

## LAPORAN PENELITIAN

# PERILAKU LENTUR KOLOM PENDEK BETON BERTULANG BERONGGA

*(Flexural Behavior of Hollow RC Short Columns)*

18 FEB 2008

0800175

Oleh :

Ir. Wisnumurti, MT  
Achfas Zacoeb, ST  
Ir. Siti Nurlina, MT

Dilaksanakan atas biaya Dana Pembinaan Pendidikan (DPP)  
Universitas Brawijaya Malang,

Berdasarkan Surat Perjanjian No.: 49/J.10.1.31/PG/2003 tanggal 17 Maret 2003



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
MALANG  
2003**

HALAMAN PENGESAHAN


1. a. Judul Penelitian : **PERILAKU LENTUR KOLOM PENDEK BETON BERTULANG BERLUBANG (*Flexural Behavior of Hollow RC Short Columns*)**
- b. Bidang Ilmu : Teknik Sipil
- c. Kategori Penelitian : I
2. Ketua Peneliti :
  - a. Nama Lengkap dan Gelar : Ir. Wisnumurti, MT
  - b. Jenis Kelamin : Laki-laki
  - c. Golongan pangkat/NIP : Penata IIIId/NIP. 131 879 046
  - d. Jabatan Fungsional : Lektor
  - e. Jabatan Struktural : Sekretaris Jurusan Teknik Sipil
  - f. Fakultas/Jurusan : Teknik/Teknik Sipil
  - g. Perguruan Tinggi : Universitas Brawijaya, Malang
3. Susunan Tim Peneliti Anggota : 2 (dua) orang
4. Lokasi Penelitian : Laboratorium Struktur UGM Yogyakarta  
Laboratorium Struktur Unibraw Malang
5. Lama Penelitian : 6 (enam) bulan
6. Biaya Penelitian : Rp. 2.996,000,-  
(Dua juta sembilan ratus sembilan puluh enam ribu rupiah)

Malang, 9 Oktober 2003

Mengetahui,  
Ketua BPP FT Unibraw

Kepala Proyek Penelitian

  
Dr. Ing. Ir. Arief Rachmansyah  
NIP. 132 059 302

  
Ir. Wisnumurti, MT  
NIP. 131 879 046

Mengetahui  
Dekan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya



  
Prof. Dr. Ir. Suhardjono, M.Pd., Dipl.HE  
NIP. 130 350 752

## RINGKASAN

PERILAKU LENTUR KOLOM PENDEK BETON BERTULANG BERONGGA  
(Wisnumurti, Achfas Zacoeb, Siti Nurlina : 2003 , 38 halaman)

Lubang akibat pemasangan pipa untuk keperluan instalasi (air hujan, sanitasi, listrik dan lain-lain) dapat berpengaruh pada degradasi kekuatan beton dan pola keruntuhan struktur seperti kolom. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan, kekakuan, daktilitas, pola retak dan model keruntuhan kolom pendek beton bertulang penampang persegi berongga akibat beban tekan aksial eksentris.

Dalam penelitian ini diuji 5 buah kolom masing-masing berpenampang persegi, dengan ukuran tinggi 150 mm, lebar 150 mm dan panjang 800 mm. Pengujian dilakukan dengan pemberian gaya tekan aksial eksentris dengan eksentrisitas beban 60 mm ( $e = 0,40 h$ ). Kuat tekan beton rata-rata yang digunakan  $f_c' = 34,52$  MPa. Digunakan 1 buah benda uji kolom solid sebagai kontrol dan 4 buah benda uji kolom berongga. Rasio lubang yang digunakan mulai dari 3,63 % sampai dengan 20,28 % yang dibuat dari pipa PVC yang diletakkan di tengah penampang kolom. Untuk tulangan baja longitudinal digunakan P12 dengan tegangan leleh rata-rata  $f_y = 323,06$  MPa dan modulus elastisitas rata-rata  $E = 257411,49$  MPa sebanyak 4 buah yang dipasang simetris dikedua sisi tampang kolom dan sebagai tulangan sengkang digunakan P6 dengan jarak 100 mm.

Kolom berongga dengan eksentrisitas beban 60 mm menunjukkan penurunan kapasitas maksimum dan kekakuan dialami kolom dengan rasio lubang 20,28 % sebesar 11,90 % dan 53,88 % relatif terhadap kolom solid. Peningkatan daktilitas maksimum dialami kolom berongga dengan rasio lubang 20,28 % dan eksentrisitas beban 60 mm sebesar 16,38 % relatif terhadap kolom solid. Model keruntuhan kolom solid dan berongga dengan eksentrisitas beban 60 mm, menunjukkan pola yang sama yaitu keruntuhan tekan. Retak pada kolom solid maupun berongga umumnya memperlihatkan pola retak yang searah tulangan sengkang pada sisi tarik dan *spalling* pada sisi tekan.

**Kata kunci** : kapasitas lentur, kolom pendek, rongga, eksentrisitas, model keruntuhan.

(DPP, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Kontrak Nomor : 49/J.10.1.31/PG/2003, Tanggal 17 Maret 2003)



## SUMMARY

### FLEXURAL BEHAVIOR OF HOLLOW RC SHORT COLUMNS

(Wisnumurti, Achfas Zacoeb, Siti Nurlina : 2003 , 38 pp.)

Hollow due to pipe installation for plumbing system has an effect on the strength degradation and modes of failure of structural elements such as column. The objective of this research is to study the strength, stiffness, ductility, cracking patterns, and modes of failure of hollow RC short columns with square cross section subjected to eccentrically axial compressive loading.

Five tie reinforced concrete columns with square cross section, having dimensions of 150mm high, 150mm width and 800mm length were tested under eccentric axial compressive loading. Among 5 specimens that were tested with load eccentricity of 60mm ( $e = 0.40h$ ), 4 of them were hollow columns, while the rest was solid column as representing control specimen. The hollow ratio was taken from 3.63% up to 20.28% and made from PVC pipe that placed in the center of column cross section. Concrete strengths used were 34.52MPa. Four longitudinal steel reinforcements of 12 mm diameter were symmetrically placed in the both side of the square column section with average yield strength of 323.06MPa, and average modulus of elasticity of 257411.49MPa. Tie reinforcements of 6mm diameter with spacing of 100mm were used along the column.

All columns with load eccentricity of 60mm, exhibited modes of failure that were similar to that of the compression failure. The load capacity and stiffness of the hollow column with hollow ratio of 20.28% had maximum decrease to 11.90% and 53.88%, compared relatively to the solid column. The ductility of the hollow columns with hollow ratio of 20.28% had maximum increase to 16.38%, compared relatively to the solid column.

**Keywords:** flexural capacity, short column, hollow, eccentricity, mode of failure.

(DPP, Faculty of Engineering, Brawijaya University, Contract Number : 49/J.10.1.31/PG/2003, Date March 17<sup>th</sup> 2003)



## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah Yang Maha Esa atas segala rahmat, bimbingan serta perlindungan yang telah diberikan sehingga kami dapat menyelesaikan laporan penelitian dengan judul **“Perilaku Lentur Kolom Pendek Beton Bertulang Berongga”**.

Kami menyadari sepenuhnya bahwa dalam proses persiapan, pelaksanaan dan penyelesaian penelitian ini tidak dapat terwujud tanpa bantuan dan dukungan dari pihak lain. Untuk itu kami ucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu hingga laporan ini dapat terwujud.

Mengingat keterbatasan kemampuan serta pengetahuan yang penulis miliki, penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan penelitian ini masih jauh dari sempurna. Dengan kerendahan hati, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun. demi kemajuan ilmu pengetahuan dan untuk pengembangan penelitian selanjutnya.

Malang, Oktober 2003

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN .....	i
RINGKASAN.....	ii
SUMMARY.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI .....	v
DAFTAR TABEL .....	vii
DAFTAR GAMBAR .....	viii
DAFTAR LAMPIRAN .....	ix
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	2
1.4. Manfaat Penelitian .....	3
1.5. Tujuan Penelitian .....	3
<b>BAB II STUDI PUSTAKA</b>	
2.1. Tinjauan Pustaka .....	4
2.2. Landasan Teori .....	5
a. Perilaku lentur .....	5
b. Kolom pendek .....	6
c. Lendutan dan <i>curvature</i> kolom .....	8
d. Kekuatan kolom .....	9
e. Daktilitas kolom .....	9
2.3. Analisis Penampang .....	10
a. Kekuatan kolom pendek dengan beban sentris .....	11
b. Kolom pendek persegi berlubang dengan beban eksentris .....	11
2.4. Diagram Interaksi .....	13
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1. Bahan dan Benda Uji .....	15
3.2. Peralatan .....	16
3.3. <i>Setting Up</i> Pengujian .....	18
3.4. Data Pengamatan .....	19
<b>BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN</b>	
4.1. Sifat-sifat Agregat, Beton dan Baja Tulangan .....	21
a. Agregat .....	21
b. Beton .....	22
c. Baja tulangan .....	23
4.2. Kekuatan Kolom Teoritis .....	23
4.3. Kekuatan Kolom .....	24
4.4. Kapasitas Lentur Penampang Kolom .....	26
4.5. Kekakuan Kolom .....	27

	4.6. Daktilitas Kolom .....	28
	4.7. Pola retak dan spalling .....	30
	4.8. Diagram interaksi dan titik keruntuhan kolom .....	34
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	
	5.1. Kesimpulan .....	37
	5.2. Saran .....	38
	DAFTAR PUSTAKA .....	39
	LAMPIRAN	





DAFTAR TABEL

Tabel 3.1.	Data benda uji .....	16
Tabel 4.1.	Kekuatan teoritis benda uji .....	23
Tabel 4.2.	Beban dan lendutan kolom dengan $e = 60$ mm .....	26
Tabel 4.3.	Momen lentur maksimum dan <i>curvature</i> kolom .....	27
Tabel 4.4.	Nilai kekakuan kolom .....	28
Tabel 4.5.	Nilai daktilitas kolom .....	30
Tabel 4.6.	Beban retak awal, <i>spalling</i> dan beban maksimum kolom .....	33
Tabel 4.7.	Beban aksial maksimum ( $P_{max}$ ) kolom teoritis dan eksperimen ....	34
Tabel 4.8.	Momen (M) kolom teoritis dan eksperimen .....	34



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Diagram interaksi yang mengilustrasikan perilaku P – M pada Kolom pendek dan kolom panjang sampai runtuh (failure) .....	7
Gambar 2.2.	Lendutan kolom akibat beban eksentris .....	8
Gambar 2.3.	Penentuan nilai daktilitas kolom .....	9
Gambar 2.4.	Segmen lingkaran .....	10
Gambar 2.5.	Tegangan dan gaya-gaya pada kolom .....	11
Gambar 2.6.	Diagram interaksi P – M suatu tampang kolom .....	14
Gambar 3.1.	Benda uji kolom .....	16
Gambar 3.2.	<i>Setting up</i> pengujian .....	18
Gambar 4.1.	Diagram gradasi batu pecah .....	21
Gambar 4.2.	Diagram gradasi pasir .....	22
Gambar 4.3.	Diagram interaksi P-M benda uji (teoritis) .....	24
Gambar 4.4.	Kurva hubungan beban-lendutan kolom $e = 60$ mm .....	25
Gambar 4.5.	Kurva momen- <i>curvature</i> kolom $e = 60$ mm .....	27
Gambar 4.6.	Penentuan nilai daktilitas kolom C1E1 .....	29
Gambar 4.7.	Pola retak dan <i>spalling</i> C1E1 .....	31
Gambar 4.8.	Pola retak dan <i>spalling</i> C2E1 .....	32
Gambar 4.9.	Pola retak dan <i>spalling</i> C3E1 .....	32
Gambar 4.10.	Pola retak dan <i>spalling</i> C4E1 .....	32
Gambar 4.11.	Pola retak dan <i>spalling</i> C5E1 .....	33
Gambar 4.12.	Diagram interaksi kolom dan titik keruntuhan C1E1 .....	35

## DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1. Analisis kekuatan kolom (teoritis)
- Lampiran 2. Uji kapasitas kolom
- Lampiran 3. kapasitas lentur dan *curvature* kolom
- Lampiran 4. Diagram interaksi P - M dan titik keruntuhan kolom
- Lampiran 5. Dokumentasi penelitian





## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1. Latar Belakang

Dengan pertimbangan dari segi ekonomi biasanya kolom dibuat dengan ukuran seragam. Hal ini dikarenakan biaya untuk bekisting cukup besar, sehingga bekisting dapat digunakan lagi dari lantai ke lantai jika ukuran kolom diusahakan tetap. Disamping itu sering dijumpai kasus pemasangan pipa pada kolom untuk keperluan instalasi (air hujan, sanitasi, listrik dan lain-lain) yang akan mengurangi luas efektif penampang dan mempengaruhi kapasitas dari kolom tersebut.

Suatu hal yang perlu ditinjau bahwa dalam ACI 318-83 pasal 6.3 ayat 4 dinyatakan bahwa pipa-pipa yang tertanam dalam kolom tidak boleh diambil lebih dari 4 % dari penampang yang digunakan dalam perhitungan. Dalam PBI 1971 pasal 5.7.1 dinyatakan bahwa pengurangan kekuatan konstruksi penampang beton yang efektif oleh adanya lubang hanya perlu diperhitungkan apabila pengurangan itu lebih dari 4 %. Sedangkan dalam SK SNI T-15-1991-03 ayat 3.3.8 butir 4 juga disebutkan bahwa penentuan tulangan minimum dan kuat rencana dari suatu komponen struktur tekan boleh menggunakan suatu luas efektif penampang yang direduksi  $A_e$  yang tidak kurang dari setengah luas total penampang yang ada.

Mengingat bahwa kolom tidak hanya menahan gaya aksial saja, namun harus diberikan eksentrisitas minimum dalam perencanaannya. Di samping itu kegagalan kolom akan berakibat langsung terhadap komponen struktur lain yang berhubungan dengannya. Umumnya kegagalan kolom adalah merupakan keruntuhan tekan yang tidak diawali dengan peringatan yang jelas dan bersifat tiba-tiba. Oleh karena itu dalam perencanaan kolom harus memberikan cadangan kekuatan yang lebih besar dibanding komponen struktur lain, sehingga faktor reduksi kekuatan  $\phi$  dalam peraturan untuk kolom lebih kecil dari balok.

Berdasarkan hal tersebut di atas dan mengingat kenyataan bahwa penggunaan struktur beton di lapangan masih merupakan salah satu alternatif bahan konstruksi yang penting, maka perlu untuk meninjau perilaku lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).

## 1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, maka dapat dibuat rumusan masalah seperti berikut ini :

- a. Berapa besar lendutan yang terjadi pada kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- b. Berapa kapasitas lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- c. Bagaimana pola retak dan jenis keruntuhan kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- d. Bagaimana pengaruh diameter lubang terhadap kapasitas lentur dari kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).

## 1.3. Batasan Masalah

Penelitian yang akan dilakukan mempunyai batasan masalah seperti berikut ini :

- a. Pembebanan statik menggunakan momen ( $M$ ) dependen terhadap gaya aksial ( $P$ ) dengan eksentrisitas ( $e$ ) tetap diberikan sampai kolom runtuh (*failure*).
- b. Desain kekuatan penampang kolom termasuk pada daerah II untuk tekan menentukan (*compression control*).
- c. Penelitian ditujukan untuk kolom persegi (*rectangular column*) dengan ukuran tertentu disesuaikan dengan kondisi di laboratorium.
- d. Penulangan kolom pada ke dua sisi tidak berubah pada setiap variasi perubahan dimensi, dalam hal ini variasi yang dimaksud adalah diameter lubang.
- e. Lubang dibuat dari pipa PVC yang diabaikan kekuatannya dalam analisis penampang kolom.
- f. Pengamatan penelitian dititikberatkan pada kemampuan kolom untuk menahan momen dan gaya aksial secara bersama.
- g. Pengamatan hanya dilakukan untuk perilaku jangka pendek setelah beton berumur 28 hari.

#### 1.4. Manfaat Penelitian

Dengan penelitian ini diharapkan dapat dipergunakan untuk :

- Mengevaluasi kapasitas lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- Memberikan gambaran tentang pengaruh diameter lubang terhadap kapasitas lentur dari kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- Mengetahui pengurangan kapasitas lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).

#### 1.5. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk :

- Mengetahui kapasitas lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- Mengetahui pola retak dan jenis keruntuhan kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- Mengetahui pengaruh diameter lubang terhadap kapasitas lentur dari kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).
- Membandingkan kapasitas lentur kolom beton bertulang berlubang dengan eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ) secara eksperimen dan teoritis.



## BAB II

### STUDI PUSTAKA

#### 2.1. Tinjauan Pustaka

Menurut ACI 318-83 pasal 6.3.4 saluran-saluran (*conduicts*) dan pipa, dengan segala kelengkapannya, yang tertanam dalam suatu kolom tidak boleh mengambil lebih dari 4 % dari luas penampang kolom yang digunakan dalam perhitungan kekuatan kolom atau luas penampang yang diperlukan untuk ketahanan terhadap kebakaran.

Secara eksplisit dalam PBI 1971 pipa-pipa yang dapat ditanam dalam kolom tidak dijelaskan. Namun dalam pasal 5.7.1 dinyatakan bahwa pipa-pipa listrik dan pipa-pipa lain serta bagiannya dari bahan apapun yang tidak merusak beton dapat ditanam dalam beton dengan persetujuan pengawas ahli. Selanjutnya dalam perhitungan kekuatan konstruksi digunakan penampang beton efektif yang sudah dikurangi oleh penampang pipa dan bagian-bagiannya, hanya perlu diperhitungkan apabila pengurangan tersebut lebih dari 4 %.

SK SNI T-15-1991-03 ayat 3.3.8 butir 4 juga disebutkan bahwa penentuan tulangan minimum dan kuat rencana dari suatu komponen struktur tekan dengan penampang yang lebih besar dari yang diperlukan berdasarkan pembebanan yang ada boleh menggunakan suatu luas efektif penampang yang direduksi  $A_g$  yang tidak kurang dari setengah luas total penampang yang ada.

Poston, dkk (1985) telah melakukan penelitian dengan model numerik untuk perilaku penampang solid non prismatic dan penampang berlubang persegiempat pada pilar jembatan yang dibebani secara biaksial. Untuk validasi kemudian dilakukan penelitian secara model eksperimen di laboratorium dengan penampang prismatic solid dengan variasi lubang persegiempat. Dari penelitian ini disimpulkan antara lain bahwa :

1. Pembatasan aplikasi asumsi *plain-section* cukup valid untuk penampang segiempat solid dan penampang lubang segiempat jika rasio bentang dinding lubang dan tebal tidak lebih dari 6. Untuk rasio lebih besar 6 ada reduksi kekuatan akibat *non-planar action* atau *local instability*.

2. Suatu perkiraan terjadi pengurangan kekuatan sebesar 15 % untuk rasio panjang bentang dinding lubang dengan tebalnya sebesar 7,5, sedang untuk rasio dibawahnya tidak terlihat pengurangan kekuatan (*strength reduction*). Secara mendasar pengurangan kekuatan akan lebih besar lagi untuk dinding lubang yang lebih langsing.

Suprabowo (1996) menyatakan bahwa kekuatan penampang balok berongga merupakan kekuatan balok tampang penuh ditambah kekuatan yang disumbangkan oleh pipa (dari baja atau PVC) dan dikurangi kekuatan beton yang tadinya mengisi rongga di dalam pipa tersebut. Cara analisisnya dikembangkan dari metode analisis kolom berpenampang lingkaran, yang diterapkan untuk analisis gaya pada pipa dan beton dalam pipa. Secara garis besar langkah analisis gaya-gaya dalam pipa ke dalam 2 kondisi, yaitu keadaan garis netral jatuh pada pipa dan garis netral jatuh di luar pipa.

## 2.2. Landasan Teori

### a. Perilaku lentur

Lentur pada kolom merupakan akibat dari regangan yang timbul karena beban luar. Apabila beban bertambah, maka pada kolom terjadi deformasi dan regangan tambahan yang mengakibatkan timbulnya (atau bertambahnya) retak lentur. Pada akhirnya dapat terjadi keruntuhan, yaitu pada saat beban luarnya mencapai kapasitas dari kolom. Taraf pembebanan demikian disebut keadaan batas dari keruntuhan lentur. Karena itulah penampang kolom didesain sedemikian rupa sehingga tidak terjadi retak yang berlebihan pada saat beban kerja dan masih mempunyai keamanan yang cukup dan kekuatan cadangan untuk menahan beban dan tegangan tanpa mengalami keruntuhan.

Asumsi-asumsi yang digunakan dalam menetapkan perilaku penampang adalah sebagai berikut (Nawy, 1998) :

1. Distribusi regangan dianggap linier berdasarkan hipotesis Bernoulli yaitu penampang yang datar sebelum mengalami lentur akan tetap datar dan tegak lurus terhadap sumbu netral setelah mengalami lentur.

2. Regangan pada baja dan beton di sekitarnya sama sebelum terjadi retak pada beton atau leleh pada baja.
3. Beton lemah terhadap tarik. Beton akan retak pada taraf pembebanan kecil, yaitu sekitar 10 % dari kekuatan tekannya. Akibatnya bagian beton yang mengalami tarik pada penampang diabaikan dalam perhitungan analisis dan desain, tulangan tarik yang ada dianggap memikul gaya tarik tersebut.

