

STUDI PARAMETRIK PERTEMUAN BALOK KOLOM *INTERIOR* PADA PORTAL BETON BERTULANG MENGGUNAKAN METODE *STRUT AND TIE*

Partogi H. Simatupang¹ (simatupangpartogi@yahoo.com)

Elia Hunggurami² (eliahunggurami@yahoo.com)

Aditya B. Ina³ (adityaina896@gmail.com)

ABSTRAK

Untuk mendesain *D-region* diperlukan analisa yang lebih mendalam dengan berdasar pada bentuk trajektori tegangan elemen yang ditinjau. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui bentuk trajektori tegangan, jumlah tulangan serta konfigurasi penulangan pada daerah pertemuan balok kolom *interior* berdasarkan metode *Strut and Tie* dibandingkan dengan metode konvensional. Pada penelitian ini, pemodelan *strut and tie* dilakukan pada pertemuan balok kolom *interior* dari portal beton bertulang 2 lantai. Trajektori tegangan pada pertemuan balok kolom *interior* memiliki bentuk yang menyilang antara trajektori tekan dan trajektori tarik. Studi parametrik pertemuan balok kolom *interior* pada portal beton bertulang menggunakan metode *Strut and Tie* menghasilkan jumlah tulangan yang lebih sedikit dibanding metode konvensional dengan persentase perbedaan terhadap metode SNI 03-2847-2002 sebesar 14,18%, sedangkan terhadap metode R. Park dan T. Paulay sebesar 3,58%.

Kata Kunci : Metode *Strut and Tie*, Trajektori Tegangan, Pertemuan Balok Kolom *Interior*

ABSTRACT

To design D-region needed deeper analysis based on the shape of stress trajectory elements. Purpose of this research are to determine the shape of stress trajectory, amount and configuration of reinforce at interior beam column joint area used strut and tie method compared with conventional method. In this research, the model of strut and tie is used in the joint of interior beam column of 2 floors of reinforced concrete frame. Stress trajectory in the joint interior beam column shaped cross. Parametric study about interior beam column joint in reinforced concrete frame used strut and tie method produce smaller amounts of reinforce compared with conventional method with different percentage about SNI-03-2847-2002 method as big as 14,18%, whereas about R. Park and T. Paulay method as big as 3,58%.

Keywords : *Strut and Tie Method, Stress Trajectory, Interior Beam Column Joint*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Daerah pada pertemuan balok dan kolom merupakan bagian struktur yang termasuk ke dalam kategori *D-region* karena memiliki bentuk trajektori tegangan yang tidak teratur. *D-region* perlu direncanakan menggunakan pendekatan metode yang lebih akurat agar didapatkan hasil yang lebih rasional sesuai kebutuhan struktur. Metode ini adalah pemodelan penunjang dan pengikat (*strut and tie model*).

¹ Dosen pada Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

² Dosen pada Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

³ Penamat dari Jurusan Teknik Sipil, FST Undana.

Trajektori tegangan yang sudah dimodelkan dalam bentuk struktur rangka kemudian diverifikasi dengan metode analisis penampang agar dapat diketahui jumlah tulangan yang diperlukan. Salah satu jenis pertemuan balok kolom adalah pertemuan balok kolom *interior*. Titik pertemuan balok kolom *interior* biasanya terdapat pada bagian tengah portal, dimana pada titik itu terdapat balok di sisi kiri dan kanan serta kolom di bagian atas dan bawah dari titik tersebut. Pada pertemuan balok kolom ini bentuk trajektori tegangannya tidak beraturan, sehingga butuh perhatian khusus dalam merencanakan pertemuan balok kolom *interior* agar struktur yang didesain mampu memenuhi syarat struktural dalam memikul beban. Hal inilah yang mendorong penulis untuk melakukan penelitian dengan judul “Studi Parametrik Pertemuan Balok Kolom *Interior* Pada Portal Beton Bertulang Menggunakan Metode *Strut And Tie*”.

MATERI

Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan pada daerah pertemuan balok kolom dengan menggunakan metode *Strut and Tie*. Namun dari penelitian-penelitian tersebut belum ada yang menyimpulkan tentang Studi Parametrik Pertemuan Balok Kolom *Interior* Pada Portal Beton Bertulang Menggunakan Metode *Strut and Tie*. Berbagai penelitian tersebut antara lain:

Analisis Pertemuan Balok – Kolom Struktur Rangka Beton Bertulang Menggunakan Metode *Strut and Tie*

Berdasarkan hasil penelitian (Riyadi, 2010) didapat kesimpulan sebagai berikut: Dari kedua metode, hubungan balok kolom berbentuk L didapat hasil perhitungan tulangan tarik 4D22, sengkang horizontal D13-100, dan D13-100 untuk sengkang vertikal. Hasil desain luas tulangan dengan metode *strut and tie* menghasilkan luas tulangan yang lebih kecil dari analisis penampang menggunakan metode ACI 318-02. Konfigurasi *strut and tie* yang digunakan akan berpengaruh pada gaya batang yang terjadi dan mempengaruhi luas tulangan perlu yang dibutuhkan pada proses desain. Ini terlihat dari perbedaan konfigurasi balok – kolom yang membuka dan menutup yang memberikan gaya batang dan tulangan yang berbeda.

