**ANALISIS ALTERNATIF DALAM MERANCANG BALOK TINGGI MENGGUNAKAN STRUT AND TIE MODEL**

**Nisa Luthfiana1), Sri Tudjono2), Yulita Arni Priastiwi3)**

*Departemen Teknik Sipil, Universitas Diponegoro, Semarang*

*nisaluthfiana0@gmail.com**,* *sritudjono@lecturer.undip.ac.id**, yulitaarnipriastiwi@lecturer.undip.ac.id*

**Abstrak**

Perencanaan struktur beton biasanya dilakukan dengan berdasarkan asumsi dari Bernoulli dan Navier untuk menganalisis penampang akibat momen lentur. Distribusi regangan dianggap linier dan ini dianggap masih berlaku meskipun penampang telah retak. Balok tinggi merupakan salah satu contoh kasus pada suatu elemen struktur yang dapat mengakibatkan terjadinya distribusi tegangan non linier, sehingga asumsi diatas tidak berlaku. Balok dikatakan balok tinggi apabila rasio bentang terhadap tingginya lebih kecil dari lima. Salah satu alternatif pendekatan untuk mengatasi elemen struktur seperti balok tinggi adalah menggunakan pendekatan *Strut and Tie Model*, yaitu dengan membagi struktur dalam daerah B (Bernoulli) dan D (*Disturb*) dan menggambarkan alur gaya (*load path*) sebagai transfer gaya yang terjadi pada struktur beton bertulang pada kondisi retak akibat pembebanannya. Parameter – parameter dari *Strut and Tie Model* yaitu batang tekan (*strut*), batang tarik (*tie*) dan titik nodal (*nodal zone*) sebagai daerah pertemuan. Tujuan dari tulisan ini adalah untuk menganalisis alternatif perencanaan/desain tulangan struktur balok tinggi beton bertulang diatas dua tumpuan sederhana akibat beban merata yang dikonversi menggunakan beban terpusat 2 titik pembebanan. Metode yang digunakan adalah *Strut and Tie Model* yang akanmenghasilkan luas tulangan longitudinal yang lebih kecil dengan selisih 25%, dimana dengan luas tulangan yang lebih kecil dari segi kekuatan masih memenuhi syarat. Hal ini menunjukkan bahwa perhitungan perencanaan balok tinggi tanpa bearing plate dengan menggunakan *metode Strut and Tie Model* pun dapat lebih optimum/efisien.

Kata kunci: *Prinsip Bernoulli, Strut and Tie Model, D – Region, B – Region*

**Abstract**

Concrete structure planning is usually carried out based on the assumptions of Bernoulli and Navier to analyze the section due to bending moments. The strain distribution is considered linear and it is considered still valid even after the section has cracked. The deep beam is one example of a structural element that can result in a non–linear stress distribution, so the above assumption does not apply. A beam is said to be a deep beam if the span to height ratio is less than five. One alternative approach to dealing with structural elements such as deep beams is to use the Strut and Tie Model approach, namely by dividing the structure into areas B (Bernoulli) and D (Disturb) and describing the load path as a force transfer that occurs in the concrete structure. Reinforced in cracked conditions due to loading. The parameters of the Strut and Tie Model are the strut, tie, and nodal zone as the meeting area. The purpose of this paper is to analyze the alternative planning/design of reinforced concrete beams structure on two simple supports due to evenly distributed loads that are converted using the two-point load centered load. The method used is the Strut and Tie Model which will produce a smaller area of longitudinal reinforcement with a difference of 25%, where the area of reinforcement is smaller in terms of strength still meets the requirements. This shows that the calculation of deep beam planning without bearing plate using the strut and tie model method can be more optimal/efficient.

