

## 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  $p$  dan  $f_c'$ .

### Beton Bertulang

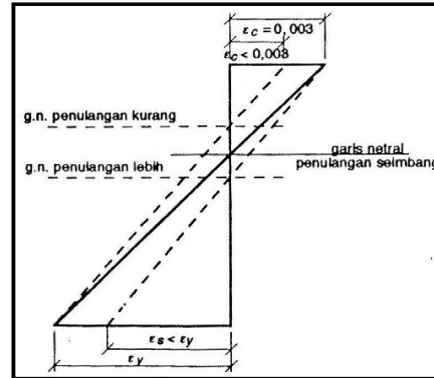
Beton tidak dapat menahan gaya tarik melebihi nilai tertentu tanpa mengalami retak-retak, maka agar beton dapat bekerja dengan baik dalam suatu sistem struktur, perlu dibantu dengan memberikan perkuatan penulangan yang terutama akan mengemban tugas menahan gaya tarik yang bakal timbul

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 Tjokrodinuljo (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 luhunya (tegangan luhunya) 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 Terlentu Bertulangan Tarik**

Analisis penampang balok terlentu 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 terlentu 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:

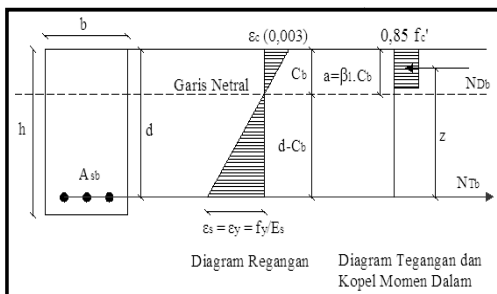
1. Rasio Tulangan Minimum ( $\rho_{\min}$ )

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

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,  $\beta_1 = 0,85 - 0,008.(f'_c - 30) \geq 0,65$

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

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

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

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

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

$$A_s = \rho_{\text{perlu}} b d \dots\dots\dots (6)$$

Kemudian, rumus perhitungan blok tegangan balok menggunakan rumus:

$$a = \frac{A_s \text{ perlu } f_y}{0,85 f_c' b} \dots\dots\dots (7)$$

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

$$M_n = A_s \text{ perlu } f_y \left( d - \frac{a}{2} \right) \dots\dots\dots (8)$$

### **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.

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

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

- 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:

$$\text{Harga pembuatan balok} = \text{Indeks Desain} \times \text{Harga Satuan} \dots\dots\dots(12)$$

- 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.

**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 ( $\rho_{\text{min}}$ ), sesuai dengan Rumus 1.
  - b. Rasio penulangan balans ( $\rho_b$ ), sesuai dengan Rumus 3.
  - c. Rasio penulangan maksimum ( $\rho_{\text{max}}$ ), sesuai dengan Rumus 2.
  - d. Menentukan *range* (rentang) rasio penulangan perlu ( $\rho_{\text{perlu}}$ ), sesuai dengan Rumus 4.
  - e. Menentukan persamaan luasan dimensi balok, sesuai dengan Rumus 5.
  - f. Asumsi dimensi struktur balok, menggunakan rumus sebagai berikut:  
  
 $d = 2b \dots\dots\dots(9)$
  - 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:

- 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

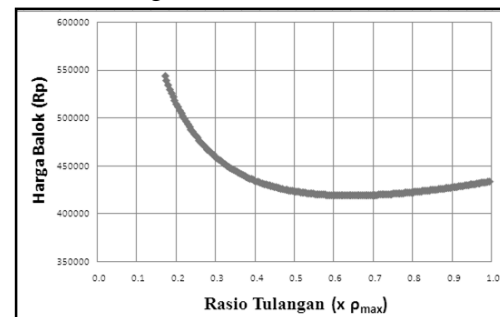
melakukan perhitungan biaya. Kemudian untuk melakukan identifikasi harga satuan material komponen struktur balok, analisis dilakukan berdasarkan Daftar Harga Upah Bahan dan Peralatan Tahun Anggaran 2011 dari Dinas Pekerjaan Umum Provinsi Bengkulu.

