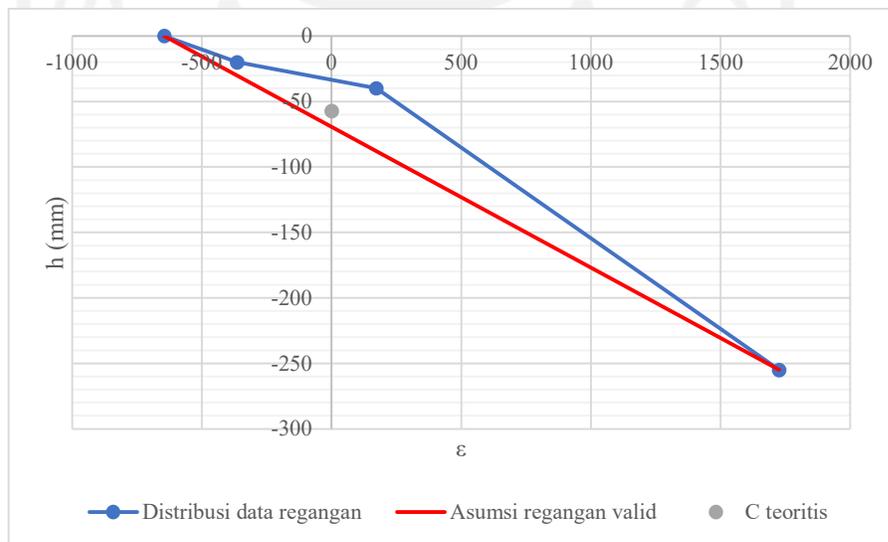
**Gambar 5. 24 Diagram Regangan Balok 5 Kondisi *First Yield***



**Gambar 5. 25 Diagram Regangan Balok 6 Kondisi *First Yield***



**Gambar 5. 26 Diagram Regangan Balok 8 Kondisi *First Yield***



**Gambar 5. 27 Diagram Regangan Balok 9 Kondisi *First Yield***

Berdasarkan Gambar 5. 21 hingga Gambar 5. 27 diperoleh rekapitulasi nilai  $c$  *First Yield* sebagai berikut.

Berikut contoh perhitungan kurvatur leleh pertama pada balok 1.

$$\phi_y = \varepsilon_c / c_{\text{first yield}}$$

$$\varepsilon_c = 683,65$$

$$c_{\text{first yield}} = 67 \text{ mm}$$

$$\phi_y = 683,65 / 67$$

$$= 0,00001$$

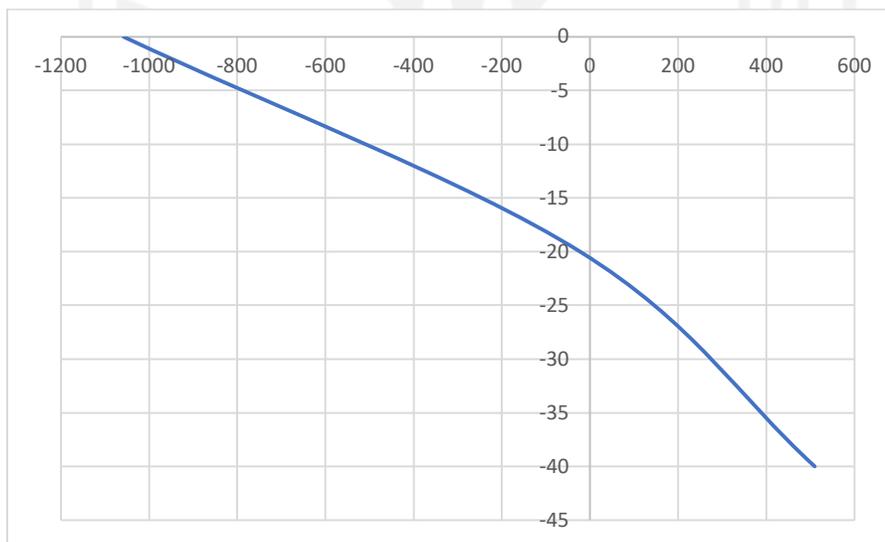
Berdasarkan contoh perhitungan di atas yang diterapkan pada semua sampel didapatkan rekapitulasi sebagai berikut

Tabel 5. 11 Rekapitulasi Kurvatur *First Yield*

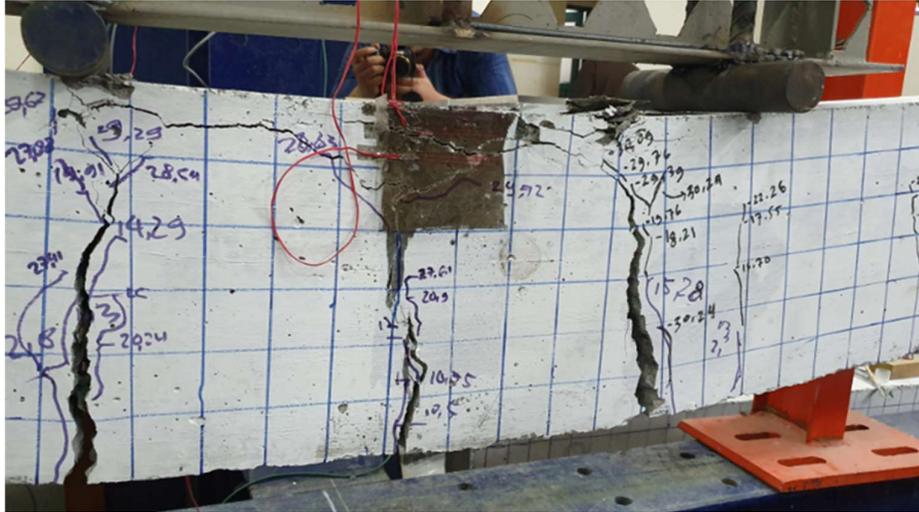
Spesimen Balok	$\epsilon_c$	c First Yield (mm)	$\phi_y$
Balok 1	369,23060	34,000	0,00001
Balok 3	683,65350	67,000	0,00001
Balok 4	887,50000	70,000	0,00001
Balok 5	526,90000	55,000	0,00001
Balok 6	577,90000	64,750	0,00001
Balok 8	810,60000	72,000	0,00001
Balok 9	644,20000	70,000	0,00001