Keywords: *Bernoulli’s Principle, Strut and Tie Model, D - Region, B - Region*

1. **Latar Belakang**

Secara umum, prosedur perancangan suatu struktur bangunan harus menjamin bahwa di bawah kondisi pembebanan terburuk struktur harus tetap aman, dan selama kondisi kerja normal deformasi dari bagian – bagian struktur tidak mengurangi bentuk, keawetan dan penampilan dari struktur. Walaupun sulit untuk menaksir akibat pembebanan yang tetap dengan kekuatan beton dan baja yang bervariasi, ketentuan diatas harus tetap dipenuhi.

Perancangan struktur beton menurut standar yang berlaku adalah menggunakan perencanaan penampang terhadap beban momen berdasarkan prinsip Bernoulli dan Navier. Distribusi regangan dianggap linier dan ini dianggap masih berlaku meskipun penampang telah retak. Banyaknya kasus untuk elemen struktur yang memiliki bentuk cukup rumit akan menimbulkan suatu permasalahan dalam perancangan. Hal ini terjadi pada elemen – elemen struktur seperti balok tinggi, corbel, dan sebagainya yang dapat mengakibatkan terjadinya distribusi regangan – non linier sehingga tidak dapat lagi direncanakan dengan cara standar. Perencanaan yang dilakukan kadangkala hanyalah bersifat pendekatan dengan peraturan – peraturan standar yang ada walaupun kadang terjadi perbedaan yang signifikan. Salah satu alternatif pendekatan untuk mengatasinya adalah menggunakan pendekatan *Strut and Tie Model.*

Pengembangan dalam perancangan struktur beton bertulang dengan *Strut and Tie Model*, yaitu dengan membagi struktur dalam daerah D dan B serta menggambarkan alur gaya (*load path*) sebagai transfer gaya yang terjadi pada struktur beton bertulang, pada kondisi retak dari sumber pembebanannya sampai tumpuan. Daerah B adalah suatu daerah dimana hipotesa Bernoulli berlaku, yaitu dimana penampang dianggap rata dan tegak lurus garis netral sebelum dan sesudah lentur. Daerah D adalah bagian dari struktur dimana terdapat/terjadi beban merata, seperti bukaan, perubahan penampang dan lain – lain yang menyebabkan kondisi kompleks dari keadaan regangan disekitarnya. *Strut and Tie Model* dianggap sebagai metode perancangan struktur beton yang transparan dan rasional, merubah pola pemikiran untuk merancang daerah D pada struktur beton. Poin terakhir ini adalah perbedaan yang paling penting karena kebanyakan masalah yang terjadi pada struktur beton justru terjadi pada daerah D, disebabkan kurang diperhatikannya detail dan kurangnya ketentuan yang mengaturnya. Pada Gambar 1 ditunjukkan pembagian daerah D dan B pada balok akibat beban merata.



Gambar 1. Pembagian Daerah D dan B pada Balok

 Struktur seperti balok tinggi (*deep beam*) mengandung daerah D. ACI *code* menjelaskan bahwa suatu balok dinyatakan sebagai balok tinggi dalam perancangan lentur bila rasio bentang bersih balok dibandingkan dengan tinggi balok $l\_{n}$/d ≤ 1,25 untuk diatas dua tumpuan dan $l\_{n}$/d ≤ 2,5 untuk balok di atas beberapa tumpuan. Selanjutnya balok juga dinyatakan sebagai balok tinggi dalam perancangan geser bila $l\_{n}$/d ≤ 5,0 dan balok tersebut dibebani dari permukaan atas serta ditumpu pada sisi bawah balok. MacGregor (2002) mendefinisikan suatu balok dinyatakan sebagai balok tinggi bila sebagian besar beban yang dipikul dapat diteruskan atau dihubungkan langsung ke tumpuan – tumpuannya melalui batang tekan (*compression test*). Gambar 2 menunjukkan contoh suatu balok tinggi diatas 2 perletakan.



