

STRUT and TIE MODEL SEBAGAI ALTERNATIF PERANCANGAN STRUKTUR BETON BERTULANG

Yuzuar Afrizal

Staf Pengajar Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bengkulu
Jl. W. R. Supratman, Kandang Limun, Bengkulu 38371, Telp (0736)344087, Ext.337

E-mail: yuzuar_s2ts03@yahoo.com

Abstract

Design of concrete structures according to the applicable standard is to use the principle of the planning section of the load moment based on the principles of Bernoulli and Navier. Considered linear strain distribution and is considered still valid even though cross-section has been cracked and the planning section of the burden of a separate shear forces with the principle of $V_c + V_s$. The number of cases for the structural elements that have a fairly complicated shape will cause a problem in its design. This happens to the elements - structural elements such as high beam, corbel, beams with fairly abrupt changes in the dimensions, etc. This is evident from the occurrence of non-linear strain distribution so that it can no longer planned in a standard way. Planning is done sometimes only be approach with the regulations - regulations to existing standards, although sometimes there is a significant difference, one alternative approach to deal with is using Strut and Tie Model approach.

Keywords : Bernoulli's principle and Navier, Strut and Tie Model, D-Region, Region B-

1. PENDAHULUAN

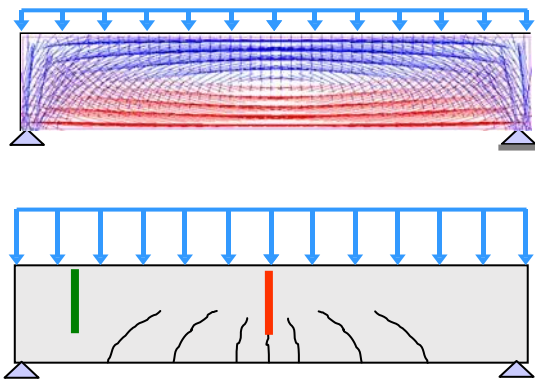
Strut and Tie method (STM) merupakan sebuah metode yang sedang berkembang akhir-akhir ini di dunia teknik sipil. Dunia perencana mulai dari praktisi hingga akademisi mulai melirik penggunaan dari metode ini, disamping karena teori yang mendasari STM ini sudah dikenal sejak lama yaitu metoda rangka batang dan kepraktisan yang menjadi pertimbangan faktor lainnya.

Strut-and tie model adalah sebuah model struktur rangka dari suatu elemen struktural atau dari sebuah *D-Region* dalam elemen tersebut, yang terdiri dari batang-batang desak dan batang-batang tarik yang terhubung pada titik-titik nodal, dan yang mampu meneruskan beban-beban terfaktor ke titik-titik tumpuan atau ke *B-Region* di dekatnya (ACI 318-02 App. A).

Dalam penyelesaian dari STM ini tidak hanya berupa satu hasil akhir yang selalu tetap bagi masing-masing perencana, melainkan memberikan hasil yang unik dimana berarti hasil desain yang diperoleh dapat saja berbeda antara perencana satu dengan perencana lainnya. Hanya saja yang membedakan berupa tingkat keefisienan rencana yang ada, baik dari segi perhitungan maupun segi material perkuatan tambahan yang akan digunakan sebagai desain dalam STM tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Metoda perencanaan standard yang ada dan biasa digunakan dalam merencanakan suatu balok seperti di atas adalah dengan menggunakan perencanaan penampang terhadap beban moment berdasarkan prinsip-prinsip *Bernoulli dan Navier*, sedangkan perencanaan penampang terhadap beban gaya geser dengan prinsip $V_c + V_s$.

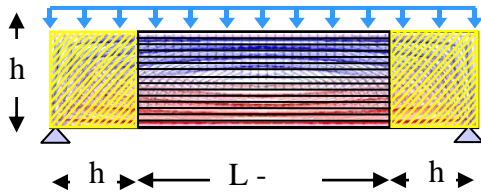


Gambar 1 Balok Sederhana dengan Beban Merata

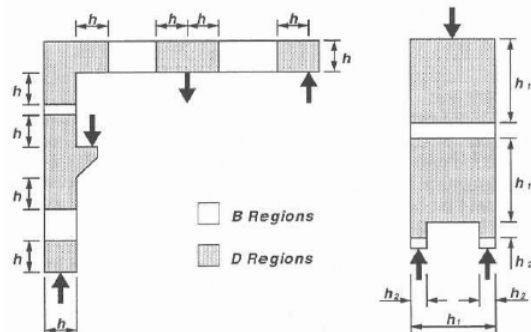
Pada analisis struktur, biasanya digunakan asumsi Bernoulli yang menyatakan bahwa penampang tetap datar selama deformasi. Dalam kenyataannya, pada daerah kerja beban terpusat, tumpuan atau di mana terdapat konsentrasi tegangan yang besar, asumsi kondisi penampang tetap

datar pada saat deformasi ini, umumnya tidak berlaku. Penampang struktur terbagi-bagi atas 2 tipe daerah, yakni daerah D dan daerah B.