## 2. Kurvatur Ultimit

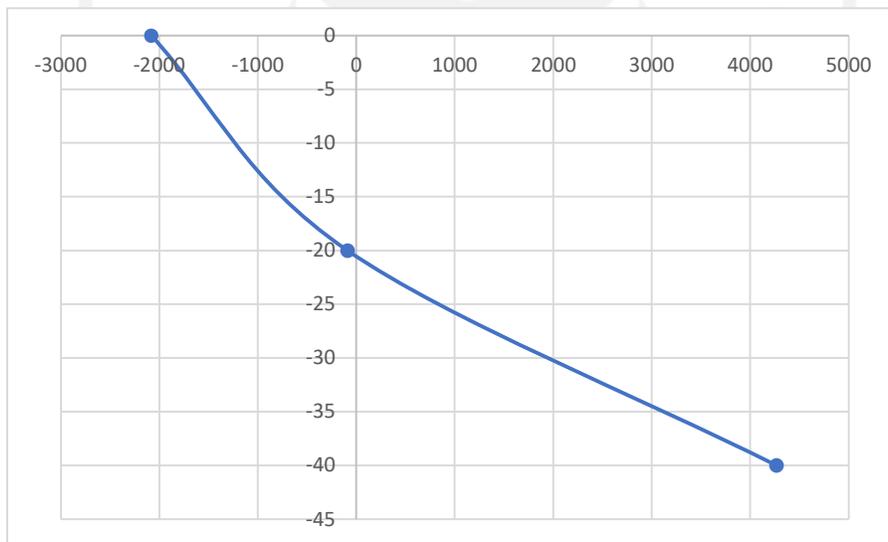
Kurvatur ultimit didapat berdasarkan hasil bagi antara regangan beton pada kondisi ultimit dengan nilai c. Berikut nilai c dan kondisi dari masing-masing balok setelah pengujian.



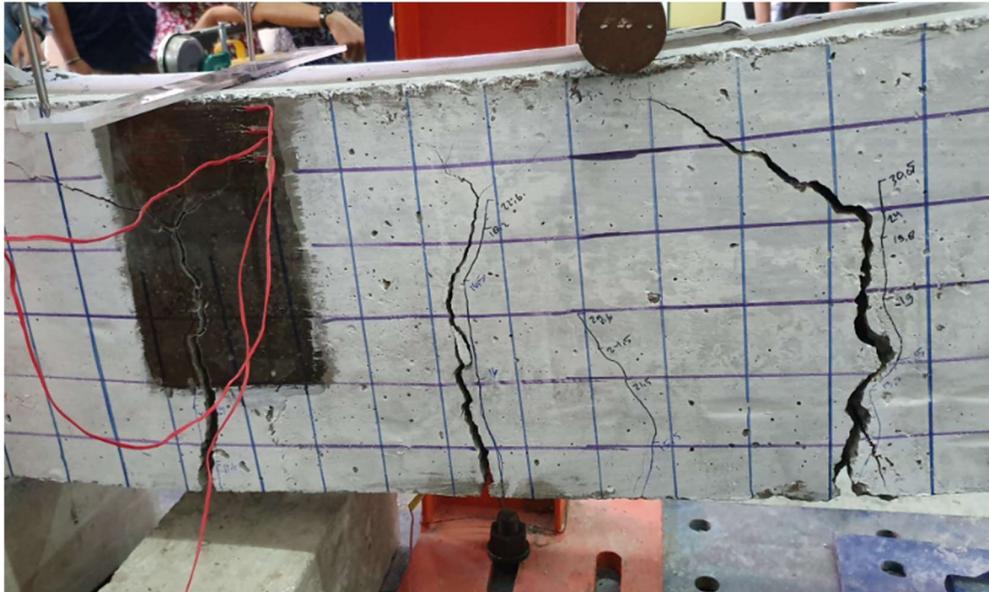
Gambar 5. 28 Diagram Regangan Beton Balok 1 Kondisi Ultimit



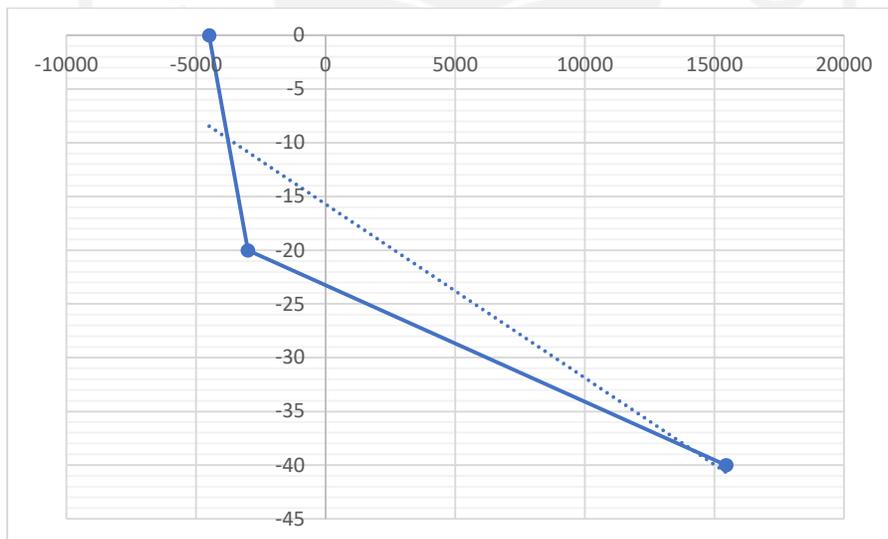
**Gambar 5. 29 Kondisi Balok 1 Setelah Uji Lentur**



