

ISSN: 2086-9045

# Inersia

Jurnal Teknik Sipil

## Artikel

Perilaku Kuat Tekan Mortar Semen Pasangan Dengan Abu Sabut Cangkang Sawit Yang Dioven dan Tidak Dioven  
*Elhusna, Agustin Gunawan, Dofi Hendro Fogi*

Perencanaan Sumur Resapan Air Hujan Untuk Konservasi Air Tanah Di Daerah Permukiman (Studi Kasus Di Perumahan RT. II, III Dan IV Perumnas Lingkar Timur Bengkulu)  
*Kurnia Iriani, Agustin Gunawan, Besperi*

Sumur Resapan Air Limbah Kamar Mandi Untuk Keseimbangan Permukaan Air Tanah Di Daerah Permukiman (Studi Kasus Di perumahan RT. II, III Dan IV Perumnas Lingkar Timur Bengkulu)  
*Anggun Lia Anestri, Agustin Gunawan, Besperi*

Evaluasi Kinerja Saluran Primer dan Bangunan Sadap Untuk Menentukan Metode Pemeliharaan Daerah Irigasi Air Ngalam Kabupaten Seluma  
*Fanny Dwiyulitasari Edwar, Muhammad Fauzi, Besperi*

Pengaruh Angin Terhadap Tinggi Gelombang Pada Struktur Bangunan *Breakwater* Di Tapak Paderi Kota Bengkulu  
*Prima Nadia, Muhammad Ali, Besperi*

Efektifitas Penerapan Belok Kiri Langsung (Studi Kasus Jalan Soeprpto Kota Bengkulu)  
*Samsul Bahri, Vitria Elsandiy*

*Stability Analysis Of Edge River Lawe Liang Panggi At Leuser Sub-District, Southeast Aceh Regency Towards Flash Flood*  
*Azmeri, Devi Sunday*

Kajian Pengaruh Penambahan Abu Cangkang Sawit Terhadap Kuat Tekan Bata Merah  
*Deltiana Rosalia, Elhusna, Agustin Gunawan*

Analisis Optimasi Biaya Konstruksi Kolom Dengan Variasi Nilai  $\rho$  dan  $f_c'$   
*Gerry Revaldo, Fepy Supriani, Mukhlis Islam*

Analisis Optimasi Biaya Konstruksi Balok Dengan Variasi Nilai  $\rho$  dan  $f_c'$   
*Marrolan, Fepy Supriani, Mukhlis Islam*

Fakultas Teknik  
Universitas Bengkulu

Vol. 5 No. 1 April 2013

**VOLUME 5 NO. 1 APRIL 2013**  
**NOMOR ISSN : 2086-9045**

**JURNAL TEKNIK SIPIL**  
**INERSIA**

**Penanggung Jawab :**

Ketua Program Studi Teknik Sipil UNIB

**Pemimpin Redaksi :**

Elhusna, S.T., M.T

**Sekretaris :**

Agustin Gunawan, S.T., M.Eng

**Dewan Penyunting Pelaksana:**

Ade Sri Wahyuni, S.T., M.Eng., Ph.D

Makmun R. Razali, S.T., M.T

Yovika Sari, A.Md

**Mitra Bestari (Reviewer) Untuk Volume Ini :**

Prof. Ir. H. Sarwidi, M.Sc., Ph.D

Dr. Ir. Abdullah, M.Sc

Dr. Gusta Gunawan, S.T., M.T

Ade Sri Wahyuni, S.T., M.Eng., Ph.D

**Alamat Sekretariat Redaksi :**

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Bengkulu

Jln. W.R. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu

Tlp.+62736-344087, 21170, Ext. 337, Fax +62736-349134

*Email: jurnalinersia\_tsunib@yahoo.com*

**Penerbit :**

Fakultas Teknik UNIB



## ANALISIS OPTIMASI BIAYA KONSTRUKSI KOLOM DENGAN VARIASI NILAI $\rho$ DAN $f_c'$

GERRY REVALDO<sup>1)</sup>, FEPY SUPRIANI<sup>2)</sup>, MUKHLIS ISLAM<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik UNIB, Jl. W. R. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371, Telp. (0736)344087, e-mail : sipil\_okezone@yahoo.com

<sup>2,3)</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik UNIB, Bengkulu

### Intisari

Penelitian ini bertujuan untuk dapat mengetahui konstruksi kolom beton bertulang berpenampang persegi yang paling optimum dan ekonomis dengan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$ . Proses optimasi pada penelitian ini memerlukan perhitungan berulang-ulang yang dibantu dengan menggunakan *Microsoft Office Excel*. Analisis biaya konstruksi kolom beton bertulang berpenampang persegi ini terdiri dari 840 sampel untuk masing-masing dimensi penampang kolom, kuat tekan beton ( $f_c'$ ), kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), dan kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) yang berbeda. Hasil sampel analisis menghasilkan grafik interaksi dimensi dan harga kolom dan grafik interaksi  $f_c'$  dan harga kolom yang terdiri dari 1.152 grafik dan juga menghasilkan grafik gabungan dari grafik sebelumnya, yaitu grafik interaksi dimensi,  $f_c'$ , dan harga kolom yang terdiri dari 96 grafik untuk masing-masing biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting, menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai. Sehingga dari semua biaya struktur kolom yang paling optimum dengan variasi nilai  $M_n$  dan  $P_n$  dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  yang sama maka nilai  $\rho$ , dimensi kolom, dan biaya struktur kolom dominan akan semakin bertambah dan dapat disimpulkan juga bahwa semakin besar nilai  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  yang sama maka nilai  $\rho$  dan biaya struktur kolom dominan akan semakin berkurang sedangkan dimensi tidak berubah dan mutu beton ( $f_c'$ ) yang digunakan 25 MPa - 30 MPa.

**Kata kunci :** optimasi, biaya, kolom, rasio tulangan, kuat tekan beton

### Abstract

*This research aims to study the most optimum and economical of square reinforced concrete column with the variation of  $\rho$  and  $f_c'$ . Process optimization in this study requires repetitive calculations by using a Microsoft Office Excel. Analysis of the cost of construction of reinforced concrete columns square cross-section consists of 840 samples with variation of column section dimensions, compressive strengths of concrete ( $f_c'$ ), nominal axial capacity of columns ( $P_n$ ), and nominal bending moment capacity of column ( $M_n$ ). The results of the sample analysis are interaction charts corresponding column dimension and cost and interaction of  $f_c'$  and cost consisting of 1,152 charts and also produces composite charts from the previous chart, which is the interaction, among dimension,  $f_c'$ , and cost of column consists of 96 graphs with variation column without using formwork, formwork 1 time use, of formwork used 2 times, 3 times and use disposable formwork. Hence from all of the cost of the optimum structure of the column with the variation of the  $M_n$  and  $P_n$  of could be concluded that the greater the value of  $M_n$  while  $P_n$  constant the of value of  $\rho$ , column dimensions, and cost structure would dominantly increase and it could be concluded also that the greater the value of  $P_n$  with constant  $M_n$  value then the value of  $\rho$  and the cost structure would dominantly decrease while the dimensions have not changed and the compressive strength of concrete ( $f_c'$ ) used are 25 MPa - 30 MPa.*

**Keywords :** optimization, cost, columns, reinforcement ratio, compressive strength of concrete

## PENDAHULUAN

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, maka semakin mudah untuk mendapatkan bahan mutu tinggi dibidang konstruksi. Hal yang demikian dengan sendirinya semakin membuka peluang untuk dapat membuat komponen struktur yang berfungsi lebih efisien dan optimal, termasuk dalam lingkungan struktur beton bertulang khususnya komponen kolom. Meskipun demikian, untuk tetap menjadi perhatian bahwa komponen struktur kolom menduduki posisi penting didalam keseluruhan sistem struktur bangunan gedung. Sehingga upaya-upaya efisien dan optimasi yang dilakukan hendaknya selalu berdasarkan pada pertimbangan-pertimbangan yang berkaitan dengan ketentuan-ketentuan yang berlaku (Dipohusodo, 1999).

Kolom merupakan anggota tekan vertikal dari suatu rangka struktural yang ditujukan untuk mendukung balok penahan beban. Kolom menyalurkan beban dari lantai atas ketinggian lebih bawah dan selanjutnya ke tanah melalui pondasi, karena kolom merupakan elemen tekan. Kegagalan sebuah kolom didalam suatu lokasi yang kritis dapat mengakibatkan keruntuhan progresif dari lantai yang berhubungan dan keruntuhan total ultimit struktur secara keseluruhan. Kegagalan kolom struktural merupakan kepentingan utama dalam hal ekonomi demikian juga korban jiwa. Perhatian yang besar perlu diambil didalam desain kolom, dengan suatu kekuatan cadangan yang lebih tinggi daripada kasus balok-balok dan elemen-elemen struktural lainnya, terutama karena kegagalan tekan memberikan peringatan visual yang sedikit (Nawy, 2010).

Dalam penelitian ini penulis menentukan dimensi kolom pada struktur beton bertulang dengan memperhatikan masalah kekuatan dan biaya karena pada saat ini harga material

yang semakin mahal, sehingga dalam merencanakan struktur bangunan sangat perlu diperhatikan masalah biaya. Dalam menganalisis perhitungan yang akan dilakukan adalah untuk memperoleh hasil yang mempunyai harga struktur kolom beton bertulang yang paling murah tetapi tetap mampu mendukung beban struktur dengan aman. Kekuatan yang dibutuhkan oleh suatu struktur kolom beton bertulang dapat dicapai dengan memberikan luasan penampang beton dan tulangan yang cukup. Dalam hal penggunaan luas dimensi penampang kolom yang besar dan pemakaian tulangan yang sedikit, atau dengan luas dimensi penampang kolom yang kecil dan pemakaian tulangan yang banyak. Penggunaan luasan tulangan baja atau rasio penulangan pada peraturan SNI 03-2847-2002 Pasal 12.9.1 membatasi luas tulangan longitudinal komponen struktur tekan non-komposit tidak boleh kurang dari 0,01 ataupun lebih dari 0,08 kali luas bruto penampang  $A_g$ .

Dalam penelitian ini untuk mendapatkan hasil yang paling optimal dicoba dengan menggunakan proses optimasi yang dibantu dengan menggunakan program komputer, untuk menghasilkan ketepatan dan kecepatan dalam analisa. Proses penelitian ini memerlukan perhitungan yang berulang-ulang atau *trial error*. Penulis melakukan penelitian untuk mencoba penentuan optimasi biaya konstruksi kolom dengan variabel desainnya berupa dimensi penampang kolom, luasan tulangan baja, kuat tekan beton ( $f_c'$ ), kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), dan kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ).

### Kolom

SK SNI 03-2847-2002 mendefinisikan kolom adalah komponen struktur bangunan yang tugas utamanya menyangga beban

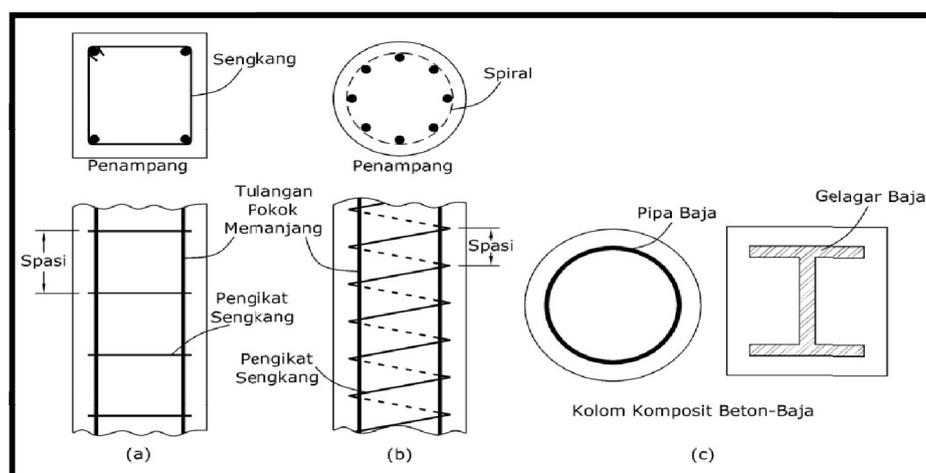
aksial desak vertikal dengan bagian tinggi yang tidak ditopang paling tidak tiga kali dimensi lateral terkecil.

Sebagai bagian dari suatu kerangka bangunan dengan fungsi dan peran seperti tersebut, kolom menempati posisi penting didalam sistem struktur bangunan. Kegagalan kolom akan berakibat langsung pada runtuhnya komponen struktur lain yang berhubungan dengannya, atau bahkan merupakan batas runtuh total keseluruhan struktur bangunan. Pada umumnya kegagalan atau keruntuhan komponen tekan tidak diawali dengan tanda peringatan yang jelas, melainkan bersifat mendadak. Oleh karena itu, dalam merencanakan struktur kolom harus memperhitungkan secara cermat dengan memberikan cadangan kekuatan lebih tinggi daripada untuk komponen struktur lainnya karena penggunaan didalam praktek umumnya kolom diperluas dengan mencakup juga tugas menahan kombinasi beban aksial dan momen lentur (Dipohusodo, 1999).

### Jenis Kolom Berdasarkan Bentuk dan Susunan Tulangan

Menurut Dipohusodo (1999), secara garis besar ada tiga jenis kolom beton bertulang, seperti yang terlihat pada Gambar 1 :

1. Kolom menggunakan pengikat sengkang lateral. Kolom ini merupakan kolom beton yang ditulangi dengan batang tulangan pokok memanjang, yang pada jarak spasi tertentu diikat dengan pengikat sengkang kearah lateral, sedemikian rupa sehingga penulangan keseluruhan membentuk kerangka seperti tampak pada Gambar 1.a.
2. Kolom menggunakan pengikat spiral. Kolom ini bentuknya sama dengan yang pertama hanya saja sebagai pengikat tulangan pokok memanjang adalah tulangan spiral yang dililitkan keliling membentuk heliks menerus disepanjang kolom seperti pada Gambar 1.b.
3. Struktur kolom komposit seperti tampak pada Gambar 1.c. Merupakan komponen struktur tekan yang diperkuat pada arah memanjang dengan gelagar baja profil atau pipa, dengan atau tanpa diberi batang tulangan pokok memanjang.



Sumber : Dipohusodo, 1999

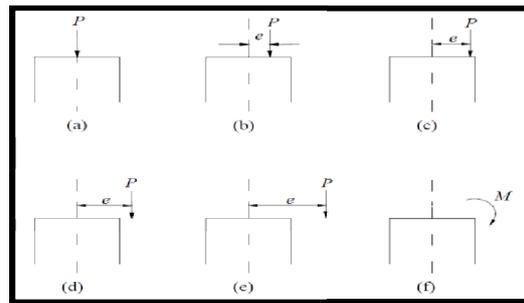
**Gambar 1.** Jenis-Jenis Kolom

### Tipe Kolom Berdasarkan Pembebanan

Menurut Prakosa (2010), kolom akan melentur akibat momen dan momen tersebut akan cenderung menimbulkan tekanan pada satu sisi kolom dan tarikan pada sisi lainnya. Tergantung pada besar relatif momen dan beban aksial, banyak cara yang dapat menyebabkan runtuhnya kolom. Gambar 2 memperlihatkan kolom yang memikul beban  $P_n$ . Dalam beberapa bagian dari gambar, beban ditempatkan pada eksentrisitas yang semakin besar sehingga menghasilkan momen yang semakin besar pula. Maka dapat diketahui tipe kolom berdasarkan pembebanannya, yaitu :

1. Mengalami beban aksial yang besar dan memiliki eksentrisitas sebesar nol sehingga tidak mengalami momen. Untuk kondisi ini, keruntuhan akan terjadi oleh hancurnya beton dan semua tulangan dalam kolom mencapai tegangan leleh dalam tekan (Gambar 2.a).
2. Mengalami beban aksial besar dan memiliki eksentrisitas yang kecil maka timbul momen yang kecil dengan seluruh penampang tertekan. Jika suatu kolom menerima momen lentur kecil, seluruh kolom akan tertekan tetapi tekanan disatu sisi akan lebih besar dari sisi lainnya. Tegangan tekan maksimum dalam kolom akan sebesar  $0,85f_c'$  dan keruntuhan akan terjadi oleh runtuhnya beton dan semua tulangan tertekan (Gambar 2.b).
3. Eksentrisitas membesar sehingga gaya tarik mulai terjadi pada satu sisi kolom. Jika eksentrisitas ditingkatkan dari kasus sebelumnya, gaya tarik akan mulai terjadi pada satu sisi kolom dan baja tulangan pada sisi tersebut akan menerima gaya tarik yang lebih kecil dari tegangan leleh. Pada sisi yang lain tulangan mendapat gaya tekan (Gambar 2.c).

4. Kondisi beban berimbang. Saat eksentrisitas terus ditambah, akan dicapai suatu kondisi dimana tulangan pada sisi tarik mencapai leleh dan pada saat yang bersamaan, beton pada sisi lainnya mencapai tekan maksimum  $0,85f_c'$ . Kondisi ini disebut kondisi pada beban berimbang, *balanced* (Gambar 2.d).
5. Mengalami momen yang besar dan beban aksial yang kecil. Jika eksentrisitas terus ditambah, keruntuhan terjadi akibat tulangan meleleh sebelum hancurnya beton (Gambar 2.e).
6. Momen lentur murni. Pada kondisi ini, keruntuhan terjadi seperti halnya pada sebuah balok (Gambar 2.f).