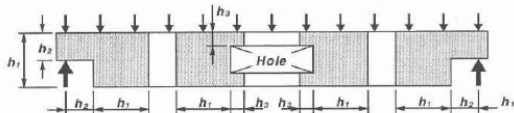
Daerah yang “tidak lagi datar”, disebut daerah D (*Disturbed* atau *Discontinuity*). Pada daerah D ini luas D dapat ditentukan dengan *St. Venant's Principle*. Perencanaannya menggunakan Model *Strut and Tie* (STM). Sedangkan daerah di mana berlaku hukum *Bernaulli*, disebut daerah B (*Bending* atau *Bernaulli*). Pada daerah B ini tegangan dapat dicari dengan menggunakan momen lentur. Perencanaannya dapat menggunakan model rangka batang atau juga *Modified Compression Field* (MCF).



Pada gambar diatas terlihat jelas bahwa untuk daerah balok bentang h dengan keringgian h merupakan daerah *Disturb* dimana terjadi distribusi tegangan yang tidak linier dan ini tidak dapat direncanakan seperti perencanaan standar yang biasa digunakan. Prinsip *St. Venant* menyatakan bahwa daerah tidak linier tersebut sejauh ketinggian balok (h) dari letak terjadinya gangguan. Sedangkan bentang sisahnya (L-2h) merupakan daerah *Bernaulli*, dimana distribusi tegangan yang terjadi linier dan dapat direncanakan sesuai cara standar yang biasa dipakai.

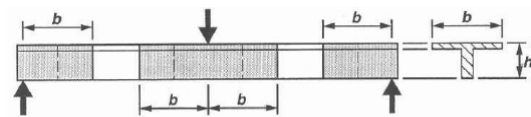


Gambar 3. Daerah B dan D



Gambar 4. Daerah B dan D pada Balok

dengan Lubang



Gambar 5. Daerah B dan D pada balok T dengan Beban Titik

2.1. Konsep Dasar Perencanaan STM

Konsep dasar yang digunakan dalam merencanakan struktur menggunakan *Strut and Tie Model* (STM) ini menggunakan idealisasi bahwa tegangan yang terjadi akan dikonsepsikan kedalam sistem truss yang ada dimana perancangan batang desak (*strut*), batang tarik (*tie*) dan titik nodal (*nodal zone*) dalam STM harus didasarkan pada prinsip kuat batas:

$$\phi F_n \geq F_u \dots \dots \dots (1)$$

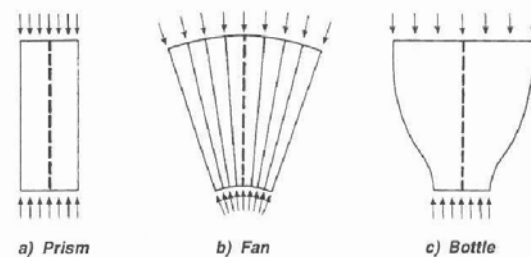
Dengan:

- F_u adalah gaya pada *strut* atau *tie*, atau gaya yang bekerja pada salah satu permukaan titik *nodal*, yang diakibatkan oleh beban-beban terfaktor.
- F_n adalah kuat nominal dari *strut*, *tie* atau titik nodal
- ϕ adalah faktor reduksi kekuatan (menurut ACI 318-2002: $\phi = 0,75$).