**Gambar 5. 30 Diagram Regangan Beton Balok 3 Kondisi Ultimit**



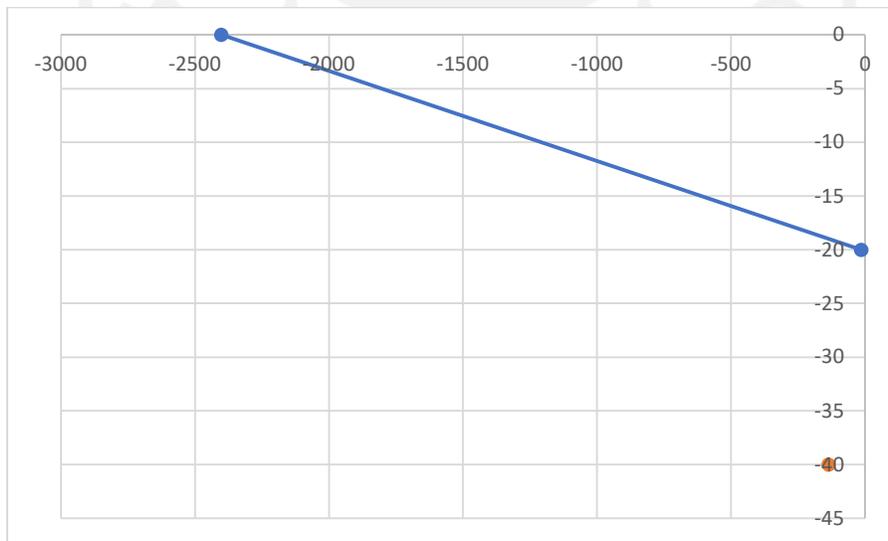
**Gambar 5. 31 Kondisi Balok 3 Setelah Uji Lentur**



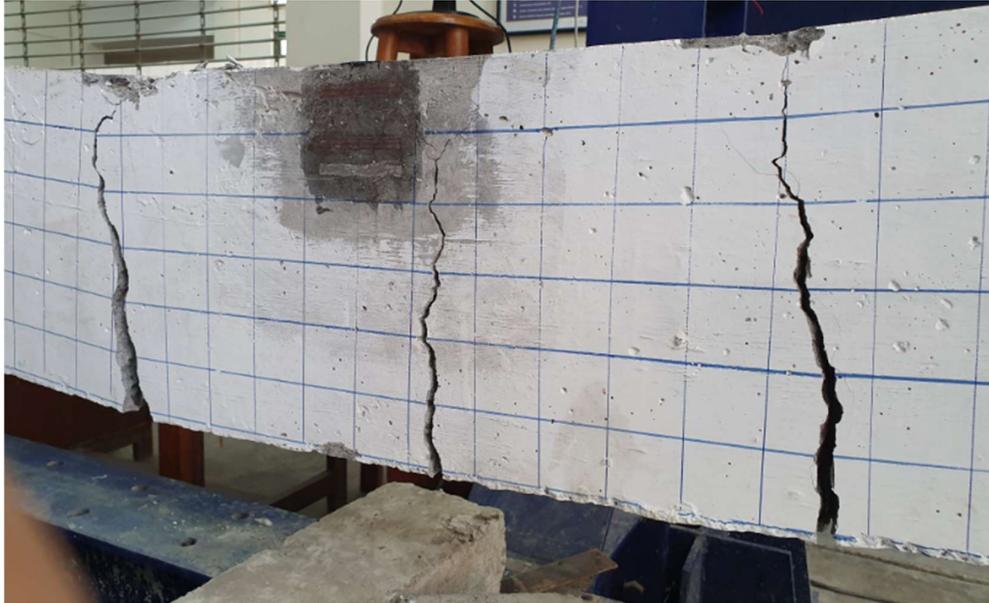
**Gambar 5. 32 Diagram Regangan Beton Balok 4 Kondisi Ultimit**



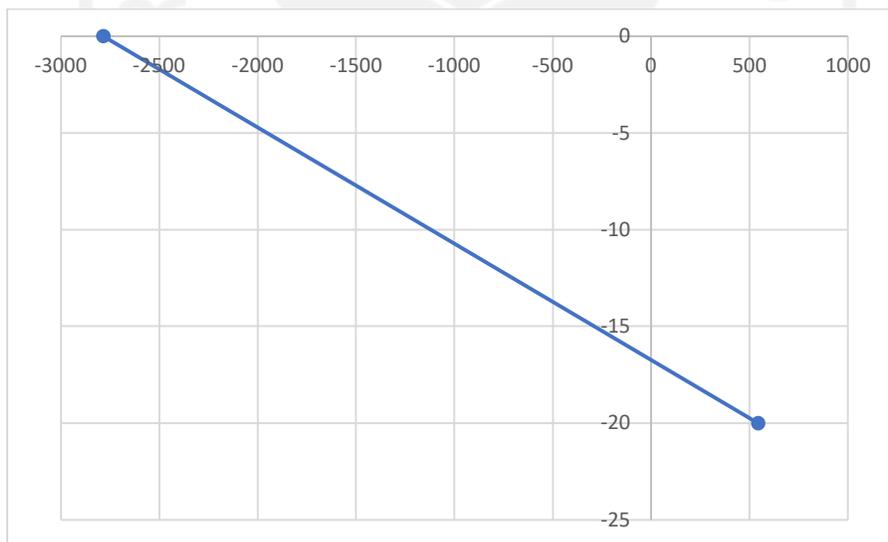
**Gambar 5. 33 Kondisi Balok 4 Setelah Uji Lentur**



**Gambar 5. 34 Diagram Regangan Beton Balok 6 Kondisi Ultimit**



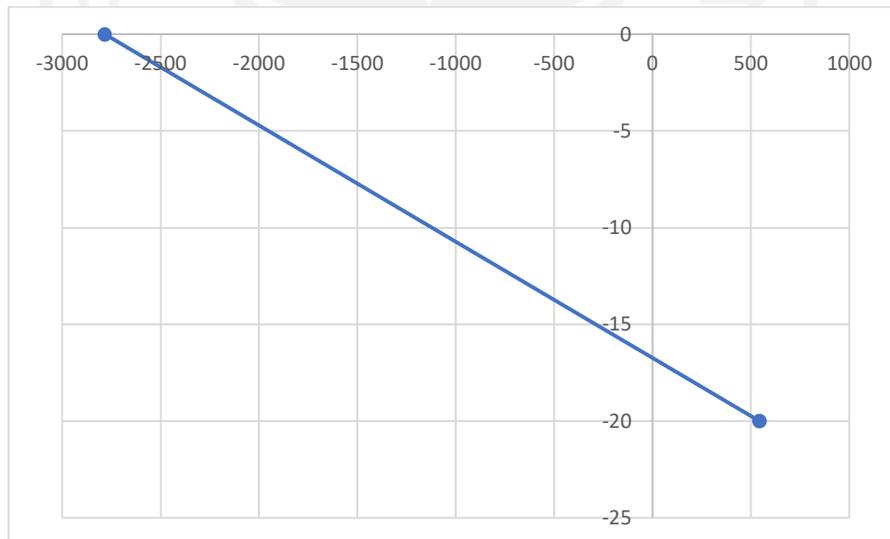
**Gambar 5. 35 Kondisi Balok 6 Setelah Uji Lentur**