Sumber : Prakosa (2010)

**Gambar 2.** Kolom Menerima Beban dengan Eksentrisitas yang Terus Diperbesar

### Asumsi Dasar Perencanaan Kolom

1. Pasal 12.2.2 SNI 03-2847-2002 : Regangan pada tulangan dan beton harus diasumsikan berbanding lurus dengan jarak dari sumbu netral.
2. Pasal 12.2.3 SNI 03-2847-2002 : Regangan maksimum yang dapat dimanfaatkan pada serat tekan beton terluar harus diambil sama dengan 0,003.
3. Pasal 12.2.4 SNI 03-2847-2002 : Tegangan pada tulangan yang nilainya lebih kecil daripada kuat leleh  $f_y$  harus diambil sebesar  $E_s$  dikalikan regangan baja. Untuk regangan yang nilainya lebih besar dari regangan leleh yang

berhubungan dengan  $f_y$ , tegangan pada tulangan harus diambil sama dengan  $f_y$ .

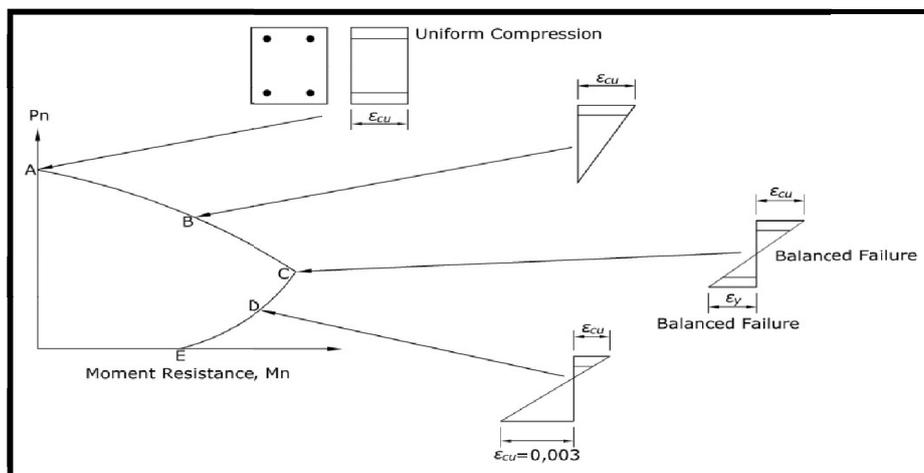
4. Pasal 12.2.5 SNI 03-2847-2002 : Dalam perhitungan aksial dan lentur beton bertulang, kuat tarik beton diabaikan.
5. Pasal 12.2.6 SNI 03-2847-2002 : Hubungan antara distribusi tegangan tekan beton dan regangan beton boleh diasumsikan berbentuk persegi, trapesium, parabola, atau bentuk lainnya yang menghasilkan perkiraan kekuatan yang cukup baik bila dibandingkan dengan hasil pengujian.
6. Pasal 12.2.7.1 SNI 03-2847-2002 : Tegangan beton sebesar  $0,85f'_c$  diasumsikan terdistribusi secara merata pada daerah tekan ekuivalen yang dibatasi oleh tepi penampang dan suatu garis lurus yang sejajar dengan sumbu netral sejarak  $a = \beta_1c$  dari serat dengan regangan tekan maksimum.
7. Pasal 12.2.7.3 SNI 03-2847-2002 : Faktor  $\beta_1$  diambil sebagai berikut :
  - a. Untuk  $f'_c \leq 30$  MPa,  $\beta_1 = 0,85$ .
  - b. Untuk  $f'_c > 30$  MPa,  $\beta_1 = 0,85 - 0,008.(f'_c - 30) \geq 0,65$ .

### Diagram Interaksi

Menurut Muin (2008), diagram interaksi adalah diagram yang menunjukkan hubungan momen lentur dan gaya aksial tekan yang dapat dipikul elemen tekan pada kondisi batas yang dapat dilihat pada Gambar 3.

Pada setiap titik pada kurva diagram interaksi menunjukkan satu kombinasi/pasangan  $M_n$  dan  $P_n$  pada kondisi batas dapat dipikul penampang. Untuk titik-titik pasangan M dan P terletak didalam area kurva merupakan pasangan M dan P yang sanggup dipikul penampang (daerah aman). Sedangkan titik-titik pasangan M dan P yang terletak diluar area kurva merupakan pasangan M dan P yang tidak dapat dipikul penampang (daerah runtuh).

Diagram interaksi kolom yang akan dibuat dan akan dipakai untuk perencanaan tulangan kolom adalah berupa diagram interaksi kolom dengan rasio tulangan 1% - 8%.



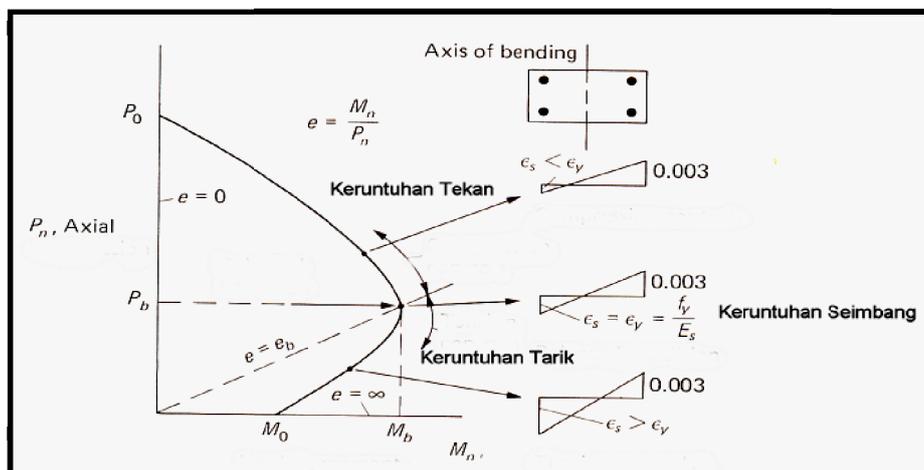
Sumber : [Muin, 2008](#)

**Gambar 3.** Diagram Interaksi  $P_n$  dan  $M_n$

## Tipe Batas Keruntuhan pada Diagram Interaksi

Menurut Muin (2008), batas keruntuhan yang tergambar pada diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  adalah terdiri dari keruntuhan tekan,

keruntuhan seimbang, dan keruntuhan tarik. Tipe keruntuhan ini tergantung dari besarnya regangan tulangan tarik ( $\epsilon_s$ ) dibandingkan dengan regangan leleh baja ( $\epsilon_y$ ) yang dapat dilihat pada Gambar 4.



Sumber : [Muin, 2008](#)

**Gambar 4.** Tipe Keruntuhan pada Diagram Interaksi

### 1. Batas Keruntuhan Tekan

Terjadi bila jumlah tulangan relatif banyak maka keruntuhan dimulai dari beton sedangkan tulangan bajanya masih elastis, yaitu apabila regangan tulangan tarik ( $\epsilon_s$ ) lebih kecil dari regangan leleh baja ( $\epsilon_y$ ). Penampang seperti itu disebut penampang *overreinforced*, sifat keruntuhannya adalah getas (non-daktail). Suatu kondisi yang berbahaya karena penggunaan bangunan tidak melihat adanya deformasi yang besar yang dapat dijadikan pertanda bilamana struktur tersebut mau runtuh, sehingga tidak ada kesempatan untuk menghindarinya terlebih dahulu. Pada Gambar 3 diagram interaksi yang terletak antara titik A dan C merupakan daerah keruntuhan tekan. Sehingga jika pasangan momen dan gaya aksial yang bekerja pada kolom terletak antara titik A dan C pada diagram interaksi, maka keruntuhan yang akan terjadi pada kolom merupakan keruntuhan tekan. Dengan kata lain titik-titik yang terletak

antara A dan C merupakan batas keruntuhan tekan.

### 2. Batas Keruntuhan Seimbang

Pada keruntuhan seimbang, beton yang tertekan runtuh bersamaan dengan tulangan tarik mencapai tegangan lelehnya. Kondisi keseimbangan regangan menempati posisi penting karena merupakan pembatas antara dua keadaan penampang kolom beton bertulang yang berbeda cara hancurnya. Jadi pada kondisi seimbang ini :

- Regangan beton maksimum,  $\epsilon_{cu} = 0,003$ .
- Regangan tulangan tarik,  $\epsilon_s = \epsilon_y$ , dan tegangannya  $f_s = f_y$ .

Sedangkan tegangan tulangan tekan tergantung dari regangannya. Jika regangan yang terjadi pada tulangan tekan melebihi regangan lelehnya ( $\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s}$ ,  $E_s$  = modulus elastisitas baja =  $2 \times 10^5$  MPa), maka tulangan tekan

sudah mencapai lelehnya, sehingga tegangan tulangan tekan  $f_s' = f_y$ .

### 3. Batas Keruntuhan Tarik

Terjadi bila jumlah tulangan baja relatif sedikit sehingga tulangan tersebut akan leleh terlebih dahulu sebelum betonnya pecah, yaitu apabila regangan tulangan tarik ( $\epsilon_s$ ) lebih besar dari regangan leleh baja ( $\epsilon_y$ ). Penampang seperti itu disebut penampang *underreinforced*. Pada Gambar 3 diagram interaksi pada daerah C-E merupakan daerah keruntuhan tarik.

### Optimasi

Penggunaan metoda optimasi dalam perencanaan struktur sebenarnya bukanlah merupakan hal yang baru dan sudah banyak dikembangkan karena manfaatnya yang banyak dirasakan. Berdasarkan berbagai kemajuan ilmu dan teknologi, perancangan struktur bangunan harus direncanakan secara optimal yaitu struktur yang paling ekonomis serta memenuhi segala persyaratan yang diinginkan. Oleh karena itu, perlu dikembangkan suatu sistem yang mampu menangani berbagai masalah optimasi. Ada dua pendekatan utama dalam optimasi struktur. Pendekatan yang pertama menggunakan pemrograman matematika dan pendekatan yang lain menggunakan metoda kriteria optimal. Kedua pendekatan ini masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan (Naftali, 2007).

Setiap struktur rangka memiliki empat hal pokok dengan empat hal ini dapat merupakan suatu variabel yang dapat diubah-ubah untuk mengoptimasi struktur tersebut (variabel desain). Empat hal ini adalah ukuran elemen, geometri struktur (posisi titik-titik kumpul), gambaran struktur (bagaimana titik-titik kumpul tersebut dihubungkan oleh elemen-elemen), dan material bangunan. Material bangunan biasanya ditentukan terlebih dahulu. Persyaratan-persyaratan yang harus dipenuhi

oleh struktur disebut kendala. Dalam sebagian besar kasus, kendala berhubungan dengan kekuatan dan defleksi struktur (Naftali, 2007).

### Biaya Pembuatan Kolom

Biaya merupakan faktor penting dalam setiap aspek kehidupan. Dengan biaya konstruksi yang lebih rendah, sebuah proyek akan menjadi lebih layak secara finansial. Dengan efisiensi biaya meterial, maka penghematan terbesar telah dilakukan. Dalam perhitungan biaya pembuatan kolom, sebelumnya harus mencari komposisi konstruksi kolom yang paling optimal agar didapat harga yang paling optimum dan ekonomis.

Analisa biaya konstruksi menggunakan indeks berdasarkan metode SNI (Standar Nasional Indonesia). Untuk pekerjaan beton, perhitungan biaya konstruksi umumnya mengacu pada SNI 7394 : 2008 tentang tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton untuk bangunan gedung dan perumahan. Pada SNI 7394 : 2008 Pasal 5 tentang persyaratan untuk perhitungan harga satuan dibagi menjadi Pasal 5.1 persyaratan umum dan pasal 5.2 persyaratan teknis.

### METODOLOGI PENELITIAN

Peneliti menggunakan jenis penelitian terapan (*applied/practical research*). Penelitian terapan adalah penyelidikan yang hati-hati, sistematis dan terus menerus terhadap suatu masalah dengan tujuan untuk digunakan dengan segera untuk keperluan tertentu. Pada penelitian ini terdapat beberapa variabel, antara lain :

#### 1. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

Variabel bebas adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel dependen (terikat). Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi kuat tekan beton ( $f_c'$ ) dari 25 MPa sampai

dengan 35 MPa, mutu baja tulangan ( $f_y$ ) = 400 MPa, ukuran dimensi kolom dari 30 cm sampai dengan 60 cm, jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tekan ( $d'$ ) = 60 mm, nilai kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), dan nilai kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ).

## 2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah rasio tulangan ( $\rho_g$ ) dari 1% sampai dengan 8%.

## Metode Analisis

Analisis kolom persegi ini nantinya akan diaplikasikan dengan menggunakan program *Microsoft Office Excel*. Pada langkah awal penelitian, peneliti akan melakukan asumsi-asumsi terhadap beberapa hal yang diketahui, antara lain :

- Tulangan yang didapat pada kolom beton bertulang berpenampang persegi dengan tulangan longitudinal dua muka.
- Meninjau elemen struktur beton bertulang yang mengalami kombinasi gaya uniaksial.
- Menentukan rasio tulangan longitudinal pada kolom berpenampang persegi dengan menggunakan diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ .
- Kuat tekan beton ( $f'_c$ ) yang diambil merupakan mutu beton normal mulai dari 25 MPa sampai dengan 35 MPa dengan kenaikan (*increment*) sebesar 2,5 MPa. Artinya, mulai dari 25 MPa, 27,5 MPa, 30 MPa, 32,5 MPa, dan 35 MPa.
- Mutu baja tulangan ( $f_y$ ) sebesar 400 MPa.
- Tulangan dari 1% sampai dengan 8% dari luas penampang kolom berdasarkan Pasal 12.9.1 SNI 03-2847-2002

- dengan kenaikan (*increment*) sebesar 0,1%.
- Dimensi kolom persegi mulai dari 30 cm sampai dengan 60 cm dengan kenaikan (*increment*) sebesar 5 cm. Artinya, mulai dari 30 cm, 35 cm, 40 cm, 45 cm, 50 cm, 55 cm, dan 60 cm.
- Nilai  $M_n$  diambil dari 50 kNm sampai dengan 1200 kNm dan nilai  $P_n$  diambil dari 50 kN sampai dengan 2000 kN, dengan kenaikan (*increment*) 400 kNm untuk  $M_n$  dan 400 kN untuk  $P_n$ . Artinya, untuk nilai  $M_n$  mulai dari 50 kNm, 400 kNm, 800 kNm, dan 1200 kNm, dan nilai  $P_n$  mulai dari 50 kN, 400 kN, 800 kN, 1200 kN, 1600 kN, dan 2000 kN.
- Jarak dari serat tekan terluar terhadap titik berat tulangan tekan ( $d'$ ) adalah 60 mm.
- Panjang kolom adalah 1 m'.
- Berat jenis besi sebesar 7.850 kg/m<sup>3</sup>.
- Modulus elastisitas baja ( $E_s$ ) sebesar 200.000 MPa.
- Sengkang tidak ditinjau.
- Perhitungan biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting, dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai.
- Menggunakan *mix design* yang diambil dari hasil penelitian di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Bengkulu untuk PT. KSS (Karya Sakti Sejahtera).
- Perhitungan biaya berdasarkan SNI 7394-2008.
- Daftar harga upah bahan dan peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.

