

PEMODELAN ZONA ANGKUR GANDA DENGAN METODE ELEMEN HINGGA DAN *STRUT AND TIE MODEL*

Silvia Stefany¹ dan F.X. Supartono²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl.Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: silvia_stefany@yahoo.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl.Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: fxsupartono@gmail.com

ABSTRAK

Teknologi prategang sekarang ini sudah banyak diterapkan pada ruang lingkup teknik sipil seperti jembatan, struktur gedung, dan lain sebagainya. Faktor kunci utama dalam pembangunan struktur beton prategang terletak pada zona angkur nya. Zona angkur merupakan zona pada beton yang terjadi distribusi tegangan dari kabel prategang ke beton dimana pada zona ini gaya terpusat akibat prategang ditransfer melalui angkur ke beton lalu menyebar untuk mencapai lebih banyak distribusi tegangan linier diatas penampang dari balok pada suatu jarak dari angkur. Tegangan yang terjadi pada zona angkur dianalisis dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga dimana bagian-bagian struktur zona angkur dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil, sehingga didapatkan analisis yang lebih akurat. Hasil dari analisis ini menunjukkan bahwa zona angkur pada daerah tekan menimbulkan tegangan tarik pada arah lateral sehingga tegangan tarik yang terjadi perlu diatasi dengan *bursting steel*. *Bursting steel* ini kemudian didesain dengan menggunakan pendekatan metode *strut and tie*. *Strut and tie model* adalah suatu pendekatan yang digunakan untuk mendesain *discontinuity regions (D-regions)* pada struktur beton bertulang atau prategang. Dengan metode ini aliran tegangan yang terjadi dapat digambarkan seperti rangka batang dengan mengasumsikan retakan sebagai tekan dan tulangan sebagai tarik. Pada daerah tepi balok juga terdapat tegangan tarik *spalling* yang perlu diatasi dengan tulangan *spalling*.

Kata kunci: zona angkur, metode elemen hingga, *bursting steel*, *strut and tie*, *spalling*

1. PENDAHULUAN

Semakin meningkatnya kebutuhan pembangunan infrastruktur, maka semakin banyak pula inovasi yang diciptakan untuk mendapatkan hasil yang lebih baik dan efisien. Salah satu dari inovasi tersebut adalah teknologi prategang. Faktor kunci utama dalam pembangunan struktur beton prategang terletak pada zona angkur nya. Zona angkur merupakan tempat dimana terjadi distribusi tegangan dari kabel prategang ke beton. Hal ini membuat zona angkur menjadi daerah yang bertegangan tinggi dan kompleks, sehingga sangat berpotensi terjadi kerusakan atau keretakan. Keretakan tersebut dapat diantisipasi dengan mendesain tulangan yang sesuai untuk menahan tegangan tarik yang terjadi.

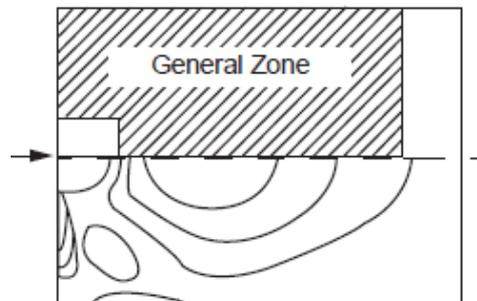
Tegangan yang terjadi pada zona angkur dapat dianalisis dengan menggunakan pendekatan metode elemen hingga. Metode elemen hingga membagi bagian-bagian struktur menjadi elemen-elemen yang lebih kecil, sehingga didapatkan hasil analisis yang lebih rinci dan akurat. Untuk mendesain tulangan sebagai penahan tegangan yang terjadi pada zona angkur digunakan pendekatan *strut and tie model (STM)*. Metode *strut and tie* ini sudah banyak digunakan untuk perhitungan struktur bangunan. Dengan menggunakan metode ini, aliran tegangan dapat digambarkan dengan bentuk seperti rangka batang dengan mengasumsikan retakan sebagai tekan (*strut*) dan tulangan sebagai tarik (*tie*). Hasil yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah desain tulangan yang dibutuhkan akibat adanya distribusi tegangan pada zona angkur dengan analisis tegangan menggunakan metode elemen hingga dan desain tulangan menggunakan *strut and tie model (STM)*.