Gambar 2. Balok Tinggi Beban Merata di atas dua perletakan

Tujuan pada tulisan kali ini yaitu untuk menganalisis alternatif dari perencanaan/desain balok tinggi dengan menggunakan *Strut and Tie Model* dengan menggunakan beban merata yang dikonversi menjadi beban 2 titik terpusat. Sedangkan manfaat dari penelitian ini adalah untuk memperoleh kebutuhan tulangan pada balok tinggi dengan metode *Strut and Tie Model.*

1. **Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan menganalisis secara manual desain balok tinggi dengan metode *Strut and Tie Model* untuk menentukan kebutuhan tulangan yang diperlukan.

**Perencanaan Balok Tinggi**

Perencanaan balok tinggi dapat dilihat pada contoh perhitungan berikut :

Diketahui data sebagai berikut :

Panjang balok (L) = 6000 mm

Selimut beton (s) = 50 mm

Bentang rangka balok ($l\_{n}$) = L – 2 x s = 6000 – 2 x 50 = 5900 mm

Tinggi balok (H) = 800 mm

Dengan peraturan **ACI 318 – 2014**

Maka lebar balok ($b\_{w}$) minimum = 236,65 mm

Diambil Lebar balok ($b\_{w}$) = 300 mm

$f'\_{c}$ = 40 MPa

$f\_{y1}$ = 400 MPa

$f\_{ys}$ = 340 MPa

Beban merata (Q) = 120 kN/m, beban dikonversi ke beban terpusat

Beban terpusat (2P) = 480 kN

D tulangan tarik = 16 mm

Ø tul. geser horizontal = 10 mm

Øtul. geser vertikal = 10 mm

Dari data – data yang ada, beban yang dikonversi menjadi beban terpusat dimaksudkan untuk memudahkan dalam melakukan perhitungan. Menurut persamaan Uhlman (1952) serta mengacu ke penelitian Partogi (2017) mengenai perancangan balok tinggi bahwa beban merata yang digunakan juga dikonversi menjadi 2 titik pembebanan.

Pada suatu struktur, umumnya hanya terdapat beberapa bentuk standar, karena itu dapat dibuat analisis yang lebih mendasar dan mendetail untuk menentukan model standar yang dapat diterapkan pada bentuk yang sama dengan ukuran yang berbeda. Standarisasi ini dapat memudahkan pekerjaan seseorang perencana dan menghindari variasi penggunaan model oleh perencana yang berbeda. Model elemen dan jenis pembebanan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :



Gambar 3. Sketsa detail Elemen Balok Tinggi yang memperlihatkan jenis perletakan

Langkah – langkah dalam melakukan perhitungan pemodelan balok tinggi dengan *strut and tie model* adalah sebagai berikut :

1. Mencari gaya reaksi
2. Menghitung batang *strut and tie* untuk membelokkan arah beban antara beban dan reaksi
3. Mencari besaran untuk nilai tegangan pada nodal
4. Pengecekan kapasitas *batang strut and tie,* lokasi batang tarik harus memperhitungkan selimut beton dan jarak antar tulangan
5. Menghitung penulangan yang dibutuhkan dilanjutkan dengan pengecekan penulangan dengan syarat minimum yang memenuhi.
6. Penggambaran balok tinggi dengan kebutuhan tulangannya.
7. **Hasil dan Pembahasan**
8. *Bangun Geometri rangka dan gaya – gaya yang bekerja padanya (lihat gambar 4)*



Gambar 4. Sketsa Rangka Batang untuk Balok Tinggi

Dengan asumsi tinggi nodal A = 50 mm dan tinggi nodal C = 50 mm, maka dicari tinggi rangka yang terbentuk (dv). Bisa dilihat pada gambar dibawah ini untuk posisi asumsi nodalnya :



Gambar 5. Sketsa Asumsi Posisi Nodal

dv = H - $\frac{(t. nodal A+t. nodal C)}{2}$ = 800 - $\frac{(50+50)}{2}$ = 750 mm

Untuk mencari nilai sudut yang dibentuk *truss*, dicari jarak antara batang AF dan BE ($d\_{v(s)}$) sebagai berikut :