Pada tahapan analisis perhitungan kolom beton bertulang peneliti mencari titik koordinat kombinasi beban pada diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ . Perhitungan dilakukan dengan menggunakan beberapa rumus

umum dari tegangan-regangan penampang beton, sebagai berikut :

$$d = h - d' \dots\dots\dots (1)$$

$$d'' = h \cdot 0,5 - d' \dots\dots\dots (2)$$

$$A_s = A_s' = 0,5 \cdot \rho_g \cdot b \cdot h \dots\dots (3)$$

$$C_b = \frac{0,003 \cdot E_s}{f_y + 0,003 \cdot E_s} \cdot d \dots\dots\dots (4)$$

$$a = \beta_1 \cdot C \dots\dots\dots (5)$$

Selanjutnya dari nilai  $C_b$  dapat menghitung nilai  $C$  disetiap jaraknya. Semakin rapat jarak perhitungan nilai  $C$  semakin baik didapat grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ . Pada diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  ada batas keruntuhan yang terdiri dari keruntuhan tekan, keruntuhan seimbang, dan keruntuhan tarik.

$$C = C_b + \left( \frac{d - C_b}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) \cdot x_i \dots\dots\dots (6)$$

$$C = d' + \left( \frac{C_b - d'}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) \cdot x_i \dots\dots\dots (7)$$

$$f_s' = 600 \cdot \frac{C - d'}{C} \dots\dots\dots (8)$$

$$f_s = 600 \cdot \frac{d - C}{C} \dots\dots\dots (9)$$

$$N_{D1} = (0,85 \cdot f_c') \cdot b \cdot a \dots\dots\dots (10)$$

$$N_{D2} = A_s' \cdot f_s' \dots\dots\dots (11)$$

$$N_T = A_s \cdot f_s \dots\dots\dots (12)$$

$$P_n = N_{D1} + N_{D2} - N_T \dots\dots\dots (13)$$

$$M_n = N_{D1} (d - d'' - a/2) + N_{D2} (d - d' - d'') + N_T \cdot d'' \dots\dots\dots (14)$$

Setelah didapatkan nilai  $P_n$  dan  $M_n$  pada setiap nilai  $C$  yang berbeda pada batas keruntuhan tekan, keruntuhan seimbang, dan keruntuhan tarik maka akan mendapatkan grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ . Setelah itu

peneliti melakukan perhitungan biaya konstruksi kolom. Adapun langkah-langkah menghitung biaya konstruksi kolom :

1. Jika setelah mendapat grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ , maka didapat juga nilai rasio tulangan ( $\rho_g$ ) yang aman untuk digunakan pada perencanaan kolom. Dengan mendapatkan nilai  $\rho_g$  maka dapat dihitung harga pembuatan kolom yang telah didesain dengan cara :

$$V_{\text{beton}} = L \times b \times h \dots\dots\dots (15)$$

$$W_{\text{besi}} = B_j \text{ besi} \times A_{st} \times L \dots\dots\dots (16)$$

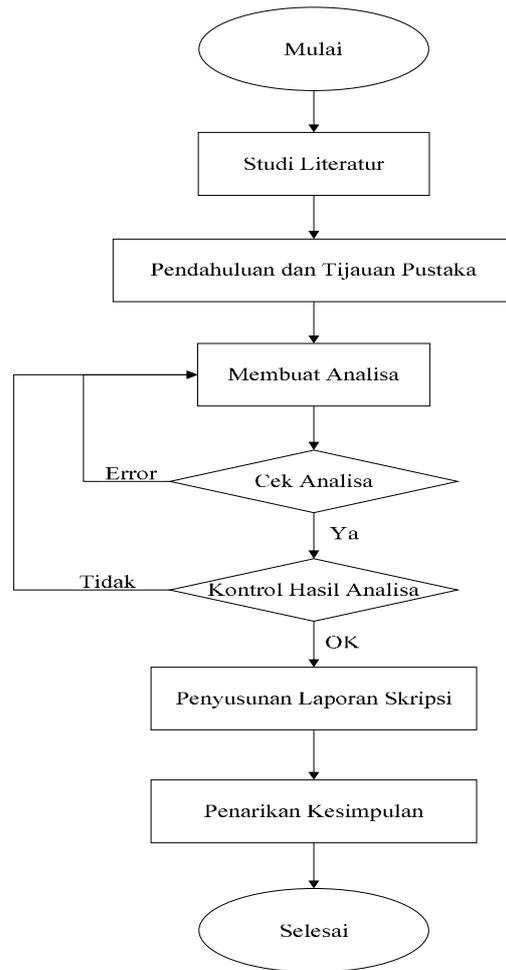
2. Sesuai dengan SNI 7394-2008, maka indeks perkalian harga pembuatan kolom beton bertulang dapat dihitung.
3. Untuk indeks bahan pekerjaan beton menggunakan indeks dari hasil perhitungan *mix design* yang diambil dari hasil penelitian di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Bengkulu untuk PT. KSS.
4. Selanjutnya dilakukan identifikasi harga satuan material komponen struktur kolom. Dimana analisis dilakukan dengan menggunakan daftar harga upah bahan dan peralatan tahun anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.
5. Untuk perhitungan harga kolom, menggunakan rumus :  
 Harga kolom per m' = Indeks x  
 Harga satuan ..... (17)
6. Perhitungan biaya struktur kolom dianalisis tanpa menggunakan bekisting, dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai.
7. Jika setelah didapatkan harga pembuatan kolom per m' dengan variasi  $\rho$  dan  $f_c'$ , maka dapat dibuat grafik interaksi antara  $\rho$  dan harga kolom dan grafik interaksi antara kuat tekan beton ( $f_c'$ ) dan harga kolom, dan juga dibuat grafik gabungan

dari grafik sebelumnya, yaitu grafik interaksi dimensi,  $f_c'$ , dan harga kolom untuk masing-masing kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ), biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting, dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai.

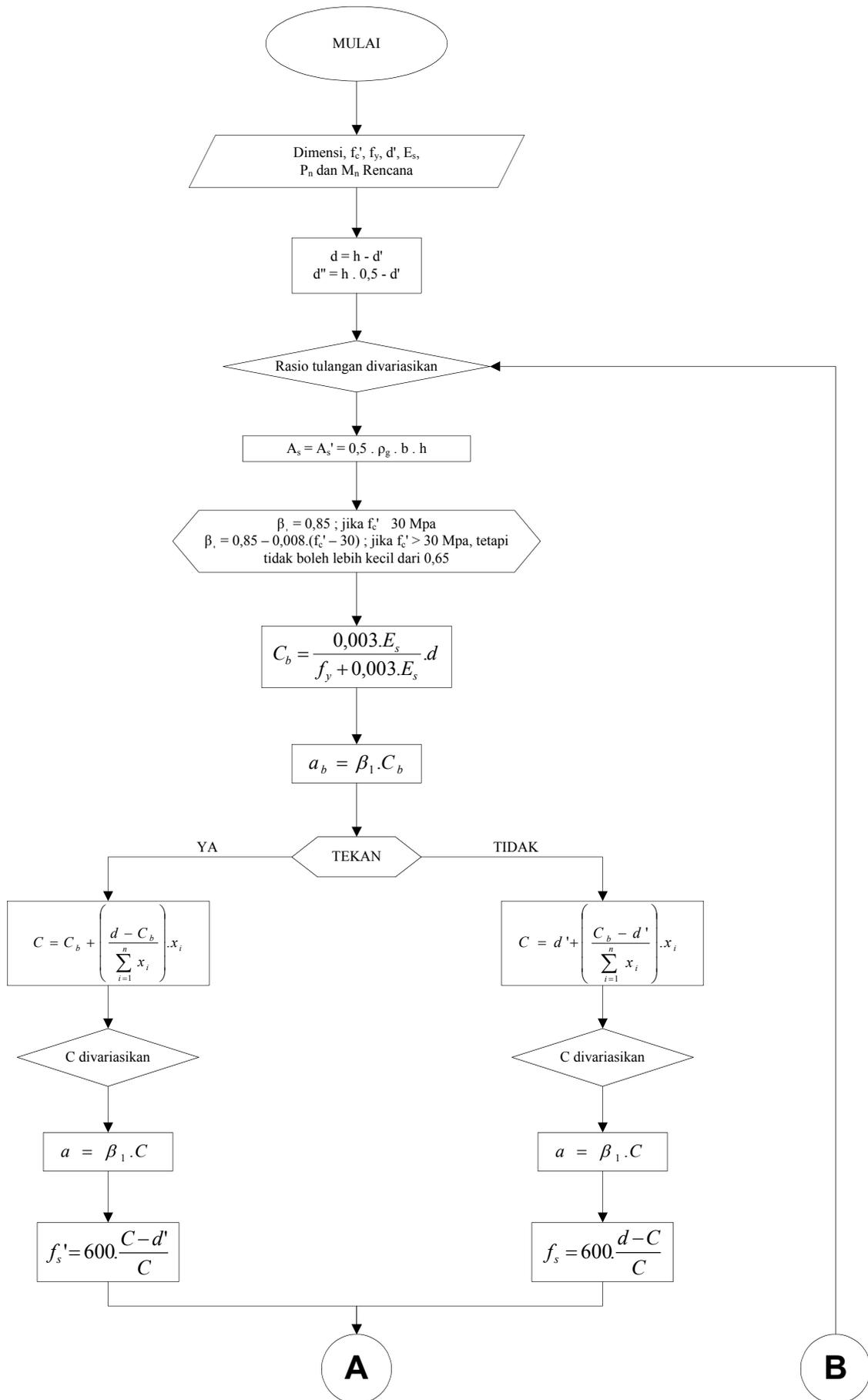
8. Dengan menggunakan grafik tersebut maka dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat dan dapat dipilih desain konstruksi kolom yang paling optimum dan ekonomis.

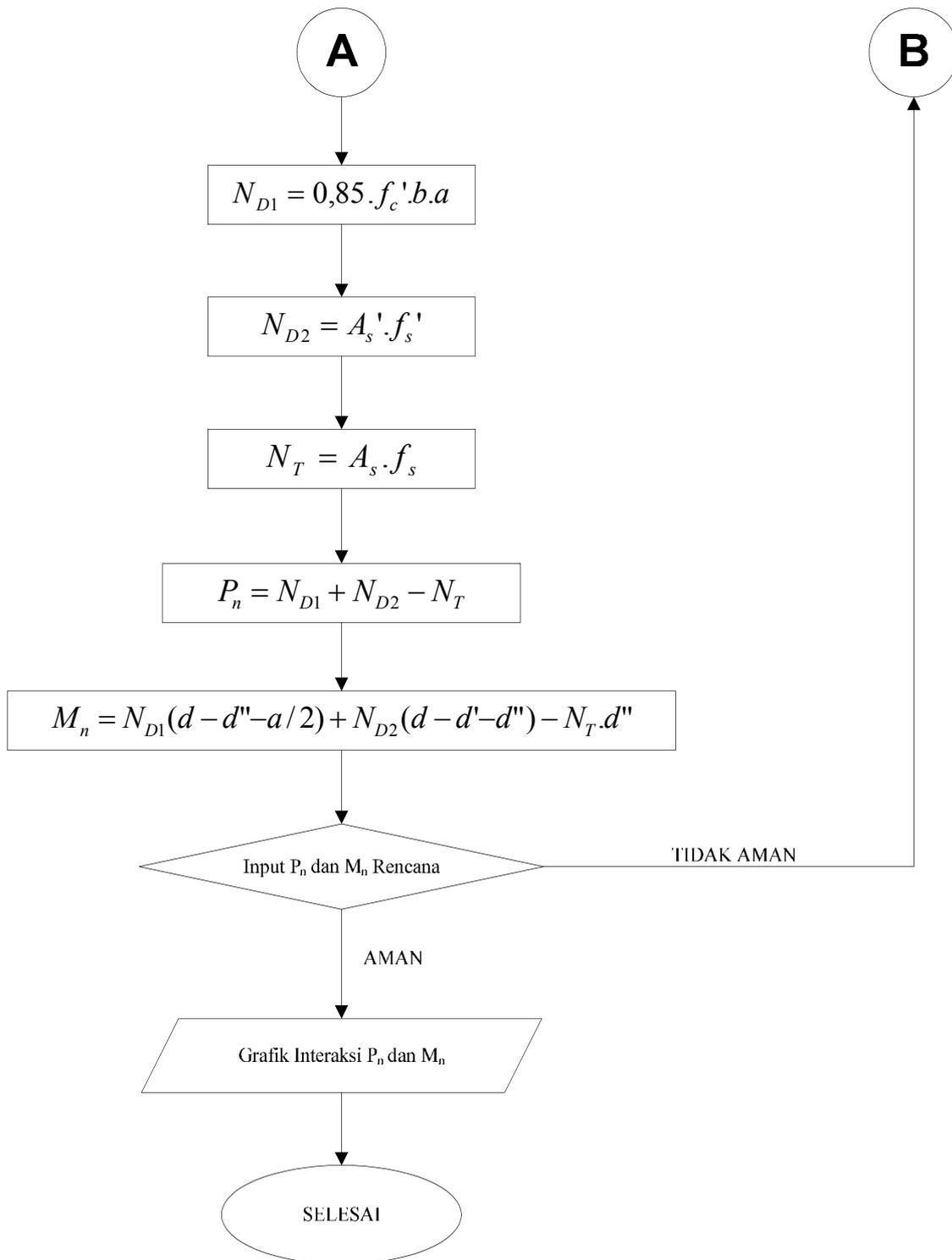
### Diagram Alir Penelitian

Untuk mempermudah proses penelitian, terlebih dahulu penulis membuat *flowchart* alir penelitian seperti terlihat pada Gambar 5 dan untuk secara lebih rinci lagi penulis membuat *flowchart* untuk menggambar diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  kolom yang terlihat pada Gambar 6 dan *flowchart* untuk perbandingan harga kolom yang terlihat pada Gambar 7.



**Gambar 5.** *Flowchart* Alir Penelitian





**Gambar 6.** Flowchart untuk Menggambar Diagram Interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  Kolom



**Gambar 7.** Flowchart untuk Perbandingan Harga Kolom

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian skripsi ditujukan untuk dapat menghasilkan konstruksi kolom beton bertulang berpenampang persegi yang paling optimum dan ekonomis dengan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$ . Analisis biaya kolom beton bertulang berpenampang persegi ini terdiri dari 840 sampel untuk masing-masing dimensi penampang kolom, kuat tekan beton ( $f_c'$ ), kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), dan kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) yang berbeda.

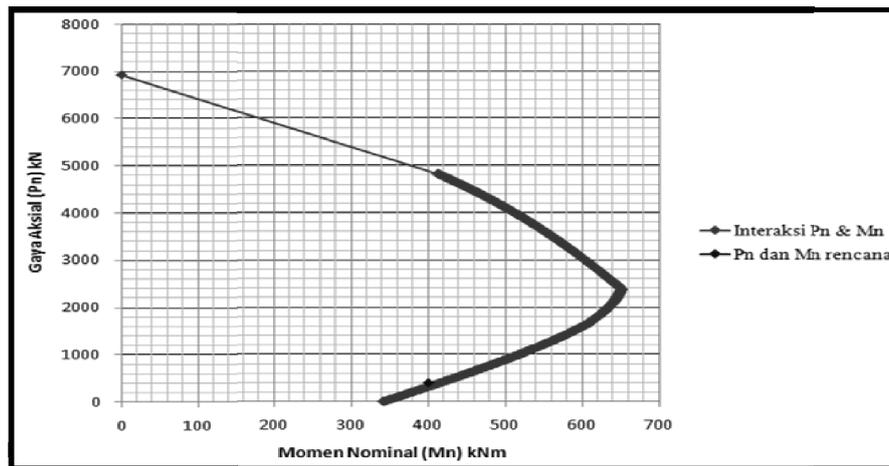
Hasil sampel analisis menghasilkan grafik interaksi dimensi dan harga kolom dan grafik interaksi  $f_c'$  dan harga kolom yang terdiri dari 1.152 grafik dan juga menghasilkan grafik gabungan dari grafik sebelumnya, yaitu grafik interaksi dimensi,  $f_c'$ , dan harga kolom yang terdiri dari 96 grafik untuk masing-masing biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting, menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai.

### Analisis Desain Kolom Berpenampang Persegi

Analisis desain kolom berpenampang persegi pada penelitian skripsi ini, penulis menggunakan asumsi-asumsi dasar yang biasa digunakan dalam perhitungan struktur kolom. Perhitungan analisis kolom yaitu dengan mencari titik koordinat kombinasi beban yang tepat pada grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ . Proses ini memerlukan perhitungan yang berulang-ulang atau *trial error* agar mendapatkan grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  pada titik-titik tertentu. Untuk rasio tulangan ( $\rho_g$ ) dicoba-coba dari 1% - 8% dari luas penampang kolom berdasarkan SNI 03-2847-2002 pasal 12.9.1 dengan kenaikan 0,1% hingga  $P_n$  dan  $M_n$  rencana pada grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  nantinya telah dinyatakan aman.

Grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  (Gambar 8) untuk satu nilai jarak dari serat tekan terluar ke sumbu netral dibagi menjadi 500 segmen untuk tiap batas keruntuhan. Semakin banyak nilai C dicari maka diagram interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  yang didapat semakin mendekati  $P_n$  dan  $M_n$  rencana. Pada satu jarak nilai C yang digunakan maka akan menghasilkan satu kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ) dan kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ). Titik-titik dari masing-masing nilai  $P_n$  dan  $M_n$  untuk tiap C digabungkan sehingga menjadi grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ . Garis berwarna merah merupakan garis interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  atau garis kondisi batas yang dapat dipikul kolom beton bertulang, dan titik berwarna biru merupakan titik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  rencana. Agar dapat melihat struktur kolom beton bertulang yang didesain aman dapat dilihat pada titik  $P_n$  dan  $M_n$  rencana tidak melewati garis berwarna merah atau tepat berada digaris berwarna merah.

Salah satu contoh detail perhitungan untuk sampel dari penelitian ini, penulis menggunakan dimensi kolom ( $b = h$ ) = 500 mm,  $f_c' = 25$  MPa,  $f_y = 400$  MPa, rasio tulangan ( $\rho_g$ ) dicoba-coba dari 1% sampai dengan 8%,  $P_n = 400$  kN dan  $M_n = 400$  kNm. Selanjutnya dilakukan analisis data, sehingga dapat menghasilkan grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  (Gambar 8). Analisis perhitungan didapat rasio tulangan ( $\rho_g$ ) sebesar 1,7%. Nilai C pada batas keruntuhan seimbang didapat sebesar 264 mm, maka nilai  $P_n$  dan  $M_n$  yang didapat adalah 2.384,25 kN dan 651,55 kNm. Nilai C yang menghasilkan nilai  $P_n$  dan  $M_n$  yang mendekati atau selisihnya paling kecil dengan  $P_n$  dan  $M_n$  rencana adalah 91,008 mm pada segmen ke 76 yang terletak pada daerah batas keruntuhan tarik, dimana nilai  $P_n$  dan  $M_n$  yang didapat sebesar 406,33 kN dan 417,73 kNm. Hasil analisis yang didapat untuk tiap nilai C menghasilkan nilai  $P_n$  dan  $M_n$  yang berbeda tiap batas keruntuhan.