Zona angkur (*anchorage zone*)

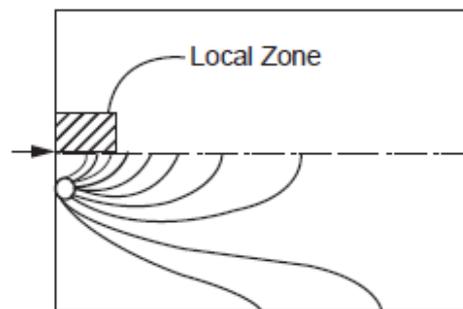
Zona angkur atau blok ujung dapat didefinisikan sebagai volume beton dimana gaya prategang yang terpusat pada angkur menyebar ke arah transversal menjadi terdistribusi linier di seluruh tinggi penampang di sepanjang bentang. Pada balok pratarik, kabel prategang mentransfer gaya tekan ke beton sekitarnya lebih panjang dari L_t secara bertahap. Pada balok pascatarik, kabel prategang mentransfer gaya tekan langsung ke akhir dari balok lewat *bearing*

plate dan ankur. Panjang daerah ini mengikuti prinsip St. Venant, yaitu bahwa tegangan menjadi seragam di lokasi sejauh kira-kira sama dengan tinggi penampang h diukur dari lokasi alat ankur. Keseluruhan prisma yang mempunyai panjang transfer h tersebut adalah zona ankur total.

Untuk tujuan mendesain, zona ankur dibagi menjadi zona umum dan zona lokal. Zona umum identik dengan zona ankur total yang panjangnya sama dengan tinggi penampang h untuk kondisi standar. Zona lokal adalah prisma beton di sekeliling dan tepat di depan alat ankur dan mengekang penulangan didalamnya. Panjang zona lokal ini harus ditinjau sebagai yang terbesar diantara lebar maksimum atau panjang alata ankur yang mengekang penulangan.



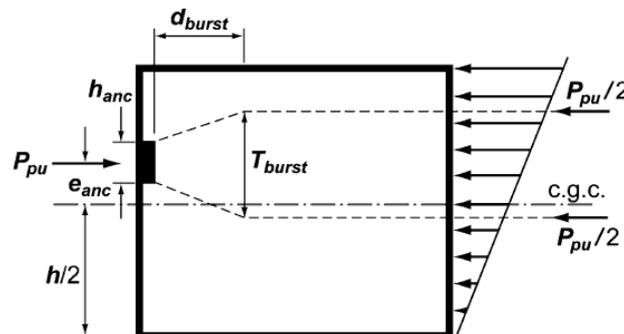
Gambar 1. Tegangan tarik utama dan zona umum pada zona ankur
Sumber: AASHTO, 2011:124



Gambar 2. Tegangan tekan utama dan zona lokal pada zona ankur
Sumber: AASHTO, 2011:124

Strut and tie model (STM)

Strut and tie model adalah suatu pendekatan yang digunakan untuk mendesain *discontinuity regions (D-regions)* pada struktur beton bertulang atau prategang. Konsep *STM* didasari atas pendekatan plastisitas untuk aliran gaya di zona ankur dengan menggunakan batang-batang lurus tarik dan tekan yang bertempuk di titik-titik diskret yang disebut nodal sehingga membentuk rangka batang. *STM* mengurangi keadaan tegangan yang kompleks pada *D-region* dari beton bertulang atau prategang menjadi sebuah rangka batang yang terdiri dari jalur tegangan *uniaxial* yang sederhana. Bagian dari *STM* yang merupakan tegangan tarik disebut *ties* dan mewakili lokasi dimana tulangan harus diletakkan. Mengetahui kekuatan yang bekerja pada batas-batas *STM*, gaya pada masing-masing anggota rangka batang dapat ditentukan dengan teori dasar rangka batang.



Gambar 3. Contoh pemodelan *strut and tie*
Sumber: ACI 318, 2008:300

Batang tekan (*strut*)

Strut atau batang tekan diasumsikan sebagai beton yang kuat menahan tekan dengan memperhitungkan landasan pembebanan dan kuat efektif pada *strut* tersebut. Batasan tegangan tekan, f_{cu} , dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$f_{cu} = \frac{f_c}{0,8+170\varepsilon_1} \leq 0,85f'_c \quad (1)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + 0,002) \cot^2 \alpha_s \quad (2)$$

dengan α_s = sudut terkecil antara *strut* dan *tie* (derajat), ε_s = regangan tarik pada beton, f'_c = tegangan pada beton (MPa).

Kekuatan nominal dari *strut* tidak bertulang dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$P_n = f_{cu}A_{cs} \quad (3)$$

dengan P_n = kekuatan nominal dari *strut* (N), f_{cu} = batasan tegangan tekan (MPa), A_{cs} = luas penampang efektif *strut* (mm^2)

Batang tarik (*tie*)

Tie merupakan batang tarik pada *strut and tie* yang terdiri dari tulangan ataupun prategang ditambah sebagian dari beton di sekelilingnya. Sebuah *tie* dapat terdiri dari satu atau beberapa lapis penulangan. Desain penulangan *tie* ini berdasarkan pada:

$$T_u \leq \phi A_s f_y \quad (4)$$

dengan T_u = gaya tarik (N), A_s = luas area *tie* (mm^2), f_y = tegangan leleh baja (MPa).

Titik pertemuan (*node*)

Node merupakan titik pertemuan dari tiga batang atau lebih dari *strut and tie* dengan berbagai kombinasi yang secara umum dapat dibagi menjadi empat jenis sambungan pertemuan yaitu CCC, CCT, CTT, dan TTT.