($d\_{v(s)}$) = $\frac{2}{3}$ x $d\_{v}$

 = $\frac{2}{3}$ x 750

 = 500 mm

Mencari besar sudut antara batang strut AB dan tie AF :

arch tan $θ$ = $\frac{(d\_{v(s)})}{a}$ = $\frac{500}{470}$

 = arch tan (1.0638) = 46,771o

Setelah didapat nilai sudut dan tinggi $d\_{v}$, maka dapat dihitung jarak antara beban dan tumpuan terdekat (a) : 470 mm

Berdasarkan analisa rangka batang dari hasil perhitungan didapat :

$\sum\_{}^{}\left(f\_{y}\right)$ = P - $f\_{AB}$ (sin $θ$)

$F\_{AB}$ = $\frac{P}{(\sin(θ))}$ = $\frac{240}{(\sin(46,771))}$ = 329,386 kN

$\sum\_{}^{}(fx)$ = $f\_{AF}$ - $f\_{AB}$ ($cos θ$)

$F\_{AF}$ = $f\_{AB}$ (cos $θ$)

= 137,244 (cos 46,771)

= 225,600 kN

Gaya batang yang ada, digunakan untuk menghitung tinggi nodal 1 dan nodal 2 sebenarnya. Dalam proses ini dilakukan proses iterasi sampai pada keadaan dimana nilai sudut $θ$ tidak lagi berubah secara signifikan. Dari konsep diatas, maka setelah dilakukan iterasi, didapat nilai tetap gaya – gaya batang sebagai berikut :

Gaya Tekan :

Batang BC dan DE = 240,000 kN

Batang AB dan EF = 329,386 kN

Batang BE = 225,600 kN

Batang CD = 0

Gaya Tarik :

Batang tarik AF = 225,600 kN

Sudut iterasi ($θ$) = 46,771o

1. *Periksa daerah nodal dan kekuatan batang Strut*

Untuk mencari kuat efektif ($f\_{cu}$) pada daerah nodal digunakan persamaan umum :

1. Cek nodal A

$f\_{cu}$ = 0,85 x $β\_{n}$ x $f'\_{c}$

$β\_{n}$ = 0,8 (nodal jenis CCT)

$=$ 0,85 x $β\_{n}$ x $f'\_{c}$

$=$ 0,85 x 0,8 x 40 = 27,2 MPa

1. Menghitung lebar daerah batang tarik ($W\_{16}$)

$W\_{16}$ = $\frac{F\_{AF}}{Φ x b\_{w} x F\_{cu}}$ ≤ 0,2 H

= $\frac{225,600 x 1000}{0,75 x 300 x 27,2}$ ≤ 160 mm

= 36,862 mm ≤ 160 mm

Karena nilai $w\_{16}$ tidak boleh kurang dari 160 mm dan nilai $w\_{16}$ dinilai terlalu kecil untuk jarak dimana tulangan tarik ditempatkan, maka dipilih nilai $w\_{16}$ $≈$ 50 mm

1. Mencari panjang pelat landasan pada tumpuan (lb)

$lb\_{1}$ $≈$ $w\_{16}$ $≈$ 50 mm

1. Mencari besar nilai tegangan yang terjadi pada dasar nodal ($f\_{basic}$)

$f\_{basic}$ = $\frac{R\_{x}}{b\_{w} x lb}$ = $\frac{240}{300 x 50 }$ = 0,016 kN/mm2 = 16 MPa

$φ$ $f\_{cu}$ = 0,75 x 27,20 = 20,40 MPa

$φ$ $f\_{cu}$ > f (base)

20,40 MPa > 16,00 MPa **(OK)**

1. Mengecek kekuatan batang *strut* AB dan EF

$F\_{cu(strut)}$ = 0,85 x $β\_{s}$ x $f'\_{c}$ , dimana :

$β\_{s}$ = 0,75

$F\_{cu (strut)}$ = 0,85 x 0,75 x 40 = 25,50 MPa

1. Mencari lebar strut pada nodal 1 ($w\_{s}$)

$w\_{s1}$ = ($W\_{16}$) (cos$ θ$) + ($1b\_{1}$) (sin $θ$)