**Gambar 8.** Grafik Interaksi  $P_n$  dan  $M_n$  untuk Dimensi 500x500 ( $\text{mm}^2$ ),  $f'_c = 25$  MPa,  $P_n = 400$  kN, dan  $M_n = 400$  kNm

### Analisis Perhitungan Biaya Struktur Kolom

Setelah mendapat grafik interaksi  $P_n$  dan  $M_n$ , maka didapat juga nilai rasio tulangan ( $\rho_g$ ) yang aman dan optimum untuk digunakan pada analisis perhitungan biaya struktur kolom untuk mendapat biaya konstruksi kolom yang paling optimum dan ekonomis. Analisis perhitungan biaya struktur kolom menggunakan nilai indeks kebutuhan pekerjaan yang sesuai dengan peraturan SNI 7394-2008. Pasal-pasal yang digunakan pada peraturan SNI 7394-2008 adalah pasal 6.11, pasal 6.17, dan pasal 6.22. Untuk harga upah bahan dan peralatan menggunakan daftar harga upah bahan dan peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.

Perhitungan harga pembuatan struktur kolom dilakukan penjumlahan harga setiap hasil perhitungan ketiga pasal sebelumnya yang nilai indeks kebutuhan bahan dan tenaga kerjanya diperhitungkan semuanya. Proses perhitungan pembuatan kolom menjadi dua cara analisis perhitungan yaitu perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting dan perhitungan biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting. Untuk proses perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting menjadi tiga asumsi yaitu

perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai. Pengertian dari tiga asumsi perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting adalah jumlah biaya pekerjaan bekisting yang dibagi setiap kali pakainya.

Salah satu contoh perhitungan untuk sampel penelitian dengan prosedur perhitungan biaya struktur kolom maka dapat menghitung biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting dan perhitungan biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting. Sehingga dapat diketahui bahwa biaya struktur kolom per m' tanpa menggunakan bekisting adalah Rp. 755.157,-, biaya struktur kolom per m' dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai adalah Rp. 1.359.149,-, biaya struktur kolom per m' dengan menggunakan bekisting 2 kali pakai adalah Rp. 1.057.153,-, dan biaya struktur kolom per m' dengan menggunakan bekisting 3 kali pakai adalah Rp. 956.487,-.

Jika setelah didapatkan harga struktur kolom pada  $P_n = 400$  kN dan  $M_n = 400$  kNm dengan variasi dimensi kolom dan  $f'_c$  yang bervariasi maka dapat dibuat grafik interaksi dimensi dan harga kolom, grafik interaksi kuat tekan beton ( $f'_c$ ) dan harga

kolom, dan grafik interaksi dimensi,  $f_c'$ , dan harga kolom dari perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting menjadi tiga asumsi yaitu perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting 1 kali pakai, menggunakan bekisting 2 kali pakai, dan menggunakan bekisting 3 kali pakai.

### Analisis Optimasi Biaya Struktur Kolom

Setelah didapatkan harga pembuatan kolom dengan variasi dimensi kolom, kuat tekan beton ( $f_c'$ ), kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ), kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ), perhitungan biaya struktur kolom dengan menggunakan bekisting, dan perhitungan biaya struktur kolom tanpa menggunakan bekisting maka dapat dibuat grafik interaksi

dimensi dan harga kolom, dan grafik interaksi kuat tekan beton ( $f_c'$ ) dan harga kolom, dan juga grafik interaksi dimensi,  $f_c'$ , harga kolom.

Pada grafik dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat dan dapat dilihat desain konstruksi kolom yang paling optimum dan ekonomis. Berdasarkan hasil perhitungan peneliti lakukan dapat membuat rekapitulasi harga pembuatan konstruksi kolom yang paling optimum dan ekonomis pada masing-masing nilai beban kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ) dan nilai kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ). Rekapitulasi harga yang paling optimum dan ekonomis pada masing-masing  $P_n$  dan  $M_n$  dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.a.** Rekapitulasi Harga Struktur Kolom yang Paling Optimum pada Masing-Masing  $P_n$  dan  $M_n$  Tanpa Menggunakan Bekisting

NO	$P_n$ (kN)	$M_n$ (kNm)	Dimensi (mm)		$f_c'$ (MPa)	Rasio Tulangan (%)	$A_s = A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	Harga Kolom per m' (Rp)
			b	h				
1	50	50	300	300	25	1,1	495,00	209.709
2	400	50	300	300	25	1,0	450,00	199.352
3	800	50	300	300	25	1,0	450,00	199.352
4	1200	50	300	300	25	1,0	450,00	199.352
5	1600	50	300	300	25	1,0	450,00	199.352
6	2000	50	300	300	30	1,0	450,00	202.144
7	50	400	550	550	35	1,4	2117,50	834.622
8	400	400	550	550	35	1,1	1663,75	730.180
9	800	400	500	500	30	1,2	1500,00	619.056
10	1200	400	500	500	25	1,0	1250,00	553.754
11	1600	400	450	450	32,5	1,1	1113,75	484.257
12	2000	400	450	450	30	1,0	1012,50	454.825
13	50	800	600	600	30	2,2	3960,00	1.305.754
14	400	800	600	600	25	2,0	3600,00	1.211.720
15	800	800	600	600	30	1,7	3060,00	1.098.597
16	1200	800	600	600	25	1,5	2700,00	1.004.563
17	1600	800	600	600	30	1,2	2160,00	891.440
18	2000	800	600	600	27,5	1,0	1800,00	803.606
19	50	1200	600	600	25	3,4	6120,00	1.791.758
20	400	1200	600	600	25	3,2	5760,00	1.708.896
21	800	1200	600	600	25	2,9	5220,00	1.584.602
22	1200	1200	600	600	32,5	2,6	4680,00	1.482.372
23	1600	1200	600	600	25	2,4	4320,00	1.377.445
24	2000	1200	600	600	35	2,1	3780,00	1.283.289

**Tabel 1.b.** Rekapitulasi Harga Struktur Kolom yang Paling Optimum pada Masing-Masing  $P_n$  dan  $M_n$  dengan Menggunakan Bekisting 1 Kali Pakai

NO	$P_n$ (kN)	$M_n$ (kNm)	Dimensi (mm)		$f_c'$ (MPa)	Rasio Tulangan (%)	$A_s = A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	Harga Kolom per m' (Rp)
			b	h				
1	50	50	300	300	25	1,1	495,00	572.105
2	400	50	300	300	25	1,0	450,00	561.747
3	800	50	300	300	25	1,0	450,00	561.747
4	1200	50	300	300	25	1,0	450,00	561.747
5	1600	50	300	300	25	1,0	450,00	561.747
6	2000	50	300	300	30	1,0	450,00	564.540
7	50	400	450	450	27,5	2,8	2835,00	1.415.114
8	400	400	450	450	25	2,4	2430,00	1.318.406
9	800	400	450	450	27,5	1,9	1923,75	1.205.367
10	1200	400	450	450	30	1,5	1518,75	1.114.943
11	1600	400	450	450	32,5	1,1	1113,75	1.027.850
12	2000	400	450	450	30	1,0	1012,50	998.418
13	50	800	600	600	30	2,2	3960,00	2.030.544
14	400	800	550	550	25	2,7	4083,75	1.926.269
15	800	800	550	550	25	2,4	3630,00	1.821.828
16	1200	800	550	550	25	2,1	3176,25	1.717.386
17	1600	800	600	600	30	1,2	2160,00	1.616.231
18	2000	800	550	550	32,5	1,5	2268,75	1.527.043
19	50	1200	600	600	25	3,4	6120,00	2.516.549
20	400	1200	600	600	25	3,2	5760,00	2.433.686
21	800	1200	600	600	25	2,9	5220,00	2.309.392
22	1200	1200	600	600	32,5	2,6	4680,00	2.207.162
23	1600	1200	600	600	25	2,4	4320,00	2.102.235
24	2000	1200	600	600	35	2,1	3780,00	2.008.079

**Tabel 1.c.** Rekapitulasi Harga Struktur Kolom yang Paling Optimum pada Masing-Masing  $P_n$  dan  $M_n$  dengan Menggunakan Bekisting 2 Kali Pakai

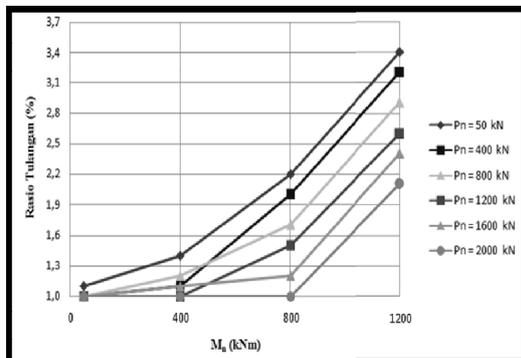
NO	$P_n$ (kN)	$M_n$ (kNm)	Dimensi (mm)		$f_c'$ (MPa)	Rasio Tulangan (%)	$A_s = A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	Harga Kolom per m' (Rp)
			b	h				
1	50	50	300	300	25	1,1	495,00	390.907
2	400	50	300	300	25	1,0	450,00	380.549
3	800	50	300	300	25	1,0	450,00	380.549
4	1200	50	300	300	25	1,0	450,00	380.549
5	1600	50	300	300	25	1,0	450,00	380.549
6	2000	50	300	300	30	1,0	450,00	383.342
7	50	400	450	450	27,5	2,8	2835,00	1.143.317
8	400	400	500	500	27,5	1,6	2000,00	1.032.686
9	800	400	500	500	30	1,2	1500,00	921.052
10	1200	400	450	450	30	1,5	1518,75	843.147
11	1600	400	450	450	32,5	1,1	1113,75	756.053
12	2000	400	450	450	30	1,0	1012,50	726.621
13	50	800	600	600	30	2,2	3960,00	1.668.149
14	400	800	600	600	25	2,0	3600,00	1.574.115
15	800	800	600	600	30	1,7	3060,00	1.460.992
16	1200	800	600	600	25	1,5	2700,00	1.366.958
17	1600	800	600	600	30	1,2	2160,00	1.253.836
18	2000	800	600	600	27,5	1,0	1800,00	1.166.001
19	50	1200	600	600	25	3,4	6120,00	2.154.153
20	400	1200	600	600	25	3,2	5760,00	2.071.291
21	800	1200	600	600	25	2,9	5220,00	1.946.997
22	1200	1200	600	600	32,5	2,6	4680,00	1.844.767
23	1600	1200	600	600	25	2,4	4320,00	1.739.840
24	2000	1200	600	600	35	2,1	3780,00	1.645.684

**Tabel 1.d.** Rekapitulasi Harga Struktur Kolom yang Paling Optimum pada Masing-Masing  $P_n$  dan  $M_n$  dengan Menggunakan Bekisting 3 Kali Pakai

NO	$P_n$ (kN)	$M_n$ (kNm)	Dimensi (mm)		$f_c'$ (MPa)	Rasio Tulangan (%)	$A_s = A_s'$ (mm <sup>2</sup> )	Harga Kolom per m' (Rp)
			b	h				
1	50	50	300	300	25	1,1	495,00	330.508
2	400	50	300	300	25	1,0	450,00	320.150
3	800	50	300	300	25	1,0	450,00	320.150
4	1200	50	300	300	25	1,0	450,00	320.150
5	1600	50	300	300	25	1,0	450,00	320.150
6	2000	50	300	300	30	1,0	450,00	322.943
7	50	400	500	500	25	2,0	2500,00	1.042.803
8	400	400	500	500	27,5	1,6	2000,00	932.021
9	800	400	500	500	30	1,2	1500,00	820.386
10	1200	400	450	450	30	1,5	1518,75	752.548
11	1600	400	450	450	32,5	1,1	1113,75	665.455
12	2000	400	450	450	30	1,0	1012,50	636.023
13	50	800	600	600	30	2,2	3960,00	1.547.351
14	400	800	600	600	25	2,0	3600,00	1.453.316
15	800	800	600	600	30	1,7	3060,00	1.340.194
16	1200	800	600	600	25	1,5	2700,00	1.246.160
17	1600	800	600	600	30	1,2	2160,00	1.133.037
18	2000	800	600	600	27,5	1,0	1800,00	1.045.203
19	50	1200	600	600	25	3,4	6120,00	2.033.355
20	400	1200	600	600	25	3,2	5760,00	1.950.492
21	800	1200	600	600	25	2,9	5220,00	1.826.198
22	1200	1200	600	600	32,5	2,6	4680,00	1.723.968
23	1600	1200	600	600	25	2,4	4320,00	1.619.042
24	2000	1200	600	600	35	2,1	3780,00	1.524.885

Dari hasil Tabel 1 dapat dilihat bahwa harga yang dihasilkan untuk kenaikan nilai  $M_n$  lebih berpengaruh dari pada kenaikan nilai  $P_n$  karena apabila nilai  $M_n$  semakin besar maka nilai rasio tulangan dan dimensi kolomnya semakin besar, sehingga harga struktur kolomnya juga akan semakin mahal tetapi nilai  $f'_c$  dominan tidak terlalu berpengaruh pada besar kecilnya nilai  $M_n$ , sedangkan nilai  $P_n$  yang semakin besar maka nilai rasio tulangan semakin berkurang, dimensi kolom dan kuat tekan beton ( $f'_c$ ) dominan tidak mengalami perubahan, sehingga harga struktur kolomnya semakin murah tetapi penurunan harganya tidak terlalu jauh dibandingkan dengan perubahan nilai  $M_n$ .

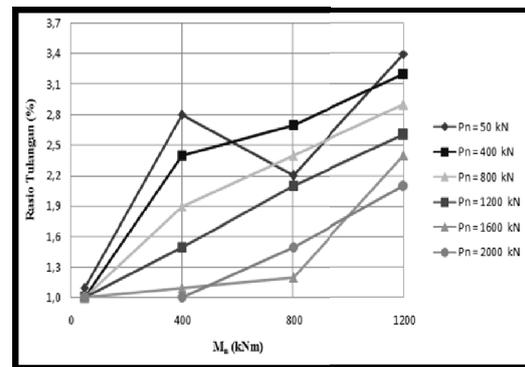
Agar lebih mudah untuk melihat hasil Tabel 1 maka dapat dibuat grafik interaksi kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) dan rasio tulangan dengan kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ) tetap yang menggunakan bekisting dan tanpa menggunakan bekisting. Sehingga grafik tersebut dapat dilihat pada Gambar 9.



**Gambar 9.a.** Grafik Interaksi  $M_n$  dan Rasio Tulangan dengan  $P_n$  Tetap yang Tanpa Menggunakan Bekisting

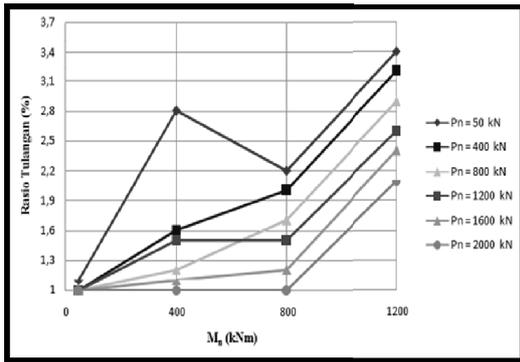
Pada Gambar 9.a dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  tetap maka nilai rasio tulangan yang didapat akan semakin besar dan dapat dilihat juga bahwa semakin besar  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  tetap maka dominan rasio tulangan semakin kecil. Penurunan rasio tulangan akibat  $P_n$  tidak terlalu besar dibandingkan dengan kenaikan

rasio tulangan akibat  $M_n$  yang selisih rasio tulangannya hingga lebih dari 1%. Sehingga kenaikan rasio tulangan lebih dipengaruhi oleh kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) daripada kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ). Pada  $M_n = 50$  kNm dominan rasio tulangan yang digunakan sebesar 1%.