2.2. Perancangan Batang Desak (*Strut*)

Bentuk-bentuk batang desak (*strut*):

1. *Prismatic Strut*
2. *Fan Strut*
3. *Bottle-shaped Strut*



Three Types of Struts (Adapted from Schlaich et al 1987)

Gambar 6. Bentuk Batang Desak

Kuat desak nominal dari batang desak tanpa tulangan memanjang harus diambil diantara nilai terkecil dari pada kedua ujung *struts*:

$$Fns = fcu \cdot Ac \dots \dots \dots (2)$$

Dengan:

- Ac adalah luas penampang lintang pada salah satu ujung *strut*. fcu adalah nilai terkecil dari kuat desak efektif pada *strut* atau pada titik nodal. Kuat desak efektif pada batang desak:

$$fcu = 0,85 \cdot \beta_s \cdot fc' \dots \dots \dots (3)$$

Dengan:

- $\beta_s = 1,0$ untuk *strut* dengan luas penampang konstant (prismatik)
- $\beta_s = 0,75$ untuk *bottle-shape strut* dengan tulangan melintang terhadap sumbu memanjangnya menurut ACI 318-2002 App.A. 3.3
- $\beta_s = 0,60$ untuk *bottle-shape strut* tanpa tulangan melintang terhadap sumbu memanjangnya menurut ACI 318-2002 App.A. 3.31 adalah faktor untuk memperhatikan penggunaan beton ringan
- $\beta_s = 0,40$ untuk *strut* di dalam batang/daerah sayap tarik.
- $\beta_s = 0,60$ untuk kasus lainnya

Jika digunakan nilai $\beta_s = 0,75$ (dengan tulangan) maka harus dipasang baja tulangan melintang *strut* untuk menahan gaya tarik transversal yang terjadi akibat penyebaran (dianggap menyebar dengan perbandingan 2 memanjang : 1 melintang) gaya desak pada *strut*.

Untuk meningkatkan kekuatan *strut* dalam menahan gaya desak, dapat ditambahkan tulangan memanjang dalam *strut* tsb. Baja tulangan ini harus dijangkar dengan sempurna, dipasang sejajar dengan sumbu memanjang *strut*, terletak di dalam daerah *strut*, dan jika perlu di beri sengkang/begel di sekeliling tulangan2 ini.

Untuk kasus ini kuat desak *strut* (bertulangan) adalah:

$$Fns = fcu \cdot Ac + As' \cdot Fs' \dots \dots \dots (4)$$

Sebagai lebar batang desak (*strut*) ws yang diperlukan untuk menghitung luas penampang Ac, diambil nilai terkecil tegak lurus pada ujung2 sumbu memanjang batang desak ybs.

Pada persamaan kuat desak efektif:

$$fcu = 0,85 \cdot \beta_s \cdot fc' \dots \dots \dots (5)$$

Faktor/koeffisien 0,85 adalah untuk mempertimbangkan pengaruh beban desak jangka panjang (seperti yg digunakan pd standard untuk menghitung kuat nominal penampang).

Faktor β_s adalah faktor konversi blok tegangan empat persegi panjang, seperti yang digunakan pada hitungan lentur untuk balok atau kolom. Jadi faktor2 yang mempengaruhi kuat desak efektif adalah:

- Pengaruh beban desak jangka panjang
- Retak-retak pada batang desak (retak longitudinal atau diagonal)
- Ikatan (*confinement*) oleh volume beton di sekeliling batang desak

2.3. Perancangan Batang Tarik (*Tie*)

Kuat tarik nominal batang tarik (*tie*):

$$Fnt = Ast \cdot fy + Aps \cdot (fse + \Delta fp) \dots \dots \dots (6)$$

Dengan:

- Ast adalah luas penampang baja tulangan
- Aps adalah luas penampang baja prategang
- $(fse + \Delta fp)$ harus melampaui nilai fpy

Sumbu memanjang baja tulangan harus dipasang tepat pada sumbu memanjang batang tarik. Ujung-ujung batang tarik ini harus dijangkar:

- Dengan panjang penjangkaran yang cukup, atau dengan
- Angker mekanik khusus atau angker *post tensioning*,

2.4. Perancangan Titik Nodal

Kuat desak nominal daerah titik nodal:

$$Fnn = An \cdot fcu \dots \dots \dots (7)$$

Dengan:

- fcu adalah kuat desak efektif beton di daerah titik nodal
- An adalah luas penampang pada titik nodal, tempat gaya Fu

bekerja, diambil tegak lurus pada garis kerja F_u .