= (50,00) (cos 46,771o) + (50,00) (sin 46,771o)

= 70,677 mm

$φ F\_{ns}$ = $φ$ x $f\_{cu}$ x $w\_{s(1)}$ x $b\_{w}$

= 0,75 x 25,50 x 70,677 x 300

= 405509,287 N = 405,509 kN

$φ F\_{ns}$ > $F\_{u (strut)}$

405,509 > 329,386 **(OK)**

1. Cek nodal B

$β\_{n}$ = 1 (nodal jenis CCC)

$ F\_{cu2}$ = 0,85 x $β\_{n}$ x $f'\_{c}$

 = 0,85 x 1 x 40 = 34 MPa

1. Mencari jarak nodal B ($W\_{12}$)

$W\_{12}$ = $\frac{F\_{AF}}{Φ x b\_{w} x f\_{cu(2)}}$ = $\frac{225,600 x 1000}{0,75 x 300 x 34}$ = $W\_{12}$ = 29,49 mm

Sehingga jarak nodal 2 ($W\_{12}$) dipilih 29,49 mm

1. Mencari nilai pelat landasan pada beban

$lb\_{2}$ = $\frac{2}{3}$ x $w\_{s}$ = $\frac{2}{3}$ x 70,677 = 47,12 mm

Maka nilai $lb\_{2}$ dipilih 47,12 mm

1. Mencari besar nilai tegangan yang terjadi pada nodal 2 ($f\_{(middle)}$)

$f\_{middle}$ = $\frac{F\_{BC}}{b\_{w} x lb\_{2}}$ = $\frac{2400}{300 x 47,12}$ = 0,0169 kN/mm2 = 16,98 MPa

$φ f\_{cu (2)}$ = 0,75 x 34 = 25,5 MPa

$φ f\_{cu (2)}$ > $f\_{middle}$

25,5 MPa > 16,98 MPa **(OK)**

1. Mencari nilai gaya horizontal tegak lurus $w\_{12}$

$P\_{h}$ = $f\_{AB}$ x cos $θ$

 = 329,386 x 0,6849 = 225,60 kN

1. Cek tegangan pada bidang vertikal dan bagian kiri nodal 2 ($f\_{(vert, face)}$)

($f\_{(vert, face)}$) = $\frac{P\_{h}}{w\_{12} x b\_{w}}$ < $F\_{cu2}$

 = $\frac{225,60}{29,49 x 300}$ < 34,00

 = 25,50 MPa < 34 MPa **(OK)**

1. Menentukan lebar *strut* pada nodal 2

$w\_{s (middle)}$ = ($w\_{12}$) (cos $θ$) + ($lb\_{2}$) (sin $θ$)

 = (24,49) (cos 46,771) + (47,12) (sin 46,771)

 = 54,53 mm

$φ$ $F\_{ns}$ = $φ$ x $f\_{cu}$ x $w\_{s (middle)}$ x $b\_{w}$

 = 0,75 x 34 x 54,53 x 300

 = 417154,50 N = 417,154 kN

$φ$ $F\_{ns}$ > $F\_{u(strut)}$

417,154 > 329,39 **(OK)**

1. Cek nodal C

$β\_{n}$ = 1 (nodal jenis CCC), $F\_{cu3}$ = 0,85 x $β\_{n}$ x $f'\_{c}$

 = 0,85 x 1 x 40 = 34 MPa

$lb\_{(3)}$ = $lb\_{(2)}$ = 7,12 mm

1. Mencari besar nilai tegangan yang terjadi pada dasar nodal ($f\_{(top)})$

$f\_{(top)}$ = $\frac{P}{b\_{w} x lb\_{2}}$ = $\frac{240 x 1000}{300 x 47,12}$ = 16,978 MPa