Penulangan kontrol retak (*crack control reinforcement*)

Penulangan ini diharapkan dapat mengontrol lebar retakan dan untuk memastikan daktilitas menjadi minimum untuk batang sehingga memungkinkan redistribusi yang signifikan dari tegangan internal. Penulangan untuk arah vertikal maupun horizontal harus memenuhi persyaratan berikut:

$$\frac{A_v}{b_w s_v} \geq 0,003 \quad (5)$$

$$\frac{A_h}{b_w s_h} \geq 0,003 \quad (6)$$

dengan A_h = total area penulangan kontrol retak horizontal dengan jarak s_h (mm^2), A_v = total area penulangan kontrol retak horizontal dengan jarak s_v (mm^2), b_w = lebar batang (mm), s_v , s_h = jarak vertikal dan horizontal penulangan kontrol retak (mm)

Metode elemen hingga

Metode elemen hingga adalah salah satu metode analisis yang rinci berbasis numerikal, yang sering dipakai untuk memecahkan masalah matematis dan fisika. Berbagai jenis masalah yang dapat dianalisis menggunakan metode ini adalah analisis struktur, transfer kalor, aliran fluida, transpor massa, dan medan elektromagnetik. Konsep dari metode elemen hingga adalah membagi bagian-bagian struktur menjadi elemen-elemen kecil yang tersambung pada nodal-nodal, permukaan atau garis tertentu yang disebut dengan diskritisasi.

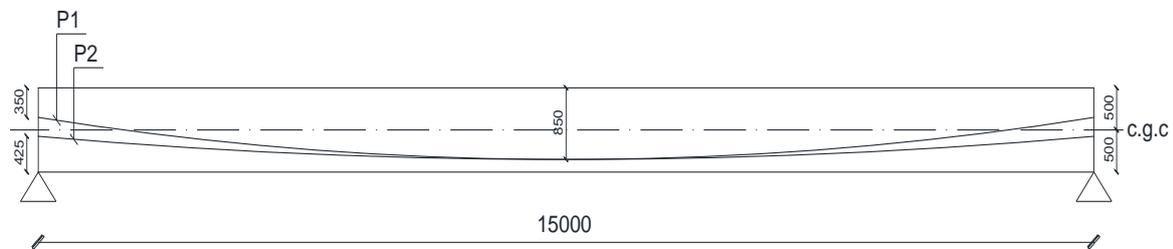
2. METODOLOGI PENELITIAN

Berikut prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini:

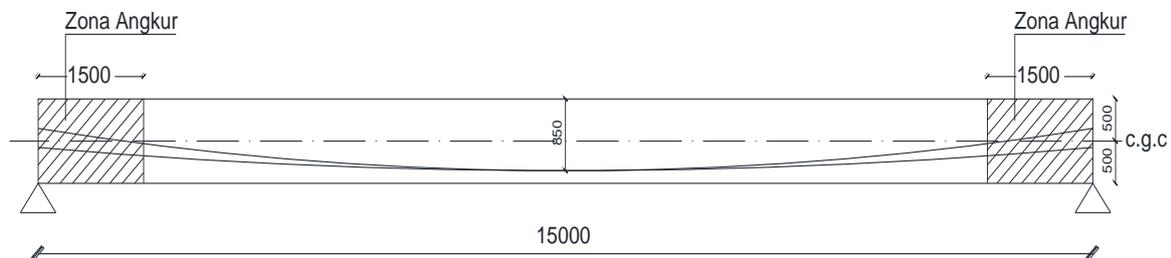
1. Menentukan zona angkur pada balok prategang
2. Analisis gaya prategang
3. Analisis distribusi tegangan struktur secara 3 dimensi dengan menggunakan bantuan program MIDAS *FEA* 2016 v1.1
4. Menentukan letak tulangan tarik
5. Membuat sketsa *strut and tie* dan menghitung gaya yang terjadi pada setiap batang
6. Cek tegangan pada *strut* dan *nodal*
7. Melengkapi desain kebutuhan tulangan akibat kontrol retak

3. HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Dimensi balok yang digunakan berukuran 0,4 m x 1 m x 15 m dengan asumsi perletakan sendi-sendi dan dibebani gaya luar sebesar 35 kN/m sepanjang bentang. Mutu beton ($f'c$) sebesar 40 MPa. Berdasarkan gaya luar yang terjadi, didapatkan jumlah *strand* sebesar 19 *strand* yang kemudian dibagi menjadi 12 *strand* dan 7 *strand* dengan eksentrisitas tengah bentang 350 mm dari titik berat. Angkur dengan 12 *strand* kemudian disebut sebagai P1 dan angkur dengan 7 *strand* disebut sebagai P2. Setelah dilakukan analisis gaya prategang didapatkan *jacking force* P1 dan P2 masing-masing sebesar 1570,73 kN dan 916,26 kN. Zona angkur diambil sebesar 1,5h sehingga didapatkan lebar zona angkur sebesar 1500 mm.