Menurut SK SNI T-15-1991-03 ayat 3.3.2 butir 6, hubungan antara distribusi tegangan tekan dan regangan beton boleh diasumsikan berbentuk persegi, trapesium, parabola atau bentuk lainnya yang menghasilkan perkiraan kekuatan yang cukup baik bila dibandingkan dengan pengujian yang menyeluruh.

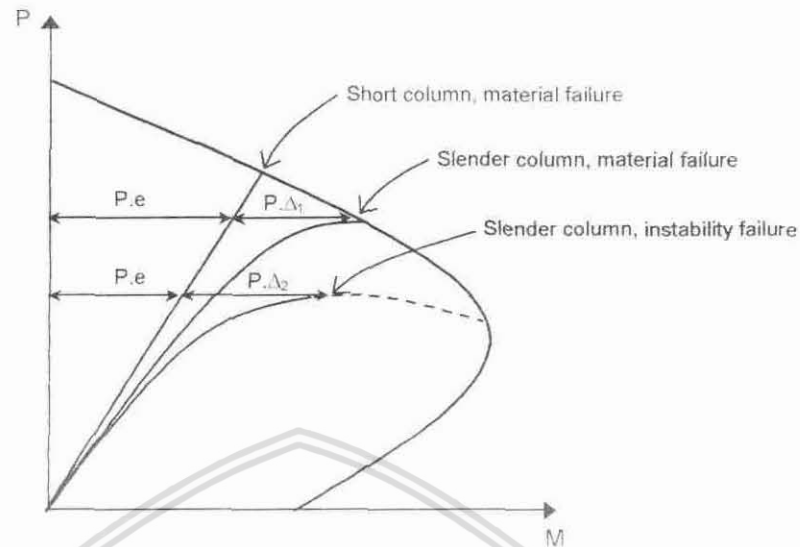
Whitney mengusulkan distribusi tegangan persegi dengan besar tegangan rata-rata  $0,85 f_c'$  yang terdistribusi merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis lurus yang sejajar garis netral berjarak  $a = \beta_1 \cdot c$  dari serat dengan regangan tekan maksimum (Wang dan Salmon, 1986). Faktor  $\beta_1$  diambil dengan ketentuan sebagai berikut:

1. Untuk  $f_c' \leq 30$  MPa  $\beta_1 = 0,85$  (1a)
2. Untuk  $30 \text{ MPa} \leq f_c' < 55$  MPa  $\beta_1 = 0,85 - 0,008 (f_c' - 30)$  (1b)
3. Untuk  $f_c' \geq 55$  MPa  $\beta_1 = 0,65$  (1c)

#### b. Kolom pendek

Kolom pendek didefinisikan sebagai suatu kolom yang beban ultimitnya tidak direduksi oleh deformasi lentur, karena tambahan eksentrisitas  $\Delta$  diabaikan, maka momen maksimum  $M$  sama dengan  $P \cdot e$  pada semua tingkat dan lintasan  $P - M$  linier dan akhirnya terjadi material runtuh (*failure*) jika mencapai garis interaksi (Park dan Paulay, 1975), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1.





Gambar 2.1. Diagram interaksi yang mengilustrasikan perilaku P – M pada kolom pendek dan kolom panjang sampai runtuh (*failure*) (Park dan Paulay, 1975)

Dalam praktek tidak ada kolom yang dibebani tanpa eksentrisitas, maka sebagai tambahan faktor reduksi kekuatan untuk memperhitungkan eksentrisitas minimum, dalam peraturan memberi ketentuan bahwa kekuatan nominal kolom dengan pengikat sengkang direduksi 20 % dan untuk kolom dengan pengikat spiral direduksi 15 % (Dipohusodo, 1994).

Tingkat kelangsingan suatu kolom diekspresikan sebagai  $\frac{k.l_u}{r}$  dengan k adalah faktor panjang efektif struktur tekan,  $l_u$  adalah panjang komponen struktur tekan yang tidak ditopang, dan r adalah jari-jari girasi potongan melintang komponen struktur. Dalam SK SNI T-15-1991-03 ayat 3.3.11 butir 4 dinyatakan bahwa untuk komponen struktur tekan yang tidak ditahan terhadap goyangan ke samping, pengaruh kelangsingan dapat diabaikan apabila memenuhi :

$$\frac{k.l_u}{r} < 22 \quad (2)$$

Bila faktor kolom = 0, harus dihitung dengan eksentrisitas minimum,  $e_{min} = (15 + 0,03h)$ , dengan h adalah ukuran kolom dalam arah momen yang ditinjau dalam



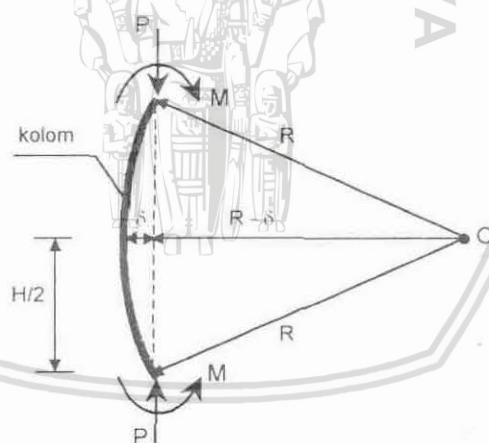
satuan mm. Hal ini serupa dengan pasal 10.11.5.4 ACI, dengan  $e_{\min} = (0,6 + 0,03h)$ ,  $h$  dalam satuan inci.

Dipohusodo (1994), pembatasan jumlah tulangan kolom agar penampang berperilaku duktail agak sukar dilakukan karena beban aksial lebih dominan sehingga keruntuhan tekan sulit dihindari. Penulangan yang biasa dilakukan di antara 1,5 – 3% dari luas penampang kolom. Sesuai dengan SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.3.9, penulangan pokok memanjang untuk kolom berpengikat sengkang bentuk segi empat atau lingkaran minimal terdiri dari 4 batang.

### c. Lentutan dan *curvature* kolom

Park dan Paulay (1975), mendefinisikan kelengkungan (*curvature*) suatu elemen lentur adalah rotasi per satuan panjang elemen. Oleh karena itu, jika  $R$  adalah jari-jari kelengkungan, maka *curvature* ( $\phi$ ) diberikan oleh persamaan berikut ini :

$$\phi = \frac{1}{R} \quad (3)$$



Gambar 2.2. Lentutan kolom akibat beban eksentris (Gere dan Timoshenko, 1984)

Hubungan lentutan dan jari-jari kelengkungan kolom dapat dilihat pada gambar di atas yang menunjukkan suatu elemen kolom yang mengalami defleksi atau lentutan sebesar  $\delta$ . Jari-jari kelengkungan ( $R$ ) akibat lentutan yang terjadi pada kolom dapat diperoleh dengan memanfaatkan gambar 2.2.

$$R = \frac{\delta^2 + 0,25L^2}{2\delta} \quad (4)$$

#### d. Kekakuan kolom

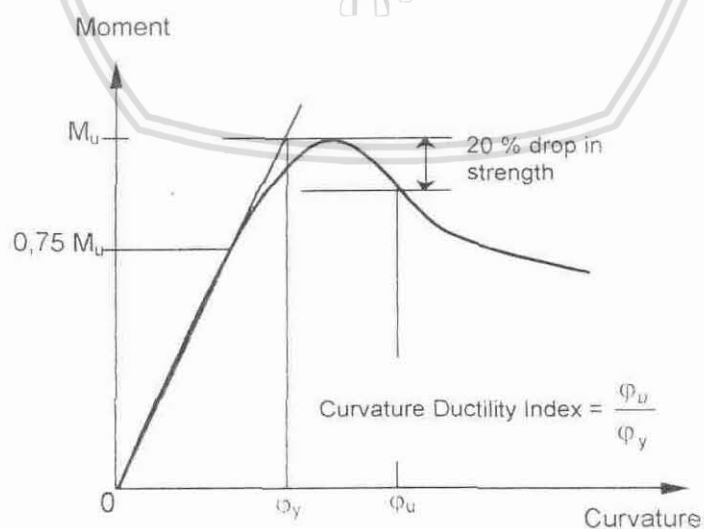
Kekakuan dari sebuah batang yang dibebani secara aksial didefinisikan sebagai gaya yang dibutuhkan untuk menghasilkan suatu lendutan satuan (Gere dan Timoshenko, 1985). Oleh karena itu diperoleh hubungan kekakuan kolom ( $K$ ) yang didefinisikan oleh persamaan :

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (5)$$

#### e. Daktilitas kolom

Park dan Paulay (1975) memberikan definisi pengukuran nilai daktilitas suatu elemen struktur adalah dengan memanfaatkan grafik hubungan antara momen dengan kelengkungan dari elemen tersebut (diagram  $M - \phi$ ). Nilai daktilitas yang diperoleh melalui diagram  $M - \phi$  disebut *curvature ductility factor* ( $\mu$ ) yaitu rasio antara *curvature* saat ultimit ( $\phi_u$ ) dan *curvature* saat leleh pertama kali ( $\phi_y$ ).

$$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y} \quad (6)$$

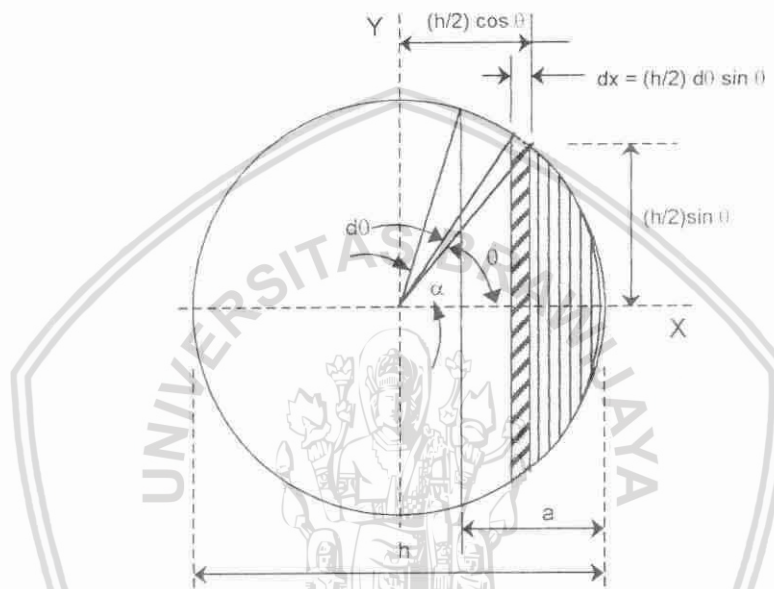


Gambar 2.3. Penentuan nilai daktilitas kolom (El-Tawil dan Deierlein, 1999)

### 2.3. Analisis Penampang

Dalam menganalisis kolom berpenampang persegi dan bulat berlubang akan selalu dijumpai penggunaan segmen lingkaran, khususnya perhitungan luas dan momen luasan terhadap garis sumbu pada segmen lingkaran.

Menurut Wang (1986) rumus untuk menghitung luas  $A$  dan momen luasan  $Q_o$  terhadap garis sumbu pada segmen lingkaran adalah sebagai berikut :



Gambar 2.4. Segmen lingkaran  
(Wang dan Salmon, 1993)

$$A = \frac{h^2}{2} \int_0^\alpha \sin^2 \theta \, d\theta = h^2 \left[ \frac{\alpha - \sin \alpha \cos \alpha}{4} \right] \quad (7)$$

$$Q_o = \frac{h^3}{4} \int_0^\alpha \sin^2 \theta \cos \theta \, d\theta = h^3 \left[ \frac{\sin^3 \alpha}{12} \right] \quad (8)$$

dengan :

$$\alpha = \text{Arc Cos} \left( \frac{R - a}{R} \right), \text{ dan } R = \frac{h}{2}$$

### a. Kekuatan kolom pendek dengan beban sentris

Kapasitas beban sentris maksimum  $P$  dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_o = 0,85f_c'(A_g - A_l) + A_{sl}f_y \quad (9a)$$

Menurut SNI (1991) kuat tekan nominal dari struktur tekan tidak boleh diambil lebih besar dari :

$$P_{n(maks)} = 0,85 P_o \quad (9b)$$

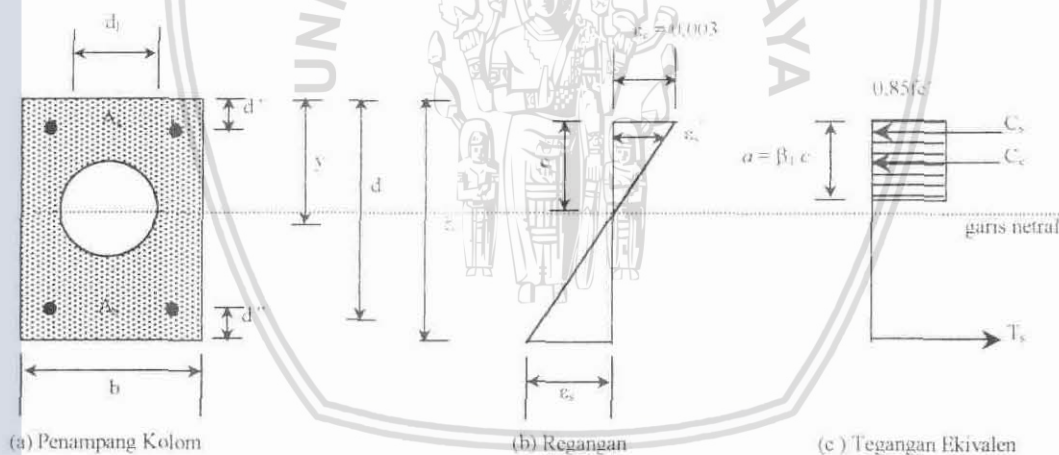
untuk kolom berspiral, dan

$$P_{n(maks)} = 0,80 P_o \quad (9c)$$

untuk kolom bersengkang.

### b. Kolom pendek persegi berlubang dengan beban eksentris

Penampang melintang suatu kolom persegi berlubang dengan diagram distribusi regangan-tegangan dan gaya yang bekerja padanya dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Tegangan dan gaya-gaya pada kolom



Persamaan keseimbangan gaya dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_n = C_c - C_{cl} + C_s - T_s \quad (10)$$

dengan :

$$C_c = 0,85f_c'ba \quad (\text{gaya tekan beton})$$

$$C_{cl} = 0,85f_c'd_l^2 \left[ \frac{\alpha_1 - \sin \alpha_1 \cos \alpha_1}{4} \right] \quad (\text{pengurangan akibat lubang})$$

$$C_s = \Sigma A_s'f_s' \quad (\text{gaya tekan baja})$$

$$T_s = \Sigma A_s f_s \quad (\text{gaya tarik baja})$$

Gaya aksial  $P_n$  dari perhitungan dengan persamaan 2.10 tidak boleh melebihi kuat tekan aksial maksimum  $P_{n(\text{maks})}$  yang dihitung dengan persamaan 2.9c.

Persamaan keseimbangan momen dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} M_n &= P_n e \\ &= MC_c - MC_{cl} + MC_s - MT_s \end{aligned} \quad (11)$$

dengan :

$$MC_c = 0,85f_c'ba \left( y - \frac{a}{2} \right) \quad (\text{momen dari beton})$$

$$MC_{cl} = 0,85f_c'd_l^3 \left[ \frac{\sin^3 \alpha_1}{12} \right] \quad (\text{pengurangan akibat lubang})$$

$$MC_s = \Sigma A_s'f_s'(y - d') \quad (\text{momen tekan baja})$$

$$MT_s = \Sigma A_s f_s (d - y) \quad (\text{momen tarik baja})$$

Tegangan  $f_s'$  pada baja dapat mencapai  $f_y$  apabila keruntuhan kolom yang terjadi berupa hancurnya beton yang tertekan. Apabila keruntuhan yang terjadi berupa lelehnya baja tulangan, maka besaran  $f_s'$  harus disubstitusikan dengan  $f_y$ . Untuk  $f_s'$  dan  $f_s$  yang lebih kecil dari  $f_y$ , yang disubstitusikan adalah tegangan aktualnya, yaitu yang dapat dihitung dengan persamaan yang diperoleh dari segitiga sebangun dengan distribusi regangan di seluruh tinggi penampang berdasarkan pada gambar 2.5.

$$f_s' = E_s \varepsilon_s' = E_s \left( 0,003 \frac{c-d'}{c} \right) \leq f_y \quad (12)$$

$$f_s = E_s \varepsilon_s = E_s \left( 0,003 \frac{\beta_1 d - a}{a} \right) \leq f_y \quad (13)$$

Jika eksentrisitas semakin kecil, maka akan terjadi suatu transisi dari keruntuhan tarik ke keruntuhan tekan. Kondisi keruntuhan *balanced* tercapai apabila tulangan tarik mengalami regangan leleh dan pada saat itu pula beton mengalami regangan batasnya.

Dari segitiga sebangun pada gambar 2.5b dapat diperoleh persamaan tinggi sumbu netral pada kondisi *balanced*  $c_b$ , yaitu :

$$\frac{c_b}{d} = \frac{0,003}{0,003 + \left( \frac{f_y}{E_s} \right)} \quad (14)$$

dengan menggunakan  $E_s = 2.10^5$  MPa didapat :

$$c_b = \frac{600d}{600 + f_y} \quad (15)$$

$$a_b = \beta_1 c_b \quad (16)$$

Dengan mensubstitusikan  $a_b$  pada persamaan 10 dan 11 akan diperoleh gaya aksial  $P_{nb}$ , eksentrisitas  $e_b$  dan momen  $M_{nb}$  pada kondisi *balanced*.

Jenis keruntuhan dapat ditentukan dengan membandingkan gaya aksial  $P_n$  dan gaya aksial pada kondisi *balanced*  $P_{nb}$ , maka :

jika  $P_n > P_{nb}$ , terjadi keruntuhan tekan,

jika  $P_n = P_{nb}$ , terjadi keruntuhan *balanced*,

jika  $P_n < P_{nb}$ , terjadi keruntuhan tarik.

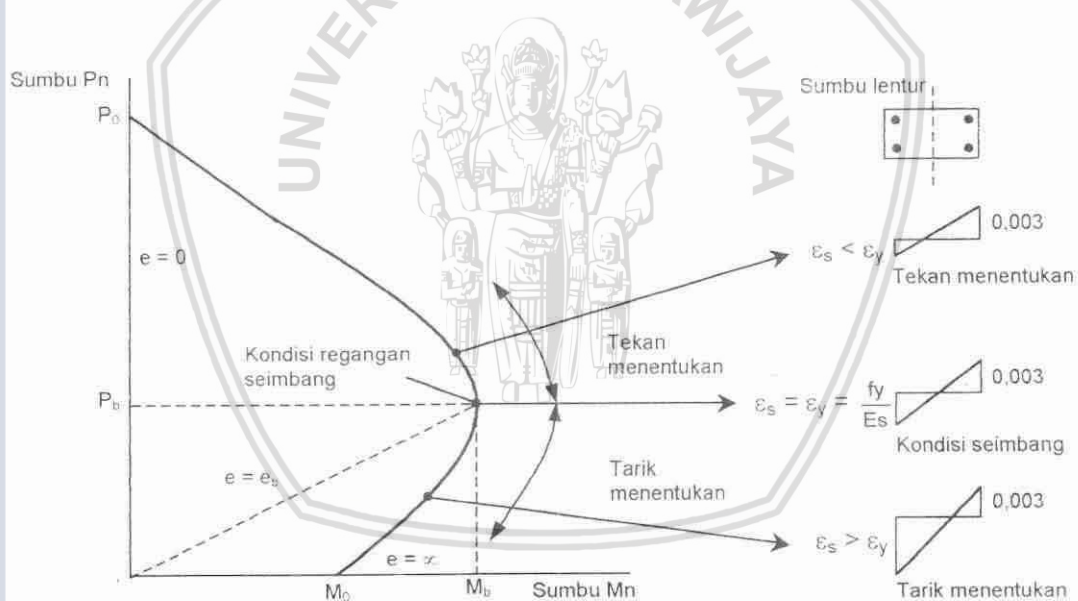
#### 4.4. Diagram Interaksi

Untuk yang disebut sebagai kolom pendek, kekuatan dicapai apabila regangan dari serat beton tekan ekstrim mencapai 0,003. Tergantung pada perbandingan dari  $M_n$  terhadap  $P_n$  (lihat gambar 2.6), diagram regangan akan menunjukkan 2 kategori khas kemungkinan yang akan terjadi :

1. Tekan pada hampir semua penampang sehingga regangan tekan dalam beton mencapai 0,003 sebelum tulangan tarik meleleh, yang dikenal sebagai daerah “tekan menentukan”.
2. Tarik di sebagian besar penampang sedemikian hingga regangan dalam tulangan tarik melampaui regangan leleh ( $\epsilon_y = f_y/E_s$ ) ketika regangan tekan dalam beton mencapai 0,003, yang dikenal sebagai daerah “tarik menentukan”.

Pemisah dari daerah “tekan menentukan” dan “tarik menentukan” adalah keadaan regangan berimbang di mana regangan beton 0,003 dan regangan leleh tulangan  $\epsilon_y = f_y/E_s$  dicapai secara bersamaan.