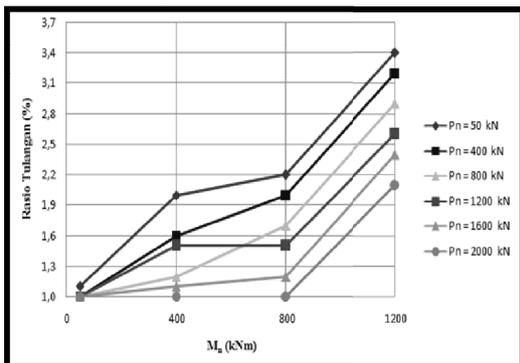
**Gambar 9.b.** Grafik Interaksi  $M_n$  dan Rasio Tulangan dengan  $P_n$  Tetap yang Menggunakan Bekisting 1 Kali Pakai

Pada Gambar 9.b dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  tetap maka dominan nilai rasio tulangan yang didapat akan semakin besar dan dapat dilihat juga bahwa semakin besar  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  tetap maka dominan rasio tulangan semakin kecil. Penurunan rasio tulangan akibat  $P_n$  tidak terlalu besar dibandingkan dengan kenaikan rasio tulangan akibat  $M_n$  yang selisih rasio tulangannya hingga lebih dari 1%. Sehingga kenaikan rasio tulangan lebih dipengaruhi oleh kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) daripada kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ). Pada  $M_n = 50$  kNm dominan rasio tulangan yang digunakan sebesar 1%. Terjadi penurunan grafik pada garis  $P_n = 50$  kN disebabkan karena rasio tulangan  $M_n = 400$  kNm dengan  $P_n = 50$  kN didapat 2,8% dengan dimensi  $450 \times 450$  (mm<sup>2</sup>),  $f'_c = 27,5$  MPa menjadi rasio tulangan 2,2 % dengan dimensi  $600 \times 600$  (mm<sup>2</sup>),  $f'_c = 30$  MPa pada  $M_n = 800$  kNm dengan  $P_n = 50$  kN.



**Gambar 9.c.** Grafik Interaksi  $M_n$  dan Rasio Tulangan dengan  $P_n$  Tetap yang Menggunakan Bekisting 2 Kali Pakai

Pada Gambar 9.c dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  tetap maka nilai rasio tulangan yang didapat akan semakin besar dan dapat dilihat juga bahwa semakin besar  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  tetap maka dominan rasio tulangan semakin kecil. Penurunan rasio tulangan akibat  $P_n$  tidak terlalu besar dibandingkan dengan kenaikan rasio tulangan akibat  $M_n$  yang selisih rasio tulangannya hingga lebih dari 1%. Sehingga kenaikan rasio tulangan lebih dipengaruhi oleh kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) daripada kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ). Pada  $M_n = 50$  kNm dominan rasio tulangan yang digunakan sebesar 1%.



**Gambar 9.d.** Grafik Interaksi  $M_n$  dan Rasio Tulangan dengan  $P_n$  Tetap yang Menggunakan Bekisting 3 Kali Pakai

Pada Gambar 9.d dapat dilihat bahwa semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  tetap maka nilai rasio tulangan yang didapat akan semakin besar dan dapat dilihat juga bahwa

semakin besar  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  tetap maka dominan rasio tulangan semakin kecil. Penurunan rasio tulangan akibat  $P_n$  tidak terlalu besar dibandingkan dengan kenaikan rasio tulangan akibat  $M_n$  yang selisih rasio tulangannya hingga lebih dari 1%. Sehingga kenaikan rasio tulangan lebih dipengaruhi oleh kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) daripada kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ). Pada  $M_n = 50$  kNm dominan rasio tulangan yang digunakan sebesar 1%.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Semakin besar nilai  $M_n$  dengan nilai  $P_n$  yang sama maka nilai rasio tulangan ( $\rho_g$ ), dimensi kolom, dan biaya struktur kolom dominan akan semakin bertambah.
2. Semakin besar nilai  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  yang sama maka nilai rasio tulangan ( $\rho_g$ ) dan biaya struktur kolom dominan akan semakin berkurang.
3. Semakin besar nilai  $P_n$  dengan nilai  $M_n$  yang sama untuk biaya struktur kolom yang paling optimum dominan dimensi tidak berubah dan kuat tekan beton ( $f'_c$ ) yang digunakan 25 MPa - 30 MPa.
4. Struktur kolom yang paling optimum dan ekonomis lebih berpengaruh pada perubahan dimensi kolom daripada nilai kuat tekan beton ( $f'_c$ ).
5. Kenaikan rasio tulangan lebih dipengaruhi oleh kuat momen nominal kolom ( $M_n$ ) daripada kuat beban aksial nominal kolom ( $P_n$ ).

### Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Sebaiknya untuk penelitian selanjutnya rentang nilai  $P_n$  dan  $M_n$  lebih dipersempit lagi.
2. Sebaiknya batasan dimensi kolomnya ditambah lagi.
3. Perlunya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai struktur kolom beton bertulang yang mengalami kombinasi momen lentur biaksial.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional Indonesia, 2002. *Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, SK SNI 03-2847-2002.
- Dipohusodo, I, 1999. *Struktur Beton Bertulang*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- Muin, R.B, 2008. *Struktur Beton Bertulang II*, [http://pksm.mercubuana.ac.id/new/elearning/files\\_modul/11025-3-905777166916.pdf](http://pksm.mercubuana.ac.id/new/elearning/files_modul/11025-3-905777166916.pdf), Tanggal 29 Juni 2012.
- Naftali, Y, 2007. *Perancangan Struktur dengan Optimasi*, <http://www.yohanli.com/perancangan-struktur-dengan-optimasi.html>, Tanggal 01 September 2012.
- Nawy, E.G., dkk, 2010. *Beton Bertulang Sebuah Pendekatan Mendasar*, ITS Press, Subaya.
- Prakosa, R.A, 2010. *Studi Pengaruh Eksentrisitas Terhadap Faktor Reduksi pada Kolom Beton Bertulang Bujursangkar dengan Menggunakan Program Visual Basic 6.0*, <http://digilib.its.ac.id/public/ITS-Undergraduate-14607-Paper-946187.pdf>, Tanggal 24 Juli 2012.
- Standar Nasional Indonesia, 2008. *Tata Cara Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Beton untuk Bangunan Gedung dan Perumahan*, SNI 7394 : 2008.

## ANALISIS OPTIMASI BIAYA KONSTRUKSI BALOK DENGAN VARIASI NILAI $\rho$ DAN $f_c'$

MARROLLAN<sup>1)</sup>, FEPY SUPRIANI<sup>2)</sup>, MUKHLIS ISLAM<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik UNIB, Jl. W. R. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371, Telp. (0736)344087, e-mail : sipil\_okezone@yahoo.com

<sup>2,3)</sup> Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik UNIB, Bengkulu

### Abstrak

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh adanya keinginan untuk mendapatkan desain struktur yang murah (optimal) dan aman. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$  pada balok beton bertulangan tunggal yang dapat menghasilkan konstruksi paling optimum dan ekonomis. Penelitian ini menggunakan proses optimasi yang memerlukan perhitungan yang berulang-ulang, penelitian ini termasuk kedalam jenis penelitian terapan. Analisis biaya balok beton bertulangan tunggal ini terdiri dari 200 sampel untuk masing-masing mutu beton ( $f_c'$ ) dari 25-35 MPa dengan kenaikan (increment) 2.5 MPa. Hasil analisis sampel menghasilkan grafik interaksi  $\rho$  dan biaya balok serta grafik interaksi  $f_c'$  dan biaya balok. Pada perhitungan biaya dibuat asumsi biaya tanpa menggunakan bekisting dan menggunakan bekisting dari 1 kali pakai sampai dengan 3 kali pakai. Penelitian ini menghasilkan grafik untuk melihat pada rasio penulangan berapa yang paling optimum dan ekonomis. Berdasarkan variasi Momen Nominal, nilai  $\rho_{perlu}$  untuk perhitungan biaya tanpa bekisting berkisar antara 0.56-0.66 (kali  $\rho_{max}$ ), dan nilai  $\rho_{perlu}$  untuk perhitungan biaya dengan bekisting asumsi 1 kali pakai sampai dengan 3 kali pakai berturut-turut yaitu berkisar antara 0.92-1 (kali  $\rho_{max}$ ), 0.75-1 (kali  $\rho_{max}$ ), dan 0.69-1 (kali  $\rho_{max}$ ).

**Kata kunci :** optimasi biaya, struktur balok, rasio tulangan, kuat tekan beton.

### Abstract

*The research was motivated by the desire to obtain inexpensive (optimum) and adequate capacity of structure. This study aims to determine the variation of  $\rho$  value and  $f_c'$  on a single reinforcement concrete beams that can produce the most optimum and economical construction. This study used optimization process that requires repetitive calculations, hence the research was categorized as applied research. This cost analysis of a single reinforced concrete beam consisted of 200 samples for each concrete compressive strength ( $f_c'$ ) of 25-35 MPa with an increment of 2.5 MPa. The results of sample analysis produce  $\rho$  interactions graphs and charts interaction between cost and  $f_c'$ . In addition, the cost calculations were made assuming the cost without using formwork and using formwork of once until three time usage. This research produced graphic to observe the most optimal and economic reinforcement ratio. Based on the variation of nominal moment, the values of  $\rho_{needed}$  was needed for without formwork cost calculation at range of between 0.56-0.66 (times  $\rho_{max}$ ), and the values of  $\rho_{needed}$  was needed for the cost calculation by once until three times formwork assumption at range of beetwen 0.92-1 (times  $\rho_{max}$ ), 0.75-1 (times  $\rho_{max}$ ), and 0.69-1 (times  $\rho_{max}$ ) respectively.*

**Keywords :** cost optimization, beams construction, reinforcement ratio, concrete compressive strength.

## PENDAHULUAN

Saat ini ilmu pengetahuan dibidang teknik sipil terus mengalami berbagai perkembangan. Hal ini tentu mengakibatkan perubahan sistem konstruksi baik ditinjau dari segi mutu, bahan, keamanan struktur konstruksi (*safety*) dan ekonomisnya. Sehingga sangat perlu untuk melakukan pertimbangan-pertimbangan yang matang didalam mendesain struktur balok, karena salah satu tujuan utama dari desain struktur khususnya struktur balok adalah untuk mendapatkan struktur yang aman selama masa penggunaan bangunan.

Pada perencanaan komponen struktur balok beton bertulang dilakukan sedemikian rupa sehingga tidak timbul keretakan yang berlebihan pada penampang sewaktu mendapat beban kerja, dan masih mempunyai cukup keamanan serta cadangan kekuatan untuk menahan beban dan tegangan lebih lanjut tanpa mengalami runtuh. Menurut Nur (2009), Struktur balok berupa balok beton bertulang merupakan anggota struktur yang paling utama mendukung beban luar serta berat sendirinya oleh momen dan gaya geser. Timbulnya tegangan-tegangan lentur akibat terjadinya momen karena beban luar merupakan faktor yang menentukan dalam menetapkan dimensi penampang struktur balok, sehingga didalam pemilihan dimensi balok nantinya harus kuat menahan beban-beban yang terjadi pada struktur.

Penentuan dimensi struktur balok harus memperhatikan masalah kekuatan dan biaya, dimana kekuatan yang dibutuhkan oleh suatu struktur balok dapat dicapai dengan memberikan luasan penampang beton dan tulangan yang cukup. Sehingga didalam melakukan analisis perhitungan diharapkan dapat memperoleh hasil yang aman dan ekonomis. Menurut Naftali (1999), untuk mendapatkan hasil yang paling murah (optimal) dapat dicapai dengan menggunakan proses optimasi. Hasil yang

didapat merupakan hasil yang mempunyai harga struktur yang paling murah tetapi tetap mampu mendukung beban struktur dengan aman, dengan pertimbangan yaitu pemberian luas penampang beton yang besar dan pemakaian tulangan yang sedikit, atau dengan pemberian luas penampang beton yang kecil dan pemakaian tulangan yang banyak.

Harga struktur balok yang murah akan tetapi tidak melanggar dari faktor keamanan yang ada merupakan salah satu tujuan yang dicari dalam penelitian ini, dimana variabel desainnya berupa dimensi penampang balok, luasan tulangan baja yang digunakan, kuat tekan beton ( $f_c'$ ), dan momen rencana ( $M_r$ ). Adapun untuk penggunaan luasan tulangan baja pada peraturan SNI 03-2847-2002 Pasal 12.3.3 dan Pasal 12.5 membatasi luas tulangan komponen struktur balok yaitu tidak kurang dari nilai rasio penulangan minimum ( $\rho_{min}$ ) dan tidak melebihi dari nilai rasio penulangan maksimum ( $\rho_{max}$ ). Selanjutnya, untuk memudahkan penyelesaian masalah optimasi balok beton bertulang pada struktur bangunan sehingga mendapatkan hasil yang cepat dan tepat, maka penulis menggunakan program *spreadsheet* sebagai alat bantu analisis dan perhitungan. Pada sistem perhitungan ini, semakin banyak titik coba yang digunakan, memungkinkan harga struktur yang didapat menjadi semakin murah. Berdasarkan uraian ini, maka pada skripsi ini penulis mencoba melakukan penelitian dalam penentuan optimasi biaya konstruksi balok dengan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$ .

## Beton Bertulang

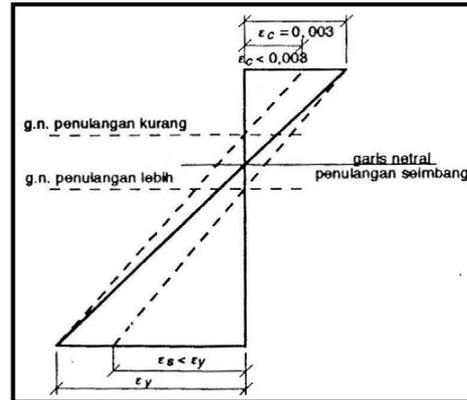
Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami retak-retak, maka agar beton dapat bekerja dengan baik dalam suatu sistem struktur, perlu dibantu dengan memberikan perkuatan penulangan yang terutama akan mengemban tugas menahan gaya tarik yang bakal timbul

didalam sistem. Sehingga untuk keperluan penulangan tersebut digunakan bahan baja yang memiliki sifat teknis menguntungkan (Dipohusodo, 1999).

Nilai kekuatan tekan dari beton berdasarkan SK SNI 03-2847-2002 yaitu kuat tekan beton yang ditetapkan oleh perencana struktur (benda uji berbentuk silinder diameter 150 mm dan tinggi 300 mm), untuk dipakai dalam perencanaan struktur beton, dinyatakan dalam satuan MPa. Bila nilai  $f_c'$  didalam tanda akar, maka hanya nilai numerik dalam tanda akar saja yang dipakai, dan hasilnya tetap mempunyai satuan N/m atau MPa (Mega Pascal). Menurut Tjokrodimuljo (dalam Firmansyah, 2007), sifat beton yang baik adalah jika beton tersebut memiliki kuat tekan tinggi (antara 20-50 MPa, pada umur 28 hari), dengan kata lain dapat diasumsikan bahwa mutu beton ditinjau hanya dari kuat tekannya saja. Selain itu ada beberapa faktor yang mempengaruhi kekuatan beton, yaitu Faktor Air Semen (FAS) dan kepadatan, umur beton, jenis dan jumlah semen, serta sifat agregat.

### Penampang Balok Bertulangan Seimbang, Kurang, dan Lebih

Menurut Dipohusodo (1999), apabila pada penampang tersebut luas tulangan baja tariknya ditambah, keadaan blok tegangan beton akan bertambah pula, dan oleh karenanya letak garis netral akan bergeser ke bawah lagi. Apabila jumlah tulangan baja tarik sedemikian sehingga letak garis netral pada posisi dimana akan terjadi secara bersamaan regangan luluh pada baja tarik dan regangan beton tekan maksimum 0,003 maka penampang disebut bertulangan seimbang. Kondisi keseimbangan regangan menempati posisi penting karena merupakan pembatas antara dua keadaan penampang balok beton bertulang yang berbeda cara hancurnya.



Sumber : Dipohusodo, 1999

**Gambar 1.** Variasi Letak Garis Netral

Apabila penampang balok beton bertulang mengandung jumlah tulangan baja tarik lebih banyak dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang balok demikian disebut bertulangan lebih (*overreinforced*). Berlebihnya tulangan baja tarik mengakibatkan garis netral bergeser ke bawah. Hal yang demikian pada gilirannya akan berakibat beton mendahului mencapai regangan maksimum 0,003 sebelum tulangan baja tariknya luluh. Apabila penampang balok tersebut dibebani momen lebih besar lagi, yang berarti regangannya semakin besar sehingga kemampuan regangan beton terlampaui, maka akan berlangsung keruntuhan dengan beton hancur secara mendadak tanpa diawali dengan gejala-gejala peringatan terlebih dahulu (Dipohusodo, 1999).

Sedangkan apabila suatu penampang balok beton bertulang mengandung jumlah tulangan baja tarik kurang dari yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan, penampang demikian disebut bertulangan kurang (*underreinforced*). Letak garis netral akan lebih naik sedikit daripada keadaan seimbang, dan tulangan baja tarik akan mendahului mencapai regangan luluhnya (tegangan luluhnya) sebelum mencapai regangan maksimum 0,003. Pada tingkat keadaan ini, bertambahnya beban akan mengakibatkan tulangan baja mulur

(memanjang) cukup banyak sesuai dengan perilaku bahan baja, dan berarti bahwa baik regangan beton maupun baja terus bertambah tetapi gaya tarik yang bekerja pada tulangan baja tidak bertambah besar. Dengan demikian berdasarkan keseimbangan gaya-gaya horizontal  $\Sigma H = 0$ , gaya tekan beton tidak mungkin bertambah sedangkan tegangan tekannya terus meningkat berusaha mengimbangi beban, sehingga mengakibatkan luas daerah tekan beton pada penampang menyusut (berkurang) yang berarti posisi garis netral akan berubah bergerak naik. Proses tersebut diatas terus berlanjut sampai suatu saat daerah beton tekan yang terus berkurang tidak mampu lagi menahan gaya tekan dan hancur sebagai efek sekunder. Cara hancur demikian, yang sangat dipengaruhi oleh peristiwa meluluhnya tulangan baja tarik berlangsung meningkat secara bertahap. Segera setelah baja mencapai titik luluh, lendutan balok meningkat tajam sehingga dapat merupakan tanda awal dari kehancuran. Meskipun tulangan baja berperilaku daktail (liat), tidak akan tertarik lepas dari beton sekalipun pada waktu terjadi kehancuran (Dipohusodo, 1999).