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

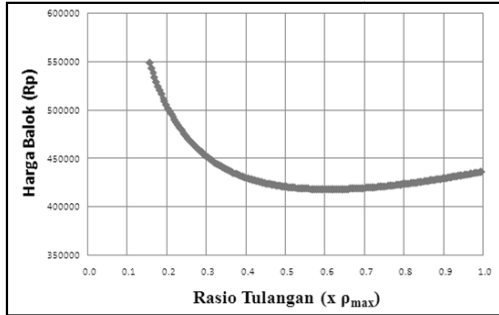
Setelah didapatkan harga pembuatan balok per m' dari 200 segmen dengan variasi  $\rho$  dengan  $f_c'$  bervariasi, maka dapat dibuat grafik interaksi antara  $\rho$  dan harga balok untuk masing-masing kuat tekan beton, adapun salah satu contoh grafik yang didapat dari perhitungan yaitu pada  $M_n =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

1. Asumsi Perhitungan Biaya tanpa Bekisting

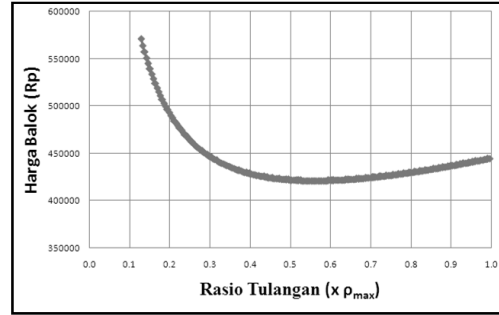


**Gambar 3.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa

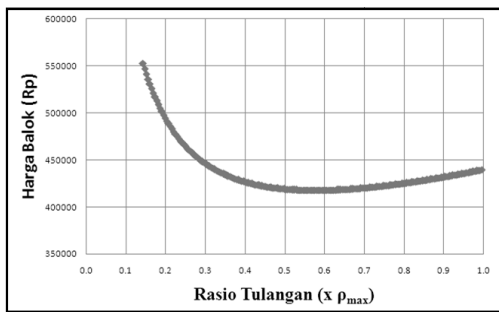




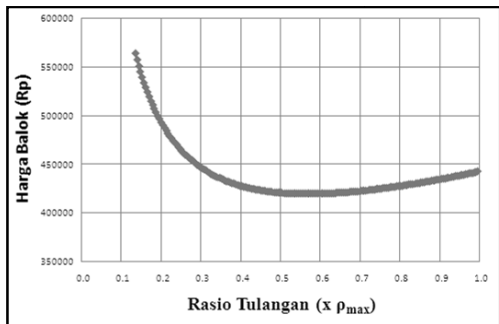
**Gambar 3.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**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

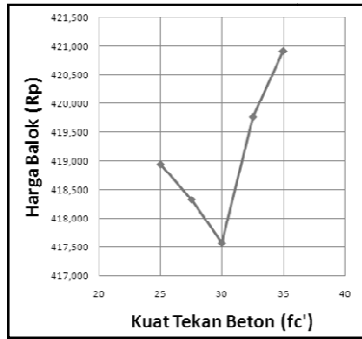


**Gambar 3.d.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok tanpa Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 32.5$  MPa

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:



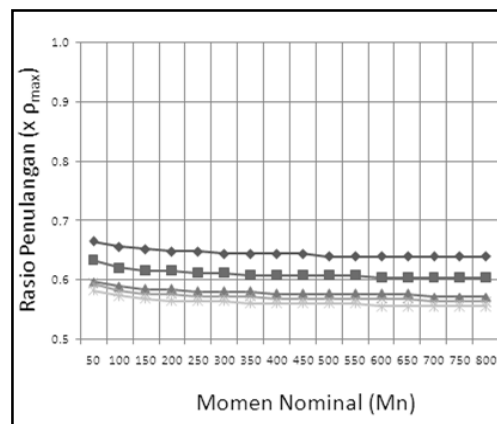
**Gambar 4.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya tanpa Bekisting

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:

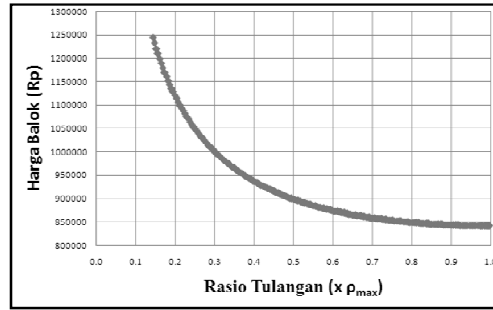
- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.63-0.66 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{\text{max}}$  yang paling optimum berada pada range 0.60-0.63 (kali  $\rho_{\text{max}}$ ).
- 3) Untuk  $f_c'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