Studi Analisis Pertemuan Balok Kolom Berbentuk T Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Pemodelan *Strut and Tie*

Hasil penelitian (Kusumo, 2012) disimpulkan bahwa tulangan pada pemodelan hubungan balok-kolom menggunakan tulangan 5D22 untuk *tie* di sebelah atas. Untuk *strut* yang diterima langsung oleh beton, dipasang 2D22. Tulangan ini dipasang untuk memfasilitasi sengkang yang harus ada pengikatnya di bawah. Sedangkan untuk kolom digunakan $A_{st} = 4D22 = 1520 \text{ mm}^2$ yang dipasang simetris. Sengkang yang digunakan adalah 2D10-200 untuk sengkang di bagian kolom maupun balok. Terdapat perbedaan antara hasil perhitungan luas tulangan menggunakan metode *strut and tie* dengan analisis penampang. Pada balok terdapat beda sebesar 18,04%, sedangkan pada kolom 8,61%. Hal ini menunjukkan bahwa metode analisis penampang lebih ekonomis daripada metode *strut and tie*.

B-region* dan *D-region

Suatu struktur portal dapat dibagi menjadi 2 bagian yaitu *B-region* dan *D-region*. Pada *B-region*, asumsi penampang bidang dari teori lentur dapat digunakan. Sedangkan untuk *D-region*, asumsi penampang bidang dari teori lentur tidak dapat digunakan. *D-region* adalah bagian komponen struktur yang mengalami perubahan mendadak dalam geometri atau pembebanan. *D-region* mencakup daerah diskontinuitas geometri, yaitu daerah yang berdekatan dengan lubang, yang mengalami perubahan mendadak dalam bentuk penampang, serta daerah diskontinuitas gaya, yaitu daerah dimana terdapat gaya terpusat atau pada reaksi perletakan. Selain itu, *corbel*,

dapped end, dan *joint* termasuk ke dalam *D-region* yang mengalami diskontinuitas geometri dan diskontinuitas gaya sekaligus. Sampai saat ini, banyak buku mendesain *D-region* dengan mengasumsikan bahwa daerah ini termasuk ke dalam *B-region* (Wight dan MacGregor, 2012).

Trajektori Tegangan

Schodek (1998) dalam Nasution (2014) menjelaskan bahwa suatu benda elastis yang dibebani sebelum retak akan menghasilkan medan tekan (*compression field*) dan medan tarik (*tension field*) elastis. Garis trajektori utama adalah garis tempat kedudukan titik-titik dari suatu tegangan utama (*principal stress*) yang memiliki nilai (aljabar) yang sama yang terdiri dari garis trajektori tegangan tekan dan garis trajektori tarik. Garis-garis trajektori menunjukkan arah dari tegangan utama pada setiap titik yang ditinjau. Jadi trajektori tegangan merupakan suatu kumpulan garis-garis kedudukan dari titik-titik yang mempunyai tegangan utama dengan nilai tertentu.

Pemodelan *Strut and Tie*

Hardjasaputra dan Tumilar (2002) menjelaskan bahwa penyaluran gaya tekan dipengaruhi oleh beton yang dibebani, oleh karena itu dimensi *Strut* dan kuat tekan beton merupakan unsur yang penting dalam menganalisa *Strut*. Kekuatan beton dalam suatu medan tekan sangat bergantung pada keadaan tegangan multiaksial yang terjadi serta berbagai gangguan dari peretakan dan tulangan. Tegangan tekan efektif f_{ce} diberikan sebagai berikut:

$$f_{ce} = 0,25 f_c' \text{ untuk balok beton dimana badannya mengalami retakan yang parah pada sudut } \theta = 30^\circ.$$

$$f_{ce} = 0,45 f_c' \text{ untuk balok beton dimana badannya mengalami retakan yang parah pada sudut } \theta = 45^\circ.$$

Pada beton struktur batang tarik dapat berupa satu atau kumpulan baja tulangan. Bila diasumsikan tulangan akan mengalami leleh pada keadaan batas, maka gaya tarik maksimum pada batang tarik (*tie*) tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