Gambar 4. Pemodelan tendon pada balok prategang

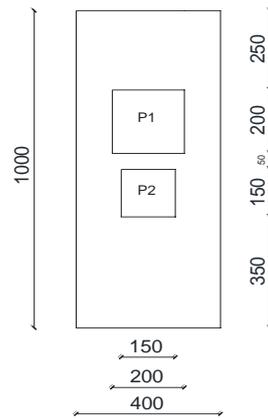


Gambar 5. Zona angkur pada balok prategang

Analisis struktur dengan program MIDAS *FEA* 2016

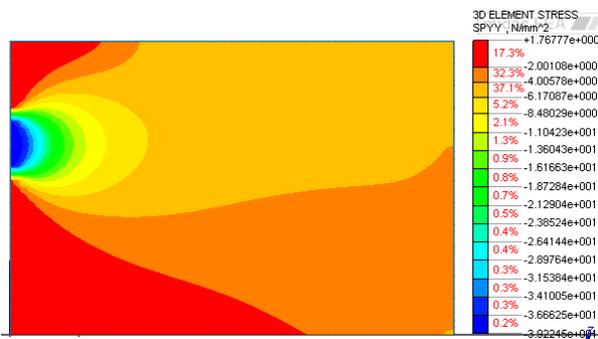
Untuk gaya yang terjadi di angkur, *jacking force* diubah menjadi gaya *pressure* merata sebesar luas ukuran *bearing plate* dengan perhitungan sebagai berikut:

Ukuran <i>bearing plate</i> 1	= 200 mm x 200 mm
Ukuran <i>bearing plate</i> 2	= 150 mm x 150 mm
Gaya <i>pressure</i> 1 (P1)	= $\frac{1570728,473}{200 \times 200} = 39,2682 \text{ N/mm}^2$
Gaya <i>pressure</i> 2 (P2)	= $\frac{916258,276}{150 \times 150} = 40,7226 \text{ N/mm}^2$

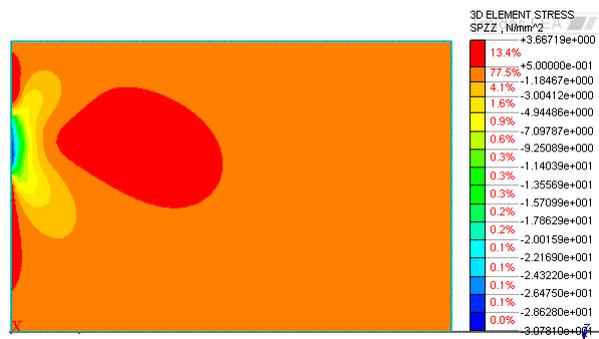


Gambar 6. Pemodelan *bearing plate* pada zona angkur

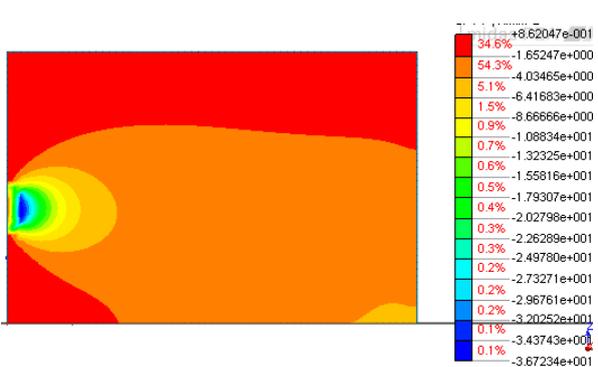
Analisis struktur zona angkur dilakukan dengan 3 tahapan, yaitu zona angkur yang diberi gaya P1, zona angkur yang diberi gaya P2, dan zona angkur yang diberi gaya P1 dan P2 secara bersama-sama yang hasilnya akan dibandingkan dengan P1 dan P2 yang di superposisi yang kemudian disebut sebagai P3.