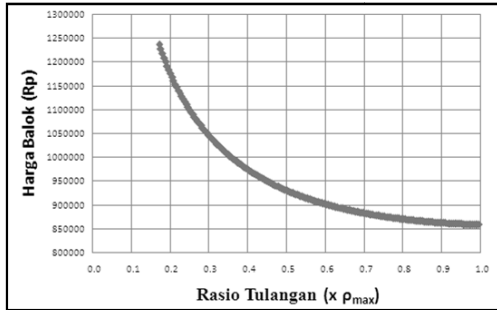
Berdasarkan data yang didapatkan diatas (dapat dilihat pada Gambar 5), ternyata semakin besar  $f_c'$  ternyata nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Selain itu, pada masing-masing  $f_c'$ , dapat dilihat bahwa semakin besar Momen Nominal, maka semakin kecil nilai  $\rho_{perlu}$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

2. Asumsi Perhitungan Biaya dengan Bekisting

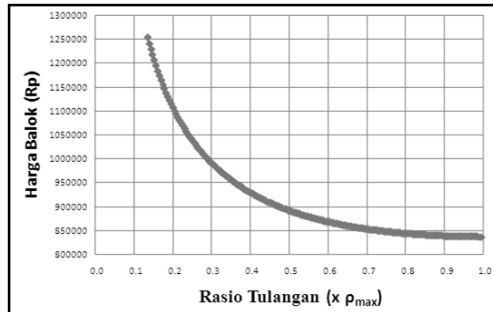
a. Asumsi 1 Kali Pakai



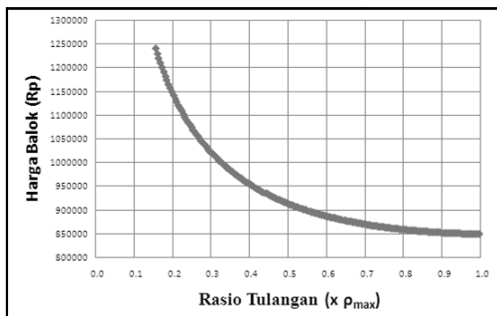
**Gambar 6.c.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 30$  MPa



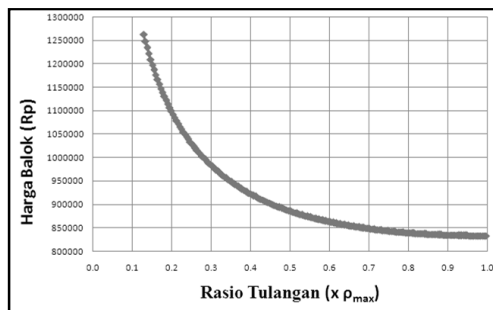
**Gambar 6.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



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

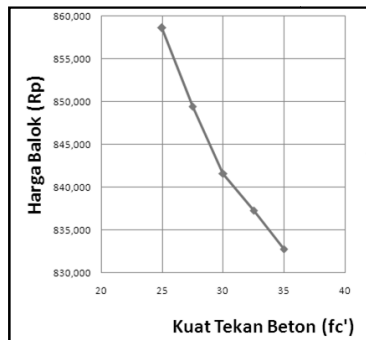


**Gambar 6.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 35$  MPa

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:



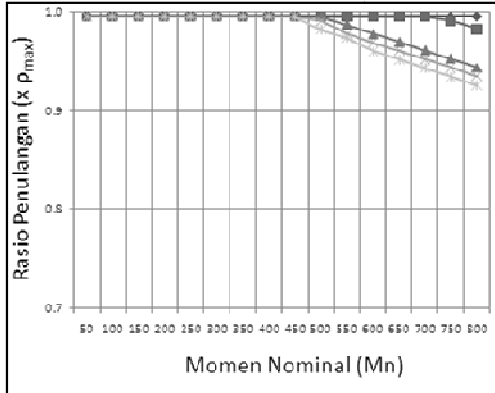
**Gambar 7.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f_c'$  untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai

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:



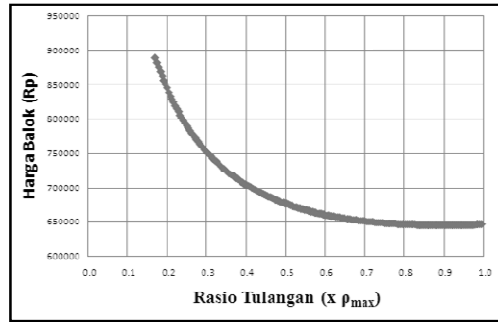
**Gambar 8.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan  $f_c'$  dengan Variasi Nilai Momen Nominal Untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 1 Kali Pakai