### **Analisis Balok Terlentur Bertulangan Tarik**

Analisis penampang balok terlentur dilakukan dengan terlebih dahulu mengetahui dimensi unsur-unsur penampang balok yang terdiri dari: jumlah dan ukuran tulangan baja tarik ( $A_s$ ), lebar balok ( $b$ ), tinggi efektif ( $d$ ), tinggi total ( $h$ ),  $f_c'$  dan  $f_y$ , sedangkan yang dicari adalah kekuatan balok ataupun manifestasi kekuatan dalam bentuk yang lain, misalnya menghitung  $M_n$ , atau memeriksa kehandalan dimensi penampang balok tertentu terhadap beban yang bekerja, atau menghitung jumlah beban yang dapat dipikul balok. Di lain pihak, proses perencanaan balok terlentur adalah menentukan satu atau lebih unsur dimensi

penampang balok yang belum diketahui, atau menghitung jumlah kebutuhan tulangan tarik dalam penampang berdasarkan mutu bahan dan jenis pembebanan yang sudah ditentukan (Dipohusodo, 1999).

### **Rasio Penulangan Lentur Balok**

Menurut Dipohusodo (1999), komponen struktural lentur meneruskan beban melalui gaya dalam (*internal forces*) momen lentur yang terdiri dari komponen tarik dan tekan. Kondisi kegagalan pada balok terbagi menjadi tiga, masing-masing dengan karakteristik kegagalan yang khas, yaitu kegagalan tarik, kegagalan tekan, kegagalan *balance* (seimbang).

Berdasarkan kondisi kegagalan pada balok, maka ada dua macam cara hancur/kegagalan, yang pertama kegagalan diawali dengan meluluhnya tulangan baja tarik berlangsung secara perlahan dan bertahap sehingga sempat memberikan tanda-tanda keruntuhan, sedangkan bentuk kehancuran dengan diawali hancurnya beton tekan secara mendadak tanpa sempat memberikan peringatan. Sehingga kondisi hancur/kegagalan yang pertama yang disukai, karena dengan adanya tanda peringatan resiko akibatnya dapat diperkecil. Untuk itu, standar SK SNI T-15-1991-03 menetapkan pembatasan penulangan yang perlu diperhatikan. Pada Pasal 3.3.3 ditetapkan bahwa jumlah tulangan baja tarik tidak boleh melebihi 0,75 dari jumlah tulangan baja tarik yang diperlukan untuk mencapai keseimbangan regangan ( $A_s \leq 0,75 A_{sb}$ ). Apabila jumlah batas penulangan tersebut dapat dipenuhi akan memberikan jaminan bahwa kehancuran daktail dapat berlangsung dengan diawali meluluhnya tulangan baja tarik terlebih dahulu dan tidak akan terjadi kehancuran getas yang lebih bersifat mendadak.

Menurut Dipohusodo (1999), untuk perhitungan rasio penulangan menggunakan batasan, yaitu:

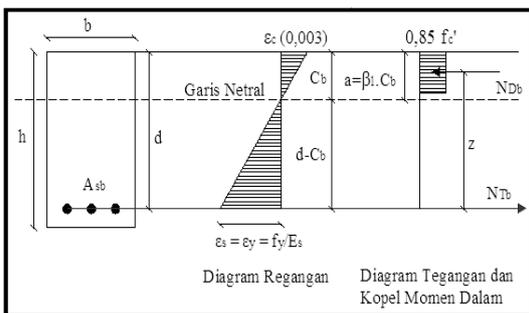
1. Rasio Tulangan Minimum ( $\rho_{min}$ )

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} \dots\dots\dots(1)$$

2. Rasio Tulangan Maksimum ( $\rho_{max}$ )

$$\rho_{max} = 0.75 \rho_b \dots\dots\dots(2)$$

Batasan minimum penulangan ini diperlukan untuk lebih menjamin tidak terjadinya hancur secara tiba-tiba seperti yang terjadi pada balok tanpa tulangan. Karena bagaimanapun, balok beton dengan penulangan tarik yang sedikit sekalipun harus mempunyai kuat momen yang lebih besar dari balok tanpa tulangan. Untuk penurunan rumus dari rasio penulangan keadaan seimbang ( $\rho_b$ ) dapat diuraikan berdasarkan Gambar 2.



Sumber : Dipohusodo, 1999

**Gambar 2.** Keadaan Seimbang Regangan

Letak garis netral pada keadaan seimbang dapat ditentukan dengan menggunakan segitiga sebanding dari diagram regangan, yaitu:

$$\frac{C_b}{0.003} = \frac{d}{\left(0.003 + \frac{f_y}{E_s}\right)}$$

dengan memasukkan nilai  $E_s = 200000$  MPa, maka:

$$C_b = \frac{0.003 d}{\left(0.003 + \frac{f_y}{200000}\right)}$$

Sehingga didapat persamaan (a) sebagai berikut:

$$C_b = \frac{600 d}{(600 + f_y)}$$

dan, karena  $\sum H = 0$  dan  $N_{Db} = N_{Tb}$ , maka

$$0.85 f'_c \beta_1 C_b b = A_{sb} f_y$$

$$C_b = \frac{A_{sb} f_y}{(0.85 f'_c) \beta_1 b}$$

$$A_{sb} = \rho_b b d$$

$$C_b = \frac{\rho_b b d f_y}{(0.85 f'_c) \beta_1 b}$$

Sehingga, didapat persamaan (b) sebagai berikut:

$$C_b = \frac{\rho_b d f_y}{(0.85 f'_c) \beta_1}$$

Dengan menggunakan persamaan (a) dan (b) dapat dicari nilai rasio penulangan balans ( $\rho_b$ ), yaitu:

$$\rho_b = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right) \dots\dots(3)$$

**Analisis dan Perancangan Balok Bertulangan Tunggal**

Berdasarkan Pasal 12.2.7.3 SNI 03-2847-2002 : Faktor  $\beta_1$  diambil sebagai berikut:

- a. Untuk  $f'_c \leq 30$  MPa,  $\beta_1 = 0,85$
- b. Untuk  $f'_c > 30$  MPa,  $\beta_1 = 0,85 - 0,008 \cdot (f'_c - 30) \geq 0,65$

Sementara untuk membuat range (rentang) nilai dari rasio penulangan perlu ( $\rho_{perlu}$ ) dihitung dengan menggunakan rumus:

$$\rho_{perlu} = \rho_{max} - \left( \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{n} \right) x_i \dots\dots(4)$$

Untuk perhitungan tulangan tunggal, persamaan luasan dimensi balok menurut Gurki (2007) ditentukan dengan rumus, yaitu:

$$bd^2 = \frac{M_r}{\rho_{perlu} \cdot f_y \left( 1 - 0,59 \frac{\rho_{perlu} f_y}{f'_c} \right)} \dots\dots(5)$$

Selanjutnya menurut Dipohusodo (1999), pada perhitungan luasan tulangan menggunakan rumus:

$$A_s = \rho_{p e r l u} b d \dots\dots\dots (6)$$

Kemudian, rumus perhitungan blok tegangan balok menggunakan rumus:

$$a = \frac{A_{s p e r} f_y}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots(7)$$

Sehingga momen nominal berdasarkan gaya tarik tulangan beton dihitung dengan rumus:

$$M_n = A_{s p e r} f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots(8)$$

**Analisa Biaya Pembuatan Balok Beton Bertulang**

Menurut Ardiansyah (2010), ekonomi konstruksi (*construction economy*) adalah upaya-upaya yang dilakukan dalam proses pra konstruksi maupun masa konstruksi dengan tujuan menekan biaya konstruksi (*cost estimate*).

Analisa biaya konstruksi menggunakan indeks berdasarkan SNI. Untuk pekerjaan beton, perhitungan biaya konstruksi umumnya mengacu pada SNI 7394 : 2008 tentang tata cara perhitungan harga satuan pekerjaan beton untuk bangunan gedung dan perumahan.

**METODELOGI PENELITIAN**

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan jenis penelitian terapan yang dilengkapi dengan metode optimasi. Adapun tujuan utama dari penelitian ini yaitu untuk menganalisis optimasi biaya konstruksi balok dengan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$ . Penelitian ini berusaha menerapkan teori atau metode yang telah dikembangkan baik dalam cakupan penelitian murni maupun penelitian terapan seperti sistem basis data dan lain sebagainya. Selain itu metode analisis dalam penelitian ini, menggunakan program *Spreadsheet* untuk dapat

memudahkan dalam pengerjaan penelitian ini.

Adapun penjelasan tahap-tahap analisis dalam penelitian struktur balok adalah sebagai berikut :

**Asumsi-asumsi**

Pada langkah awal penelitian, peneliti melakukan asumsi-asumsi terhadap beberapa hal yang diketahui, antara lain :

- a. Tulangan yang didapat pada balok beton bertulang berpenampang persegi dengan tulangan tunggal.
- b. Meninjau elemen struktur beton bertulang yang mengalami gaya momen.
- c. Menentukan rasio tulangan longitudinal pada balok dengan berdasarkan nilai momen rencana ( $M_r$ ).
- d. Mutu beton ( $f_c'$ ) yang diambil merupakan mutu beton normal mulai dari 25 MPa sampai dengan 35 MPa dengan kenaikan sebesar 2,5 MPa.
- e. Mutu tulangan baja ( $f_y$ ) sebesar 400 MPa.
- f. Mengasumsikan ukuran dimensi struktur balok  $d = 2b$ .
- g. Jarak dari serat tarik terluar terhadap titik berat tulangan tarik ( $d'$ ) adalah 60 mm.
- h. Nilai  $M_r$  diambil dari 50 KNm sampai dengan 800 KNm, dengan kenaikan (*increment*) sebesar 50 KNm.
- i. Panjang balok adalah 1 m'.
- j. Perhitungan tulangan tekan diabaikan dan sengkang tidak ditinjau.
- k. Perhitungan biaya berdasarkan SNI 7394-2008.
- l. Untuk perhitungan biaya dilakukan 2 cara yaitu perhitungan biaya struktur balok tanpa bekisting dan dengan bekisting, dimana untuk perhitungan biaya struktur balok dengan bekisting diasumsikan satu kali pakai sampai dengan tiga kali pakai.

- m. Menggunakan *mix design* yang diambil dari hasil penelitian di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Bengkulu untuk PT. KSS.
- n. Daftar harga upah bahan dan peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.

**Analisis Perhitungan**

1. Mencari Dimensi Struktur Balok  
Perhitungan dilakukan dengan menggunakan beberapa rumus umum dari tegangan-regangan penampang beton, sebagai berikut :
  - a. Rasio penulangan minimum ( $\rho_{min}$ ), sesuai dengan Rumus 1.
  - b. Rasio penulangan balans ( $\rho_b$ ), sesuai dengan Rumus 3.
  - c. Rasio penulangan maksimum ( $\rho_{max}$ ), sesuai dengan Rumus 2.
  - d. Menentukan *range* (rentang) rasio penulangan perlu ( $\rho_{perlu}$ ), sesuai dengan Rumus 4.
  - e. Menentukan persamaan luasan dimensi balok, sesuai dengan Rumus 5.
  - f. Asumsi dimensi struktur balok, menggunakan rumus sebagai berikut:  
 $d = 2b$  .....(9)
  - g. Menentukan luas tulangan, sesuai dengan Rumus 6.
  - h. Menentukan blok tegangan, sesuai dengan Rumus 7.
  - i. Menentukan momen nominal, sesuai dengan Rumus 8.
2. Menghitung Biaya Konstruksi Balok
  - a. Berdasarkan hasil analisis kebutuhan tulangan dan luasan dimensi balok, selanjutnya dilakukan perhitungan volume beton dan baja tersebut, yaitu dengan menggunakan rumus:

$$V_{beton} = L \times b \times h \dots\dots\dots(10)$$

$$W_{besi} = L \times B_{jbesi} \times A_{Stulangan} \dots\dots\dots(11)$$

- b. Pada perhitungan biaya ini diasumsikan harga pembuatan balok tanpa bekisting dan dengan bekisting, dimana untuk harga pembuatan balok dengan bekisting diasumsikan dari 1 kali pakai sampai dengan 3 kali pakai.
- c. Perhitungan biaya konstruksi balok ini, sesuai dengan SNI 7394-2008, maka indeks perkalian volume dengan harga pembuatan balok beton bertulang dapat dihitung.
- d. Untuk indeks bahan pekerjaan beton menggunakan indeks dari hasil perhitungan *mix design* yang diambil dari hasil penelitian di Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Universitas Bengkulu untuk PT. KSS.
- e. Kemudian dilakukan identifikasi harga satuan material komponen struktur balok, dimana analisis dilakukan dengan Daftar harga upah bahan dan peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.
- f. Setelah itu, untuk penentuan biaya/harga balok, menggunakan rumus, yaitu:  
  
 Harga pembuatan balok = Indeks Desain x Harga Satuan .....(12)
- g. Setelah didapatkan harga pembuatan balok per m' dengan variasi  $\rho$  dan  $f_c'$ , maka dapat dibuat grafik interaksi antara  $\rho$  dan harga balok serta grafik interaksi antara kuat tekan beton ( $f_c'$ ) dan harga balok. Dengan menggunakan grafik tersebut maka dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat dan dapat dipilih desain konstruksi balok yang paling optimum dan ekonomis.

- h. Selanjutnya untuk melihat trend grafik yang didapat, maka divariasikan juga nilai momen rencana ( $M_r$ ).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan pada penelitian skripsi ini dibagi menjadi dua tahapan, yaitu dimulai dengan mencari nilai momen nominal ( $M_n$ ) yang aman dari nilai momen rencana ( $M_r$ ) dan selanjutnya melakukan perhitungan harga pembuatan struktur balok. Perhitungan pada skripsi ini dilakukan untuk mencari biaya konstruksi balok yang paling optimum berdasarkan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$ , sehingga kita dapat mengetahui optimasi balok bertulangan tunggal yaitu pada berapa  $\rho_{max}$  yang paling optimum berdasarkan variasi tersebut, selain itu untuk dapat melihat trend grafiknya akan divariasikan juga nilai momen rencana ( $M_r$ ).

### Analisis Desain Struktur Balok Bertulangan Tunggal

Pada analisis perhitungan ini, peneliti menggunakan asumsi-asumsi dasar yang biasa digunakan dalam perhitungan struktur balok bertulangan tunggal. Dimana analisis perhitungan dilakukan berulang-ulang dengan menggunakan program *Spreadsheet* pada nilai rentang rasio penulangan minimum ( $\rho_{min}$ ) dan rasio penulangan maksimum ( $\rho_{max}$ ). Untuk mencari nilai rentang tersebut, peneliti membagi nilai rasio penulangan menjadi 200 segmen, dimana pada tiap satu nilai rasio penulangan dihasilkan satu nilai momen nominal ( $M_n$ ) dan besaran dimensi balok ( $b$  dan  $h$ ) serta luas tulangan yang digunakan ( $A_s$ ).

### Analisis Perhitungan Biaya Struktur Balok Bertulangan Tunggal

Perhitungan biaya konstruksi balok ini, berdasarkan dengan SNI 7394-2008. Di dalam SNI 7394-2008 sudah ada indeks desain yang telah ditetapkan untuk

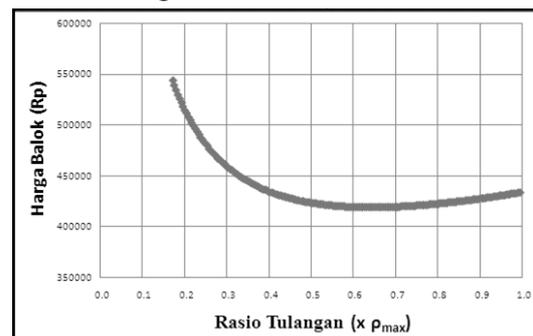
melakukan perhitungan biaya. Kemudian untuk melakukan identifikasi harga satuan material komponen struktur balok, analisis dilakukan berdasarkan Daftar Harga Upah Bahan dan Peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.

Pada perhitungan harga pembuatan balok ini, diasumsikan harga pembuatan balok tanpa bekisting dan dengan bekisting. Dimana untuk harga pembuatan balok dengan bekisting diasumsikan dari satu kali pakai sampai dengan tiga kali pakai.