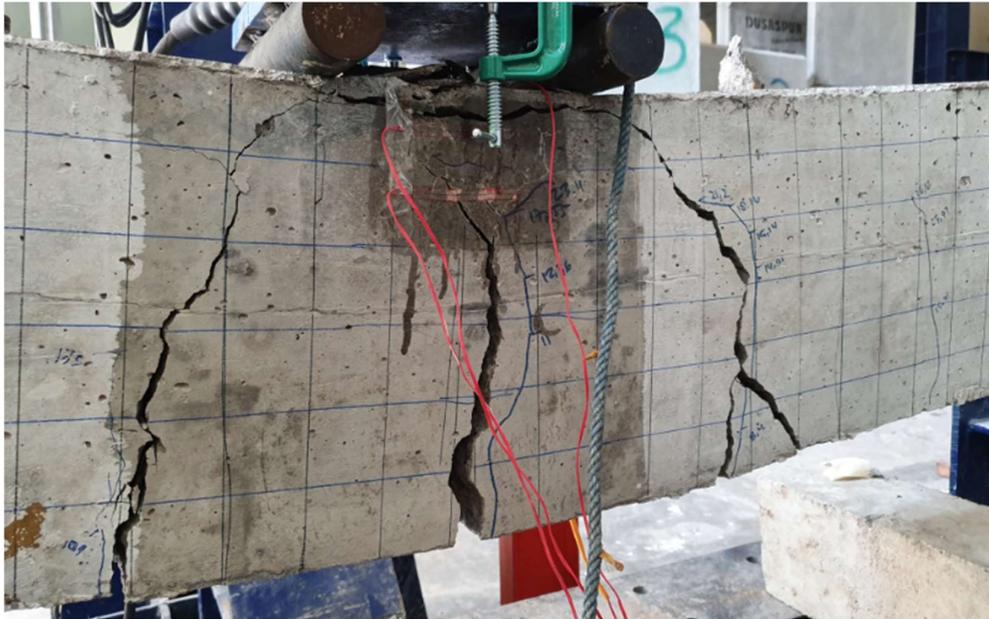
**Gambar 5. 36 Diagram Regangan Beton Balok 8 Kondisi Ultimit**



**Gambar 5. 37 Kondisi Balok 8 Setelah Uji Lentur**



**Gambar 5. 38 Diagram Regangan Beton Balok 9 Kondisi Ultimit**



**Gambar 5. 39 Kondisi Balok 9 Setelah Uji Lentur**

Beberapa sampel menghasilkan nilai yang tidak masuk akal. Hal tersebut disebabkan oleh terjadinya retakan pada daerah *strainingauge* beton. Retakan tersebut mengakibatkan pembacaan regangan pada alat datalogger terlalu signifikan. Pendekatan regresi dilakukan untuk mendapatkan hasil nilai  $c$  percobaan yang lebih masuk akal. Berdasarkan grafik dan gambar yang ditampilkan pada Gambar 5. 28 hingga Gambar 5. 39 serta pendekatan yang dilakukan dapat diperoleh nilai kurvatur ultimit dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}\phi_u &= \varepsilon_c / c \\ &= 0,00208 / 20,9 \\ &= 0,00010\end{aligned}$$

Rekapitulasi perhitungan di atas dapat diamati pada tabel berikut.

**Tabel 5. 12 Rekapitulasi Kurvatur Ultimit**

Spesimen Balok	C Percobaan Ult (mm)	$\varepsilon_c$ Percobaan	$\phi_u$
Balok 1	20,4	0,00106	0,00005
Balok 3	20,9	0,00208	0,00010
Balok 4	15,8	0,00450	0,00028
Balok 5	39,5	0,00129	0,00003

Balok 6	20,1	0,00240	0,00012
Balok 8	16,7	0,00278	0,00017
Balok 9	20,1	0,00310	0,00015

Berdasarkan regangan beton yang diperoleh dari pembacaan *straingauge*, balok 1, 4 dan 5 menghasilkan regangan beton yang tidak rasional. Secara teoritis besar regangan beton yang seharusnya adalah 0,003. Oleh karena itu, data kurvatur ultimit dari balok 1, 4 dan 5 tidak valid dan tidak digunakan dalam perhitungan daktilitas kurvatur.

### 3. Daktilitas Kurvatur

Nilai daktilitas kurvatur adalah rasio antara kurvatur ultimit dengan kurvatur leleh pertama yang telah didapat pada perhitungan di atas.

Berikut contoh perhitungan daktilitas kurvatur balok 3

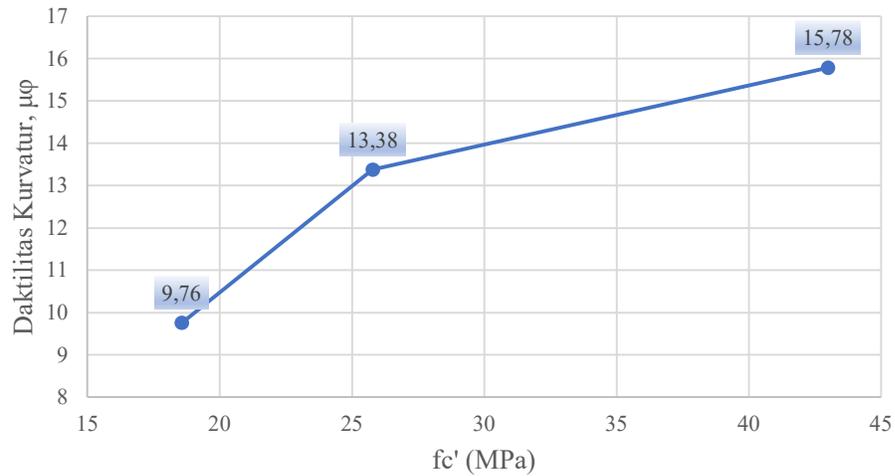
$$\begin{aligned}\mu\phi &= \phi_u / \phi_y \\ &= 0,00010 / 0,00001 \\ &= 9,76\end{aligned}$$