Untuk suatu penampang terdapat jumlah kombinasi kekuatan yang tak terhingga pada  $P_n$  dan  $M_n$  bekerja secara bersamaan. Kombinasi-kombinasi dari kekuatan ini terletak pada suatu kurva seperti ditunjukkan oleh gambar 2.6.



Gambar 2.6. Diagram interaksi P-M suatu tampang kolom (Wang dan Salmon, 1993)

## BAB III

### METODE PENELITIAN

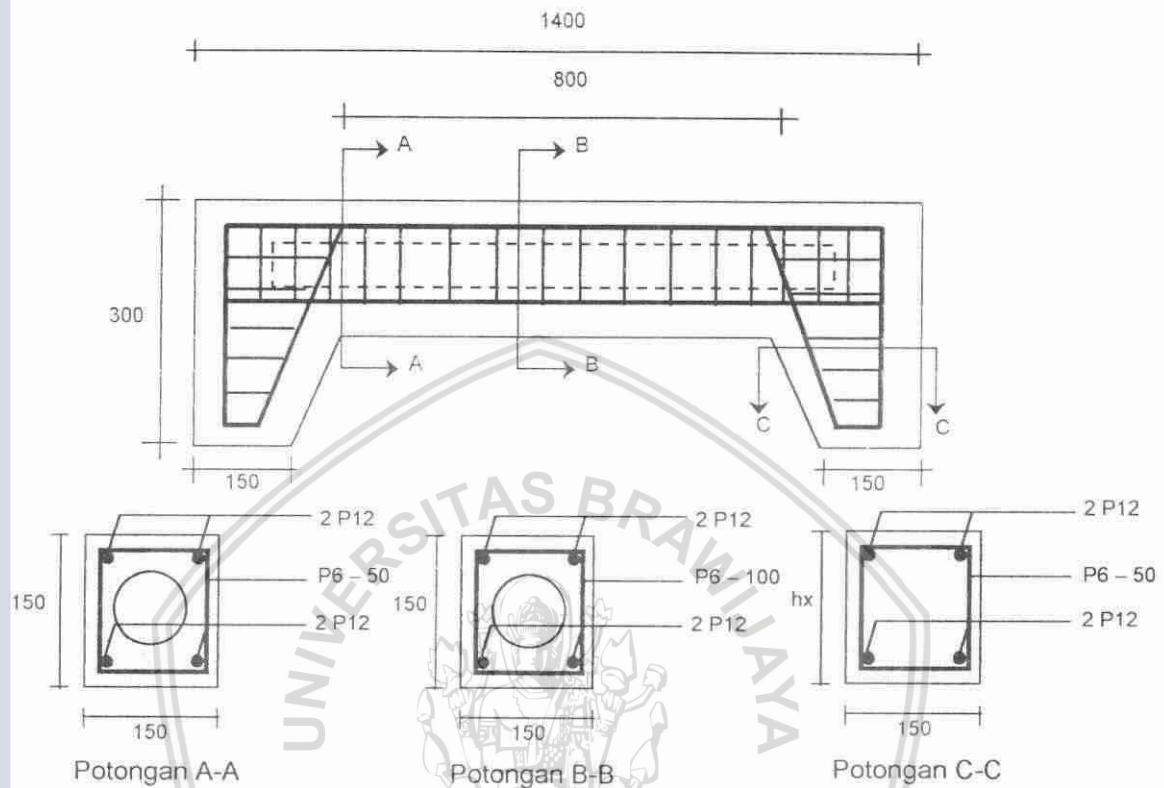
#### 3.1. Bahan dan Benda Uji

Bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah :

- a) Beton dengan kuat tekan rata-rata yang diharapkan 25 MPa dibuat dari campuran semen PPC tipe A, agregat halus dari Kali Progo, agregat kasar dari Kali Bawang dan air
- b) Baja tulangan yang digunakan adalah baja tulangan polos yang ada di pasaran dengan diameter pengenal 12 mm digunakan sebagai tulangan memanjang balok dan 6 mm digunakan sebagai tulangan sengkang.
- c) Cetakan Beton digunakan multiplek dengan tebal 7 mm dan kayu reng berukuran 2 x 3 cm digunakan sebagai pengaku hubungan bekisting.
- d) Pipa PVC dengan merk dagang Wavin digunakan untuk membuat lubang pada kolom, dengan berbagai ukuran diameter yang sesuai dengan rasio lubang dan tidak dilakukan pengujian khusus.
- e) Pelat baja dengan tebal 10 mm digunakan untuk membuat dudukan *load cell* pada daerah kepala kolom dan sebagai *ring plate* untuk as pada alat pengujian kolom.
- f) Benda uji, mengingat kapasitas peralatan pembebanan (*loading equipment*) yang tersedia, maka dimensi kolom yang akan digunakan adalah : panjang 800 mm, lebar 150 mm dan tinggi 150 mm. Kolom tersebut diberi tulangan pada dua sisi dengan masing-masing sisi menggunakan 2 P12. Untuk detail dari benda uji kolom yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.1. Benda uji berupa kolom beton bertulang dibuat sebanyak 5 buah, yang terdiri dari 1 buah benda uji utuh (tanpa lubang) dan 4 buah benda uji berlubang dengan luas lubang yang divariasikan. Untuk data benda uji yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.1. Dengan rasio luas lubang merupakan persentase dari luas kotor penampang kolom (Ag). Letak pipa PVC diusahakan di tengah-tengah agar garis netral pipa berhimpit dengan garis netral kolom. Pada kepala kolom diberikan tambahan tulangan untuk menghindari kerusakan pada daerah ujung dan disesuaikan



dengan standar untuk pengujian statik menggunakan beban aksial  $P$  dan momen  $M$  dengan eksentrisitas  $e$  tetap, yaitu di daerah keruntuhan tekan.



Gambar 3.1. Benda uji kolom

Tabel 3.1. Data benda uji

Kode Kolom	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Ukuran Pipa PVC	Diameter Aktual (mm)	Rasio Lubang (%)	Eksentrisitas (mm)
C1 - E1	150	150	800	0	0	0	60
C2 - E1	150	150	800	1"	32,25	3,63	60
C3 - E1	150	150	800	1,5"	47,75	7,95	60
C4 - E1	150	150	800	2"	59,85	12,50	60
C5 - E1	150	150	800	2,5"	76,25	20,28	60

### 3.2. Peralatan

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

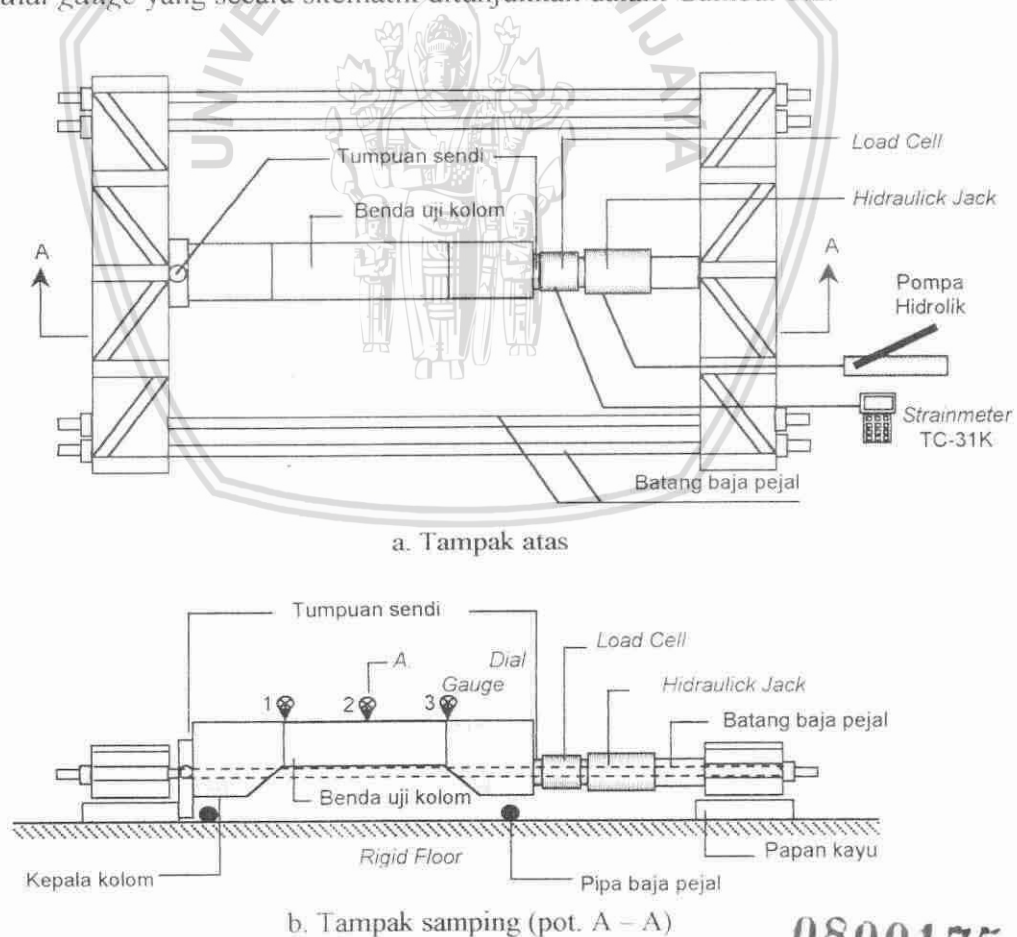
- Universal Testing Machine*, alat ini digunakan untuk uji tarik baja tulangan menggunakan alat dengan merk REIHLE buatan Amerika dengan kapasitas 60.000 lbs
- Compression Testing Machine*, alat ini digunakan untuk uji kuat tekan silinder beton dengan merk Wfi buatan England dengan kapasitas 2000 kN.

- c) *Slump Test Apparatus*, alat ini digunakan untuk pengujian nilai *slump* dari adukan beton.
- d) *Concrete Mixer* (molen) untuk mengaduk campuran beton sebelum dituang ke dalam acuan kolom dengan kapasitas  $0,25 \text{ m}^3$ .
- e) Cetakan baja berukuran diameter 15 cm dan tinggi 30 cm untuk mencetak benda uji silinder beton.
- f) Vibrator, alat ini digunakan untuk memadatkan beton setelah dituang ke dalam acuan kolom.
- g) *Hydraulic Jack* dan *Hydraulic Pump*, alat ini digunakan untuk memberikan beban ke benda uji kolom beton bertulang dengan merk Simplex buatan USA dengan kapasitas 100 ton.
- h) *Load Cell* dan *Strainmeter*, *Load cell* dengan merk Controls buatan Italia dengan kapasitas 60 ton digunakan untuk membaca beban dari *hydraulic pump* yang dirangkaikan dengan alat digital *Strainmeter* merk TC-31K, sehingga hasil pembebanan dari *hydraulic jack* dapat terbaca sesuai dengan tahap pembebanan yang direncanakan.
- i) *Dial Gauge*, alat ini digunakan untuk mengukur besarnya lendutan yang terjadi pada kolom dengan kapasitas 50 mm dan tingkat ketelitian 0,01 mm.
- j) Pipa baja pejal digunakan untuk meletakkan bagian ujung benda uji kolom dengan maksud untuk menghilangkan pengaruh gesekan kolom uji dengan lantai yang nantinya kolom uji dapat bebas bergerak. Pipa baja pejal ini berada dibawah kepala kolom masing-masing 1 buah. Pipa baja pejal ini digunakan juga untuk memodelkan tumpuan sendi pada benda uji kolom, digunakan pipa baja pejal yang diletakkan pada ujung benda uji kolom. Pipa baja pejal ini berdiameter sekitar 30 mm dan 20 mm.
- k) Kaca pembesar dan teropong pengamat retak, kaca pembesar untuk mengamati retak yang terjadi dan teropong pengamat retak (*microcrack meter*) untuk mengetahui lebar retak sesungguhnya.
- l) Alat tulis dan mistar digunakan untuk membuat kotak-kotak dipermukaan kolom beton bertulang dengan ukuran 5 cm x 5 cm dan untuk menandai retak yang terjadi, sehingga dapat terlihat pola retaknya.

- m) Kamera untuk mendokumentasikan kegiatan selama penelitian dan gambar-gambar yang diperlukan.
- n) Alat pendukung lain yang digunakan untuk membantu pelaksanaan penelitian ini seperti mesin pengelas, alat gerinda, *crane*, cetok, ember dan pelat baja.

### 3.3. Setting Up Pengujian

Pelaksanaan pengujian dilakukan dengan menempatkan benda uji kolom pada 2 buah rangka baja yang diletakkan di atas lantai kerja yang dihubungkan dengan 4 buah pipa baja pejal yang dikunci ujung-ujungnya dengan mur. Selanjutnya kepala kolom dihubungkan dengan tumpuan sendi dengan salah satu ujungnya menempel pada rangka baja dan yang lainnya pada *load cell*. Peralatan utama yang digunakan dalam pengujian adalah *load cell*, *hydraulic jack*, pompa hidrolik, *strainmeter* dan 3 buah *dial gauge* yang secara skematik ditunjukkan dalam Gambar 3.2.



b. Tampak samping (pot. A - A)  
Gambar 3.2. Setting up pengujian

0800175



Sebelum dilakukan pengujian, benda uji kolom diberi beban kecil dari *hydraulic jack* untuk mengontrol bahwa *dial gauge*, *load cell* dan *strainmeter* yang akan digunakan berfungsi seperti yang direncanakan. Pembacaan beban dan lendutan dilakukan secara bertahap, mulai pembebanan nol sampai pembebanan maksimum. Sedangkan besarnya tahap pembacaan beban pada tiap-tiap pembebanan (*loading step*) disesuaikan dengan rencana beban maksimum dibagi dengan jumlah data yang diinginkan. Besarnya kelipatan bervariasi antara 4 kN sampai 10 kN. Data pembacaan beban dan lendutan kemudian dibuat dalam bentuk grafik hubungan antara beban ( $P$ ) dan lendutan ( $\Delta$ ). Pembebanan statik diberikan sampai dicapai kondisi benda uji runtuh dan pada pengujian dilakukan pula pengamatan retak dan pengukuran lebar retak yang terjadi.

### 3.4. Data pengamatan

Pada penelitian ini dilakukan pembacaan data, yang meliputi pembacaan data kuat tekan silinder beton, kuat tarik baja dan data beban-lendutan pada saat pengujian benda uji kolom. Penelitian ini juga melakukan pengamatan retak, mengenai retak awal, lokasi, ukuran dan juga *spalling* yang terjadi.

#### a. Data kuat tekan beton

Data ini diperoleh dari pengujian kuat tekan silinder beton pada saat silinder beton telah berumur 28 hari.

#### b. Data uji tarik baja

Pengujian tarik baja dilakukan untuk baja tulangan yang digunakan sebagai tulangan longitudinal. Pengujian tarik baja tulangan memberikan data tegangan, regangan dan modulus elastisitas bahan dari baja tulangan yang digunakan pada benda uji kolom.

#### c. Data beban–lendutan benda uji kolom.

Pada saat pengujian benda uji kolom berlangsung dilakukan pengamatan dan pembacaan beban dan lendutan yang terjadi. Data beban diperoleh dari pembacaan alat *strainmeter* TC-31K yang dihubungkan dengan *load cell*., sedangkan data lendutan diperoleh dari pembacaan *dial gauge*.



d. Data pengamatan retak dan *spalling*

Data ini diperoleh dengan mencatat beban retak awal, lokasi dan ukuran retak serta beban saat terjadi *spalling*. Data pola retak dan *spalling* digambarkan dengan cara membagi permukaan kolom menjadi grid-grid dengan ukuran kotak 50 x 50 mm. Pengamatan *spalling* juga dilakukan terutama pada saat terjadi *spalling* awal dan *spalling* pada *cover* beton sampai jatuh.

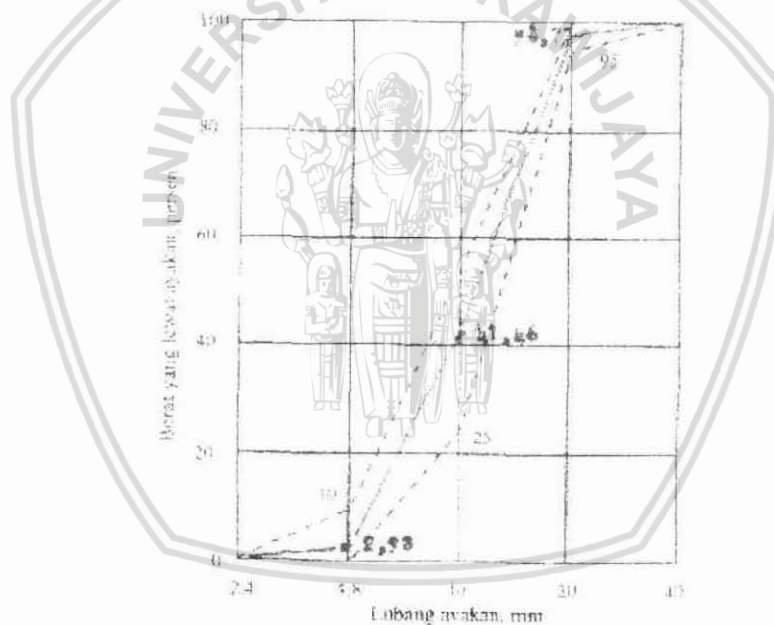


## BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

### 4.1. Sifat-sifat Agregat, Beton dan Baja Tulangan

#### a. Agregat

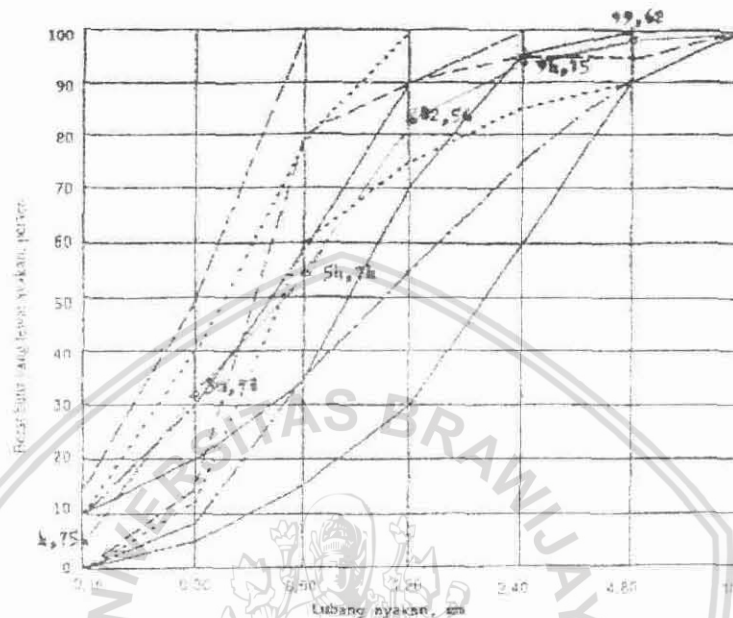
Agregat kasar dalam penelitian ini menggunakan batu pecah dengan besar butir maksimum 20 mm yang berasal dari Kali Bawang. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa gradasi batu pecah berada di antara batas gradasi yang menunjukkan bahwa batu pecah tersebut memenuhi persyaratan seperti pada Gambar 4.1 dengan modulus kehalusan 6,560. Hasil yang diperoleh untuk berat jenis agregat kasar bernilai  $2,502 \text{ gr/cm}^3$ .



Gambar 4.1. Diagram gradasi batu pecah

Pasir yang digunakan sebagai agregat halus berasal dari Kali Progo. Dari hasil uji bahan diperoleh data gradasi pasir masuk daerah II (agak kasar) seperti pada Gambar 4.2 dengan modulus kehalusan 2,332. Hasil yang diperoleh untuk berat jenis pasir bernilai  $2,676 \text{ gr/cm}^3$ , kandungan lumpur pada pasir sebesar 1,571 % dan hasil pemeriksaan kandungan zat organik menunjukkan warna tampak lebih muda

daripada warna standar. Hasil ini sesuai dengan persyaratan kandungan lumpur maksimum untuk pasir tidak boleh lebih dari 5 % dan untuk persyaratan kandungan zat organik warna tidak boleh lebih tua daripada warna standar.



Gambar 4.2 Diagram gradasi pasir

#### b. Beton

Beton dibuat dengan perbandingan adukan 1 semen, 1,65 pasir, 2,01 kerikil dan 0,50 air. Dengan perbandingan tersebut menghasilkan nilai slump sebesar 13 mm. Dengan nilai slump seperti ini sifat pengerjaan beton menjadi tidak sulit. Dari hasil uji tekan silinder beton benda uji diperoleh kuat tekan rata-rata sebesar 34,52 MPa. Kecepatan pembebanan rata-rata sebesar 2,39 kg/cm<sup>2</sup> per detik. dalam uji tekan silinder beton yang diberikan sudah sesuai dengan SK SNI M-14-1989-F tentang Metode Pengujian Kuat Tekan Beton, yaitu sebesar 2–4 kg/cm<sup>2</sup> per detik.

SK SNI T-15-1991-03 pasal 3.1.5 memberikan rumus empiris untuk mendapatkan nilai modulus elastisitas beton adalah :

$$E_c = 0,043 w_c^{1,50} \sqrt{f'_c}$$

Rumus empiris tersebut hanya berlaku untuk beton dengan berat jenis antara 1500 sampai 2500 kg/m<sup>3</sup>. Dari hasil pengujian dengan  $w_{rata-rata} = 2392,45 \text{ kg/m}^3$  dan  $f_c' = 34,52 \text{ MPa}$ , didapatkan nilai modulus elastisitas beton,  $E_c = 29564,34 \text{ MPa}$ .