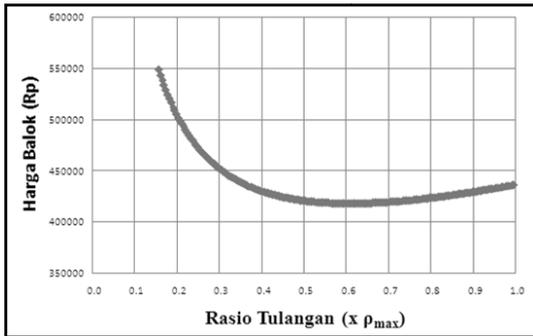
### Analisis Optimasi Biaya Struktur Balok Bertulangan Tunggal

Setelah didapatkan harga pembuatan balok per m' dari 200 segmen dengan variasi  $\rho$  dengan  $f_c'$  bervariasi, maka dapat dibuat grafik interaksi antara  $\rho$  dan harga balok untuk masing-masing kuat tekan beton, adapun salah satu contoh grafik yang didapat dari perhitungan yaitu pada  $M_n = 400$  KNm, sebagai berikut:

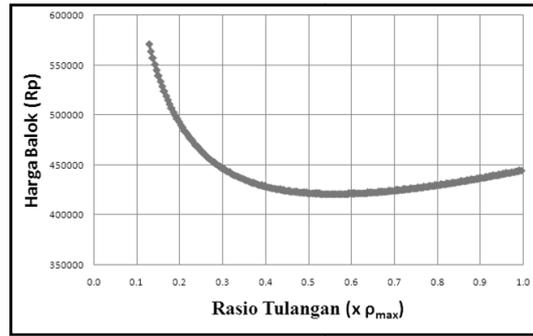
1. Asumsi Perhitungan Biaya tanpa Bekisting



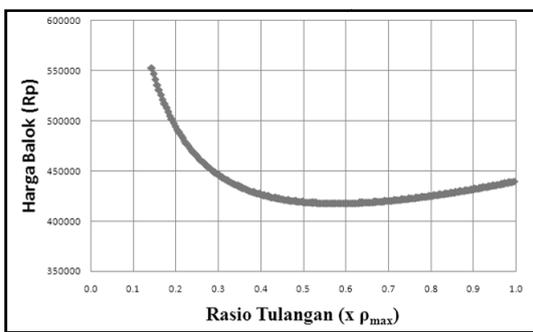
**Gambar 3.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



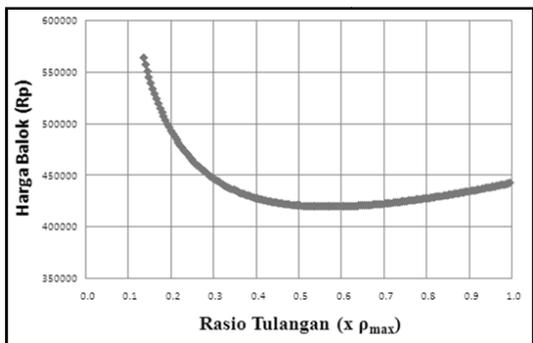
**Gambar 3.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**Gambar 3.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 35$  MPa



**Gambar 3.c.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 30$  MPa

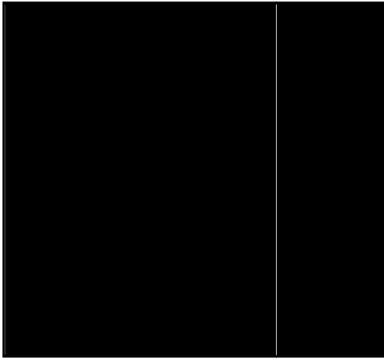


**Gambar 3.d.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 32.5$  MPa

Pada grafik (Gambar 3.a sampai dengan Gambar 3.e) dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan kuat tekan beton yang dibuat dan dapat dilihat desain konstruksi balok yang paling optimum pada berapa rentang  $\rho_{max}$ , dimana pada grafik tersebut nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum untuk  $M_n = 400$  kNm, yaitu:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa berada pada  $0.6441 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 418,939.-
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa berada pada  $0.6078 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 418,322.-
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa berada pada  $0.5760 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 417,565.-
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa berada pada  $0.5678 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 419,774.-
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa berada pada  $0.5602 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 420,916.-

Sehingga berdasarkan nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum dari masing-masing kuat tekan beton ( $f_c'$ ) tersebut dapat dibuat grafik sebagai berikut:



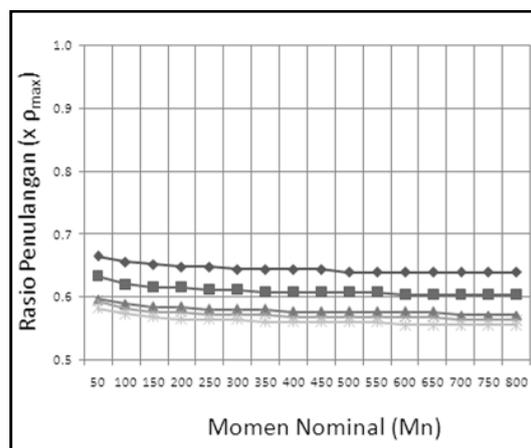
**Gambar 4.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya tanpa Bekisting

Pada grafik (Gambar 3.a sampai dengan Gambar 3.e), ternyata dalam suatu desain struktur balok bertulangan tunggal ini, semakin besar  $f_c'$  maka nilai  $\rho_{\text{perlu}}$  yang paling optimum semakin kecil. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan nilai  $f_c'$  yang semakin tinggi, akan menambah besar nilai  $\rho_{\text{max}}$  pada setiap kenaikan  $f_c'$ , sehingga akan mempengaruhi nilai  $\rho_{\text{perlu}}$ . Kemudian pada Gambar 4 dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat, dimana harga yang paling optimum terdapat pada  $f_c' = 30$  MPa.

Selanjutnya dari hasil perhitungan sampel ini, maka untuk melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap masing-masing kuat tekan beton ( $f_c'$ ). Maka peneliti melakukan variasi pada nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm. Berdasarkan hasil perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan bahwa pada  $f_c' = 30$  MPa, merupakan nilai kuat tekan beton yang paling optimum dalam mendesain struktur balok bertulangan tunggal non bekisting ini. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan semakin besar  $f_c'$  maka dimensi semakin kecil dan kebutuhan tulangan semakin banyak, dimana kebutuhan tulangan semakin mengalami kenaikan

drastis pada  $f_c' = 32,5$  MPa dan  $f_c' = 35$  MPa, yang berakibat dengan kenaikan harga balok.

Kemudian dari hasil perhitungan dengan variasi nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm, peneliti juga melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap nilai  $\rho_{\text{perlu}}$  yang paling optimum pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 5.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan  $f_c'$  dengan Variasi Nilai Momen Nominal Untuk Perhitungan Biaya tanpa Bekisting

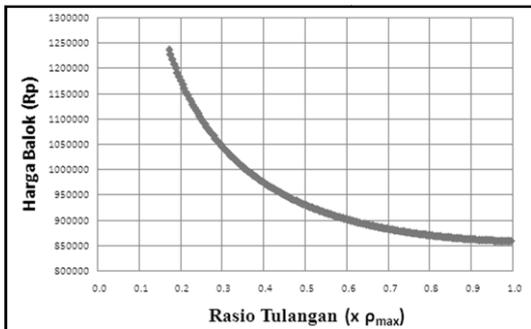
Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.63-0.66 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.60-0.63 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.57-0.60 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.56-0.59 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).

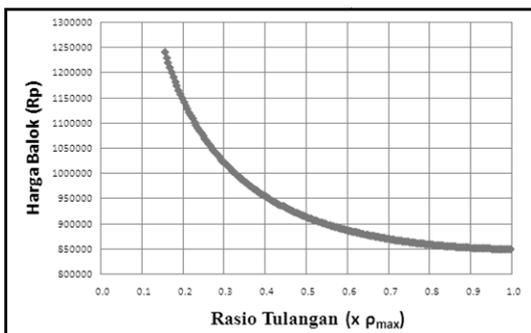
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.56-0.58 (kali  $\rho_{max}$ ).

Berdasarkan data yang didapatkan diatas (dapat dilihat pada Gambar 5), ternyata semakin besar  $f_c'$  ternyata nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Selain itu, pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat bahwa semakin besar Momen Nominal, maka semakin kecil nilai  $\rho_{perlu}$  optimum. Hal ini dikarenakan dimensi beton semakin besar sehingga mampu menahan momen tersebut.

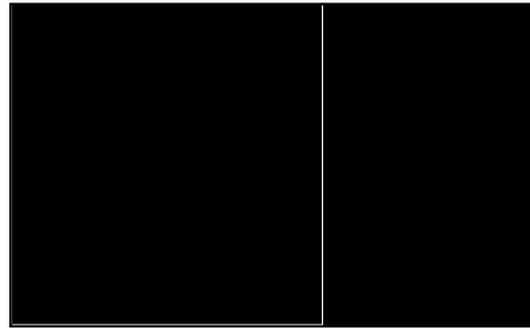
2. Asumsi Perhitungan Biaya dengan Bekisting  
 a. Asumsi 1 Kali Pakai



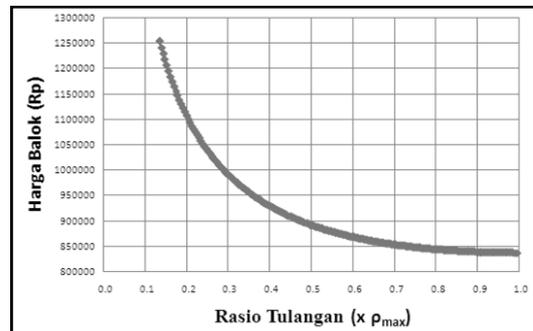
**Gambar 6.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



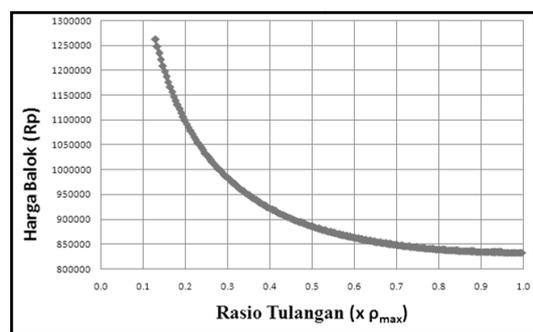
**Gambar 6.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**Gambar 6.c.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 30$  MPa



**Gambar 6.d.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 32.5$  MPa

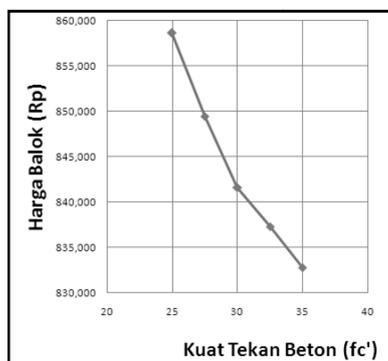


**Gambar 6.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 35$  MPa

Pada grafik (Gambar 6.a sampai dengan Gambar 6.e) dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan kuat tekan beton yang dibuat dan dapat dilihat desain konstruksi balok yang paling optimum pada berapa rentang  $\rho_{max}$ , dimana pada grafik tersebut nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum untuk  $M_n = 400$  KNm, yaitu:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa berada pada  $0.9959 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 858,614.-
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa berada pada  $0.9958 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 849,429.-
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa berada pada  $0.9957 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 841,618.-
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa berada pada  $0.9957 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 837,255.-
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa berada pada  $0.9956 \rho_{max}$ , dengan harga Rp. 832,779.-

Sehingga berdasarkan nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum dari masing-masing kuat tekan beton ( $f_c'$ ) tersebut, dapat dibuat grafik sebagai berikut:



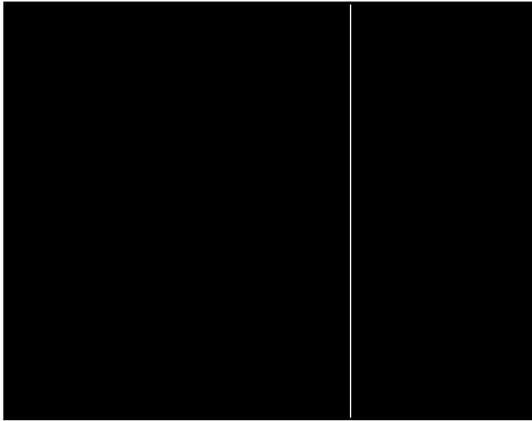
**Gambar 7.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai

Pada grafik (Gambar 6.a sampai dengan Gambar 6.e), ternyata dalam suatu desain struktur balok bertulangan tunggal ini, semakin besar  $f_c'$  maka nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan nilai  $f_c'$  yang semakin tinggi, akan menambah besar nilai  $\rho_{max}$  pada setiap kenaikan  $f_c'$ , sehingga akan mempengaruhi nilai  $\rho_{perlu}$ . Kemudian pada

Gambar 7 dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat, dimana harga yang paling optimum terdapat pada  $f_c' = 35$  MPa.

Selanjutnya dari hasil perhitungan sampel ini, maka untuk melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap kuat tekan beton ( $f_c'$ ). Maka peneliti melakukan variasi pada nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm. Berdasarkan hasil perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan bahwa pada  $f_c' = 35$  MPa, merupakan nilai kuat tekan beton yang paling optimum dalam mendesain struktur balok bertulangan tunggal dengan bekisting satu kali pakai ini. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan semakin besar  $f_c'$  maka dimensi semakin kecil dan kebutuhan tulangan semakin banyak, akan tetapi harga besi yang naik tidak mempengaruhi dengan harga bekisting yang mahal dalam mengikuti penurunan dimensi balok.

Kemudian dari hasil perhitungan dengan variasi nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm, peneliti juga melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



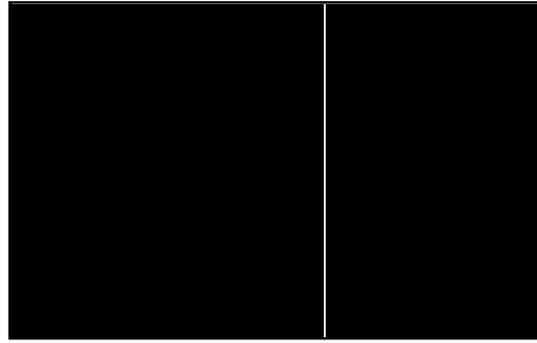
**Gambar 8.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan  $f_c'$  dengan Variasi Nilai Momen Nominal Untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan yang peneliti lakukan (Lampiran L-X), maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan:

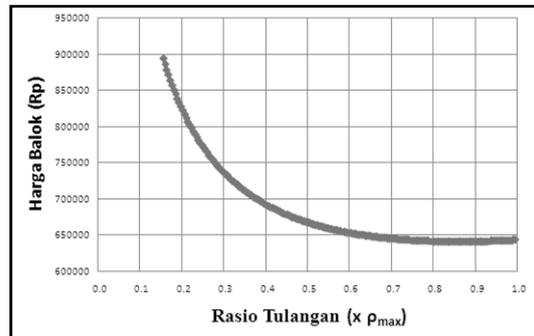
- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.98-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.94-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.93-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.92-1 (kali  $\rho_{max}$ ).

Berdasarkan data yang didapatkan diatas (dapat dilihat pada Gambar 8), ternyata semakin besar  $f_c'$  ternyata nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Selain itu, pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat bahwa semakin besar momen nominal, maka semakin kecil nilai  $\rho_{perlu}$  optimum. Hal ini dikarenakan dimensi beton semakin besar sehingga mampu menahan momen tersebut.