$φ$ $f\_{cu3}$ = 0,75 x 34 = 25,5 MPa

$φ$ $f\_{cu3}$ > $f\_{(top)}$

25,5 MPa > 16,978 MPa **(OK)**

1. Mengecek kekuatan batang *strut* BC dan CD

$F\_{cu (strut)}$ = 0,85 x $β\_{n}$ x $f'\_{c}$ ($β\_{s}$ = 0,75)

$F\_{cu (strut)}$ = 0,85 x $0,75$ x $40 $= 25,5 MPa

$φ$ $F\_{ns}$ =$ φ$ x $F\_{cu (strut)}$ x $lb\_{3}$ x $b\_{w}$

 = 0,75 x 25,5 x 47,12 x 300

 = 270351 N = 270,351 kN

$φ$ $F\_{ns}$ > $F\_{cu (strut)}$

270,351 kN > 240 kN **(OK)**

1. Pengecekan kembali sudut dan gaya batang yang bekerja

Setelah dilakukan pengecekan daerah nodal dan strut, didapat ketinggian nodal 1 (lebar *tie*) maka, nilai $d\_{v}$ adalah sebagai berikut :

$d\_{v}$ = H - $\frac{(t. nodal A+t. nodal C)}{2}$

= 800 - $\frac{(50+50)}{2}$

= 750 mm

Untuk mencari nilai sudut yang dibentuk *truss*, dicari jarak antara batang AF dan BE ($d\_{v(s)}$) sebagai berikut :

($d\_{v(s)}$) = $\frac{2}{3}$ x $d\_{v}$

= $\frac{2}{3}$ x 750 = 500 mm

Jarak antara beban dan tumpuan terdekat

1. = 470 mm

Mencari besar sudut antara batang *strut* AB dan *tie* AF :

$θ$ = $\frac{(dv\_{\left(s\right)})}{a}$ = arctan $\left(\frac{500}{470}\right)$ = arctan (1,0638) = 46,771o

Berdasarkan analisa rangka batang dari hasil perhitungan didapat :

Gaya Tekan :

Batang BC dan DE = 240,00 kN

Batang AB dan EF = 329,386 kN

Batang CD = 0

Batang BE = 225,60 kN

Gaya Tarik :

Batang tarik AF = 94,00 kN

Sudut iterasi ($θ$) = 46,771o

Dengan demikian gaya – gaya batang dan sudut rangka ($θ$) ini sudah tidak mengalami perubahan secara signifikan dengan gaya batang asumsi sebelumnya. Iterasi tidak perlu lagi dilakukan.

1. *Periksa gaya geser maksimum yang diizinkan balok tinggi*

Menurut **ACI 318 – 2014** Bagian 11.8.3 menentukan batas gaya geser yang diizinkan pada balok tinggi yaitu sebagai berikut :

d = h - $\frac{w\_{16}}{2}$ = 800 - $\frac{50}{2}$ = 775 mm

$l\_{n}$ = 5900 mm

Rumus yang dipakai untuk menentukan gaya geser yang diizinkan :

$V\_{u}$ < Ø $\left|\frac{2}{3} \left(10+ \frac{l\_{n}}{d}\right) \sqrt{f'\_{c} b\_{w} d}\right|$

240,000 N < 0,85 $\left|\frac{2}{3} \left(10+ \frac{5900}{775}\right) \sqrt{40 x 300 x 775}\right|$

240,000 N < 17714130,52 N **(OK)**

1. Pilih penulangan untuk batang *tie* A – F

$A\_{s perlu}$ = $\frac{F\_{AF}}{Φ x f\_{y}}$ = $\frac{225,6 x 1000}{0,75 x 400}$ = 752 mm2

Berdasarkan **ACI 318 – 2014 11.9.5**, penulangan minimum $A\_{s perlu}$ pada daerah tarik tidak kurang dari :

0,04 $\left(\frac{f'\_{c}}{f\_{y}}\right)$ $b\_{w}$ d = 0,04 $\left(\frac{40}{400}\right)$ x 300 x 775