Untuk beton kepadatan normal dengan berat jenis  $\pm 2300 \text{ kg/m}^3$  dapat digunakan nilai modulus elastisitas beton :

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

Dengan menggunakan persamaan di atas, didapatkan nilai modulus elastisitas sebesar 27614,25 MPa.

### c. Baja tulangan

Pengujian baja tulangan dilaksanakan tiga kali dengan tiga buah benda uji. Baja tulangan yang dipakai diameter pengenal 12 mm dengan jenis baja polos. Dari diameter pengenal tersebut setelah diteliti diameter nyatanya bervariasi sebagai berikut : 11,816 mm, 11,852 mm dan 11,867 mm. Dari hasil uji tarik baja tulangan didapatkan nilai tegangan leleh rata-rata,  $f_s = 323,06 \text{ MPa}$  dan modulus elastisitas rata-rata,  $E_s = 257411,49 \text{ MPa}$ .

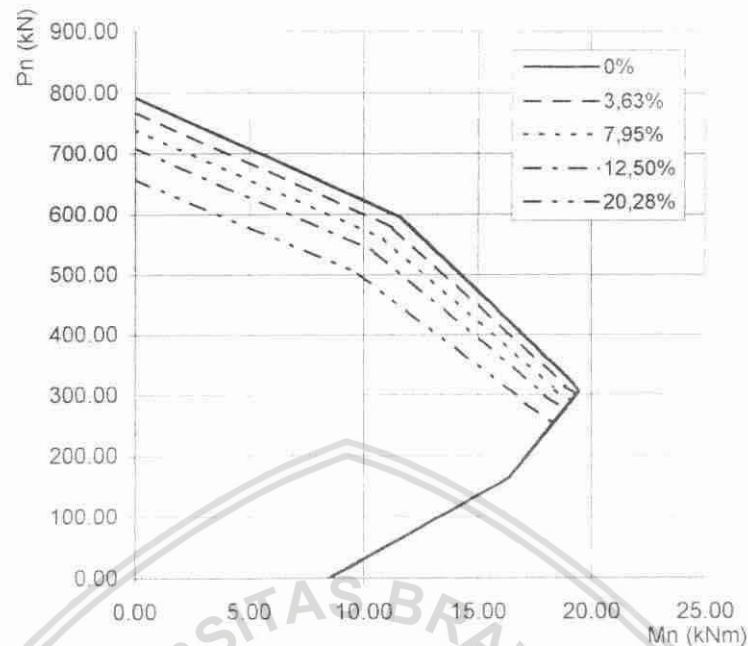
### 4.2. Kekuatan Kolom Teoritis

Data benda uji yang diberikan dalam Tabel 3.1 di Bab III dan dengan menggunakan persamaan yang diberikan dalam Bab II untuk analisis penampang kolom, maka dapat dihitung kapasitas dari masing-masing benda uji yang ditunjukkan pada Tabel 4.1 (perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada Lampiran 1). Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya dibuat diagram interaksi P-M untuk masing-masing benda uji.

Tabel 4.1. Kekuatan teoritis benda uji

Kode Kolom	Kuat Tekan Beton (MPa)	Rasio Lubang (%)	Eksentrisitas Beban (mm)	$P_{nominal}$ (kN)	$M_{nominal}$ (kNm)
C1E1	34,52	0	60	320,22	19,21
C2E1	34,52	3,63	60	314,47	18,87
C3E1	34,52	7,95	60	307,44	18,45
C4E1	34,52	12,50	60	299,78	17,99
C5E1	34,52	20,28	60	285,82	17,15

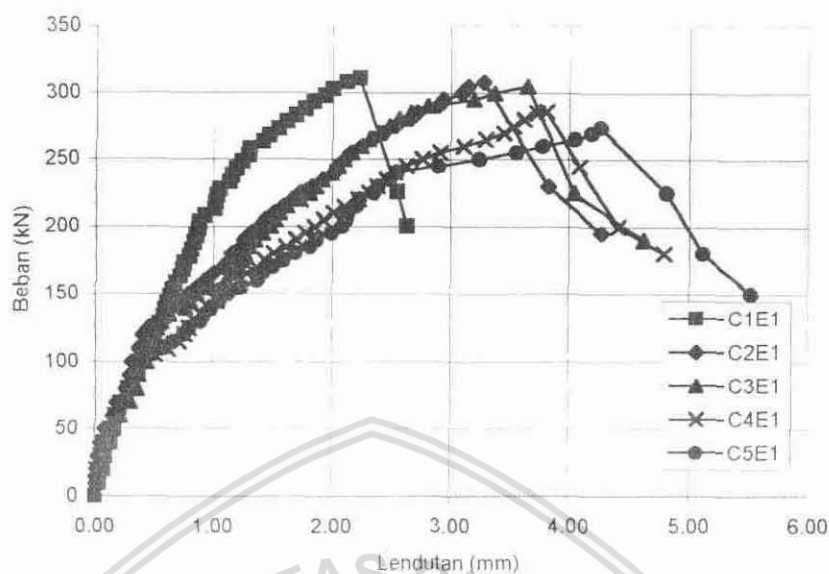




Gambar 4.3. Diagram interaksi P-M benda uji (teoritis)

#### 4.3. Kekuatan Kolom

Kemampuan kolom untuk daerah tekan menentukan ( $e < e_b$ ) dari hasil pengujian menunjukkan penurunan kapasitas seiring dengan bertambahnya rasio lubang. Dengan melihat kurva hubungan beban-lendutan kolom  $e = 60$  mm pada Gambar 4.4, menunjukkan bahwa kolom dengan rasio lubang semakin besar, penurunan kekuatan yang terjadi juga semakin besar. Hal ini sesuai dengan hasil analisis (teoritis) bahwa lubang akan mereduksi kekuatan kolom karena letak lubang di daerah blok tekan beton. Penurunan kekuatan tersebut diiringi dengan bertambahnya lendutan yang terjadi pada kolom. Data hasil uji kapasitas kolom selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 2.



Gambar 4.4. Kurva hubungan beban-lendutan kolom  $e = 60$  mm

Pengujian kolom dengan eksentrisitas beban,  $e = 60$  mm (daerah tekan menentukan) menyebabkan retak-retak pada daerah kepala kolom, hal ini dikarenakan kesalahan dalam penempatan tulangan geser. Khusus benda uji C1E1 terjadi kerusakan kepala kolom, sehingga kekuatan kolom sebenarnya tidak dapat teramati. Beban maksimum yang dicapai bersamaan dengan terjadinya *spalling* secara tiba-tiba.

Pada Tabel 4.2 diberikan nilai beban maksimum ( $P_{max}$ ) dan lendutan ( $\Delta_{max}$ ) kolom saat beban maksimum dicapai pada benda uji kolom dengan eksentrisitas beban 60 mm. Berdasarkan Tabel 4.2, dapat dijelaskan bahwa kemampuan kolom berongga mengalami penurunan yang cukup berarti terhadap kolom solid dalam hal mendukung beban, terutama pada saat mencapai beban maksimum. Penurunan kapasitas terbesar pada kolom berongga (C5E1) sebesar 11,90 % terhadap kapasitas kolom solid (C5E1).

Tabel 4.2. Beban dan lendutan kolom dengan  $e = 60$  mm

Benda Uji	Rasio Lubang (%)	$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)
C1E1 <sup>*)</sup>	0	311	2,23
C2E1	3,63	308	3,28
C3E1	7,95	305	3,65
C4E1	12,50	286	3,81
C5E1	20,28	274	4,26

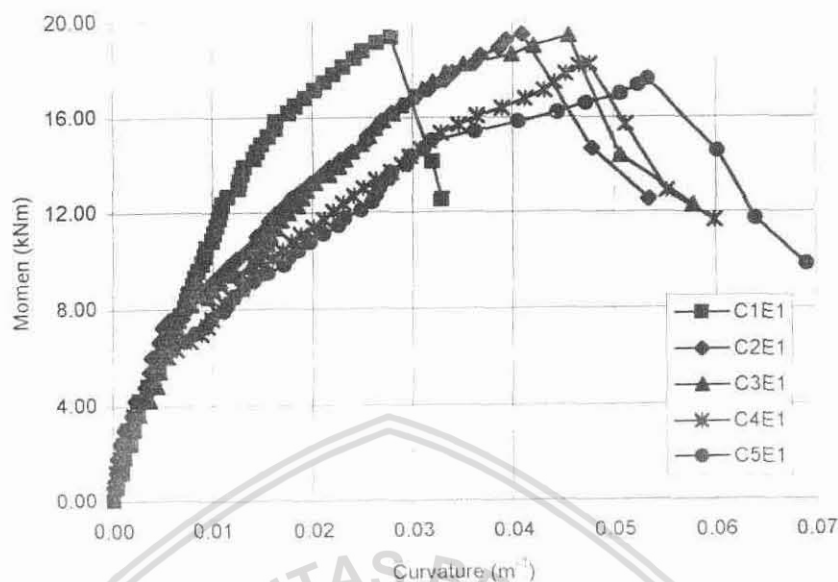
<sup>\*)</sup> benda uji gagal akibat kerusakan pada kepala kolom

#### 4.4. Kapasitas Lentur Penampang Kolom

Kekuatan lentur dari suatu penampang beton bertulang yang menerima beban aksial dan beban lentur dapat diperoleh dengan mendapatkan kurva momen-*curvature* dari penampang tersebut. Data beban dan lendutan yang diperoleh dari pengujian kolom, dapat digunakan untuk memperoleh kurva momen-*curvature* penampang kolom.

Untuk momen lentur diambil nilai momen lentur yang maksimum yang terjadi pada bagian tengah tinggi (*midheight*) kolom, sebagai akibat eksentrisitas beban dan lendutan kolom yang terjadi. Untuk nilai *curvature* kolom dapat dihitung melalui data lendutan kolom, dengan memanfaatkan persamaan (2.6) dan (2.7). Hasil kapasitas lentur dan *curvature* kolom diberikan selengkapnya pada Lampiran 3.

Kekuatan lentur penampang kolom pada tengah tinggi (*midheight*) kolom diperlihatkan pada Gambar 4.5. Nilai momen lentur dan *curvature* kolom untuk daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) diberikan pada Tabel 4.3.



Gambar 4.5. Kurva momen-*curvature* kolom  $e = 60$  mm

Kapasitas momen lentur kolom untuk daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) mengalami penurunan akibat adanya lubang. Berdasarkan Tabel 4.3, menunjukkan penurunan kapasitas momen lentur terbesar pada kolom berongga (C5E1) sebesar 8,99 % terhadap kapasitas momen lentur kolom solid (C1E1).

Tabel 4.3. Momen lentur maksimum dan *curvature* kolom

Benda Uji	Eksentrisitas (mm)	Rasio Lubang (%)	$M_{max}$ (kNm)	$\phi_{max}$ ( $m^{-1}$ )
C1E1	60	0	19,35	0,0279
C2E1	60	3,63	19,49	0,0409
C3E1	60	7,95	19,41	0,0456
C4E1	60	12,50	18,25	0,0476
C5E1	60	20,28	17,61	0,0532

#### 4.5. Kekakuan Kolom

Kekakuan kolom ( $K$ ) yang dimaksudkan adalah gaya ( $P$ ) yang diperlukan untuk mendapatkan satu unit *displacement* (lendutan) kolom ( $\Delta$ ) akibat beban aksial sesuai dengan definisi yang diberikan oleh Gere dan Timoshenko (1985).



Untuk daerah tekan menentukan, adanya rongga pada kolom akan mempengaruhi nilai kekakuan kolom. Penurunan nilai kekakuan kolom seiring dengan peningkatan nilai rasio lubang. Sedangkan untuk daerah tarik menentukan, kekakuan kolom relatif sama untuk rasio lubang sampai dengan 20,28 %.

Nilai kekakuan kolom yang diberikan pada Tabel 4.4, didasari pada beban maksimum kolom ( $P_{max}$ ) dan lendutan kolom yang sesuai dengan beban maksimum kolom ( $\Delta_{max}$ ). Kekakuan masing-masing kolom dapat diperoleh nilainya dengan memanfaatkan persamaan (2.8).

Tabel 4.4. Nilai kekakuan kolom

Benda Uji	Eksentrisitas (mm)	Rasio Lubang (%)	$P_{max}$ (kN)	$\Delta_{max}$ (mm)	Kekakuan (kN/mm)
C1E1	60	0	311	2,23	139,46
C2E1	60	3,63	308	3,28	93,90
C3E1	60	7,95	305	3,65	83,56
C4E1	60	12,50	286	3,81	75,07
C5E1	60	20,28	274	4,26	64,32

Dari Tabel 4.4, nilai kekakuan untuk daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) terlihat bahwa terjadi penurunan nilai kekakuan kolom berongga dibandingkan dengan kolom solid. Penurunan terbesar terjadi pada kolom dengan nilai rasio lubang terbesar (C5E1), yaitu sebesar 53,88 % terhadap kekakuan kolom solid (C1E1). Untuk daerah tekan menentukan dapat dikatakan bahwa dengan adanya lubang yang terbuat dari pipa PVC akan menurunkan kekakuan dari kolom.

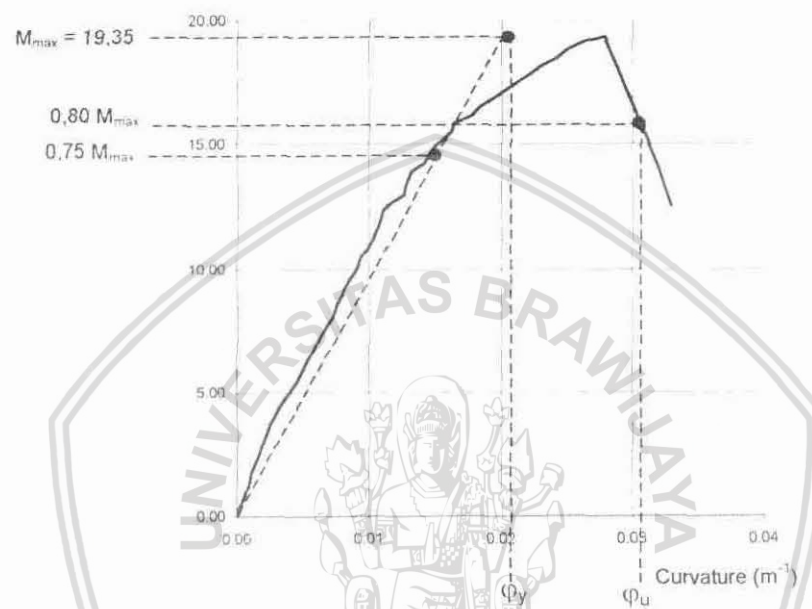
#### 4.6. Daktilitas Kolom

Daktilitas dari suatu struktur merupakan kemampuan struktur tersebut untuk tidak mengalami keruntuhan secara tiba-tiba (*brittle*) dan masih mampu berdeformasi cukup besar pada saat mencapai beban maksimum sebelum struktur tersebut mengalami keruntuhan. Suatu struktur dikatakan daktail, apabila struktur menerima beban gempa dan struktur tersebut masih mampu tetap berdiri tanpa terjadi keruntuhan.

Nilai beban dan lendutan kolom yang diperoleh saat pengujian dapat digunakan untuk mendapatkan nilai momen lentur maksimum dan *curvature* kolom

pada *midheight* kolom (lihat Lampiran 3), yang selanjutnya dapat dibuat kurva momen-*curvature* kolom.

Sebagai contoh penentuan nilai *curvature* saat ultimit ( $\varphi_u$ ) dan *curvature* saat leleh ( $\varphi_y$ ) diberikan untuk kolom C1E1 (lihat Gambar 4.6).



Gambar 4.6. Penentuan nilai daktilitas kolom C1E1

Sebagai contoh penentuan nilai daktilitas untuk kolom C1E1 dimana dari Gambar 4.6 didapatkan :

$$\varphi_y = 0,021$$

$$\varphi_u = 0,031$$

maka,

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\varphi_y} = \frac{0,031}{0,021} = 1,48$$

Dengan cara serupa pada penentuan daktilitas kolom C1E1, maka nilai daktilitas kolom lainnya diberikan pada Tabel 4.5 untuk pengujian dengan eksentrisitas beban,  $e = 60$  mm pada kolom solid dan berongga.

Tabel 4.5. Nilai daktilitas kolom

Benda Uji	Eksentrisitas (mm)	Rasio Lubang (%)	Curvature ultimit, $\phi_u$ ( $m^{-1}$ )	Curvature leleh, $\phi_v$ ( $m^{-1}$ )	Daktilitas, $\mu$
C1E1	60	0	0,021	0,031	1,48
C2E1	60	3,63	0,031	0,049	1,58
C3E1	60	7,95	0,031	0,051	1,65
C4E1	60	12,50	0,033	0,056	1,70
C5E1	60	20,28	0,035	0,062	1,77

Berdasarkan Tabel 4.5. untuk daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) menunjukkan nilai daktilitas kolom mengalami peningkatan untuk rasio lubang yang lebih besar. Peningkatan nilai daktilitas kolom berongga relatif terhadap kolom solid, diperlihatkan dengan kemampuan kolom berongga yang masih dapat berdeformasi setelah beban maksimumnya dicapai. Peningkatan nilai daktilitas terbesar dialami oleh kolom berongga (C5E1) sebesar 16,38 % terhadap kolom solid (C1E1). Dapat dikatakan pula bahwa dengan adanya lubang yang terbuat dari pipa PVC akan meningkatkan daktilitas dari kolom.

#### 4.7. Pola Retak dan Spalling

Pada umumnya retak-retak dimulai pada daerah kritis di mana bekerja momen lentur maksimum dan dimensi terlemah. Retak yang terjadi merupakan retak lentur, yang ditandai dengan arah retak transversal menuju tinggi kolom. Retak lentur awal (*first crack*) terjadi rata-rata pada saat beban mencapai sekitar 30 % dari beban maksimum atau beban runtuhnya.

Penambahan retak untuk setiap peningkatan beban tidak selalu merupakan kelanjutan dari retak sebelumnya. Peningkatan beban dapat menimbulkan retak baru di tempat lain, tetapi ada juga dapat memperpanjang retak sebelumnya. Retak baru timbul pada awal-awal beban retak, setelah beban ditingkatkan lagi sampai sekitar 50 % dari beban runtuh, retak yang terjadi merupakan perpanjangan dari retak sebelumnya.

Proses retak selalu diawali dengan retak lentur, yang pada umumnya terjadi di daerah yang mengalami momen lentur terbesar. Pada benda uji daerah ini terletak di tengah bentang kolom (*midheight*). Retak pertama yang terjadi merupakan retak

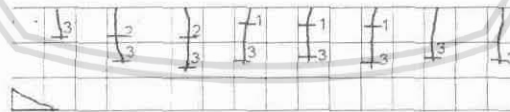


lentur dan selalu ditemukan pada sisi atas (daerah tarik kolom). Lebar retak lentur awal yang teramati berkisar antara 0,01 sampai 0,02 mm.

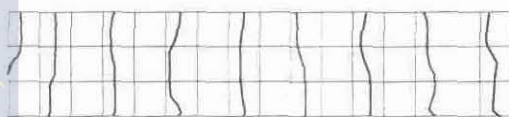
Pola retak dan *spalling* pada kolom untuk daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) diperlihatkan pada Gambar 4.7 sampai 4.11. Umumnya pola retak kolom arah transversal searah tulangan sengkang dan *spalling* terjadi bersamaan dengan tercapainya beban maksimum ( $P_{max}$ ). Pola retak umumnya terjadi pada bagian sisi tarik kolom dan *spalling* kolom umumnya terjadi pada bagian beton tekan ini sesuai dengan yang diharapkan. Dengan adanya rongga pada kolom akan menyebabkan *spalling* yang terjadi juga semakin besar seiring dengan bertambahnya nilai rasio lubang.

Retak lentur awal (*first crack*) terjadi rata-rata pada saat beban mencapai 36,24 % dari beban maksimum atau beban runtuhnya. Beban maksimum yang terjadi juga merupakan beban yang menyebabkan *spalling* pada sisi tekan kolom. *Spalling* pada daerah tekan menentukan ( $e = 60$  mm) terjadi secara tiba-tiba bersamaan dengan dicapainya beban maksimum.