Berdasarkan contoh perhitungan di atas yang diterapkan pada semua sampel didapatkan rekapitulasi sebagai berikut

**Tabel 5. 13 Tabel Rekapitulasi Daktilitas Kurvatur Balok**

Spesimen Balok	$\phi_y$	$\phi_u$	$\mu\phi$
Balok 1	0,00001	0,00005	4,77
Balok 3	0,00001	0,00010	9,76
Balok 4	0,00001	0,00028	22,44
Balok 5	0,00001	0,00003	3,40
Balok 6	0,00001	0,00012	13,38
Balok 8	0,00001	0,00017	14,78
Balok 9	0,00001	0,00015	16,79

Berdasarkan data daktilitas kurvatur diatas maka grafik hubungan antara daktilitas kurvatur dengan  $f_c'$  dari hasil percobaan yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.



**Gambar 5. 40 Grafik Hubungan Antara Daktilitas Kurvatur dengan Fc'**

Berdasarkan Gambar 5. 40 dapat diamati bahwa dengan campuran beton yang sama, penggantian semen holcim serbaguna ke holcim *powermax* dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang sebesar 37,07%. Penambahan jumlah semen *powermax* yang digunakan juga dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang sebesar 18%. Hasil perhitungan diatas sesuai dengan teori yang mengatakan bahwa tegangan desak beton mempunyai pengaruh linier terhadap daktilitas lengkung (Widodo,2012). Nilai daktilitas kurvatur akan semakin besar berdasarkan pada nilai  $fc'$  yang semakin besar.

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan dari Bab V sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan bahwa:

1. Penggantian semen *powermax* terhadap semen holcim serbaguna dengan  $f_c'$  rencana yang sama dapat menghasilkan tingkat kekakuan beton yang lebih tinggi sebesar 15,3%. Sedangkan menambahkan proporsi semen dengan jumlah 11,62% dapat meningkatkan nilai kekakuan beton sebesar 46,2%.
2. Penggantian semen *powermax* terhadap semen holcim serbaguna dengan  $f_c'$  rencana yang sama menghasilkan nilai kuat lentur balok beton bertulang yang lebih kecil 2,07%. Akan tetapi menambahkan proporsi semen dengan jumlah 11,62% dapat meningkatkan nilai kuat lentur balok beton bertulang sebesar 18,98%. Berdasarkan nilai faktor reduksi yang diperoleh, hanya spesimen balok dengan  $f_c'$  rencana 25 MPa yang kompatibel dengan standar SNI (nilai  $\phi \geq 0,9$ ).
3. Penggantian semen *powermax* terhadap semen holcim serbaguna dengan  $f_c'$  rencana yang sama dapat meningkatkan tingkat daktilitas simpangan balok beton bertulang sebesar 10,51%. Sedangkan menambahkan proporsi semen dengan jumlah 11,62% dapat meningkatkan daktilitas simpangan balok beton bertulang sebesar 10,34%.
4. Penggantian semen *powermax* terhadap semen holcim serbaguna dengan  $f_c'$  rencana yang sama dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang sebesar 37,07%. Sedangkan menambahkan proporsi semen dengan jumlah 11,62% dapat meningkatkan daktilitas kurvatur balok beton bertulang sebesar 18%.

#### 6.2. Saran

Berikut beberapa saran yang dapat diberikan sebagai acuan pengembangan penelitian selanjutnya.

1. Waktu pencatatan sebaiknya dilakukan per detik.

2. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan jenis dan varian semen yang berbeda.
3. Pengujian dapat dilakukan pada umur kurang dari atau lebih dari 28 hari.
4. Penelitian selanjutnya dapat meneliti dengan kuat tekan beton yang berbeda.
5. Penelitian dapat dilakukan dengan ukuran sampel yang berbeda.
6. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan jumlah dan ukuran yang berbeda.
7. Penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan menambahkan *additive* pada campuran beton.



## DAFTAR PUSTAKA

- BSN. (2000). *Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal*. Jakarta: BSN.
- BSN. (2004). *Semen Portland Komposit SNI 7064-2004*. Jakarta: BSN.
- BSN. (2019). *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung SNI 2847-2019*. Jakarta: BSN.
- Nur, O. F. (2009). Analisa Pengaruh Penambahan Tulangan Tekan Terhadap Daktilitas Kurfatur Balok Beton Bertulang. *Jurnal Rekayasa Sipil*.
- Nurlina, S., Suseno, H., Hidayat, M. T., & Pratama, I. M. (2016). PERBANDINGAN DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN PERKUATAN CFRP DAN GFRP. *REKAYASA SIPIL*, 10(1).
- Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*. New York: John Wiley & Sons.
- Pawirodikromo, W. (2012). *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Priastiwi, Y. A., Imran, I., & Nurojin, N. (2016). *PENGARUH PEMBERIAN KEKANGAN PADA ZONA TEKAN TERHADAP PENINGKATAN DAKTILITAS BALOK DI LOKASI SENDI PLASTIS AKIBAT BEBAN MONOTONIK DAN SIKLIK*. Semarang: Doctor Program in Civil Engineering.
- Tavio, Purwono, R., & Rosyidah, A. (2009). PENINGKATAN DAYA DUKUNG DAN DAKTILITAS BALOK BETON BERTULANG DENGAN MENGGUNAKAN PERKUATAN CFRP (CARBON FIBER REINFORCED POLYMER). *dinamika TEKNIK SIPIL*, 9(1), 9-18.
- Yulianto, H. (2021). Komparasi Kapasitas Nominal Lentur Pelat Komposit Beton-Dek Baja Antara Metode Ultimit, Tegangan Kerja dan SDI ANSI 2017. *Teknisia*, XIV(1), 1-10.