 = 930 mm2

Maka dipilih $A\_{s perlu}$ = 930 mm2

Jumlah tulangan = $\left(\frac{A\_{s perlu} }{\frac{1}{4} π D^{2}}\right)$ = $\left(\frac{930 }{\frac{1}{4} x 3,14 x 16^{2}}\right)$ = 4,63 $≈$ 5 tulangan

Sehingga luas tulangan $A\_{s}$ terpasang menjadi

= 5 x 201,06 = 1005,3 mm2

Maka, dipakai tulangan longitudinal 5D16

Cek batang tarik :

$T\_{u}$ = $Φ$ x $A\_{s}$ x $f\_{y}$

 = 0,8 x 1005,3 x 400

 = 321696 N = 321,696 kN

$T\_{u}$ > $F\_{16} $

321,696 kN > 225,60 kN **(OK)**

1. *Menghitung jarak bidang runtuh atau critical section (*$l\_{a}$*) dari perletakan untuk menentukan panjang pengangkuran (*$l\_{dh}$*)*
2. Mengecek jarak *critical section*

$l\_{a}$ = $\left(\frac{w\_{16}}{2}\right)$/$\left(\tan(θ)\right)$

 = $\left(50,00\right)$/$\left(\tan(46,771)\right)$

 = 23,5 mm

1. Mengecek panjang penyaluran (rumus berdasarkan SNI beton 2847 : 2019)

$L\_{dh}$ = $\frac{f\_{y }x d\_{b}}{5,4 x \sqrt{f'\_{c}}}$ > 8 $d\_{b}$

 = $\frac{400 x 16}{5,4 x \sqrt{40}}$ > 128 mm

$L\_{dh}$ = 187,394 > 128 mm **(OK)**

1. *Beri penulangan minimum pada strut A – B*
2. Menghitung besar sudut vertikal dengan aksis pada strut 1 – 2

$γ\_{(tulangan vertikal)}$ = 46,77o

Spasi maksimum ($SV\_{max}$) = $\frac{d}{5}$ atau 300 mm (diambil yang terkecil)

 = 155 mm

Sehingga spasi maksimum untuk tulangan vertikal adalah 155 mm

Maka, dipakai tulangan vertikal Ø 10 – 155 mm

$ρ\_{v}$ = $\frac{4 π r^{2}}{s\_{v} b\_{w}}$ > 0,0025

 = $\frac{4 x 3,14 x 25^{2}}{155 x 300}$ > 0,0025

 = 0,1688 > 0,0025 **(OK)**

$ρ\_{v}$ sin $γ$ = 0,1688 sin 46,771o = 0,1229

1. Menghitung besar sudut aksis pada strut 1 – 2 dan penulangan horisontal

$γ\_{(tulangan vertikal)}$ =90,00o - 46,77o = 42,23o

Spasi maksimum ($Sh\_{max}$) = $\frac{d}{5}$ atau 300 mm (diambil yang terkecil) = 130 mm (agar persamaan $ρ\_{h}$ memenuhi)

$ρ\_{h}$ = $\frac{2πr^{2}}{s\_{h }b\_{w}}$ > 0,0015

 = $\frac{2 x 3,14 x 25^{2}}{130 x 300}$ > 0,0015

 = 0,1006 > 0,0015 **(OK)**

$ρ\_{h}$ sin $γ$ = 0,1006 sin 42,23o = 0,0676

Jumlah tulangan (n) = $\left(\frac{H-2s-2D sengkang vertikal}{sh\_{max}}\right)$ x jumlah kaki

 = $\left(\frac{800-2 x 50-2 x 10 }{130}\right)$ x 2

 = 10 buah

Total $A\_{s}$ perlu = n x $A\_{s}$ 1 tulangan

 = (10) x $\left(\frac{π x 10^{2}}{4}\right)$ = 768,40 mm2

Maka dipakai tulangan horizontal 10Ø10

1. *Cek persyaratan* ***ACI 318 – 2014***

Dengan rumus umum yang ditentukan oleh **ACI 318 – 2014**, ditentukan sebagai berikut :