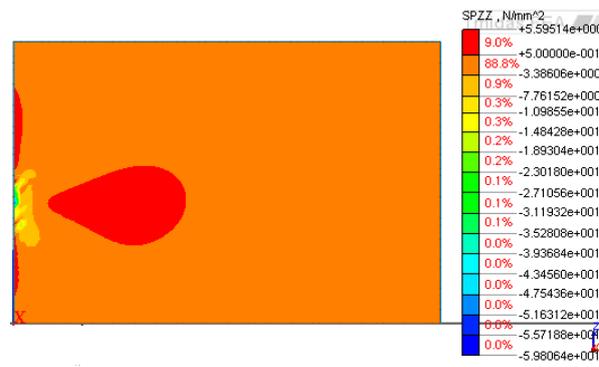
Gambar 7. Tegangan tekan akibat P1



Gambar 8. Tegangan tarik akibat P1

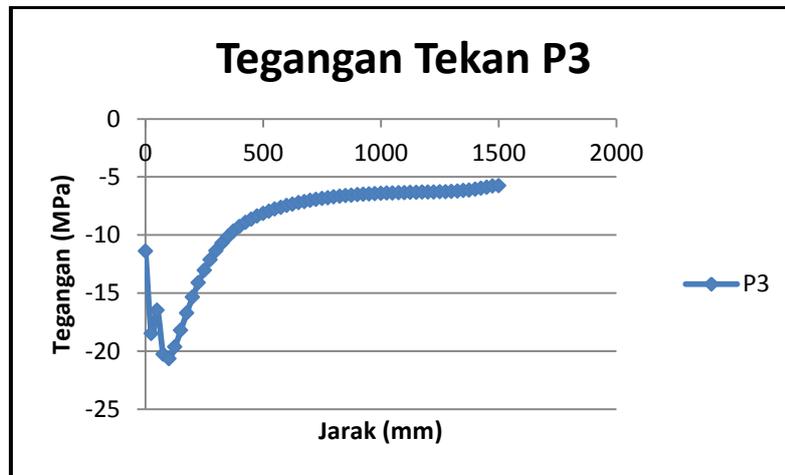


Gambar 9. Tegangan tekan akibat P2

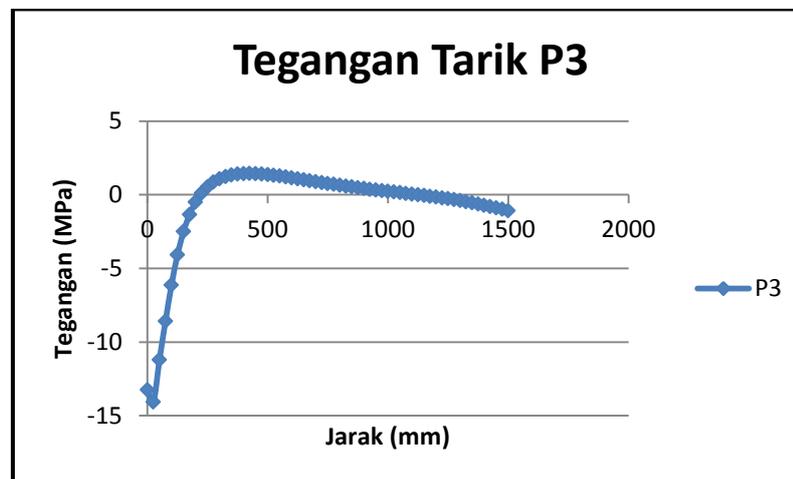


Gambar 10. Tegangan tarik akibat P2

Analisis tegangan P1 dan P2 di superposisi sehingga kemudian didapatkan nilai grafik tegangan P3 sebagai berikut:

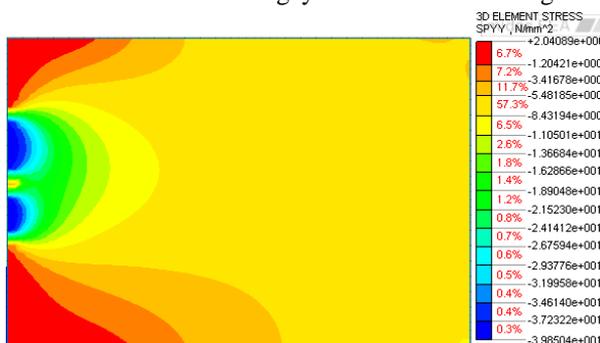


Gambar 11. Grafik tegangan tekan P3

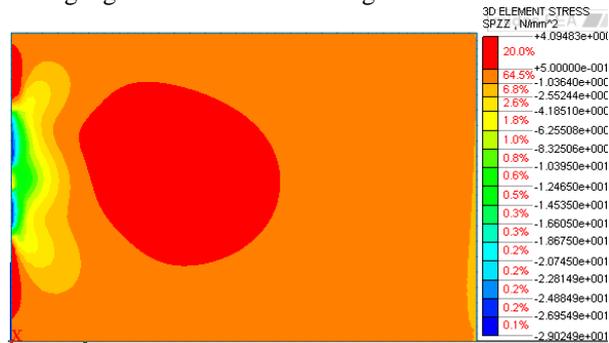


Gambar 12. Grafik tegangan tekan P3

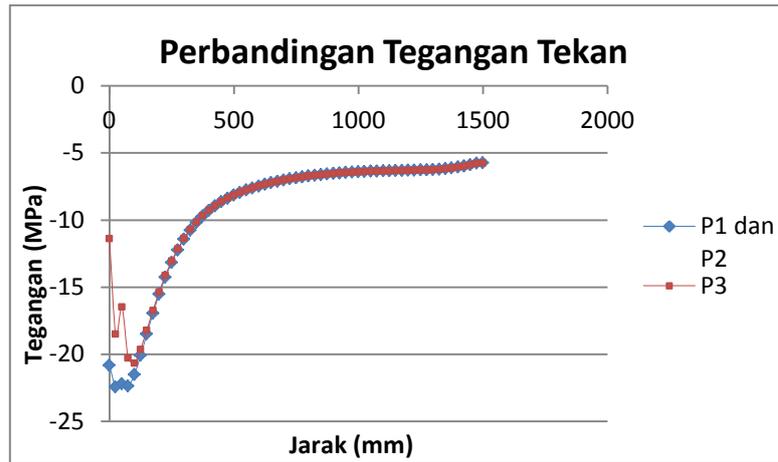
Dilakukan analisis akibat gaya P1 dan P2 dan menghasilkan tegangan tekan dan tarik sebagai berikut:



Gambar 13. Tegangan tekan akibat P1 dan P2



Gambar 14. Tegangan tarik akibat P1 dan P2



Gambar 15. Grafik perbandingan tegangan tekan antara P1 dan P2 dengan P3

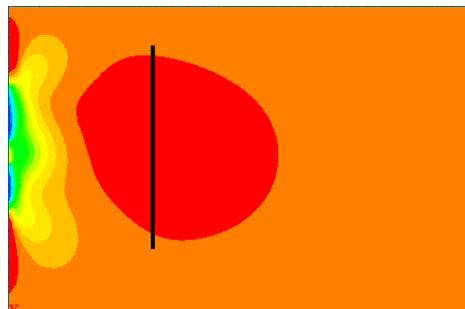


Gambar 16. Grafik perbandingan tegangan tarik antara P1 dan P2 dengan P3

Berdasarkan hasil analisis tegangan antara tegangan P1 dan P2 dengan tegangan P3, pada tegangan tekan dapat dilihat bahwa terjadi perbedaan yang signifikan pada koordinat 0 hingga koordinat 150 sedangkan pada tegangan tarik terdapat perbedaan yang cukup signifikan pada koordinat 0 hingga koordinat 50. Tetapi analisis tegangan ini dapat dilakukan secara terpisah karena perbedaan yang besar hanya terjadi pada titik awal koordinat.

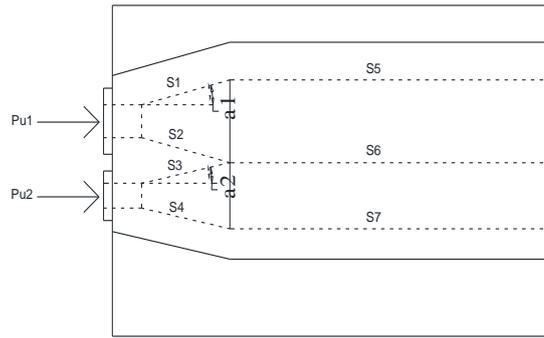
Pemodelan dengan *strut and tie*

Berdasarkan hasil analisis tegangan zona angkur pada MIDAS *FEA* 2016 v1.1 akibat gaya P1 dan P2, didapatkan daerah tarik dengan titik maksimum tarik pada koordinat 400 sehingga koordinat tersebut digunakan sebagai letak garis pengikat (*tie*).



Gambar 17. Letak garis pengikat akibat P1 dan P2

$$\begin{aligned}
 P_{u1} &= 1,2 \times 1570728,473 \text{ N} = 1884874,168 \text{ N} \\
 P_{u2} &= 1,2 \times 916258,276 \text{ N} = 1099509,931 \text{ N} \\
 \alpha_1 &= 14,0363^\circ \\
 \alpha_2 &= 11,7683^\circ
 \end{aligned}$$



Gambar 18. Pemodelan *Strut and Tie* Akibat Gaya P1 dan P2

Tabel 1. Distribusi gaya pada *strut and tie* akibat gaya P1 dan P2

Member	Gaya (kN)
S1	971,4419
S2	971,4419
S3	561,5587
S4	561,5587
S5	942,4371
S6	1492,192
S7	549,755
T1	235,6092
T2	114,5323

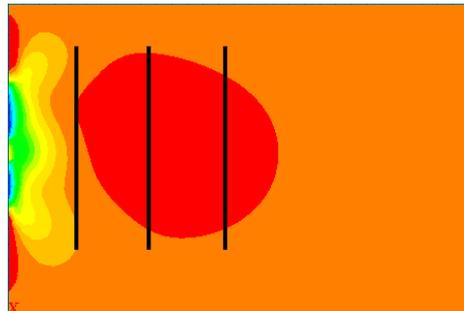
Luas baja untuk T1 dan T2

$$A_{stT1} = \frac{T}{\phi f_y} = \frac{235,6092 \times 1000}{0,9 \times 460} = 569,1044 \text{ mm}^2$$

$$A_{stT2} = \frac{T}{\phi f_y} = \frac{114,5323 \times 1000}{0,9 \times 460} = 276,6480 \text{ mm}^2$$