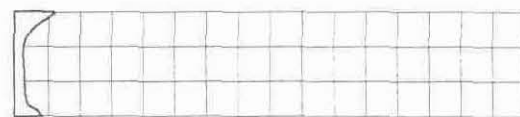
Untuk kolom C1E1 kerusakan terjadi pada kepala kolom, hal ini disebabkan kesalahan dalam penempatan tulangan geser. Pada penelitian ini tulangan geser pada daerah kepala kolom dipasang searah dengan gaya aksial, yang seharusnya dipasang dengan arah tegak lurus dengan gaya aksial dengan spasi yang lebih rapat.



a. Sisi samping kolom



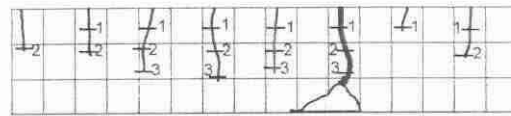
a. Sisi tarik kolom



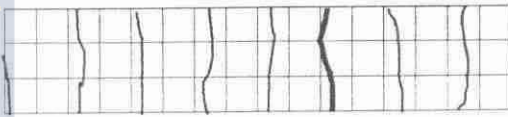
b. Sisi tekan kolom

Gambar 4.7. Pola retak dan *spalling* C1E1

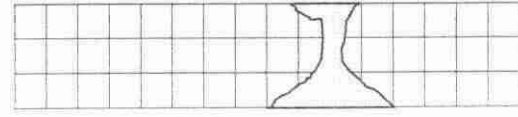




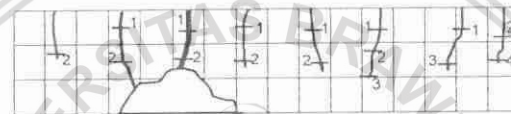
a. Sisi samping kolom



a. Sisi tarik kolom



b. Sisi tekan kolom

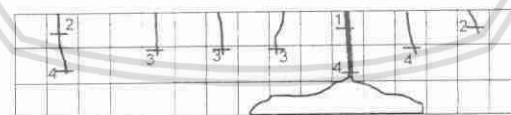
Gambar 4.8. Pola retak dan *spalling* C2E1

a. Sisi samping kolom

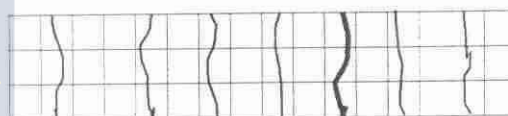


a. Sisi tarik kolom

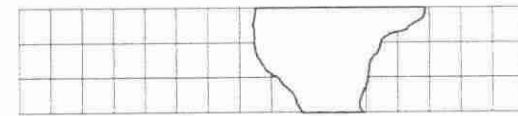
b. Sisi tekan kolom

Gambar 4.9. Pola retak dan *spalling* C3E1

a. Sisi samping kolom

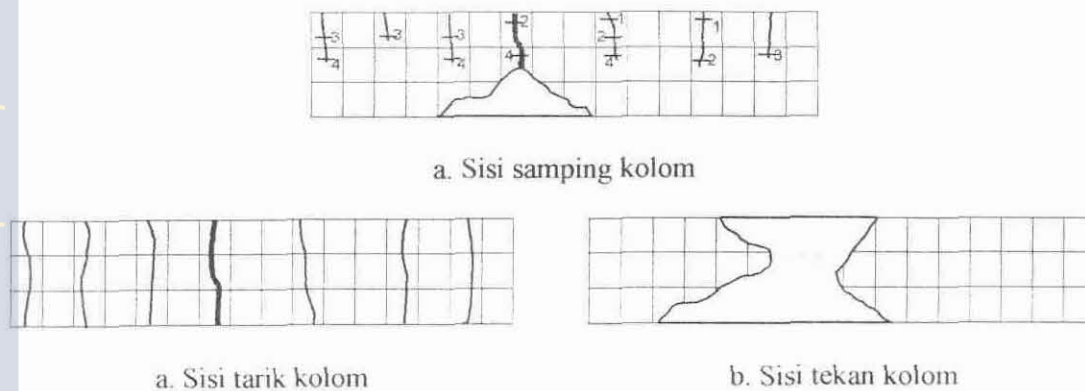


a. Sisi tarik kolom



b. Sisi tekan kolom

Gambar 4.10. Pola retak dan *spalling* C4E1

Gambar 4.11. Pola retak dan *spalling* C5E1

Tabel 4.6 memberikan data beban saat terjadi retak awal, *spalling* dan beban maksimum. Beban saat terjadi retak awal, *spalling* dan beban maksimum kolom diperoleh dari hasil uji kapasitas kolom.

Tabel 4.6. Beban retak awal, *spalling* dan beban maksimum kolom

Benda Uji	Eksentrisitas (mm)	Rasio Lubang (mm)	Beban (kN)		
			Retak Awal <sup>1)</sup>	<i>Spalling</i> <sup>2)</sup>	$P_{max}$
C1E1	60	0	120	311	311
C2E1	60	3,63	120	308	308
C3E1	60	7,95	120	305	305
C4E1	60	12,50	90	286	286
C5E1	60	20,28	90	274	274

<sup>1)</sup> beban retak awal diambil saat retak mulai terlihat (retak rambut) dengan lebar retak sekitar 0,01 sampai 0,02 mm

<sup>2)</sup> beban *spalling* diambil pada saat *spalling* jatuh ke lantai

Dari Tabel 4.6 dapat dilihat bahwa kemampuan kolom dalam mendukung beban akibat adanya rongga, dimana untuk beban retak awal menurun sebesar 25% untuk kolom dengan  $e = 60$  mm. Penurunan terjadi mulai kolom dengan rasio lubang 12,50 % (C4E1).

Retak pada kolom solid maupun berongga umumnya memperlihatkan pola retak yang searah tulangan sengkang pada sisi tarik. Model keruntuhan kolom solid

dan berongga untuk  $e = 60$  mm menunjukkan pola yang sama yakni keruntuhan tekan. Model keruntuhan kolom diawali munculnya retak awal pada sisi tarik yang melebar dan memanjang seiring peningkatan beban, kemudian terjadi *spalling* secara tiba-tiba pada sisi tekan. *Spalling* terjadi bersamaan dengan tercapainya beban maksimum ( $P_{max}$ ).

#### 4.8. Diagram Interaksi dan Titik Keruntuhan Kolom

Hasil pengujian kapasitas kolom dan hasil perhitungan teoritis diberikan pada Tabel 4.7 dan Tabel 4.8. Perhitungan kapasitas kolom secara teoritis selengkapnya diberikan pada Lampiran 1.

Tabel 4.7. Beban aksial maksimum ( $P_{max}$ ) kolom teoritis dan eksperimen

Benda Uji	Eksentrisitas Beban	Rasio Lubang	$P_{max}$ Teoritis	$P_{max}$ Eksperimen	<u>Eksperimen</u> Teoritis
	(mm)	(%)	(KN)	(KN)	
C1E1	60	0	320,22	311	0,97
C2E1	60	3,63	314,47	308	0,98
C3E1	60	7,95	307,44	305	0,99
C4E1	60	12,50	299,78	286	0,95
C5E1	60	20,28	285,82	274	0,96

Tabel 4.8. Momen (M) kolom teoritis dan eksperimen

Benda Uji	Eksentrisitas Beban	Rasio Lubang	M Teoritis	M Eksperimen	<u>Eksperimen</u> Teoritis
	(mm)	(%)	(KNm)	(KNm)	
C1E1	60	0	19,21	19,35	1,01
C2E1	60	3,63	18,87	19,49	1,03
C3E1	60	7,95	18,45	19,41	1,05
C4E1	60	12,50	17,99	18,25	1,01
C5E1	60	20,28	17,15	17,61	1,03

Kapasitas beban maksimum kolom hasil eksperimen memberikan hasil yang lebih kecil dari hasil yang diperoleh secara teoritis. Hal ini tidak sesuai dengan beberapa literatur yang menunjukkan hasil eksperimen biasanya lebih besar dari hasil teoritis. Perbedaan beban maksimum kolom solid dan berongga hasil teoritis dan

hasil eksperimen pada Tabel 4.8 memberikan perbedaan yang cukup kecil. Besarnya perbedaan beban maksimum eksperimen dan teoritis untuk kolom dengan  $e = 60$  mm, rata-rata sebesar 2,89 %.

Diagram interaksi kolom dapat diperoleh dengan bantuan Program Microsoft Excell. Diagram interaksi kolom digunakan untuk menentukan letak titik keruntuhan (titik pertemuan beban maksimum dan momen yang sesuai) dari masing-masing kolom solid dan berongga (hasil eksperimen dan teoritis).

Diagram interaksi kolom solid dan titik keruntuhan C1E1 ditunjukkan pada Gambar 4.12. Untuk melihat gambar interaksi kolom solid maupun berongga dan titik keruntuhan dari semua benda uji diberikan selengkapnya pada Lampiran 4.



Gambar 4.12. Diagram interaksi kolom–titik keruntuhan C1E1

Jika dilihat titik keruntuhan kolom solid maupun berongga hasil eksperimen, umumnya berada di dalam dari gambar diagram interaksi kolom yang sesuai (garis putus). Hal ini terjadi, mungkin disebabkan oleh :

1. Kuat tarik beton tidak diperhitungkan dalam analisis, yang pada kenyataannya mungkin memberikan pengaruh yang cukup berarti terhadap kapasitas beban maksimum kolom.



2. Adanya pipa PVC di dalam kolom yang diabaikan kekuatannya dalam analisis yang mungkin akan memberikan pengaruh terhadap kemampuan kolom dalam mendukung beban maksimum.
3. Ketidaktepatan dalam penentuan eksentrisitas beban yang dapat bergeser akibat frame yang digunakan dalam pelaksanaan pengujian kolom kurang kaku dan tidak dihubungkan dengan *rigid floor* di laboratorium. Hal ini akan memberikan hasil yang tidak sesuai dengan analisis (hasil teoritis).

Titik keruntuhan hasil eksperimen tersebut masih di luar dari gambar diagram interaksi kapasitas kolom yang direduksi (garis putus-putus). Hal ini sesuai dengan yang disyaratkan dalam SK SNI 1991 tentang Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung bahwa kuat tekan nominal dari struktur tekan yang digunakan ( $P_n$ ) tidak boleh melebihi dari  $0,80 P_o$  (kapasitas beban aksial nominal teoritis) untuk kolom bersengkang sesuai dengan persamaan (2.13c) yang pada Gambar 4.12 ditunjukkan dengan garis putus-putus.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1. Kesimpulan

Dalam penelitian ini dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk daerah tekan menentukan ( $e < e_b$ ), beban maksimum kolom berongga menurun sebesar 11,90% untuk kolom dengan rasio lubang 20,28 % dan eksentrisitas beban 60 mm, relatif terhadap kolom solid.
2. Untuk daerah tekan menentukan ( $e < e_b$ ), kekakuan kolom berongga menurun sebesar 53,88 % untuk kolom dengan rasio lubang 20,28 % dan eksentrisitas beban 60 mm, relatif terhadap kolom solid.
3. Untuk daerah tekan menentukan ( $e < e_b$ ), daktilitas kolom berongga meningkat sebesar 16,38 % untuk kolom dengan rasio lubang 20,28 % dan eksentrisitas beban 60 mm, relatif terhadap kolom solid.
4. Retak pada kolom solid maupun berongga umumnya memperlihatkan pola retak yang searah tulangan sengkang pada sisi tarik dan *spalling* di sisi tekan.
5. *Spalling* yang terjadi pada sisi tekan kolom semakin lebar seiring dengan bertambahnya rasio lubang.
6. Model keruntuhan kolom solid dan berongga untuk  $e = 60$  mm menunjukkan pola yang sama yakni keruntuhan tekan. Model keruntuhan kolom diawali munculnya retak awal pada sisi tarik yang melebar dan memanjang seiring peningkatan beban, kemudian terjadi *spalling* pada sisi tekan yang bersamaan dengan tercapainya beban maksimum ( $P_{max}$ ).
7. Penambahan pipa PVC akan menyebabkan kolom lebih bersifat daktail untuk eksentrisitas beban lebih kecil dari eksentrisitas *balance* ( $e < e_b$ ).

## 5.2. Saran

1. Untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih baik, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut yang serupa dengan variasi tinjauan yang berbeda.
2. Pada penelitian lebih lanjut, perlu diperhatikan beberapa hal guna mendapatkan hasil pengujian yang lebih baik. Hal-hal tersebut diantaranya pengadaan material yang sesuai, pelaksanaan pengecoran, pembuatan dan perawatan benda uji.
3. Masalah *setting up* pada saat pengujian supaya diperhatikan dan dijaga agar arah bebannya tetap seperti yang diharapkan dalam analisis.
4. Perlu dilakukan penelitian langsung di lapangan untuk mendapatkan gambaran kejadian yang sebenarnya.



## DAFTAR PUSTAKA

- American Concrete Institute, 1995. **Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-95) and Commentary (ACI 318R-95)**. Farmington Hills.
- Departemen Pekerjaan Umum & Tenaga Listrik, 1977. **Peraturan Beton Bertulang Indonesia 1971 NI-2**. Bandung.
- Departemen Pekerjaan Umum, 1991. **SK SNI T-15-1991-03, Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung**. Bandung.
- Dipohusodo, I., 1996. **Struktur Beton Bertulang : Berdasarkan SK SNI T-15-1991-03 Departemen Pekerjaan Umum RI**. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta.
- El Tawil, S., & Deierlein, G.G., 1999. Strength and Ductility of Concrete Encased Composite Columns. **Journal of Structural Engineering**, Vol. 125 no. 9, pp. 1009-1019.
- Gere, J.M., & Timoshenko, S.P., 1984. **Mechanics of Material, 2<sup>nd</sup> Edition**. Wadsworth, Inc., Belmont, California.
- Mosley, W.H., & Bungey, J.H., 1989. **Perencanaan Beton Bertulang Edisi Ketiga**. Editor Iwan Gunawan, Erlangga, Jakarta.
- Nawy, E.G., 1998. **Beton Bertulang : Suatu Pendekatan Dasar**. Terjemahan oleh Bambang Suryotomo. Refika Aditama, Bandung.
- Neville, A.M., 1975, **Properties of Concrete, Second Edition**. The English language Book Society and Pitman Publishing, London.
- Park, R., & Paulay, T., 1975. **Reinforced Concrete Structures**. John Wiley & Sons. Inc., New York.
- Poston, R.W., Gilliam, T.E., Yamamoto, Y., & Breen, J.E., 1985. Hollow Concrete Bridge Pier Behaviour. **ACI Journal**, November-December, pp. 779-787.
- Suprabowo, S., 1996. **Analisis Kapasitas Kolom Beton Bertulang Berlubang**. Skripsi, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Tjokrodimulyo, K., 1996. **Teknologi Beton, cetakan ke-2**. Nafiri, Yogyakarta.
- Wang, C.K., & Salmon, C.G., 1993. **Disain Beton Bertulang, Jilid 1, Edisi Keempat**. Terjemahan oleh Binsar Hariandja, Erlangga, Jakarta.



## ANALISIS KAPASITAS KOLOM (TEORITIS)

Tabel L1.1. Data benda uji kolom

Kode Kolom	B (mm)	H (mm)	L (mm)	Ukuran Pipa PVC	Diameter Aktual (mm)	Rasio Lubang (%)	Eksentrisitas (mm)
C1 – E1	150	150	8000	0	0	0	50
C2 – E1	150	150	8000	1"	32,25	3,63	50
C3 – E1	150	150	8000	1,5"	47,75	7,95	50
C4 – E1	150	150	8000	2"	59,85	12,50	50
C5 – E1	150	150	8000	2,5"	76,25	20,28	50

### Tampang kolom tanpa rongga (*solid column*)

Dimensi kolom :

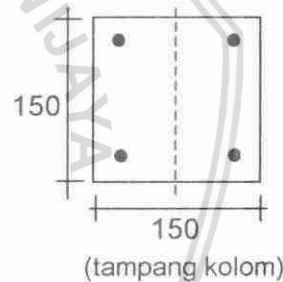
$$\begin{aligned} b &: 150 \text{ mm} \\ h &: 150 \text{ mm} \end{aligned}$$

Tulangan :

$$\begin{aligned} f_y &: 322,39 \text{ MPa} \\ E_s &: 239.752,72 \text{ MPa} \\ A_s = A_s' = 2P12 &: 226,2 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Beton :

$$\begin{aligned} f_c' &: 34,52 \text{ MPa} \\ \text{Selimut beton} &: 20 \text{ mm} \\ d = 150 - 20 - (12/2) &: 124 \text{ mm} \\ \beta_1 = 0,85 - 0,008(f_c' - 30) & \\ &= 0,814 \end{aligned}$$



$$c_b = \frac{0,003E_s}{0,003E_s + f_y} d = \frac{0,003 \cdot 239752,72}{0,003 \cdot 239752,72 + 322,39} \cdot 124 = 85,62 \text{ mm}$$

Kondisi seimbang (*balanced failure*)

Kontrol regangan pada baja tulangan tekan :

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{322,39}{239752,72} = 0,0013$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s' &= 0,003 \frac{c_b - d'}{c_b} = 0,003 \frac{85,62 - 26}{85,62} \\ &= 0,0021 > \epsilon_y \rightarrow \text{leleh} \end{aligned}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c_b = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 85,62 = 313511,09 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_{nb} = C_c + C_s - T_s = (313511,09 + 72924,62 - 72924,62)/1000 = 306,69 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned}
 M_{nb} &= C_c \left( \frac{h}{2} - \beta_1 \cdot \frac{c_b}{2} \right) + C_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + T_s \left( d - \frac{h}{2} \right) \\
 &= 313511,09 \left( \frac{150}{2} - 0,804 \cdot \frac{85,62}{2} \right) + 72924,62 \left( \frac{150}{2} - 26 \right) + 72924,62 \left( 124 - \frac{150}{2} \right) \\
 &= (12722518,30 + 3573306,38 + 3573306,38) / 10^6 = 19,46 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} = \frac{19,46}{306,69} \cdot 1000 = 63,46 \text{ mm}$$

Digunakan  $e = 19,5 \text{ mm} < e_b \rightarrow$  kondisi tekan menentukan (*compression failure*)

Ditetapkan :  $A_s' =$  leleh  
 $A_s =$  belum leleh

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 0 &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c \left( e - \frac{h}{2} + \beta_1 \cdot \frac{c}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \left( e - \frac{h}{2} + d' \right) - A_s \cdot E_s \cdot \frac{d-c}{c} \cdot 0,003 \left( d - \frac{h}{2} + e \right) \\
 &= 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c \left( 19,5 - \frac{150}{2} + 0,804 \cdot \frac{c}{2} \right) + 226,2 \cdot 322,39 \left( 19,5 - \frac{150}{2} + 26 \right) \\
 &\quad - 226,2 \cdot 239752,72 \cdot \frac{124-c}{c} \cdot 0,003 \left( 124 - \frac{150}{2} + 19,5 \right) \\
 &= -203282,64 \cdot c + 1472,87 \cdot c^2 - 2151276,23 \cdot \frac{1381941487,06}{c} + 11144689,41 \\
 &= 1472,87 \cdot c^3 - 203282,64 \cdot c^2 + 8993413,18 \cdot c - 1381941487,06
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 141,67 \text{ mm}$

Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} = 0,003 \frac{141,67-26}{141,67} = 0,0024 > \varepsilon_y \rightarrow A_s' \text{ leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} = 0,003 \frac{124-141,67}{141,67} = -0,0004 < \varepsilon_y \rightarrow A_s \text{ belum leleh}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 141,67 = 518901,83 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot E_s \cdot 0,003 \cdot \frac{d-c}{c} = 226,2 \cdot 239752,72 \cdot 0,003 \cdot \frac{124-141,67}{141,67} = -20292,52 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s = (518901,83 + 72924,62 - (-20292,52)) / 1000 = 595,30 \text{ kN}$$

$$M_n = P_n \cdot e = (595,30 \cdot 19,5) / 1000 = 11,61 \text{ kNm}$$

Digunakan  $e = 60 \text{ mm} < e_b \rightarrow$  kondisi tekan menentukan (*compression failure*)

Ditetapkan :  $A_s' =$  leleh  
 $A_s =$  belum leleh

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 0 &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c \left( e - \frac{h}{2} + \beta_1 \cdot \frac{c}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \left( e - \frac{h}{2} + d' \right) - A_s \cdot E_s \cdot \frac{d-c}{c} \cdot 0,003 \cdot \left( d - \frac{h}{2} + e \right) \\
 &= 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c \left( 60 - \frac{150}{2} + 0,804 \cdot \frac{c}{2} \right) + 226,2 \cdot 322,39 \left( 60 - \frac{150}{2} + 26 \right) \\
 &\quad - 226,2 \cdot 239752,72 \cdot \frac{124-c}{c} \cdot 0,003 \cdot \left( 124 - \frac{150}{2} + 60 \right) \\
 &= -54941,25 \cdot c + 1472,87 \cdot c^2 + 802170,80 - \frac{2199001782,32}{c} + 17733885,34 \\
 &= 1472,87 \cdot c^3 - 54941,25 \cdot c^2 + 18536056,14 \cdot c - 2199001782,32
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 87,76$  mm

Kontrol regangan :

$$\epsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} = 0,003 \frac{87,76-26}{87,76} = 0,0021 > \epsilon_y \rightarrow A_s' \text{ leleh}$$

$$\epsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} = 0,003 \frac{124-87,76}{87,76} = 0,0012 < \epsilon_y \rightarrow A_s \text{ belum leleh}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 87,76 = 321442,96 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot E_s \cdot 0,003 \cdot \frac{d-c}{c} = 226,2 \cdot 239752,72 \cdot 0,003 \cdot \frac{124-87,76}{87,76} = 67184,48 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s = (321442,96 + 72924,62 - 67184,48)/1000 = 320,22 \text{ kN}$$

$$M_n = P_n \cdot e = (320,22 \cdot 60)/1000 = 19,21 \text{ kNm}$$

Digunakan  $e = 100 \text{ mm} > e_b \rightarrow$  kondisi tarik menentukan (*tension failure*)