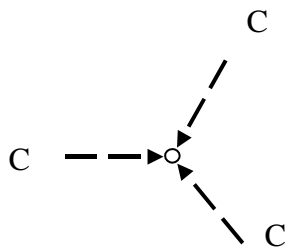
- Kuat desak efektif beton:
 $f_{cu} = 0,85 \cdot \beta_n \cdot f_c' \dots \dots (8)$

Dengan

- $\beta_n = 1,0$ untuk titik nodal yg dikelilingi
- strut dan bearing area
- $\beta_n = 0,8$ untuk titik nodal yang mempunyai satu batang tarik
- $\beta_n = 0,6$ untuk titik nodal yang mempunyai dua atau lebih batang tarik

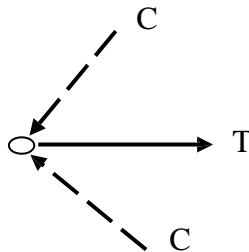
Idealisasi gaya yang terjadi pada nodal:

(1) CCC-Node:



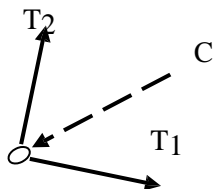
Dengan $\beta_n = 1,0$

(2) CCT-Node:



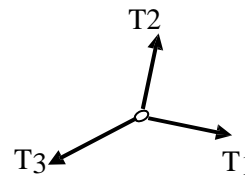
Dengan $\beta_n = 0,8$

(3) CTT-Node:



Dengan $\beta_n = 0,6$

(4) TTT-Node:



3. METODOLOGI PENELITIAN

Analisis balok dengan elemen *solid Finite Element* (analisis linear statistik):

- Tentukan arah tegangan utama
- Model STM mengikuti pola penyebaran tegangan
- Integrasikan tegangan yang bekerja pada tiap batang
- Disain penampang menurut gaya hasil integrasi tadi

3.1. Metoda Aliran Beban (*Load Path*)

Metode ini lebih sederhana jika dibandingkan dengan cara sebelumnya. Langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

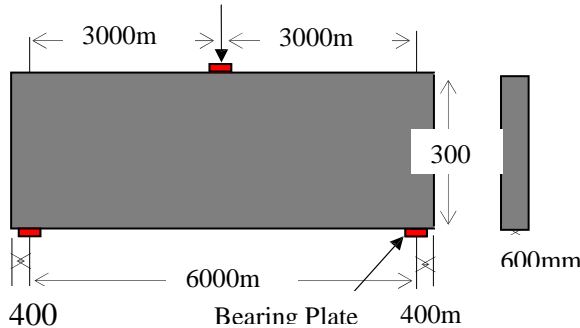
1. Cari gaya reaksi
2. Bagi beban yang bekerja pada daerah D ke dalam beberapa segmen sebagai berikut:
 - a. Gantikan tegangan dengan resultan gaya
 - b. Untuk beban tidak simetrik gunakan resultan gaya
3. Sediakan *strut* dan *tie* untuk membelokkan arah beban antara beban dan reaksi
4. Lokasi batang tarik harus memperhitungkan selimut beton dan jarak antar tulangan
5. Bila ada beberapa alternatif pola aliran beban, gunakan pola aliran beban yang paling sederhana

3.2 Model STM yang Sudah ada

Pada suatu struktur, umumnya hanya terdapat beberapa bentuk standar. Karena itu dapat dibuat analisis yang mendetail untuk menentukan model standar yang dapat diterapkan pada bentuk yang sama dengan ukuran yang berbeda. Standarisasi ini dapat memudahkan pekerjaan seorang perencana dan menghindari variasi penggunaan model oleh perencana yang berbeda.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Di sini akan dicontohkan satu uraian perhitungan pada *Deep Beam* dengan beban terpusat seperti dibawah ini:



Diketahui :

PDL = 1000 kN ; PLL = 400 kN ;
 $f_c = 40 \text{ Mpa}$; $f_y = 400 \text{ Mpa}$
 Hitung kebutuhan tulangan yang diperlukan dengan menggunakan metode STM

Jawab :

Tahapan penyelesaian:

1. Menghitung beban terfaktor
2. Menentukan dimensi *bearing plate*
3. Cek *bearing capacity* pada landasan beban dan reaksi tumpuan
4. Memilih dan menetapkan *strut-and-tie-model* (STM)
5. Menentukan daerah D, perkiraan gaya-gaya, dan dimensi batang
6. Hitungan kebutuhan baja tulangan
7. Cek persyaratan tulangan minimum
8. Gambar penulangan

Uraian tahapan penyelesaian di atas bila diuraikan akan seperti tahapan di bawah ini:

1. Menghitung beban terfaktor:
 $P_u = 1,2 \text{ PDL} + 1,6 \text{ PLL}$
 $= 1,2 \cdot 1000 + 1,6 \cdot 400 = 1840$
 Reaksi Tumpuan $R_u = P_u = 1840 \text{ kN}$
2. Menentukan dimensi *bearing plate*
 Titik nodal di bawah *bearing plate* adalah jenis CCC $\beta_n = 1,0$.
 Kuat desak efektif yang diijinkan adalah:

$$\phi f_{cu} = 0,75 \cdot (0,85 \cdot \beta_n \cdot f_c)$$

$$= 0,75 \cdot (0,85 \cdot 1,0 \cdot 40)$$

$$= 25,5$$
 MPa

Dipilih *bearing plate* ukuran 500 mm x 600 x 500 mm

Luas plat $A_c = 500 \times 600 = 300000 \text{ mm}^2$

Tegangan yg terjadi di bawah *bearing plate* :

$$f_c = 1840000 / (300000) = 6,13$$

$$\text{MPa} < \phi f_{cu}$$

Jadi dimensi *bearing plate* cukup dan dapat digunakan.

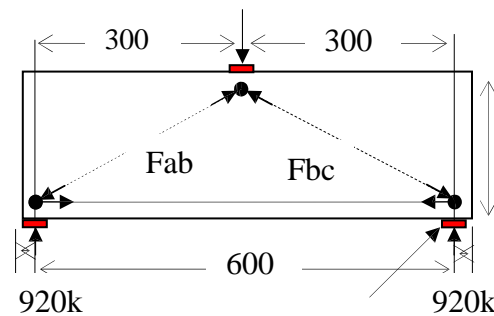
3. Cek *Bearing Capacity* pada landasan beban dan reaksi tumpuan:

$$\begin{aligned} \text{Bearing strength} &= \phi \cdot 0,85 \cdot f_c \cdot \beta_n \cdot A_c \\ &= 0,75 \cdot 0,85 \cdot 40 / 1000 \cdot 1,0 \cdot (500 \cdot 600) \\ &= 7650 \text{ kN} > P_u = 1840 \text{ kN} \text{ OK!} \end{aligned}$$

Pada tumpuan:

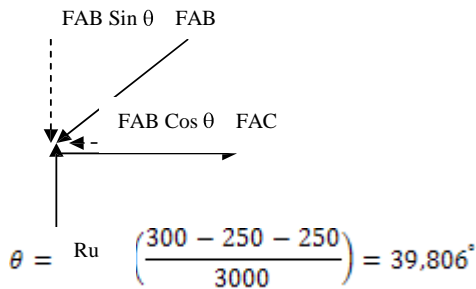
$$\begin{aligned} \text{Bearing strength} &= \phi \cdot 0,85 \cdot f_c \cdot \beta_n \cdot A_c \\ &= 0,75 \cdot 0,85 \cdot 40 / 1000 \cdot 0,8 \cdot (500 \cdot 600) \\ &= 6120 \text{ kN} > R_u = 920 \text{ kNOK!} \end{aligned}$$

4. Memilih dan menetapkan STM:



Semua *bearing plate* 500 mm x 600 mm

5. Menentukan daerah D, perkiraan gaya-gaya dan dimensi batang :
 - a. Seluruh wilayah balok tersebut adalah '*disturbed region*' (daerah D), karena simetris cukup ditinjau setengah bentang.
 - b. Posisi horizontal dari titik nodal A dan B mudah untuk ditentukan, yaitu tepat di atas pusat tumpuan dan tepat di bawah pusat beban. Sedangkan posisi vertikalnya harus diperkirakan atau dihitung. Misal diperkirakan titik-titik nodal terletak 250 mm dari tepi balok.
 - c. Mencari gaya-gaya batang : Keseimbangan di titik A



$$\Sigma V = 0$$

$$Ru - F_{AB} \sin \theta = 0$$

$$F_{AB} = \frac{Ru}{\sin \theta} = \frac{920}{\sin 39,806} = 1437,073 \text{ kN}$$

$$\Sigma H = 0$$

$$F_{AC} - F_{AB} \cos \theta = 0$$

$$F_{AC} = F_{AB} \cos \theta = 1437,073 \cos 39,806$$

$$F_{AC} = 1103,983 \text{ kN}$$

d. Kontrol batang desak :
 Tegangan desak efektif :
 $\phi f_{cu} = \phi \cdot (0,85 \cdot \beta_s \cdot f_c')$
 $= 0,75 \cdot (0,85 \cdot 0,6 \cdot 40)$
 $= 15,3 \text{ Mpa}$

e. Lebar batang desak/strut:
 $F_{u_{AB}} = 1437,037 \text{ kN}$
 $W_s = \frac{F_{u_{AB}}}{\phi \cdot f_{cu} \cdot b} = \frac{1437,073 \cdot 1000}{0,75 \cdot 15,3 \cdot 600} = 156,544 \text{ mm}$
 Dipakai $W_s = 150 \text{ mm}$