Digunakan 3 buah tulangan sengkang 2 kaki D 13 mm.

$$A_{st} = \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \pi \times 13^2 \times 2 \times 3 = 796,3934 \text{ mm}^2 > A_{stT1} \text{ dan } A_{stT2} \text{ (OK)}$$



Gambar 19. Letak Tulangan Tarik Akibat Gaya P1 dan P2

Cek kapasitas *struts* dan *nodes*

Tabel 2. Luas daerah *strut and tie* akibat gaya P1 dan P2

Member	Cross Sectional Dimension		
	Width (mm)	Depth (mm)	Acs (mm ²)
S1	220	200	44000
S2	220	200	44000
S3	170	150	25500
S4	170	150	25500
S5	210	200	42000
S6	340	200	68000
S7	170	150	25500
T1	446	200	89200
T2	140	200	28000

Perhitungan untuk S1,

$$\varepsilon_s = \frac{PuTie}{A_{st}E_s} = \frac{235,6092 \times 1000}{569,1044 \times 200000} = 0,001479$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_s + (\varepsilon_s + 0,002) \cot^2(\alpha_s) = 0,001479 + (0,001479 + 0,002) \cot^2(75,9638) = 0,001697$$

$$f_{cu} = \frac{f'c}{0,8+170\varepsilon_1} = \frac{40}{0,8+170 \times 0,001697} = 36,75 \text{ MPa}$$

$0,85f'c = 0,85 \times 40 = 34 \text{ MPa}$, $f_{cu} > 0,85f'c$, digunakan $f_{cu} = 34 \text{ MPa}$

$\emptyset Pn = \emptyset f_{cu} A_{cs} = 0,75 \times 34 \times 44000 = 1047,2 \text{ kN} > Pu$, S1 memenuhi.

Tabel 3. Cek kapasitas *strut* akibat gaya P1 dan P2

	Pu (kN)	Tie (kN)	α_s	ε_s	ε_1	f_{cu} (MPa)	f_{cu} pakai (MPa)	$\emptyset Pn$ (kN)	KET
S1	971,441896	235,60921	75,96376	0,001479	0,001697	36,75001	34	1047,2	OK
S2	971,441911		75,96376	0,001479	0,001697	36,75001	34	1047,2	OK
S3	561,558694	114,53229	78,23171	0,001215	0,001355	38,8232	34	606,9	OK
S4	561,558694		78,23171	0,001215	0,001355	38,8232	34	606,9	OK
S5	942,437084	235,60921	90	0,001479	0,001479	38,04204	34	999,6	OK
S6	1492,19205		90	0,001479	0,001479	38,04204	34	1618,4	OK
S7	549,754966	114,53229	90	0,001215	0,001215	39,73819	34	606,9	OK

Node 5

Tipe nodal = CCT

Untuk CCT, node $f_{cu} = 0,75f'c = 0,75 \times 40 = 30 \text{ MPa} < f_{cu}$, perlu di cek kapasitas node 5.

Tabel 4. Cek tipe *nodes* akibat gaya P1 dan P2

	Strut f_{cu} (MPa)	Node	Node Type	Node f_{cu} (MPa)	KET
S1	34	1	CCC	34	
	34	5	CCT	30	CHECK
S2	34	1	CCC	34	
	34	6	CCT	30	CHECK
S3	34	3	CCC	34	
	34	6	CCT	30	CHECK
S4	34	4	CCC	34	
	34	7	CCT	30	CHECK
S5	34	5	CCT	30	CHECK
S6	34	6	CCT	30	CHECK
S7	34	7	CCT	30	CHECK

Node 5

$\emptyset Pn = \emptyset f_{cu} A_{cs} = 0,75 \times 30 \times 44000 = 990 \text{ kN} > Pu$, S1 memenuhi, sehingga node 3 memenuhi.

Tabel 5. Cek kapasitas *nodes* akibat gaya P1 dan P2

Node	f_{cu} (MPa)	Join	A_{cs} (mm ²)	Pu (kN)	$\emptyset Pn$ (kN)	KET
5	30	S1	44000	971,4419	990	OK
	30	S5	42000	942,4371	945	OK
	30	T1	89200	235,6092	2007	OK
6	30	S2	44000	971,4419	990	OK
	30	S3	25500	561,5587	573,75	OK
	30	S6	68000	1492,192	1530	OK
	30	T1	89200	235,6092	2007	OK
7	30	T2	28000	114,5323	630	OK
	30	S4	25500	561,5587	573,75	OK
	30	S7	25500	549,755	573,75	OK
	30	T2	28000	114,5323	630	OK