Ditetapkan :  $A_s' = \text{leleh}$

$A_s = \text{leleh}$

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 0 &= 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c \left( e - \frac{h}{2} + \beta_1 \cdot \frac{c}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \left( e - \frac{h}{2} + d' \right) - A_s \cdot f_y \left( d - \frac{h}{2} + e \right) \\
 &= 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c \left( 100 - \frac{150}{2} + 0,804 \cdot \frac{c}{2} \right) + 226,2 \cdot 322,39 \left( 100 - \frac{150}{2} + 26 \right) \\
 &\quad - 226,2 \cdot 322,39 \cdot \left( 124 - \frac{150}{2} + 100 \right) \\
 &= 91568,76 \cdot c + 1472,87 \cdot c^2 + 3719155,52 - 10865768,08 \\
 &= 1472,87 \cdot c^2 + 91568,76 \cdot c - 7146612,56
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 45,19$  mm

Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{45,19 - 26}{45,19} = 0,0013 \geq \varepsilon_y \rightarrow \text{As' leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{124 - 45,19}{45,19} = 0,0052 > \varepsilon_y \rightarrow \text{As leleh}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 35,72 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 45,19 = 165519,68 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s = (165519,68 + 72924,62 - 72924,62)/1000 = 163,87 \text{ kN}$$

$$M_n = P_n \cdot e = (163,87 \cdot 100)/1000 = 16,39 \text{ kNm}$$

Kondisi tekan murni (pure compression)

Digunakan  $e = 0$

Anggapan : semua penampang kolom menahan gaya aksial tekan, luas beton yang digunakan dalam perhitungan dikurangi dengan luas tulangan baja.

$$\begin{aligned} P_n &= 0,85 \cdot f_c' \cdot (b \cdot h - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y \\ &= \frac{0,85 \cdot 34,52 \cdot (150 \cdot 150 - 2 \cdot 226,2) + 2 \cdot 226,2 \cdot 322,39}{1000} \\ &= 792,77 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$M_n = 0 \text{ kNm}$$

Kondisi lentur murni (pure flexure)

Digunakan  $e = \infty$

Ditetapkan :  $A_s' = \text{belum leleh}$   
 $A_s = \text{leleh}$

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{c - 26}{c}$$

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

$$\Sigma H = 0$$

$$C_c + C_s - T_s = 0$$

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c + A_s' \cdot f_s' - A_s \cdot f_y = 0$$

$$0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c + 226,2 \cdot 239752,72 \cdot \left(0,003 \frac{c - 26}{c}\right) + 226,2 \cdot 322,39 = 0$$

$$3662,75 \cdot c + 162696,20 - \frac{4230101,09}{c} + 72924,62 = 0$$

$$3662,75 \cdot c^2 + 89771,58 \cdot c - 4230101,09 = 0$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 23,87 \text{ mm}$



Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{23,87 - 26}{23,87} = -0,0003 < \varepsilon_y \rightarrow \text{As' belum leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{124 - 23,87}{23,87} = 0,013 \geq \varepsilon_y \rightarrow \text{As leleh}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 23,87 = 87429,85 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot E_s \cdot 0,003 \cdot \frac{d - c}{c} = 226,2 \cdot 239752,72 \cdot 0,003 \cdot \frac{23,87 - 26}{23,87} = -14517,93 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s \\ = (87429,85 - 14517,93 - 72924,62) / 1000 = 0 \text{ kN}$$

Momen terhadap tulangan tarik :

$$M_n = C_c \cdot \left( d - \beta_1 \frac{c}{2} \right) + C_s \cdot (d - d') \\ = \frac{87429,85 \cdot \left( 124 - 0,804 \cdot \frac{23,87}{2} \right) - 14517,93 \cdot (124 - 26)}{1000} \\ = 8,49 \text{ kNm}$$

### Tampang kolom berongga (*hollow column*)

Dimensi kolom :

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

$$h : 150 \text{ mm}$$

Tulangan :

$$f_y : 322,39 \text{ MPa}$$

$$E_s : 239.752,72 \text{ MPa}$$

$$A_s = A_s' = 2P12 : 226,2 \text{ mm}^2$$

Beton :

$$f_c' : 34,52 \text{ MPa}$$

$$\text{Selimut beton} : 20 \text{ mm}$$

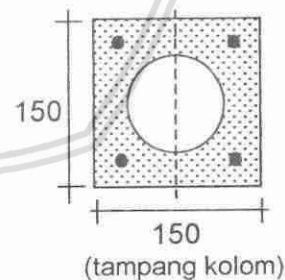
$$d = 150 - 20 - (12/2) : 124 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = 0,85 - 0,008(f_c' - 30)$$

$$= 0,814$$

$$\text{Diameter lubang} : 32,25 \text{ mm}$$

$$\text{Jari-jari, R} : 16,125 \text{ mm}$$



$$V_3 = \frac{h}{2} - \beta_1 \cdot c_b = \frac{150}{2} - 0,804 \cdot 85,62 = 6,14$$

$$\theta_4 = \arccos \left( \frac{V_3}{R} \right) = \arccos \left( \frac{6,14}{16,125} \right) = 1,18$$

Kondisi seimbang (balanced failure)

Gaya aksial akibat beton di dalam pipa :

$$P_{cp} = 0,85 \cdot R^2 \cdot f_c' \cdot (\theta_4 - \sin \theta_4 \cos \theta_4) \\ = 0,85 \cdot 16,125^2 \cdot 34,52 \cdot (1,18 - \sin 1,18 \cdot \cos 1,18) = 6537,87 \text{ N}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c_b = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 85,62 = 313511,09 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_{nb} = C_c + C_s - T_s - P_{cp} \\ = 313511,09 + 72924,62 - 72924,62 - 6537,87 = 307074,17 \text{ N} \\ = 299,65 \text{ kN}$$

Momen akibat beton di dalam pipa :

$$M_{cp} = 0,57 \cdot R^3 \cdot f_c' \cdot \sin^3 \theta_4 \\ = 0,57 \cdot 16,125^3 \cdot 34,52 \cdot \sin^3 1,18 = 67494,09 \text{ Nmm}$$

$$M_{nb} = C_c \left( \frac{h}{2} - \beta_1 \cdot \frac{c_b}{2} \right) + C_s \left( \frac{h}{2} - d' \right) + T_s \left( d - \frac{h}{2} \right) - M_{cp} \\ = 313511,09 \left( \frac{150}{2} - 0,804 \cdot \frac{85,62}{2} \right) + 72924,62 \left( \frac{150}{2} - 26 \right) + 72924,62 \left( 124 - \frac{150}{2} \right) \\ - 67494,09 \\ = 12722518,30 + 3573306,38 + 3573306,38 - 67494,09 = 19802257,68 \text{ Nmm} \\ = 19,39 \text{ kNm}$$

$$e_b = \frac{M_{nb}}{P_{nb}} = \frac{19,39}{299,65} \cdot 1000 = 64,72$$

Digunakan  $e = 19,5 \text{ mm} < e_b \rightarrow$  kondisi tekan menentukan (*compression failure*)

Ditetapkan :  $A_s' =$  leleh  
 $A_s =$  belum leleh

Mencari garis netral :

Momen akibat beton di dalam pipa

$$M_{cp} = 0,85 \cdot \Pi \cdot R^2 \cdot f_c' \cdot e \\ = 0,85 \cdot \Pi \cdot 16,125^2 \cdot 34,52 \cdot 19,5 = 483631,20 \text{ Nmm}$$

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$0 = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c \left( e - \frac{h}{2} + \beta_1 \cdot \frac{c}{2} \right) + A_s' \cdot f_y \left( e - \frac{h}{2} + d' \right) - A_s \cdot E_s \cdot \frac{d-c}{c} \cdot 0,003 \left( d - \frac{h}{2} + e \right) - M_{cp} \\ = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c \left( 19,5 - \frac{150}{2} + 0,804 \cdot \frac{c}{2} \right) + 226,2 \cdot 322,39 \left( 19,5 - \frac{150}{2} + 26 \right) \\ - 226,2 \cdot 239752,72 \cdot \frac{124-c}{c} \cdot 0,003 \left( 124 - \frac{150}{2} + 19,5 \right) - 483631,20$$

$$\begin{aligned}
 &= -203282,64.c + 1472,87.c^2 - 2151276,23 - \frac{1381941487,06}{c} + 11144689,41 \\
 &\quad - 483631,20 \\
 &= 1472,87.c^3 - 203282,64.c^2 + 8509781,98.c - 1381941487,06
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 143,37$  mm

Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{143,37 - 26}{143,37} = 0,0025 > \varepsilon_y \rightarrow \text{As}' \text{ leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{124 - 143,37}{143,37} = -0,0004 < \varepsilon_y \rightarrow \text{As} \text{ belum leleh}$$

Menghitung kapasitas kolom :

Gaya aksial akibat beton di dalam pipa :

$$\begin{aligned}
 P_{cp} &= 0,85.fc'.\Pi.R^2 \\
 &= 0,85.34,52.\Pi.16,125^2 = 24801,60 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$C_c = 0,85.fc'.b.\beta_1.c = 0,85.34,52.150.0,804.143,37 = 525128,50 \text{ N}$$

$$C_s = A_s'.fy = 226.2.322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s'.Es.0,003.\frac{d - c}{c} = 226.2.239752,72.0,003.\frac{124 - 143,37}{143,37} = -21981,07 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_c + C_s - T_s - P_{cp} \\
 &= 525128,50 + 72924,62 - (-21981,07) - 24801,60 = 595232,58 \text{ N} \\
 &= 578,95 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$M_n = P_n.e = (578,95.19,5)/1000 = 11,29 \text{ kNm}$$

Digunakan  $e = 60 \text{ mm} < e_b \rightarrow$  kondisi tekan menentukan (*compression failure*)

Ditetapkan :  $\text{As}' = \text{leleh}$   
 $\text{As} = \text{belum leleh}$

Mencari garis netral :

Momen akibat beton di dalam pipa

$$\begin{aligned}
 M_{cp} &= 0,85.\Pi.R^2.fc'.e \\
 &= 0,85.\Pi.16,125^2.34,52.60 = 1488095,99 \text{ Nmm}
 \end{aligned}$$

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 0 &= 0,85.fc'.b.\beta_1.c.\left(e - \frac{h}{2} + \beta_1.\frac{c}{2}\right) + A_s'.fy.\left(e - \frac{h}{2} + d'\right) - A_s.Es.\frac{d - c}{c}.0,003.\left(d - \frac{h}{2} + e\right) - M_{cp} \\
 &= 0,85.34,52.150.0,804.c.\left(60 - \frac{150}{2} + 0,804.\frac{c}{2}\right) + 226.2.322,39.\left(60 - \frac{150}{2} + 26\right) \\
 &\quad - 226.2.239752,72.\frac{124 - c}{c}.0,003.\left(124 - \frac{150}{2} + 60\right) - 1488095,99
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= -54941,25.c + 1472,87.c^2 + 802170,80 - \frac{2199001782,32}{c} + 17733885,34 \\
 &\quad - 1488095,99 \\
 &= 1472,87.c^3 - 54941,25.c^2 + 17047960,15.c - 2199001782,32
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 90,83$  mm

Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c - d'}{c} = 0,003 \frac{90,83 - 26}{90,83} = 0,0021 > \varepsilon_y \rightarrow \text{As}' \text{ leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d - c}{c} = 0,003 \frac{124 - 90,83}{90,83} = 0,0011 < \varepsilon_y \rightarrow \text{As} \text{ belum leleh}$$

Menghitung kapasitas kolom :

Gaya aksial akibat beton di dalam pipa :

$$\begin{aligned}
 P_{cp} &= 0,85.fc'.\Pi.R^2 \\
 &= 0,85.34,52.\Pi.16,125^2 = 23956,25 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$C_c = 0,85.fc'.b.\beta_1.c = 0,85.34,52.150.0,804.90,83 = 332687,60 \text{ N}$$

$$C_s = A_s'.f_y = 226,2.322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s'.E_s.0,003 \frac{d - c}{c} = 226,2.239752,72.0,003 \frac{124 - 90,83}{90,83} = 59414,65 \text{ N}$$

$$\begin{aligned}
 P_n &= C_c + C_s - T_s - P_{cp} \\
 &= 332687,60 + 72924,62 - 59414,65 - 24801,60 = 321395,97 \text{ N} \\
 &= 314,47 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$M_n = P_n.e = (314,47.60)/1000 = 18,87 \text{ kNm}$$

Digunakan  $e = 100 \text{ mm} > e_b \rightarrow$  kondisi tarik menentukan (*tension failure*)

Ditetapkan :  $As' = \text{leleh}$   
 $As = \text{leleh}$

Momen total di titik tangkap gaya aksial sama dengan nol

$$\begin{aligned}
 0 &= 0,85.fc'.b.\beta_1.c \left( e - \frac{h}{2} + \beta_1 \frac{c}{2} \right) + A_s'.f_y \left( e - \frac{h}{2} + d' \right) - A_s.f_y \left( d - \frac{h}{2} + e \right) \\
 &= 0,85.34,52.150.0,804.c \left( 100 - \frac{150}{2} + 0,804 \frac{c}{2} \right) + 226,2.322,39 \left( 100 - \frac{150}{2} + 26 \right) \\
 &\quad - 226,2.322,39 \left( 124 - \frac{150}{2} + 100 \right) \\
 &= 91568,76.c + 1472,87.c^2 + 3719155,52 - 10865768,08 \\
 &= 1472,87.c^2 + 91568,76.c - 7146612,56
 \end{aligned}$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 45,19$  mm



Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} = 0,003 \frac{45,19-26}{45,19} = 0,0013 \geq \varepsilon_y \rightarrow \text{As' leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} = 0,003 \frac{124-45,19}{45,19} = 0,0052 > \varepsilon_y \rightarrow \text{As leleh}$$

$$V_3 = \frac{h}{2} - \beta_1 \cdot c = \frac{150}{2} - 0,804 \cdot 45,19 = 38,67$$

$$\theta_4 = \arccos \left( \frac{V_3}{R} \right) = \arccos \left( \frac{38,67}{16,125} \right) = \infty \quad (\text{lubang tidak berpengaruh})$$

$$P_{cp} = 0 \text{ N}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 45,19 = 165519,68 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s - P_{cp} = (165519,68 + 72924,62 - 72924,62 - 0)/1000 = 163,87 \text{ kN}$$

$$M_n = P_n \cdot e = (163,87 \cdot 100)/1000 = 16,39 \text{ kNm}$$

Kondisi tekan murni (pure compression)

Digunakan  $e = 0$

Anggapan : semua penampang kolom menahan gaya aksial tekan, luas beton yang digunakan dalam perhitungan dikurangi dengan luas tulangan baja.

$$\begin{aligned} P_n &= 0,85 \cdot f_c' \cdot (b \cdot h - A_{st}) + A_{st} \cdot f_y - 0,85 \cdot f_c' \cdot \pi \cdot R^2 \\ &= \frac{0,85 \cdot 34,52 \cdot (150 \cdot 150 - 2 \cdot 226,2) + 2 \cdot 226,2 \cdot 322,39 - 0,85 \cdot 35,72 \cdot \pi \cdot 16,125^2}{1000} \\ &= 768,81 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$M_n = 0 \text{ kNm}$$

Kondisi lentur murni (pure flexure)

Digunakan  $e = \infty$

Ditetapkan : As' = belum leleh

As = leleh

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} = 0,003 \frac{c-26}{c}$$

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

$$\Sigma H = 0$$

$$C_c + C_s - T_s = 0$$

$$0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c + A_s' \cdot f_s' - A_s \cdot f_y = 0$$

$$0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot c + 226,2 \cdot 239752,72 \cdot \left(0,003 \frac{c-26}{c}\right) + 226,2 \cdot 322,39 = 0$$

$$3662,75 \cdot c + 162696,20 - \frac{4230101,09}{c} + 72924,62 = 0$$

$$3662,75 \cdot c^2 + 89771,58 \cdot c - 4230101,09 = 0$$

Dari persamaan di atas didapatkan nilai  $c = 23,87$  mm

Kontrol regangan :

$$\varepsilon_s' = 0,003 \frac{c-d'}{c} = 0,003 \frac{23,87-26}{23,87} = -0,0003 < \varepsilon_y \rightarrow A_s' \text{ belum leleh}$$

$$\varepsilon_s = 0,003 \frac{d-c}{c} = 0,003 \frac{124-23,87}{23,87} = 0,013 \geq \varepsilon_y \rightarrow A_s \text{ leleh}$$

$$V_3 = \frac{h}{2} - \beta_1 \cdot c = \frac{150}{2} - 0,804 \cdot 23,87 = 55,81$$

$$\theta_4 = \arccos\left(\frac{V_3}{R}\right) = \arccos\left(\frac{55,81}{16,125}\right) = \infty \quad (\text{lubang tidak berpengaruh})$$

$$P_{cp} = 0 \text{ N}$$

$$C_c = 0,85 \cdot f_c' \cdot b \cdot \beta_1 \cdot c = 0,85 \cdot 34,52 \cdot 150 \cdot 0,804 \cdot 23,87 = 87429,85 \text{ N}$$

$$C_s = A_s' \cdot E_s \cdot 0,003 \cdot \frac{d-c}{c} = 226,2 \cdot 239752,72 \cdot 0,003 \cdot \frac{23,87-26}{23,87} = -14517,93 \text{ N}$$

$$T_s = A_s \cdot f_y = 226,2 \cdot 322,39 = 72924,62 \text{ N}$$

$$P_n = C_c + C_s - T_s - P_{cp} \\ = (87429,85 - 14517,93 - 72924,62 - 0)/1000 = 0 \text{ kN}$$

Momen terhadap tulangan tarik :

$$M_n = C_c \cdot \left(d - \beta_1 \frac{c}{2}\right) + C_s \cdot (d - d')$$

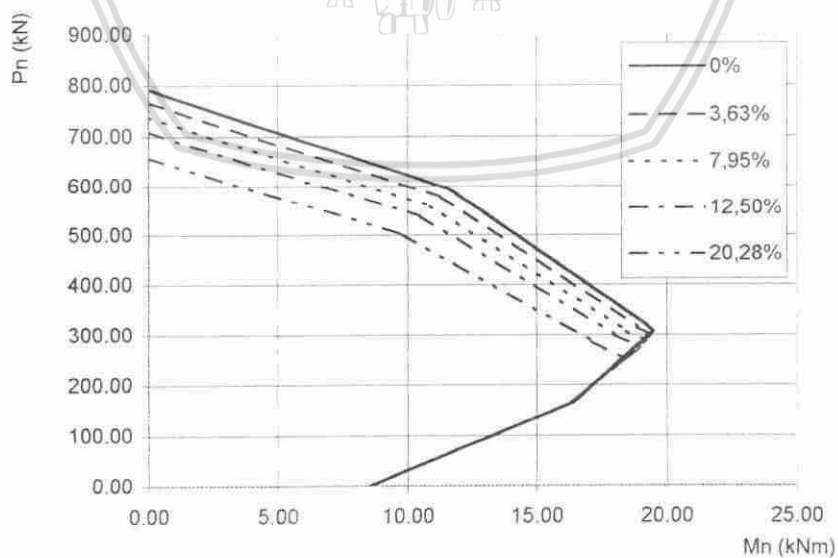
$$= \frac{87429,85 \cdot \left(124 - 0,804 \cdot \frac{23,87}{2}\right) - 14517,93 \cdot (124 - 26)}{1000}$$

$$= 8,49 \text{ kNm}$$

Dengan cara yang sama didapatkan hasil seperti yang ditunjukkan pada tabel L5.2.