6. Menghitung kebutuhan baja tulangan:
 $\phi F_{nt} = \phi \cdot f_y \cdot A_{st} \geq F_{u_{AC}}$
 $A_{st} = \frac{F_{u_{AC}}}{\phi \cdot f_y} = \frac{1103,983 \cdot 1000}{0,75 \cdot 400} = 3679,943 \text{ mm}^2$
 Digunakan tulangan 6 D 30 = 6 x 706,9 = 4241,1 mm²

Kapasitas batang tarik AC
 $\phi F_{nt_{AC}} = \phi \cdot f_y \cdot A_{st} = 0,75 \cdot 400 / 1000 \cdot 4241,4$
 $= 1272,42 \text{ kN} > F_u = 1103,983 \text{ kN}$

Batang tarik harus dijangkarkan cukup kuat di titik nodal A

$$\phi F_{nm_{AC}} = \phi \cdot f_{cu} \cdot A_c = \phi \cdot (0,85 \cdot \beta_n \cdot f_c') \cdot (b \cdot W_t) \geq F_{u_{AC}}$$

$$W_t = \frac{F_u}{\phi \cdot 0,85 \cdot \beta_n \cdot f_c' \cdot b} = \frac{1103,983 \cdot 1000}{0,75 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 40 \cdot 600}$$

$$W_t = 90,195 \text{ mm}$$

Dipakai $W_t = 100 \text{ mm}$, dimana pusat berat tulangan berada pada $W_t/2 = 50 \text{ mm}$ dari sisi bawah

7. Tulangan minimum dan tulangan untuk *bottle shaped strut* :

Pada arah horizontal dan vertikal dipasang tulangan diameter 14 mm jarak 200 mm pada masing-masing permukaan.

$$\rho_v = \rho_h = 2 \cdot 153 / (600 \cdot 200) =$$

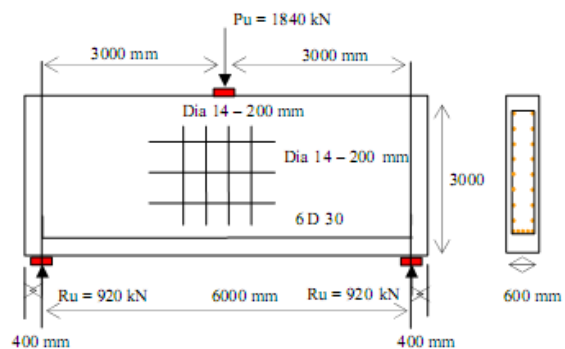
$$0,0026$$

$$\Sigma \rho \sin = 0,0026 \sin 39,806 + 0,0026 \sin$$

$$50,194$$

$$0,0037 \geq 0,003 \dots \text{Ok}$$

8. Gambar Penulangan



5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan dalam *paper* ini, maka dapat diambil beberapa kesimpulan antara lain:

- Analisis yang didasarkan pada model *Strut and Tie* merupakan metode yang rasional dan akan memberikan penulangan yang efisien
- Untuk mendapatkan perancangan penulangan pada daerah *Disturb* perlu dibuat pemodelan yang bervariasi untuk mendapatkan penulangan yang paling efisien, ataupun menggunakan bentuk-bentuk standar yang telah ada.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ACI 318 – 2002 , “*Building Code Requirements for Structural Concrete*”, , ACI, Farmington Hills Mi., 2002
- [2] Hardjasaputra, H. dan Tumilar, S., “*Model Penunjang dan Pengikat Pada Perancangan Struktur Beton*”, Univ. Pelita Harapan Press, 2002
- [3] Sulistyono.D., “*Strut-And-Tie Model Pada Perancangan Struktur Beton*”, Bahan Kuliah Topik Spesial, Struktur, Pasca Sarjana, Gadjah Mada, 2004
- [4] Konstruksi, No. 297- Februari-Maret 2001, “MegaKonstruksi.com”, updated 20 April 2001
- [5] Tjen Tjhin, “*Strut-and-TieResource Web Site*”, University of Illinois at Urbana-Champaign Last update:30, May 2002
- [6] C. C. Fu, “The Strut-And-Tie Model of Concrete Structures”, Presented to The Maryland State Highway Administration , The BEST Center University of Maryland, August 21, 2001.