Yulianto, H., Mustofa, M., & Yahya, Z. A. (2020). Karakteristik Beton Umur 28 Hari dengan Varian Portland Podzolan Cement. Yogyakarta: Jurusan Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.





# LAMPIRAN

## Lampiran 1 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 1

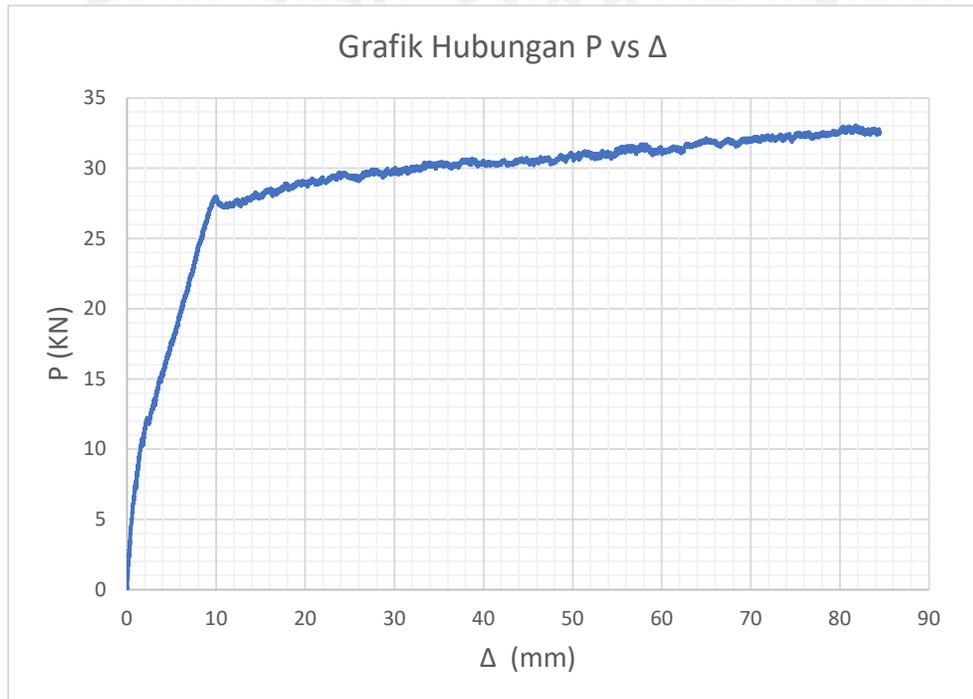


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 1



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

## Lampiran 2 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 3

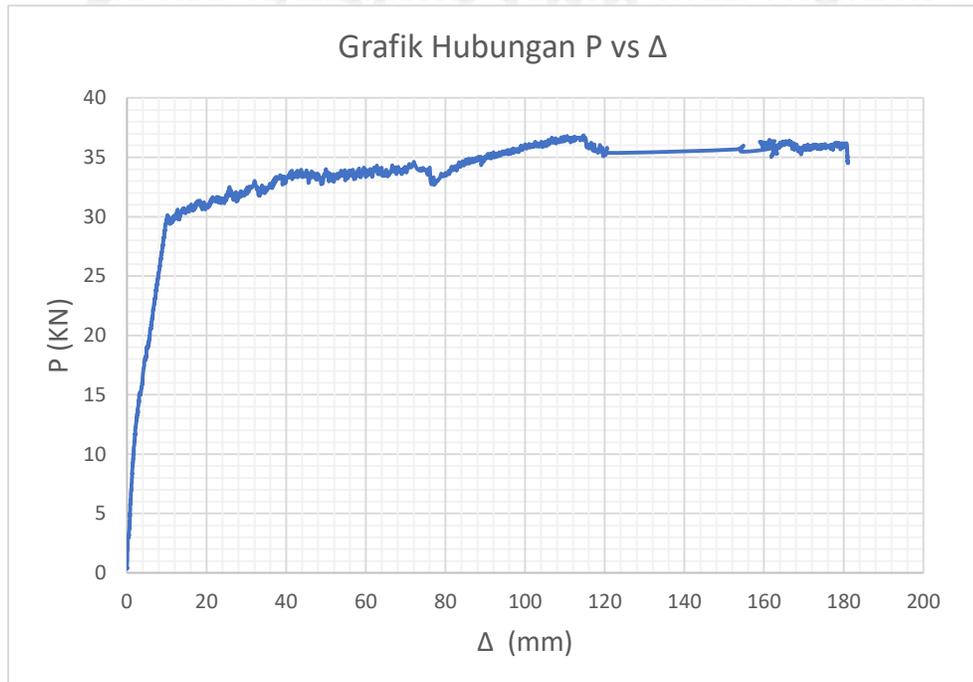


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 3



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

## Lampiran 3 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 4

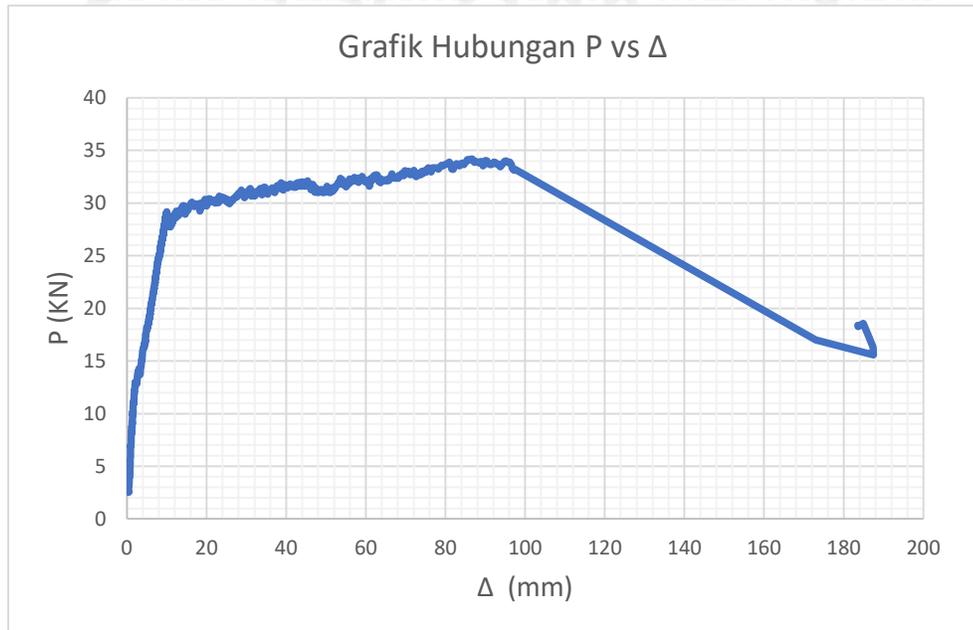