Tabel L5.2. Kapasitas kolom dengan mutu beton,  $f_c' = 34,52$  MPa

Ratio Lubang (%)	Eksentritas (mm)	$P_n$ (kN)	$M_n$ (kNm)	Kode Benda Uji
0	0,00	792,77	0,00	-
	$e_{min} = 19,5$	595,30	11,61	-
	60,00	320,22	19,21	C1 - E1
	$e_b = 63,46$	306,69	19,46	-
	100,00	163,87	16,39	-
	$\infty$	0,00	8,49	-
3,63	0,00	768,81	0,00	-
	$e_{min} = 19,5$	578,95	11,29	-
	60,00	314,47	18,87	C2 - E1
	$e_b = 64,72$	299,65	19,39	-
	100,00	163,87	16,39	-
	$\infty$	0,00	8,49	-
7,95	0,00	740,25	0,00	-
	$e_{min} = 19,5$	559,28	10,91	-
	60,00	307,44	18,45	C3 - E1
	$e_b = 66,76$	287,81	19,21	-
	100,00	163,87	16,39	-
	$\infty$	0,00	8,49	-
12,50	0,00	710,26	0,00	-
	$e_{min} = 19,5$	538,45	10,50	-
	60,00	299,78	17,99	C4 - E1
	$e_b = 69,02$	274,71	18,96	-
	100,00	163,87	16,39	-
	$\infty$	0,00	8,49	-
20,28	0,00	658,85	0,00	-
	$e_{min} = 19,5$	502,28	9,79	-
	60,00	285,82	17,15	C5 - E1
	$e_b = 73,16$	251,56	18,40	-
	100,00	163,80	16,38	-
	$\infty$	0,00	8,49	-



Gambar L.5.1. Diagram P - M untuk  $f_c' = 34,52$  MPa

## HASIL UJI KAPASITAS KOLOM

Benda Uji : C1E1

No	Beban kN	Perpendekan ( $\Delta L$ ) 0,01 mm			Lendutan (mm)	Keterangan
		1	2	3		
1	0	0	0	0	0.00	
2	10	2	5	1	0.04	
3	20	5	10	1	0.07	
4	30	7	13	1	0.09	
5	40	10	19	1	0.14	
6	50	15	25	2	0.17	
7	60	20	32	4	0.20	
8	70	27	42	8	0.25	
9	80	32	53	14	0.30	
10	90	36	62	15	0.37	
11	100	41	73	23	0.41	
12	110	46	84	30	0.46	
13	120	50	93	35	0.51	retak rambut
14	128	55	101	38	0.56	
15	133	57	106	39	0.58	
16	138	59	109	40	0.60	
17	143	60	111	40	0.61	
18	148	63	116	41	0.64	
19	153	64	118	41	0.66	
20	158	65	121	41	0.68	retak no. 2
21	163	67	126	42	0.72	
22	168	67	128	42	0.74	
23	173	69	131	43	0.75	
24	178	69	134	40	0.80	
25	183	67	135	40	0.82	
26	188	67	137	40	0.84	
27	193	67	139	40	0.86	
28	198	68	141	40	0.87	
29	203	68	142	40	0.88	
30	208	80	156	47	0.93	
31	213	83	166	47	1.01	
32	218	83	167	47	1.02	
33	223	83	169	48	1.04	
34	228	83	171	48	1.06	retak no. 3
35	233	83	180	50	1.14	
36	238	84	184	52	1.16	
37	243	85	188	52	1.20	
38	248	87	194	52	1.25	
39	253	88	200	52	1.30	
40	258	90	202	52	1.31	
41	263	90	213	53	1.42	
42	268	100	224	55	1.47	
43	273	103	233	55	1.54	
44	278	105	242	56	1.62	
45	283	107	251	57	1.69	
46	288	112	262	59	1.77	
47	293	122	275	60	1.84	
48	298	131	291	64	1.94	
49	303	149	309	69	2.00	
50	308	150	324	75	2.12	
51	311	192	359	80	2.23	Pmax dan Spalling
52	226	194	395	85	2.56	
53	200	192	439	159	2.64	



## HASIL UJI KAPASITAS KOLOM

Benda Uji : C2E1

No	Beban kN	Perpendekan ( $\Delta L$ ) 0,01 mm			Lendutan (mm)	Keterangan
		1	2	3		
1	0	0	0	0	0.00	
2	10	0	1	0	0.01	
3	20	0	2	0	0.02	
4	30	0	3	0	0.03	
5	40	0	5	0	0.05	
6	50	0	9	0	0.09	
7	60	0	15	0	0.15	
8	70	0	18	0	0.18	
9	80	0	26	0	0.26	
10	90	0	29	0	0.29	
11	100	0	31	0	0.31	
12	110	0	37	0	0.37	
13	120	0	40	0	0.40	retak rambut
14	125	0	46	1	0.46	
15	130	0	54	1	0.54	
16	135	0	60	1	0.60	
17	140	1	67	3	0.65	
18	145	3	75	5	0.71	
19	150	4	84	6	0.79	
20	155	6	92	6	0.86	
21	160	7	99	6	0.93	
22	165	8	107	7	1.00	
23	170	9	116	8	1.08	retak no. 2
24	175	10	124	10	1.14	
25	180	11	127	12	1.16	
26	185	12	135	12	1.23	
27	190	14	139	12	1.26	
28	195	15	145	12	1.32	
29	200	15	152	12	1.39	
30	205	16	159	14	1.44	
31	210	16	166	14	1.51	
32	215	17	174	14	1.59	
33	220	17	182	14	1.67	
34	225	18	190	15	1.74	retak no. 3
35	230	18	199	15	1.83	
36	235	19	209	15	1.92	
37	240	19	218	14	2.02	
38	245	20	221	14	2.04	
39	250	20	228	14	2.11	
40	255	21	234	15	2.16	
41	260	21	243	16	2.25	
42	265	22	252	15	2.34	
43	270	22	261	15	2.43	
44	275	22	272	16	2.53	
45	280	23	285	16	2.66	
46	285	23	291	16	2.72	
47	290	24	309	16	2.89	
48	295	23	314	17	2.94	
49	300	23	329	17	3.09	
50	305	24	335	17	3.15	
51	308	25	349	18	3.28	
52	230	26	405	18	3.83	Pmax dan Spalling
53	195	26	449	18	4.27	

## HASIL UJI KAPASITAS KOLOM

Benda Uji : C3E1

No	Beban kN	Perpendekan ( $\Delta L$ ) 0,01 mm			Lendutan (mm)	Keterangan
		1	2	3		
1	0	0	0	0	0.00	
2	10	0	2	1	0.02	
3	20	0	5	2	0.04	
4	30	0	7	2	0.06	
5	40	0	13	3	0.12	
6	50	0	17	3	0.16	
7	60	0	23	4	0.21	
8	70	0	32	5	0.30	
9	80	0	40	9	0.36	
10	90	0	42	10	0.37	
11	100	0	48	10	0.43	
12	110	1	53	10	0.48	
13	120	2	55	10	0.49	retak rambut
14	125	3	60	12	0.53	
15	130	5	65	13	0.56	
16	135	9	74	13	0.63	
17	140	12	90	15	0.77	
18	145	15	97	18	0.81	
19	150	17	104	18	0.87	
20	155	19	118	20	0.99	
21	160	22	133	23	1.11	
22	165	25	142	25	1.17	
23	170	28	147	29	1.19	retak no. 2
24	175	30	154	30	1.24	
25	180	34	161	35	1.27	
26	185	37	168	38	1.31	
27	190	40	175	40	1.35	
28	195	40	182	42	1.41	
29	200	40	190	44	1.48	
30	205	40	195	46	1.52	
31	210	40	199	47	1.56	
32	215	40	205	47	1.62	
33	220	40	217	48	1.73	
34	225	41	225	48	1.81	
35	230	42	231	48	1.86	retak no. 3
36	235	43	237	48	1.92	
37	240	44	245	48	1.99	
38	245	45	252	49	2.05	
39	250	46	258	50	2.10	
40	255	47	265	50	2.17	
41	260	48	274	51	2.25	
42	265	48	281	52	2.31	Retak no. 4
43	270	48	290	53	2.40	
44	275	49	299	53	2.48	
45	280	50	308	54	2.56	
46	285	51	319	55	2.66	
47	290	52	335	57	2.81	
48	295	53	374	57	3.19	
49	300	55	393	58	3.37	
50	305	57	422	58	3.65	Pmax dan Spalling
51	225	60	464	59	4.05	
52	190	63	523	59	4.62	

## HASIL UJI KAPASITAS KOLOM

Benda Uji : C4E1

No	Beban kN	Perpendekan ( $\Delta L$ ) 0,01 mm			Lendutan (mm)	Keterangan
		1	2	3		
1	0	0	0	0	0.00	
2	10	0	1	0	0.01	
3	20	0	2	0	0.02	
4	30	0	5	0	0.05	
5	40	0	8	0	0.08	
6	50	0	12	0	0.12	
7	60	0	17	1	0.17	
8	70	0	22	1	0.22	
9	80	1	29	2	0.28	
10	90	1	37	2	0.36	
11	100	1	45	2	0.44	retak rambut
12	105	1	53	3	0.51	
13	110	1	64	3	0.62	
14	115	1	73	3	0.71	
15	120	1	79	5	0.76	
16	125	2	83	5	0.80	
17	130	2	88	5	0.85	retak no. 2
18	135	2	94	5	0.91	
19	140	2	99	4	0.96	
20	145	2	106	3	1.04	
21	150	2	111	2	1.09	retak no. 3
22	155	2	118	4	1.15	
23	160	2	124	4	1.21	
24	165	2	131	4	1.28	
25	170	2	139	4	1.36	
26	175	2	146	4	1.43	
27	180	3	154	4	1.51	retak no. 4
28	185	4	165	4	1.61	
29	190	4	174	5	1.70	
30	195	5	182	5	1.77	
31	200	5	190	5	1.85	
32	205	5	198	5	1.93	
33	210	7	207	5	2.01	
34	215	7	217	6	2.11	
35	220	7	229	6	2.23	
36	225	7	238	6	2.32	
37	230	8	245	6	2.38	
38	235	8	254	7	2.47	
39	240	8	261	7	2.54	
40	245	8	271	8	2.63	
41	250	10	286	8	2.77	
42	255	10	301	9	2.92	
43	260	10	321	9	3.12	
44	265	10	339	9	3.30	
45	270	10	355	11	3.45	
46	275	11	364	11	3.53	
47	280	11	373	11	3.62	
48	285	11	384	12	3.73	
49	286	12	393	13	3.81	Pmax dan Spalling
50	245	13	422	13	4.09	
51	200	13	454	13	4.41	
52	180	14	493	14	4.79	



## HASIL UJI KAPASITAS KOLOM

Benda Uji : C5E1

No	Beban kN	Perpendekan ( $\Delta L$ ) 0,01 mm			Lendutan (mm)	Keterangan
		1	2	3		
1	0	0	0	0	0.00	
2	10	2	5	1	0.04	
3	20	2	7	1	0.06	
4	30	4	9	2	0.06	
5	40	4	12	2	0.09	
6	50	7	16	5	0.10	
7	60	7	25	5	0.19	
8	70	9	34	8	0.26	
9	80	9	39	8	0.31	
10	90	10	45	9	0.36	
11	100	10	51	9	0.42	retak rambut
12	105	15	61	11	0.48	
13	110	15	72	13	0.58	
14	115	17	81	13	0.66	
15	120	17	91	15	0.75	
16	125	22	98	15	0.80	
17	130	22	108	15	0.90	retak no. 2
18	135	25	113	15	0.93	
19	140	25	118	14	0.99	
20	145	26	125	13	1.06	
21	150	28	133	12	1.13	retak no. 3
22	155	28	145	14	1.24	
23	160	30	159	14	1.37	
24	165	30	163	14	1.41	
25	170	36	174	14	1.49	
26	175	36	183	14	1.58	
27	180	37	194	14	1.69	retak no. 4
28	185	37	206	14	1.81	
29	190	39	213	15	1.86	
30	195	39	226	15	1.99	
31	200	39	235	15	2.08	
32	205	40	239	15	2.12	
33	210	40	241	15	2.14	
34	215	40	248	16	2.20	
35	220	42	252	16	2.23	
36	225	42	264	16	2.35	
37	230	42	268	16	2.39	
38	235	42	278	16	2.49	
39	240	43	285	17	2.55	
40	245	44	321	18	2.90	
41	250	45	356	18	3.25	
42	255	47	389	19	3.56	
43	260	47	411	19	3.78	
44	265	50	439	19	4.05	
45	270	52	455	21	4.19	
46	274	55	464	21	4.26	Pmax dan Spalling
47	225	58	522	23	4.82	
48	180	62	554	23	5.12	
49	150	64	596	23	5.53	



## KAPASITAS LENTUR DAN CURVATURE KOLOM

Benda Uji : C1E1

No	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Momen Lentur (kNm)	Curvature ( $m^{-1}$ )	Keterangan
1	0	0.00	0.00	0.0000	
2	10	0.04	0.60	0.0004	
3	20	0.07	1.20	0.0009	
4	30	0.09	1.80	0.0011	
5	40	0.14	2.41	0.0017	
6	50	0.17	3.01	0.0021	
7	60	0.20	3.61	0.0025	
8	70	0.25	4.22	0.0031	
9	80	0.30	4.82	0.0037	
10	90	0.37	5.43	0.0046	
11	100	0.41	6.04	0.0051	
12	110	0.46	6.65	0.0057	
13	120	0.51	7.26	0.0063	retak rambut
14	128	0.55	7.75	0.0068	
15	133	0.58	8.06	0.0072	
16	138	0.60	8.36	0.0074	
17	143	0.61	8.67	0.0076	
18	148	0.64	8.97	0.0080	
19	153	0.66	9.28	0.0082	
20	158	0.68	9.59	0.0085	retak no. 2
21	163	0.72	9.90	0.0089	
22	168	0.74	10.20	0.0092	
23	173	0.75	10.51	0.0094	
24	178	0.80	10.82	0.0099	
25	183	0.82	11.13	0.0102	
26	188	0.84	11.44	0.0104	
27	193	0.86	11.75	0.0107	
28	198	0.87	12.05	0.0109	
29	203	0.88	12.36	0.0110	
30	208	0.93	12.67	0.0116	
31	213	1.01	13.00	0.0126	
32	218	1.02	13.30	0.0127	
33	223	1.04	13.61	0.0129	
34	228	1.06	13.92	0.0132	retak no. 3
35	233	1.14	14.24	0.0142	
36	238	1.16	14.56	0.0145	
37	243	1.20	14.87	0.0149	
38	248	1.25	15.19	0.0156	
39	253	1.30	15.51	0.0162	
40	258	1.31	15.82	0.0164	
41	263	1.42	16.15	0.0177	
42	268	1.47	16.47	0.0183	
43	273	1.54	16.80	0.0192	
44	278	1.62	17.13	0.0202	
45	283	1.69	17.46	0.0211	
46	288	1.77	17.79	0.0221	
47	293	1.84	18.12	0.0230	
48	298	1.94	18.46	0.0242	
49	303	2.00	18.79	0.0250	
50	308	2.12	19.13	0.0264	
51	311	2.23	19.35	0.0279	Pmax dan Spalling
52	226	2.56	14.14	0.0319	
53	200	2.64	12.53	0.0329	

## KAPASITAS LENTUR DAN CURVATURE KOLOM

Benda Uji : C2E1

No	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Momen Lentur (kNm)	Curvature ( $m^{-1}$ )	Keterangan
1	0	0.00	0.00	0.0000	
2	10	0.01	0.60	0.0001	
3	20	0.02	1.20	0.0002	
4	30	0.03	1.80	0.0004	
5	40	0.05	2.40	0.0006	
6	50	0.09	3.00	0.0011	
7	60	0.15	3.61	0.0019	
8	70	0.18	4.21	0.0022	
9	80	0.26	4.82	0.0032	
10	90	0.29	5.43	0.0036	
11	100	0.31	6.03	0.0039	
12	110	0.37	6.64	0.0046	
13	120	0.40	7.25	0.0050	retak rambut
14	125	0.46	7.56	0.0057	
15	130	0.54	7.87	0.0067	
16	135	0.60	8.18	0.0074	
17	140	0.65	8.49	0.0081	
18	145	0.71	8.80	0.0089	
19	150	0.79	9.12	0.0099	
20	155	0.86	9.43	0.0107	
21	160	0.93	9.75	0.0116	
22	165	1.00	10.06	0.0124	
23	170	1.08	10.38	0.0134	retak no. 2
24	175	1.14	10.70	0.0142	
25	180	1.16	11.01	0.0144	
26	185	1.23	11.33	0.0154	
27	190	1.26	11.64	0.0157	
28	195	1.32	11.96	0.0164	
29	200	1.39	12.28	0.0173	
30	205	1.44	12.60	0.0180	
31	210	1.51	12.92	0.0189	
32	215	1.59	13.24	0.0198	
33	220	1.67	13.57	0.0208	
34	225	1.74	13.89	0.0217	retak no. 3
35	230	1.83	14.22	0.0228	
36	235	1.92	14.55	0.0240	
37	240	2.02	14.88	0.0252	
38	245	2.04	15.20	0.0255	
39	250	2.11	15.53	0.0264	
40	255	2.16	15.85	0.0270	
41	260	2.25	16.18	0.0281	
42	265	2.34	16.52	0.0292	
43	270	2.43	16.85	0.0303	
44	275	2.53	17.20	0.0316	
45	280	2.66	17.54	0.0332	
46	285	2.72	17.87	0.0339	
47	290	2.89	18.24	0.0361	
48	295	2.94	18.57	0.0367	
49	300	3.09	18.93	0.0386	
50	305	3.15	19.26	0.0393	
51	308	3.28	19.49	0.0409	Pmax dan Spalling
52	230	3.83	14.68	0.0479	
53	195	4.27	12.53	0.0534	

## KAPASITAS LENTUR DAN CURVATURE KOLOM

Benda Uji : C3E1

No	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Momen Lentur (kNm)	Curvature ( $m^{-1}$ )	Keterangan
1	0	0.00	0.00	0.0000	
2	10	0.02	0.60	0.0002	
3	20	0.04	1.20	0.0005	
4	30	0.06	1.80	0.0007	
5	40	0.12	2.40	0.0014	
6	50	0.16	3.01	0.0019	
7	60	0.21	3.61	0.0026	
8	70	0.30	4.22	0.0037	
9	80	0.36	4.83	0.0044	
10	90	0.37	5.43	0.0046	
11	100	0.43	6.04	0.0054	
12	110	0.48	6.65	0.0059	
13	120	0.49	7.26	0.0061	retak rambut
14	125	0.53	7.57	0.0066	
15	130	0.56	7.87	0.0070	
16	135	0.63	8.19	0.0079	
17	140	0.77	8.51	0.0096	
18	145	0.81	8.82	0.0101	
19	150	0.87	9.13	0.0108	
20	155	0.99	9.45	0.0123	
21	160	1.11	9.78	0.0138	
22	165	1.17	10.09	0.0146	
23	170	1.19	10.40	0.0148	retak no. 2
24	175	1.24	10.72	0.0155	
25	180	1.27	11.03	0.0158	
26	185	1.31	11.34	0.0163	
27	190	1.35	11.66	0.0169	
28	195	1.41	11.97	0.0176	
29	200	1.48	12.30	0.0185	
30	205	1.52	12.61	0.0190	
31	210	1.56	12.93	0.0194	
32	215	1.62	13.25	0.0202	
33	220	1.73	13.58	0.0216	
34	225	1.81	13.91	0.0226	
35	230	1.86	14.23	0.0232	retak no. 3
36	235	1.92	14.55	0.0239	
37	240	1.99	14.88	0.0249	
38	245	2.05	15.20	0.0256	
39	250	2.10	15.53	0.0262	
40	255	2.17	15.85	0.0271	
41	260	2.25	16.18	0.0281	
42	265	2.31	16.51	0.0289	retak no. 4
43	270	2.40	16.85	0.0299	
44	275	2.48	17.18	0.0310	
45	280	2.56	17.52	0.0320	
46	285	2.66	17.86	0.0332	
47	290	2.81	18.21	0.0351	
48	295	3.19	18.64	0.0399	
49	300	3.37	19.01	0.0421	
50	305	3.65	19.41	0.0456	Pmax dan Spalling
51	225	4.05	14.41	0.0506	
52	190	4.62	12.28	0.0577	



## KAPASITAS LENTUR DAN CURVATURE KOLOM

Benda Uji : C4E1

No	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Momen Lentur (kNm)	Curvature ( $m^{-1}$ )	Keterangan
1	0	0.00	0.00	0.0000	
2	10	0.01	0.60	0.0001	
3	20	0.02	1.20	0.0002	
4	30	0.05	1.80	0.0006	
5	40	0.08	2.40	0.0010	
6	50	0.12	3.01	0.0015	
7	60	0.17	3.61	0.0021	
8	70	0.22	4.22	0.0027	
9	80	0.28	4.82	0.0034	
10	90	0.36	5.43	0.0044	
11	100	0.44	6.04	0.0054	retak rambut
12	105	0.51	6.35	0.0064	
13	110	0.62	6.67	0.0077	
14	115	0.71	6.98	0.0089	
15	120	0.76	7.29	0.0095	
16	125	0.80	7.60	0.0099	
17	130	0.85	7.91	0.0106	retak no. 2
18	135	0.91	8.22	0.0113	
19	140	0.96	8.53	0.0120	
20	145	1.04	8.85	0.0129	
21	150	1.09	9.16	0.0136	retak no. 3
22	155	1.15	9.48	0.0144	
23	160	1.21	9.79	0.0151	
24	165	1.28	10.11	0.0160	
25	170	1.36	10.43	0.0170	
26	175	1.43	10.75	0.0179	
27	180	1.51	11.07	0.0188	retak no. 4
28	185	1.61	11.40	0.0201	
29	190	1.70	11.72	0.0212	
30	195	1.77	12.05	0.0221	
31	200	1.85	12.37	0.0231	
32	205	1.93	12.70	0.0241	
33	210	2.01	13.02	0.0251	
34	215	2.11	13.35	0.0263	
35	220	2.23	13.69	0.0278	
36	225	2.32	14.02	0.0289	
37	230	2.38	14.35	0.0297	
38	235	2.47	14.68	0.0308	
39	240	2.54	15.01	0.0317	
40	245	2.63	15.34	0.0329	
41	250	2.77	15.69	0.0346	
42	255	2.92	16.04	0.0364	
43	260	3.12	16.41	0.0389	
44	265	3.30	16.77	0.0412	
45	270	3.45	17.13	0.0431	
46	275	3.53	17.47	0.0441	
47	280	3.62	17.81	0.0452	
48	285	3.73	18.16	0.0466	
49	286	3.81	18.25	0.0476	Pmax dan Spalling
50	245	4.09	15.70	0.0511	
51	200	4.41	12.88	0.0551	
52	180	4.79	11.66	0.0599	