Penulangan arah vertikal:

$$s = 200 \text{ mm}; b = 400 \text{ mm}; A_{st \text{ crack}} = 0,003 \times 200 \times 400 = 240 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan sengkang 4 kaki D 13 mm

$$A_{st} = \frac{1}{4}\pi D^2 = \frac{1}{4} \pi \times 13^2 \times 4 = 530,9292 \text{ mm}^2$$

Penulangan arah horizontal:

$$s = 100 \text{ mm}; b = 400 \text{ mm}; A_{st \text{ crack}} = 0,003 \times 150 \times 400 = 120 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan longitudinal 4 D 10 mm

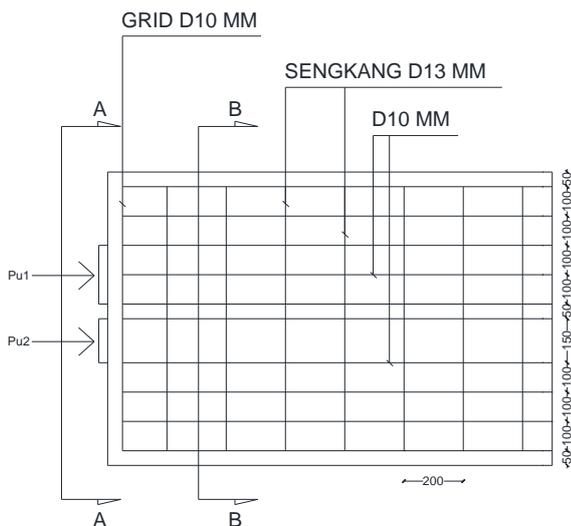
$$A_{st} = \frac{1}{4}\pi D^2 = \frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 4 = 314,1593 \text{ mm}^2$$

$$\text{Spalling force} = 2\%P_u = 0,02 \times (1884874,168 + 1099509,931) = 59687,682 \text{ N}$$

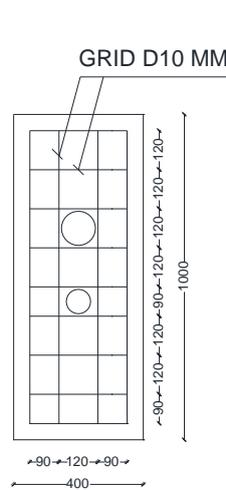
$$\text{Luas tulangan untuk menahan spalling force } (A_{st}) = \frac{P}{\phi f_y} = \frac{59687,682}{0,9 \times 460} = 144,1731 \text{ mm}^2$$

Digunakan tulangan sengkang *grid* D 10 mm

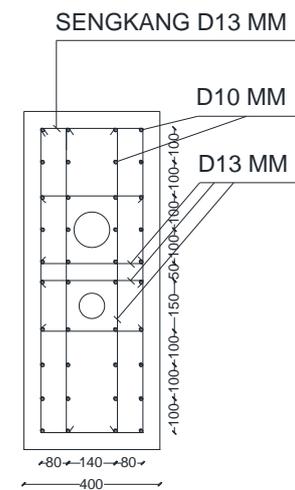
$$A_{st} = \frac{1}{4}\pi D^2 = \frac{1}{4} \pi \times 10^2 \times 4 = 314,1592 \text{ mm}^2 > 144,1731 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$



Gambar 20. Tampak samping zona ankur ganda



Gambar 21. Potongan A-A



Gambar 22. Potongan B-B

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Zona ankur pada daerah tekan menimbulkan tegangan tarik pada arah lateral. Tegangan tarik yang terjadi pada zona ankur perlu diatasi dengan *bursting steel*.
2. Pada daerah tepi balok terjadi tegangan *spalling* yang perlu diatasi dengan *spalling reinforcement*.
3. Pada balok dengan ankur ganda, tegangan tarik mulai terjadi pada jarak 225 mm dan tegangan tarik maksimum terjadi pada jarak 425 mm sebesar 1,446 MPa.
4. Analisis tegangan dengan dua ankur antara masing-masing gaya dapat dilakukan secara terpisah karena hasil menunjukkan analisis tegangan yang dilakukan secara terpisah dengan yang digabungkan menunjukkan hasil yang sama.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2012). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI Committee 318. (2007). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary*. USA: American Concrete Institute.
- Breen, J.E. dkk. (1994). *Anchorage Zone Reinforcement for Post-Tensioned Concrete Girders*. Washington DC: Transportation Research Board.
- Lin, T.Y. dan Ned H. Burns. (1981). *Design of Prestressed Concrete Structures*. Canada: John Wiley & Sons.
- Logan, Daryl L. (2012). *A First Course in the Finite Element Method Fifth Edition*. Stamford: Cengage Learning.
- Martin, Barney T. dan David H. Sanders. (2007). *Verification and Implementation of Strut-and-Tie Model in LRFD Bridge Design Specifications*. New York.
- Rogowsky, D.M. dan P Marti. (1996). *Detailing for Post-Tensioned*. Switzerland: VSL International Ltd.