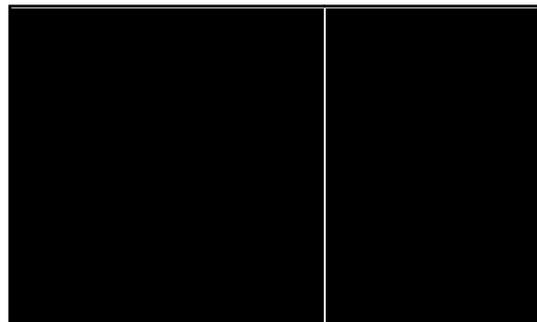
b. Asumsi 2 Kali Pakai



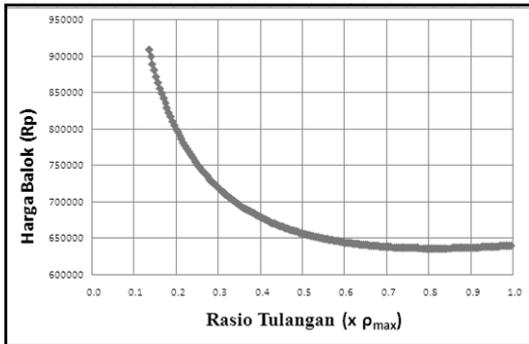
**Gambar 9.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



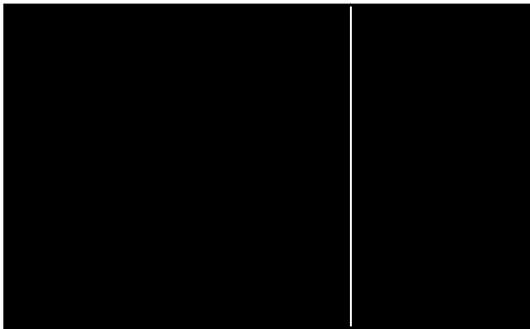
**Gambar 9.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**Gambar 9.c.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 30$  MPa



**Gambar 9.d.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 32.5$  MPa

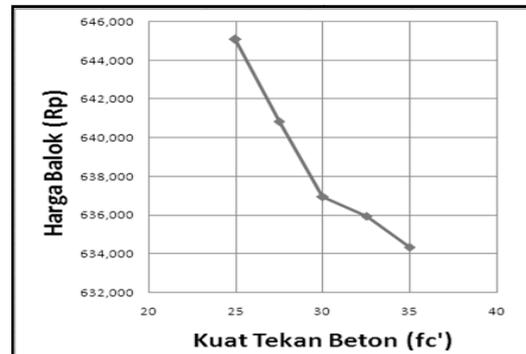


**Gambar 9.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 35$  MPa

Pada grafik (Gambar 9.a sampai dengan Gambar 9.e) dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan kuat tekan beton yang dibuat dan dapat dilihat desain konstruksi balok yang paling optimum pada berapa rentang  $\rho_{max}$ , dimana pada grafik tersebut nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum untuk  $M_n = 400$  KNm, yaitu:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa berada pada 0.9007  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 645,083.-
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa berada pada 0.8608  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 640,833.-
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa berada pada 0.8244  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 636,965.-
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa berada pada 0.8142  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 635,941.-
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa berada pada 0.8040  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 634,353.-

Sehingga berdasarkan nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum dari masing-masing kuat tekan beton ( $f_c'$ ) tersebut, dapat dibuat grafik sebagai berikut:



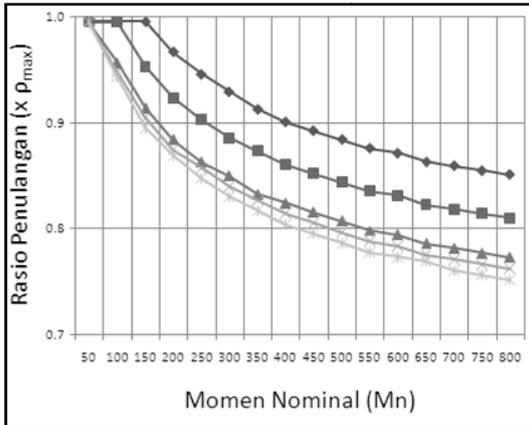
**Gambar 10.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai

Pada grafik (Gambar 9.a sampai dengan Gambar 9.e), ternyata dalam suatu desain struktur balok bertulangan tunggal ini, semakin besar  $f_c'$  maka nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan nilai  $f_c'$  yang semakin tinggi, akan menambah besar nilai  $\rho_{max}$  pada setiap kenaikan  $f_c'$ , sehingga akan mempengaruhi nilai  $\rho_{perlu}$ . Kemudian pada Gambar 10 dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat, dimana harga yang paling optimum terdapat pada  $f_c' = 35$  MPa.

Selanjutnya dari hasil perhitungan sampel ini, maka untuk melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap kuat tekan beton ( $f_c'$ ). Maka peneliti melakukan variasi pada nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm. Berdasarkan hasil perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan bahwa pada  $f_c' = 35$  MPa, merupakan nilai kuat tekan beton yang paling optimum dalam mendesain struktur

balok bertulangan tunggal dengan bekisting dua kali pakai ini. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan semakin besar  $f_c'$  maka dimensi semakin kecil dan kebutuhan tulangan semakin banyak, akan tetapi harga besi yang naik tidak mempengaruhi dengan harga bekisting yang mahal dalam mengikuti penurunan dimensi balok.

Kemudian dari hasil perhitungan dengan variasi nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm, peneliti juga melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 11.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan  $f_c'$  dengan Variasi Nilai Momen Nominal Untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai

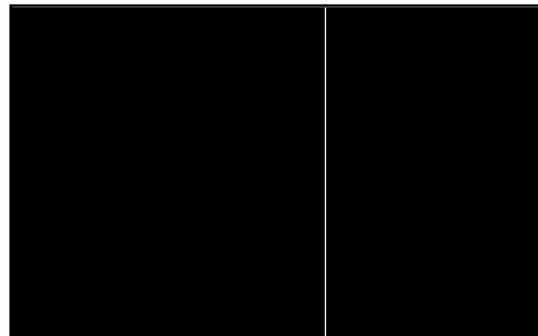
Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.85-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.81-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.77-1 (kali  $\rho_{max}$ ).

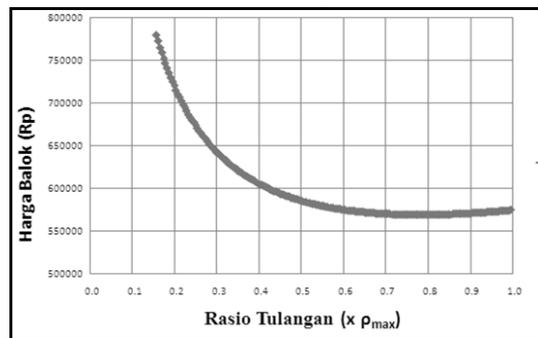
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.76-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.75-1 (kali  $\rho_{max}$ ).

Berdasarkan data yang didapatkan diatas (dapat dilihat pada Gambar 11), ternyata semakin besar  $f_c'$  ternyata nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Selain itu, pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat bahwa semakin besar momen nominal, maka semakin kecil nilai  $\rho_{perlu}$  optimum. Hal ini dikarenakan dimensi beton semakin besar sehingga mampu menahan momen tersebut.

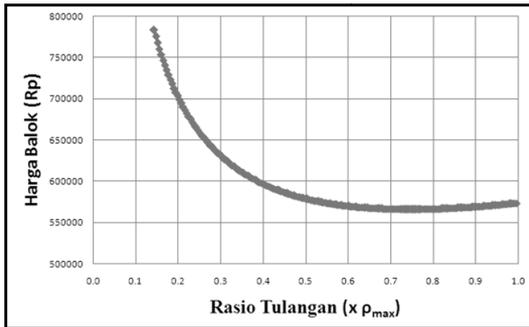
c. Asumsi 3 Kali Pakai



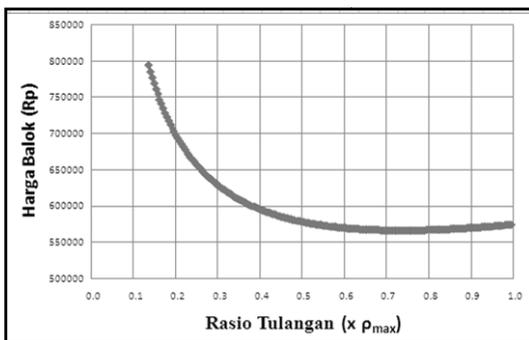
**Gambar 12.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



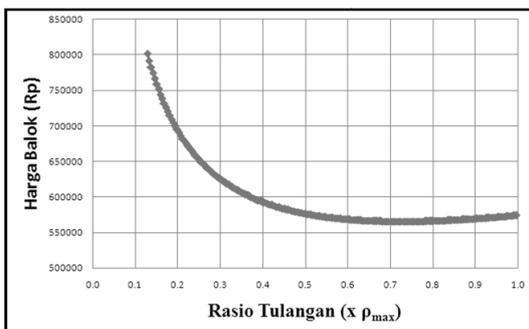
**Gambar 12.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**Gambar 12.c.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 30$  MPa



**Gambar 12.d.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 3 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 32.5$  MPa



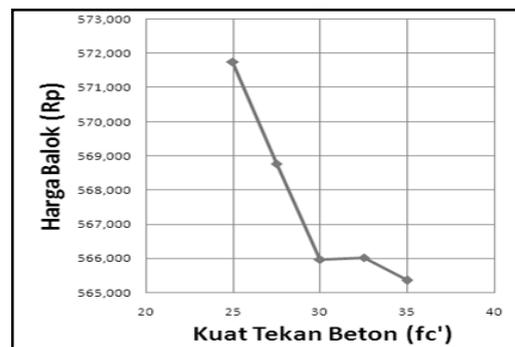
**Gambar 12.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 3 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 35$  MPa

Pada grafik (Gambar 12.a sampai dengan Gambar 12.e) dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan kuat tekan beton yang dibuat dan dapat dilihat desain konstruksi balok yang paling optimum pada berapa rentang  $\rho_{max}$ , dimana pada grafik tersebut nilai  $\rho_{perlu}$

yang paling optimum untuk  $M_n = 400$  KNm, yaitu:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa berada pada 0.8220  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 571,760.-
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa berada pada 0.7807  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 568,763.-
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa berada pada 0.7473  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 565,973.-
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa berada pada 0.7364  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 566,023.-
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa berada pada 0.7257  $\rho_{max}$ , dengan harga Rp. 565,356.-

Sehingga berdasarkan nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum dari masing-masing kuat tekan beton ( $f_c'$ ) tersebut, dapat dibuat grafik sebagai berikut:



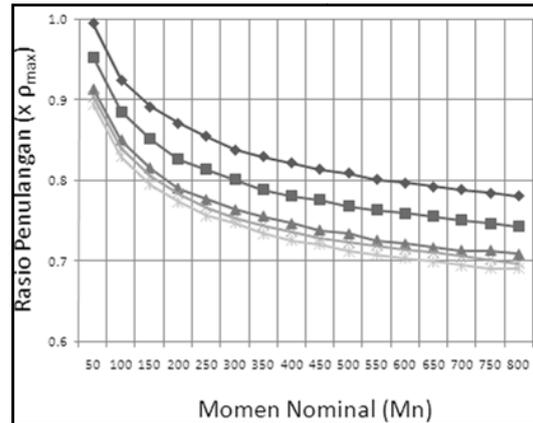
**Gambar 13.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 3 Kali Pakai

Pada grafik (Gambar 12.a sampai dengan Gambar 12.e), ternyata dalam suatu desain struktur balok bertulangan tunggal ini, semakin besar  $f_c'$  maka nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan nilai  $f_c'$  yang semakin tinggi, akan menambah besar nilai  $\rho_{max}$  pada setiap kenaikan  $f_c'$ , sehingga akan mempengaruhi nilai  $\rho_{perlu}$ . Kemudian pada Gambar 13 dapat dilihat perbedaan harga sesuai dengan desain yang dibuat, dimana harga yang paling optimum terdapat pada  $f_c' = 35$  MPa.

Selanjutnya dari hasil perhitungan sampel ini, maka untuk melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap kuat tekan beton ( $f_c'$ ). Maka peneliti melakukan variasi pada nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm. Berdasarkan hasil perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok dengan asumsi tiga kali pakai yang paling optimum didapatkan:

- a) Untuk nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 700 KNm, nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum pada  $f_c' = 35$  MPa. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan semakin besar  $f_c'$  maka dimensi semakin kecil dan kebutuhan tulangan semakin banyak, akan tetapi harga besi yang naik tidak mempengaruhi dengan harga bekisting yang mahal dalam mengikuti penurunan dimensi balok.
- b) Untuk nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 750 KNm sampai 800 KNm, nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum pada  $f_c' = 30$  MPa. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan semakin besar  $f_c'$  maka dimensi semakin kecil dan kebutuhan tulangan semakin banyak, dimana kenaikan volume baja pada saat  $f_c' > 30$  MPa, mengalami peningkatan yang drastis. Sehingga baja kembali mempengaruhi harga pembuatan balok bertulangan tunggal dengan asumsi tiga kali pakai ini sebanding dengan nilai  $M_r$  yang besar.

Kemudian dari hasil perhitungan dengan variasi nilai momen rencana ( $M_r$ ) dari 50 KNm sampai 800 KNm dengan kenaikan (*increment*) 50 KNm, peneliti juga melihat trend grafik yang didapatkan jika nilai  $M_r$  divariasikan terhadap nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat pada grafik di bawah ini:



**Gambar 14.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan  $f_c'$  dengan Variasi Nilai Momen Nominal Untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 3 Kali Pakai

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan:

- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.78-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.74-0.95 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.71-0.91 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.70-0.90 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.69-0.90 (kali  $\rho_{max}$ ).

Berdasarkan data yang didapatkan diatas (dapat dilihat pada Gambar 14), ternyata semakin besar  $f_c'$  ternyata nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Selain itu, pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat bahwa semakin besar momen nominal, maka semakin kecil nilai  $\rho_{perlu}$  optimum. Hal ini dikarenakan dimensi beton semakin besar sehingga mampu menahan momen tersebut.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang didapat dari penelitian analisis optimasi biaya konstruksi balok dengan variasi nilai  $\rho$  dan  $f_c'$  ini adalah sebagai berikut:

6. Berdasarkan variasi momen nominal, nilai optimum untuk perhitungan biaya tanpa bekisting berkisar antara 0.56-0.66 (kali  $\rho_{max}$ ).
7. Berdasarkan variasi momen nominal, nilai optimum untuk perhitungan biaya dengan bekisting asumsi 1 kali pakai berkisar antara 0.92-1 (kali  $\rho_{max}$ ), untuk perhitungan biaya dengan bekisting asumsi 2 kali pakai berkisar antara 0.75-1 (kali  $\rho_{max}$ ), untuk perhitungan biaya dengan bekisting asumsi 3 kali pakai berkisar antara 0.69-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
8. Berdasarkan variasi momen nominal, semakin besar  $f_c'$  maka nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil.
9. Untuk perhitungan biaya tanpa bekisting, nilai  $f_c'$  yang paling optimum terletak pada  $f_c' = 30$  MPa.
10. Untuk perhitungan biaya dengan bekisting dari satu kali pakai sampai dengan dua kali pakai, nilai  $f_c'$  yang paling optimum terletak pada  $f_c' = 35$  MPa.
11. Untuk perhitungan biaya dengan bekisting dengan tiga kali pakai, untuk nilai  $M_n$  dari 50 kNm sampai dengan 700 kNm nilai  $f_c'$  yang paling optimum terletak pada  $f_c' = 35$  Mpa, sedangkan untuk nilai  $M_n$  dari 750 sampai dengan 800 kNm nilai  $f_c'$  yang paling optimum terletak pada  $f_c' = 30$  MPa.

### Saran

Untuk menyelesaikan masalah optimasi yang cukup rumit seperti optimasi beton bertulang pada struktur balok bertulangan tunggal, diperlukan metoda optimasi yang lebih baik lagi, ada beberapa saran yang mungkin dapat membantu dalam

mengembangkan optimasi beton bertulang pada struktur balok bertulangan tunggal yaitu :

4. Metoda optimasi perlu dikembangkan lagi ke analisis struktur lainnya, terutama dalam proses penelusurannya, sehingga metoda ini dapat menjadi lebih baik lagi.
5. Apabila ingin melanjutkan penelitian lanjutan tentang struktur balok bertulangan tunggal, disarankan untuk menambah variabel momen rencana ( $M_r$ ) dan asumsi penggunaan bekisting lebih dari tiga kali.
6. Selain itu, disarankan untuk menambah perhitungan menjadi struktur balok bertulangan rangkap.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ardiansyah, R., 2010. *Analisis Tulangan Optimum untuk Mendapatkan Efisiensi Biaya Maksimum terhadap Pekerjaan Balok Lantai (Floor Beam) Gedung Struktur Beton Bertulang*, Jurnal Teknik Sipil-Universitas Islam Riau.
- Dipohusodo, I., 1999. *Struktur Beton Bertulang*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.
- DPU, 2011. *Daftar Harga Upah, Bahan dan Peralatan*, Dinas Pekerjaan Umum Propinsi Bengkulu, Bengkulu.
- DPU, 2008. *SNI 7394-2008: Tata Cara Perhitungan Harga Satuan Pekerjaan Beton untuk Konstruksi Bangunan Gedung dan Perumahan*, Panitia Teknik Standarisasi Bidang Konstruksi dan Bangunan, Bandung.
- DPU, 2002. *SK-SNI 03-2847-2002 : Tata Cara Perencanaan Struktur Beton untuk Bangunan Gedung*, Panitia Teknik Standarisasi Bidang Konstruksi dan Bangunan, Bandung.
- DPU, 1991. *SNI T-15-1991-03: Tata Cara Perhitungan Struktur Beton untuk*

*Bangunan Gedung*, Yayasan LPMB,  
Bandung.

- Firmansyah, 2007. [http://eprints.undip.ac.id/34288/6/1793\\_chapter\\_II.pdf](http://eprints.undip.ac.id/34288/6/1793_chapter_II.pdf),  
Tanggal 28 Juli 2012, 09.15 WIB.
- Gurki, J. T. S., 2007. *Beton Bertulang (Edisi Revisi)*, Rekayasa Sains, Bandung.
- LTS, 2012. *Data Mix Design Untuk PT. KSS*, Laboratorium Konstruksi dan Teknologi Beton Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bengkulu, Bengkulu.
- Naftali, Y., 1999. *Perancangan Struktur dengan Optimasi*. <http://www.yohanli.com/perancangan-struktur-dengan-optimasi.html>,  
Tanggal 12 Agustus 2012, 10.35 WIB.
- Nawy, E. G., dkk., 2010. *Beton Bertulang Sebuah Pendekatan Mendasar*, ITS Press, Surabaya.
- Nur, Oscar Fithrah, 2009. *Kajian Eksperimental Prilaku Balok Beton Tulangan Tunggal Berdasarkan Tipe Keruntuhan Balok*, Jurnal Rekayasa Sipil Volume 5 No. 02.