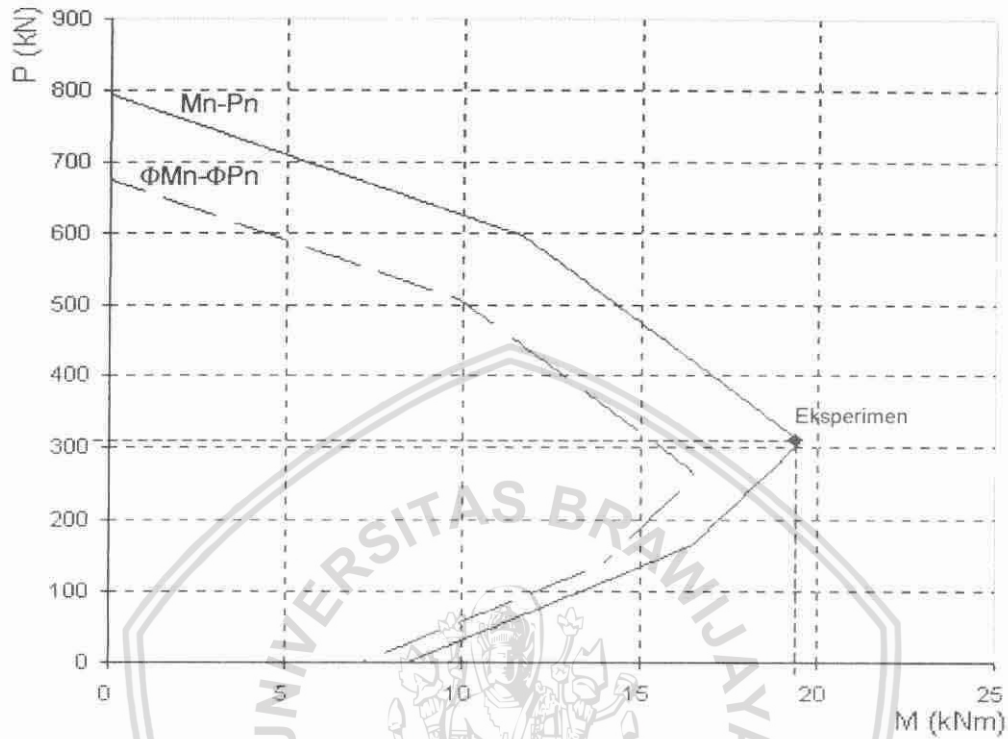


## KAPASITAS LENTUR DAN CURVATURE KOLOM

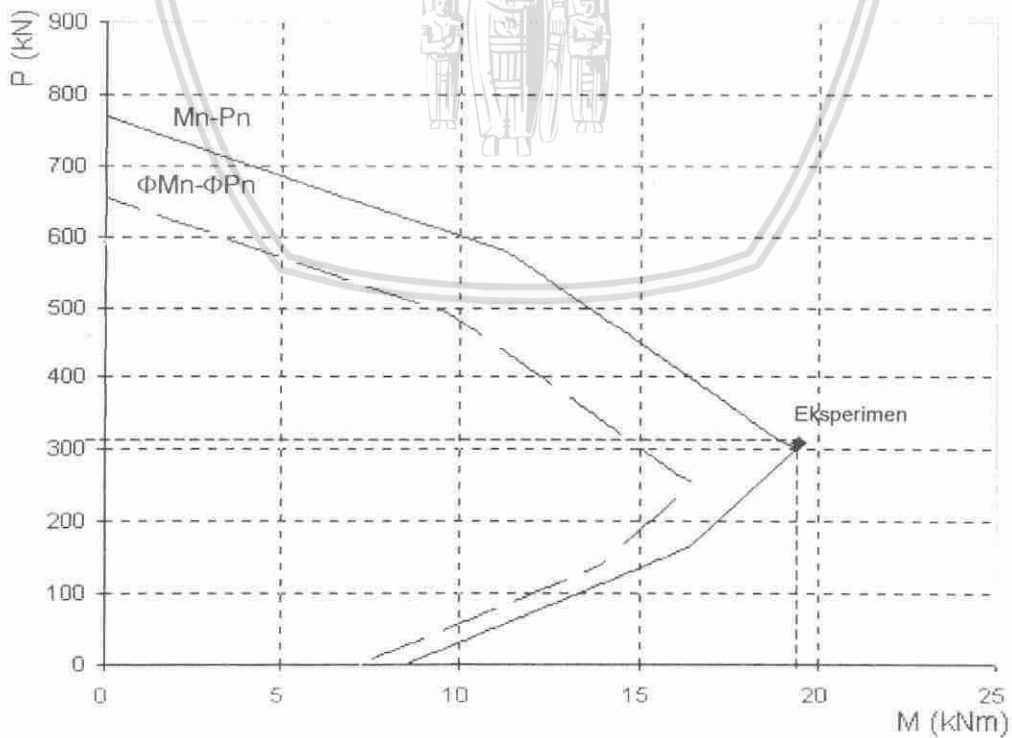
Benda Uji : C5E1

No	Beban (kN)	Lendutan (mm)	Momen Lentur (kNm)	Curvature ( $m^{-1}$ )	Keterangan
1	0	0.00	0.00	0.0000	
2	10	0.04	0.60	0.0004	
3	20	0.06	1.20	0.0007	
4	30	0.06	1.80	0.0007	
5	40	0.09	2.40	0.0011	
6	50	0.10	3.01	0.0012	
7	60	0.19	3.61	0.0024	
8	70	0.26	4.22	0.0032	
9	80	0.31	4.82	0.0038	
10	90	0.36	5.43	0.0044	
11	100	0.42	6.04	0.0052	retak rambut
12	105	0.48	6.35	0.0060	
13	110	0.58	6.66	0.0072	
14	115	0.66	6.98	0.0082	
15	120	0.75	7.29	0.0094	
16	125	0.80	7.60	0.0099	
17	130	0.90	7.92	0.0112	retak no. 2
18	135	0.93	8.23	0.0116	
19	140	0.99	8.54	0.0123	
20	145	1.06	8.85	0.0132	
21	150	1.13	9.17	0.0141	retak no. 3
22	155	1.24	9.49	0.0155	
23	160	1.37	9.82	0.0171	
24	165	1.41	10.13	0.0176	
25	170	1.49	10.45	0.0186	
26	175	1.58	10.78	0.0197	
27	180	1.69	11.10	0.0211	retak no. 4
28	185	1.81	11.43	0.0226	
29	190	1.86	11.75	0.0232	
30	195	1.99	12.09	0.0249	
31	200	2.08	12.42	0.0260	
32	205	2.12	12.73	0.0264	
33	210	2.14	13.05	0.0267	
34	215	2.20	13.37	0.0275	
35	220	2.23	13.69	0.0279	
36	225	2.35	14.03	0.0294	
37	230	2.39	14.35	0.0299	
38	235	2.49	14.69	0.0311	
39	240	2.55	15.01	0.0319	
40	245	2.90	15.41	0.0362	
41	250	3.25	15.81	0.0406	
42	255	3.56	16.21	0.0445	
43	260	3.78	16.58	0.0472	
44	265	4.05	16.97	0.0506	
45	270	4.19	17.33	0.0523	
46	274	4.26	17.61	0.0532	Pmax dan Spalling
47	225	4.82	14.58	0.0602	
48	180	5.12	11.72	0.0639	
49	150	5.53	9.83	0.0690	

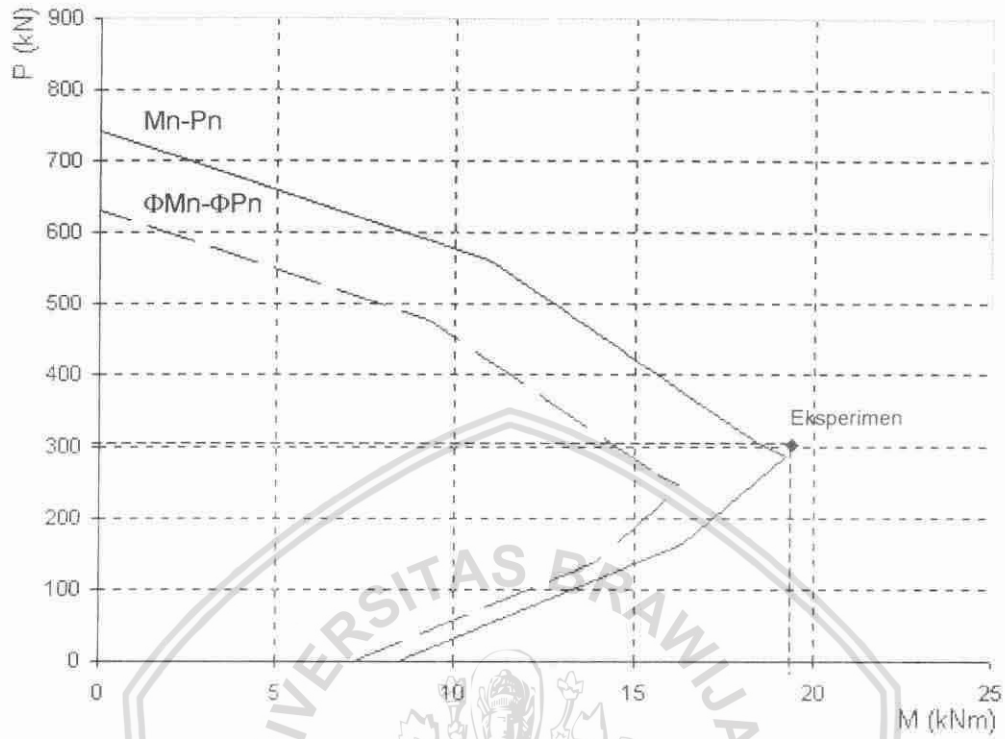
## DIAGRAM INTERAKSI P-M DAN TITIK KERUNTUHAN KOLOM



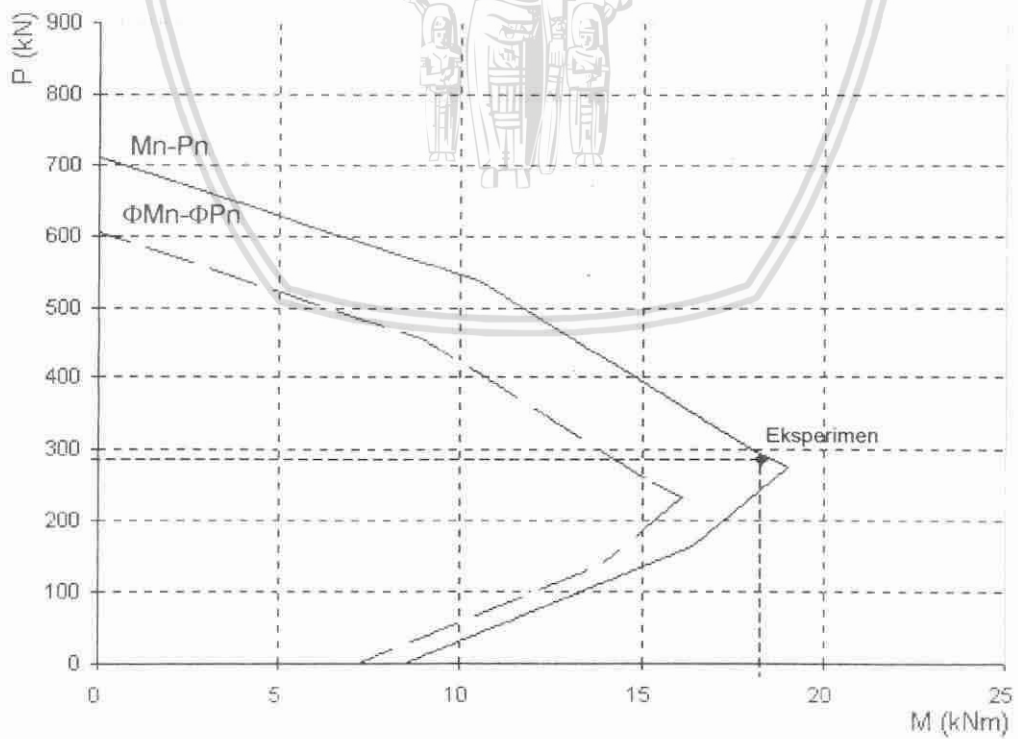
Gambar L.4.1. Diagram interaksi P-M dan titik keruntuhan C1E1 hasil eksperimen



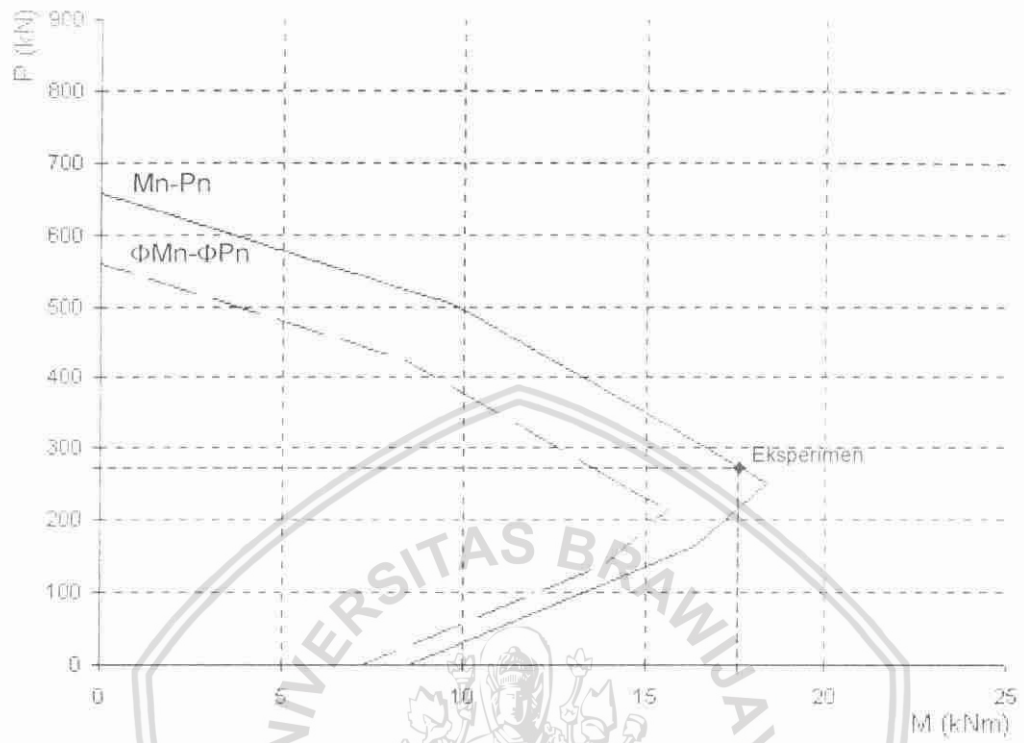
Gambar L.4.2. Diagram interaksi P-M dan titik keruntuhan C2E1 hasil eksperimen



Gambar L.4.3. Diagram interaksi P-M dan titik keruntuhan C3E1



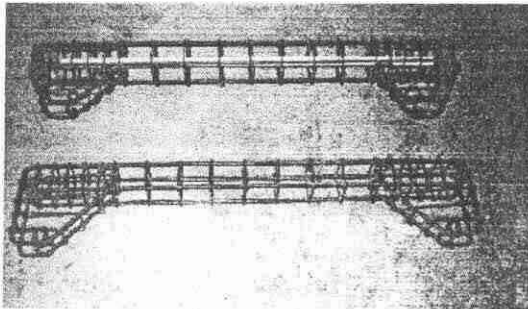
Gambar L.4.4. Diagram interaksi P-M dan titik keruntuhan C4E1



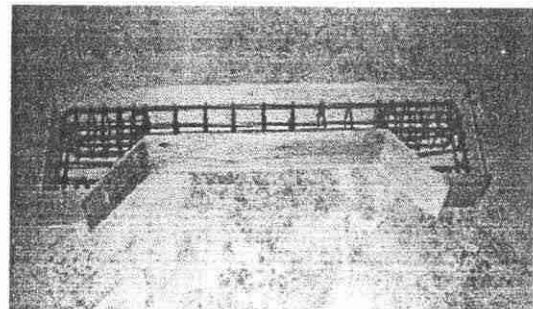
Gambar L.4.5. Diagram interaksi P-M dan titik keruntuhan C5E1



### DOKUMENTASI PENELITIAN



Penulangan benda uji



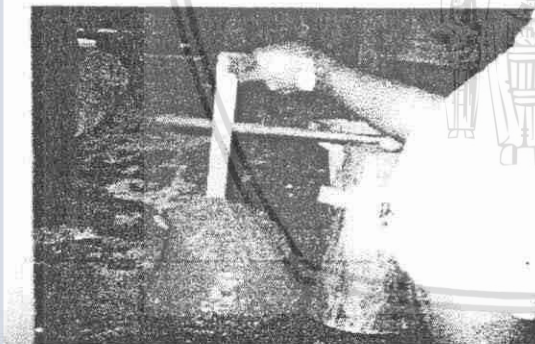
Bekisting benda uji



Pengadukan beton



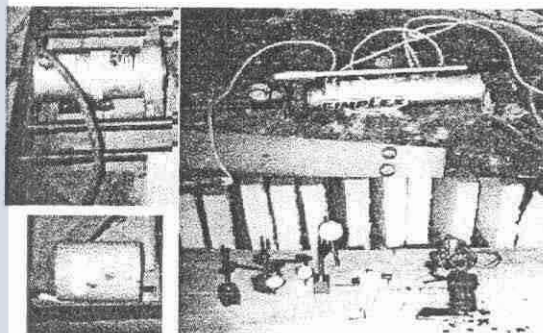
Pengecoran



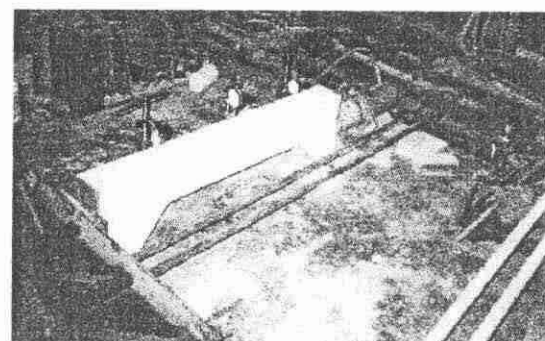
Uji nilai slump



Uji tekan silinder beton

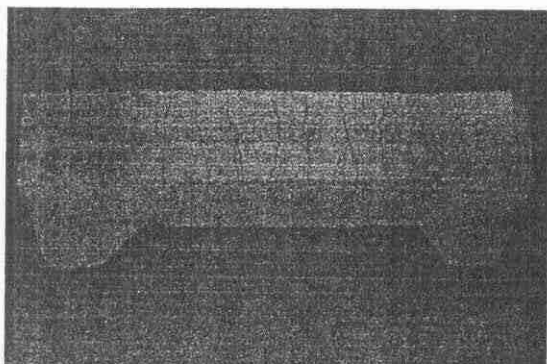


Peralatan pengujian

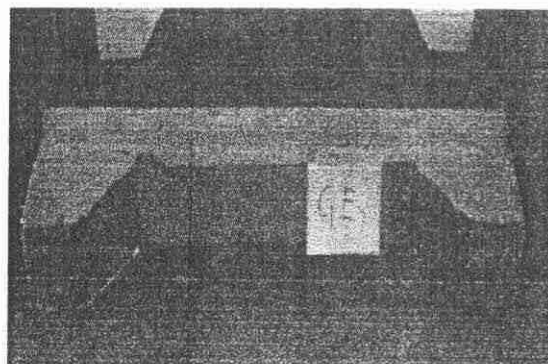


Setting Up pengujian

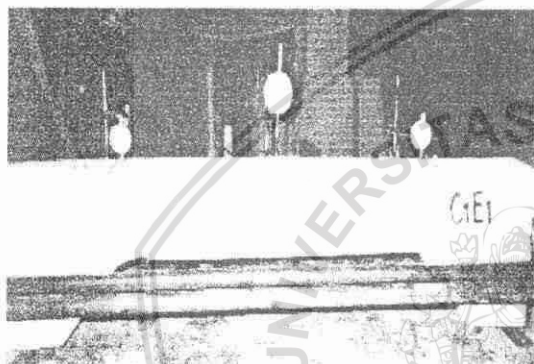




Sisi tarik C1E1  
(setelah pengujian)



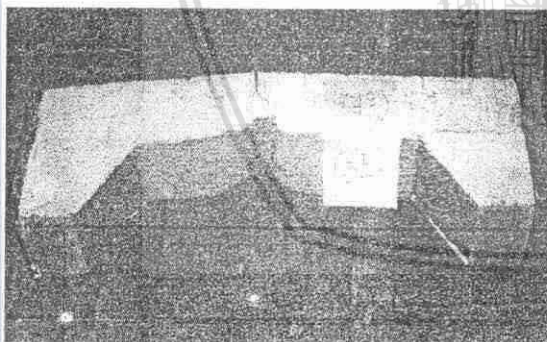
Sisi tekan C1E1  
(setelah pengujian)



Sisi samping C1E1  
(setelah pengujian)



Sisi tarik C5E1  
(setelah pengujian)



Sisi tekan C5E1  
(setelah pengujian)



Sisi samping C5E1  
(setelah pengujian)

0800175