$\sum\_{}^{}\left(ρi\right)(sin γ)$ > 0,003

$\sum\_{}^{}\left(ρi\right)(sin γ)$ = (0,001379 + 0,00246) > 0,003

 = 0,0038 > 0,003 **(OK)**

Detail balok tinggi yang telah didesain di sketsa dalam gambar berikut :



Gambar 6. Detail Penulangan Balok Tinggi

Berdasarkan hasil dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa semakin besar nilai rasio bentang balok tinggi (L/H), maka semakin besar pula luasan tulangan yang diperlukan baik tulangan longitudinal, tulangan vertikal, maupun tulangan horizontal. Luas tulangan yang dibutuhkan oleh tulangan vertikal yang lebih besar daripada tulangan longitudinal menandakan bahwa pada balok tinggi, keruntuhan yang terjadi dominan diakibatkan oleh gaya geser. Dari gambar penulangan dapat dilihat bahwa tulangan horizontal yang dibutuhkan adalah $10∅10$, untuk tulangan longitudinal 7D16 mm serta untuk tulangan vertikalnya menggunakan $4∅10$ – 155 cm. Dengan menggunakan metode strut and tie model, maka diperoleh hasil tegangan sebesar 16,978 MPa pada dasar nodal. Sedangkan pada penelitian sebelumnya yaitu Yuzuar Afrizal (2011) yang merencanakan balok tinggi dengan menggunakan alternatif bearing plate, untuk tegangan yang terjadi di bawah bearing plate yaitu 6,13 MPa.

1. **Kesimpulan dan Saran**

Dari hasil penelitian diatas dapat disimpulkan bahwa berdasarkan rangka batang yang terbentuk, sudut arah tegangan antara batang *strut and tie* yang besarnya dipengaruhi oleh nilai rasio L/H. Nilai rasio L/H mempengaruhi besar luas tulangan, baik itu tulangan longitudinal, tulangan vertikal, maupun tulangan horizontal. Luas tulangan yang dibutuhkan oleh tulangan vertikal yang lebih besar daripada tulangan longitudinal menandakan bahwa pada balok tinggi, keruntuhan yang terjadi dominan diakibatkan oleh gaya geser. Analisis yang didasarkan pada model strut and tie merupakan motode yang paling rasional dan akan memberikan penulangan yang efisien.

**Daftar Kepustakaan**

Abousaidi, L.2009. Investigating Strut and Tie Model in Deep Beams. Canada: Ryerson University.

ACI Committee 318, 2014. Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI-318 - 2014) and Commentary (ACI 318 - 2014). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute

Hardjasaputra, H., dan Tumilar, S. 2002. Model Penunjang dan Pengikat (*Strut and Tie Model*) pada Perancangan Struktur Beton, Jakarta: Universitas Pelita Harapan.

James, K. W., Gustavo, J.P. 2003. Strut and Tie Model for Deep Beam Design. ACI Building Code. USA : University of Michigan.

MacGregor, J.G. 2002. Part 2 : Derivation of strut and tie models for 2002 *ACI Code*, p.7 – 40, in: SP 208 – Examples for the Design of Structural Concrete with Strut and Tie Models: KH Reineck (Ed)., American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan

G. Nawy, Edward. Beton Bertulang-Suatu Pendekatan Dasar. PT. Rafika Aditama; Bandung, November 2008

Partogi, H, 2017. Perancangan Balok Tinggi Beton Bertulang yang Memikul Beban Merata dengan menggunakan SAP 2000. Kupang: Universitas Nusa Cendana

SNI. 2847 : 2019. Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung, Jakarta : Penerbit BSN

Yosafat, AP., Bambang, S. 2010. Pemodelan Numerik Perilaku Keruntuhan Balok Tinggi Beton Bertulang

Yuzuar, A, 2011. *Strut and Tie Model* sebagai alternatif perancangan struktur beton bertulang. Bengkulu: Universitas Bengkulu