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

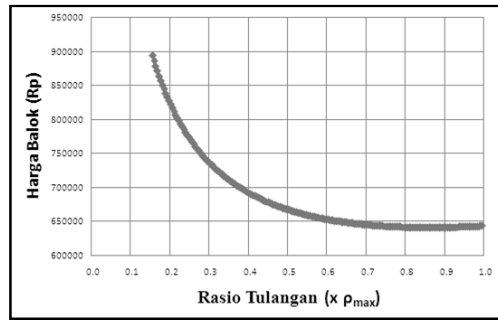
- 1) Untuk  $f_c' = 25$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 2) Untuk  $f_c' = 27.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.98-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 3) Untuk  $f_c' = 30$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$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

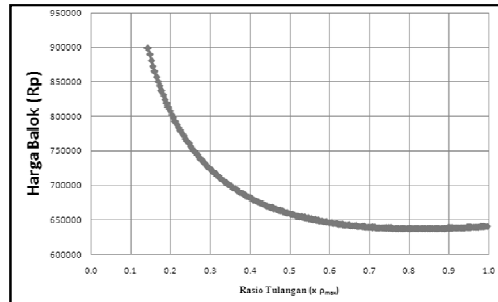
b. Asumsi 2 Kali Pakai



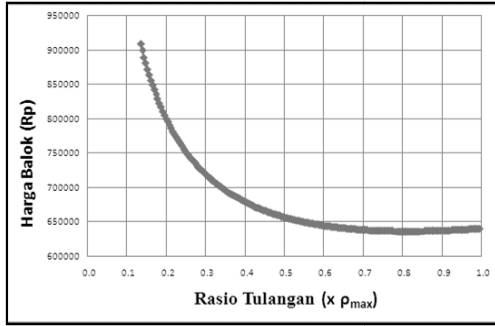
**Gambar 9.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



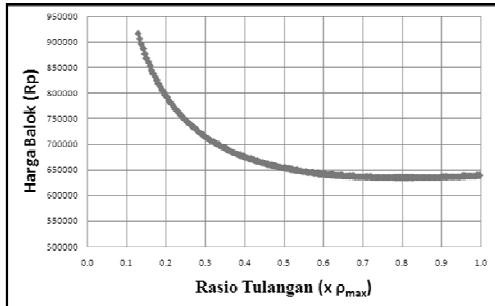
**Gambar 9.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**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

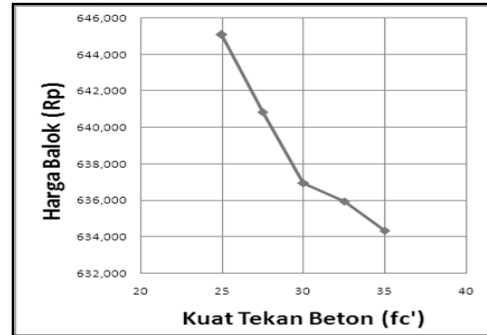


**Gambar 9.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f'_c = 35$  MPa

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:



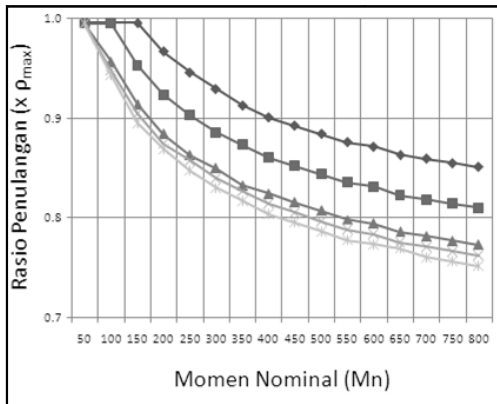
**Gambar 10.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Perbedaan  $f'_c$  untuk Perhitungan Biaya dengan Bekisting Asumsi 2 Kali Pakai

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

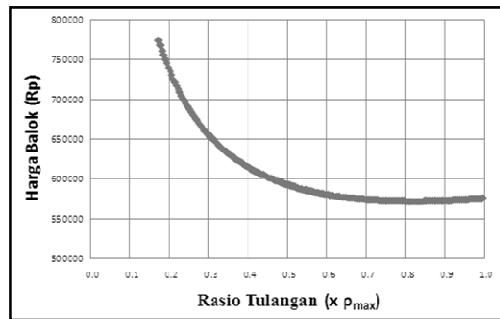
Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan yang peneliti lakukan, maka untuk nilai biaya pembuatan konstruksi balok yang paling optimum didapatkan:

- 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  $\rho_{max}$ ).