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 4



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

Lampiran 4 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 5

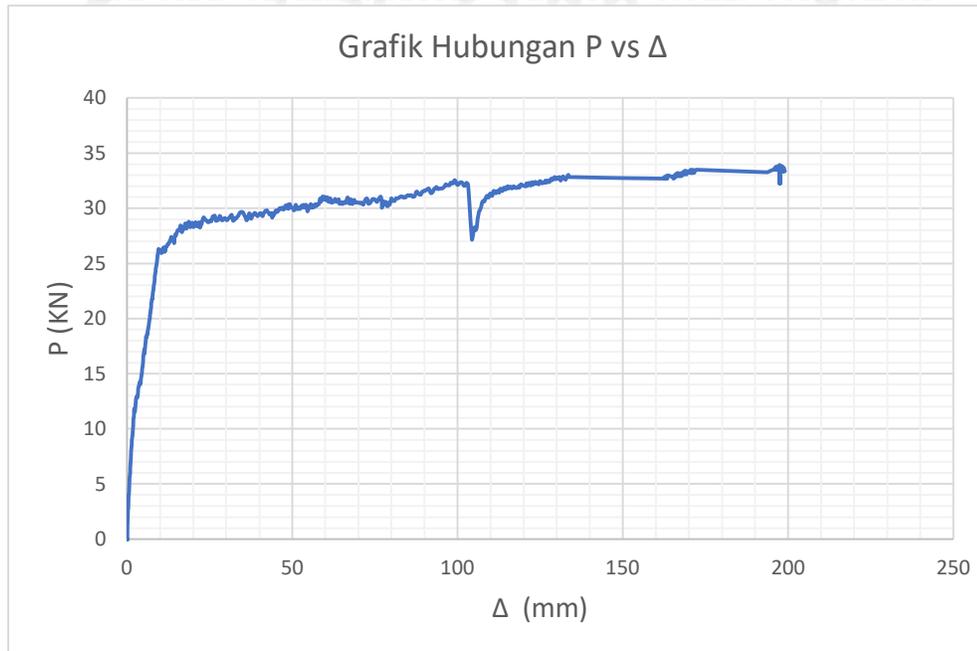


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 5



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

Lampiran 5 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 6

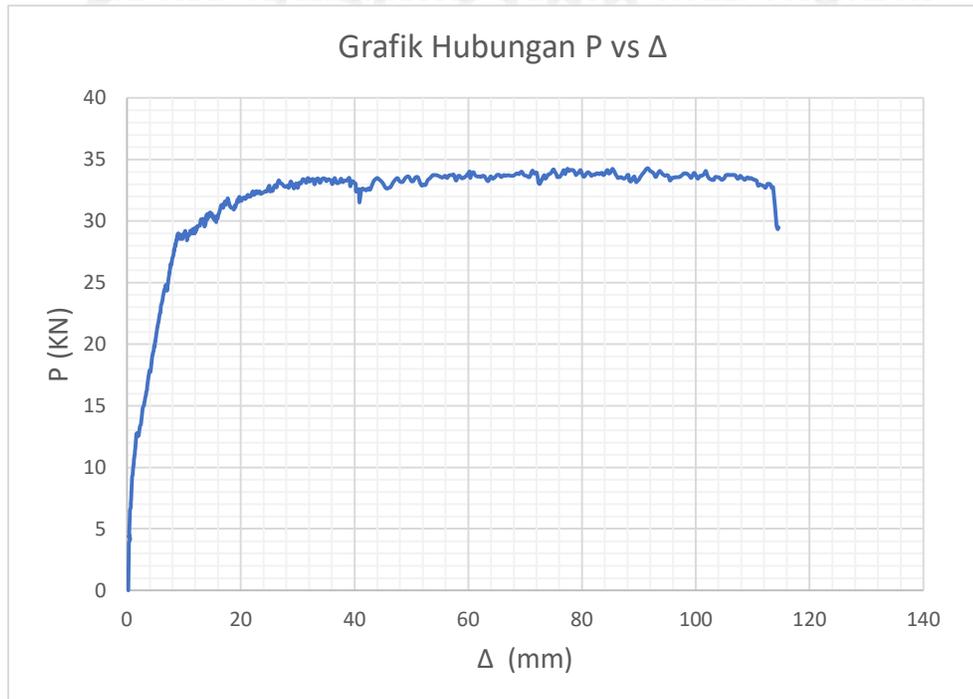


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 6



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

## Lampiran 6 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 7

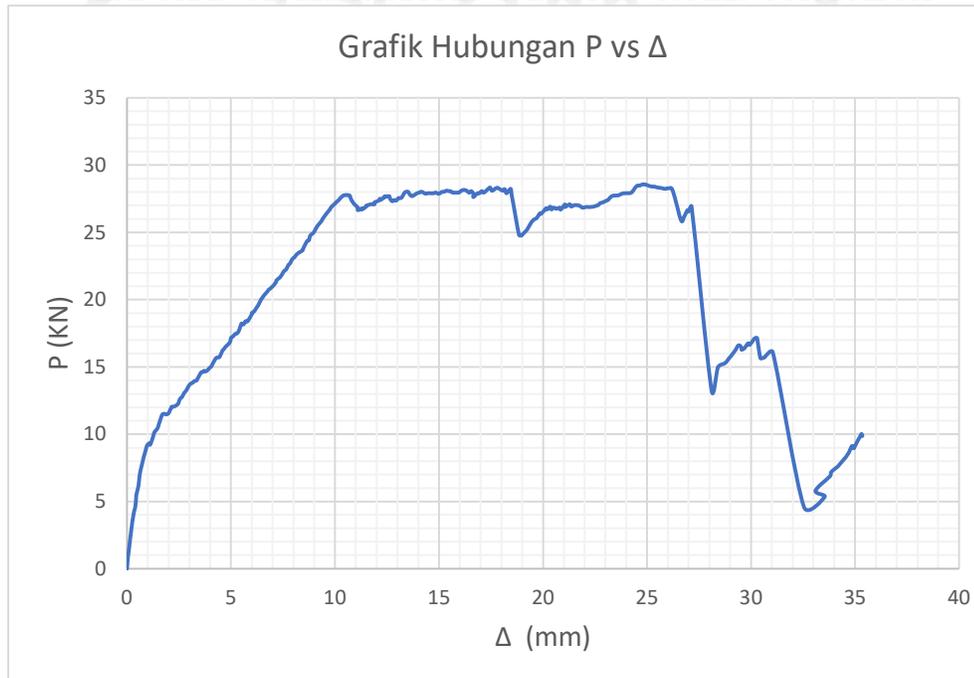


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 7



Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

## Lampiran 7 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 8

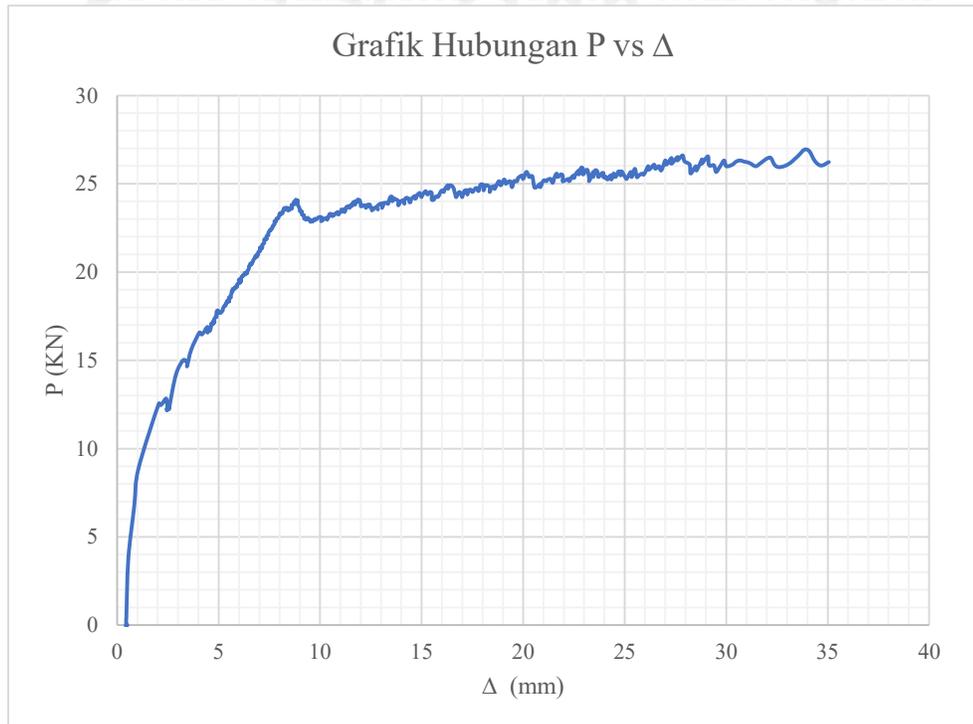


LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 8

Grafik Hubungan P vs  $\Delta$ 

Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)

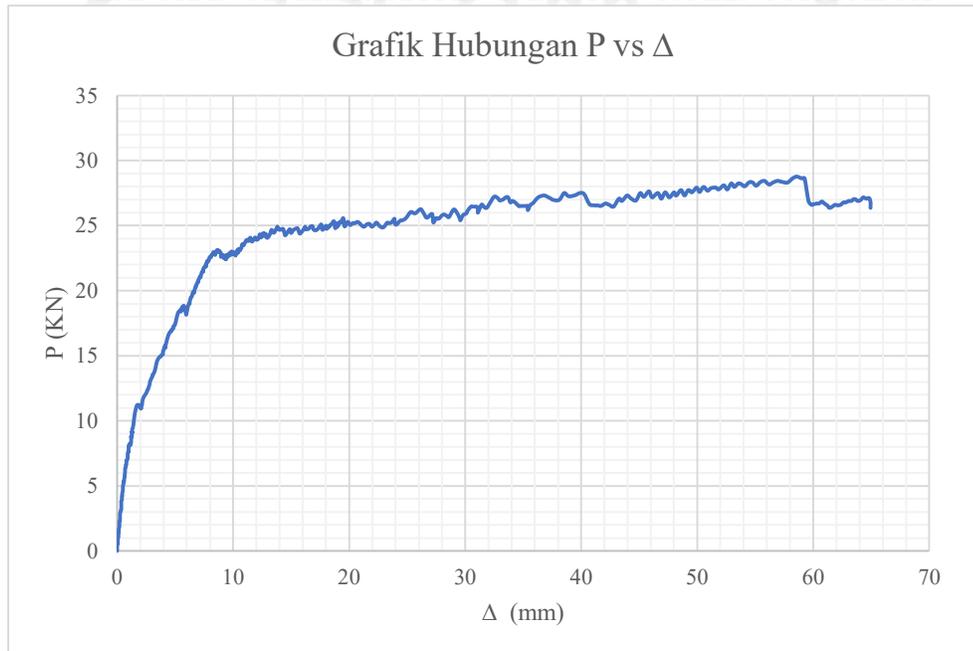
## Lampiran 8 Data Laporan Sementara Uji Lentur Balok 9



LAB. STRUKTUR DAN MEKANIKA REKAYASA  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

Jl. Kaliurang KM 14,4 Telp. (0274) 8905042, 895707 fax 895330  
Yogyakarta 55584

## LAPORAN SEMENTARA PENGAMATAN UJI LENTUR BALOK 9

Grafik Hubungan P vs  $\Delta$ 

Diperiksa Oleh  
Kepala Laboran

Diperiksa Oleh  
Laboran

(Hariadi Yulianto, S.T., M.Eng.)

(Muchamad Amirul Yachya, S.Pd.)