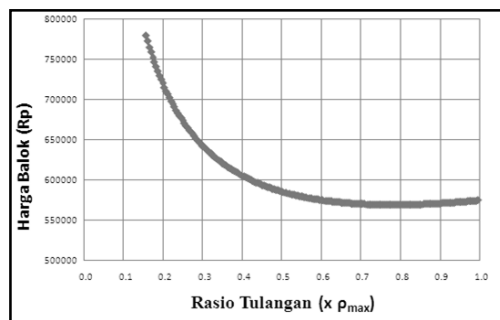
- 4) Untuk  $f_c' = 32.5$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.76-1 (kali  $\rho_{max}$ ).
- 5) Untuk  $f_c' = 35$  MPa rentang nilai  $\rho_{max}$  yang paling optimum berada pada range 0.75-1 (kali  $\rho_{max}$ ).

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.

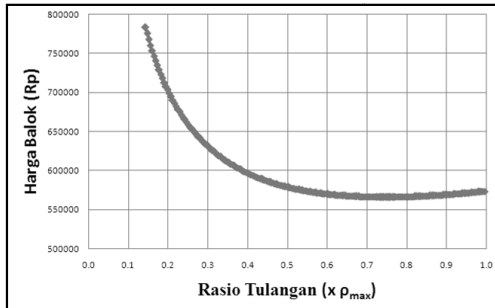
### c. Asumsi 3 Kali Pakai



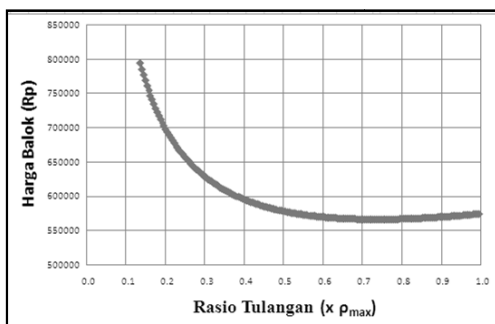
**Gambar 12.a.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 25$  MPa



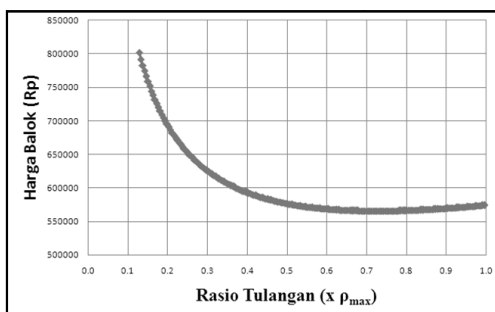
**Gambar 12.b.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f_c' = 27.5$  MPa



**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



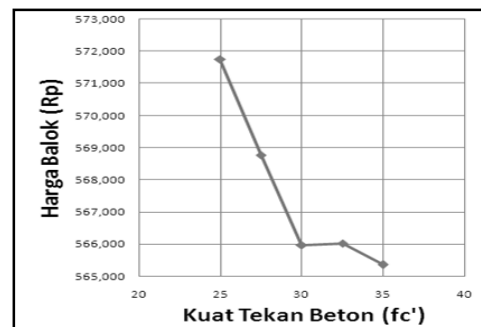
**Gambar 12.e.** Grafik Interaksi  $\rho$  dan Harga Balok dengan Bekisting Asumsi 3 Kali Pakai untuk  $M_n = 400$  KNm dan  $f'_c = 35$  MPa

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

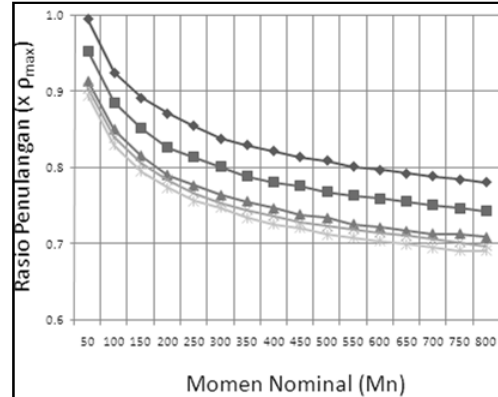
Pada grafik (Gambar 12.a sampai dengan Gambar 12.e), ternyata dalam suatu desain struktur balok bertulangan tunggal ini, semakin besar  $f'_c$  maka nilai  $\rho_{perlu}$  yang paling optimum semakin kecil. Menurut peneliti, hal ini dikarenakan nilai  $f'_c$  yang semakin tinggi, akan menambah besar 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.