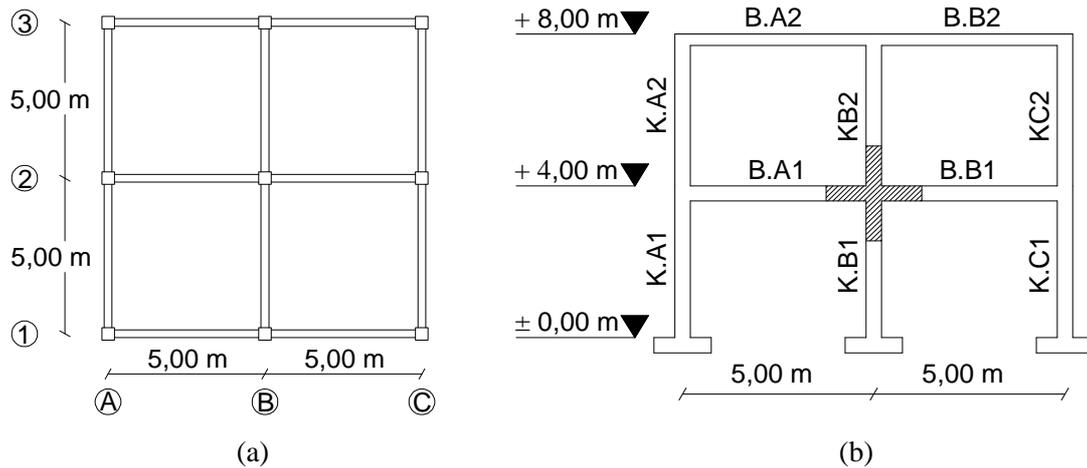
$$T_u = \phi \cdot A_s \cdot f_y \quad (1)$$

Pertemuan Balok Kolom *Interior*

Wight dan MacGregor (2012) menjelaskan bahwa fungsi pertemuan balok kolom pada portal adalah untuk mentransfer beban dan momen pada ujung balok ke kolom. Pertemuan balok kolom yang berada di tengah-tengah portal biasa disebut dengan *joint interior*. Gaya tarik dan tekan dari ujung balok dan gaya-gaya aksial dari kolom dapat disalurkan secara langsung melalui *joint*. Dalam pembebanan lateral, gaya-gaya seimbang dari balok dan kolom menyebabkan munculnya tegangan tarik dan tekan pada *joint* secara diagonal. Retak terjadi tegak lurus terhadap tegangan diagonal tarik pada *joint* dan pada muka *joint* dimana balok berpotongan dengan *joint*.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, pemodelan *strut and tie* dilakukan pada pertemuan balok kolom *interior* dari portal beton bertulang 2 lantai. Gambar denah dan portal yang akan diteliti pada bagian pertemuan balok kolom *interior* terdapat pada Gambar 1. Gambar 1 (a) adalah denah organisasi struktur portal, sedangkan Gambar 1 (b) merupakan pertemuan balok kolom *interior* pada portal. Terdapat 4 variasi portal berdasarkan dimensi komponen struktur (balok dan kolom) yang dianalisa dalam penelitian ini. Balok atap B.A2 dan B.B2 memiliki dimensi yang konstan yaitu 20/30. Balok lantai 2 B.A1 dan B.B1 memiliki variasi dimensi, antara lain 25/40 dan 25/60. Semua kolom pada portal yang ditunjukkan dalam Gambar 1 memiliki variasi dimensi antara lain 40/40 dan 50/50. Selain itu, digunakan 2 jenis mutu beton (f_c') yaitu 20 MPa dan 35 MPa serta 2 jenis mutu tulangan (f_y) yaitu 200 MPa dan 400 MPa.



Gambar 1. (a). Denah Organisasi Struktur
(b). Pertemuan Balok Kolom Interior (yang diarsir) Pada Portal

Berdasarkan data-data di atas, analisa dilakukan dengan memodelkan struktur portal 2D pada program SAP2000. *Input* beban-beban pada portal lalu lakukan analisa struktur dengan SAP2000 untuk mendapatkan gaya dalam. Gaya dalam pada pertemuan balok kolom interior didistribusikan pada tiap *shell* dari pertemuan balok kolom interior yang dimodelkan dengan *finite element model* (FEM). Pemodelan FEM dilakukan dengan SAP2000 untuk mendapatkan gambar SMax dan SMin. Garis-garis trajektori tegangan yang dihasilkan SAP2000 menunjukkan suatu pendekatan batasan tegangan yang terjadi dalam *range* tertentu. Gambar SMax dan SMin digabung menjadi satu gambar trajektori tegangan dengan menggambar manual menggunakan program AutoCAD. Pemodelan *strut and tie* dilakukan dalam bentuk rangka batang berdasarkan trajektori tegangan, dihitung jumlah tulangan dan konfigurasi penulangan yang dibutuhkan menggunakan metode *strut and tie*, lalu dibandingkan terhadap metode konvensional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembebanan

Beban yang membebani portal diambil berdasarkan Peraturan Pembebanan Indonesia Untuk Gedung 1983 (PPIUG 1983). Masing-masing beban tersebut didefinisikan sebagai berikut:

1. Beban mati terdiri dari berat dinding dinding, berat sendiri komponen struktur, dan beban tributaris yang sebidang dengan pelat. Berat dinding per meter lari adalah sebesar 1020 kg/m. Berat sendiri komponen struktur akan dihitung otomatis oleh program SAP2000 dengan spesifikasi berat jenis beton adalah 2400 kg/m³. Pada beban sebidang pelat, untuk pelat atap sebesar 1073,33 kg/m, sedangkan pelat lantai sebesar 1286 kg/m.
2. Portal yang ditinjau dianggap merupakan gedung perkantoran. Beban hidup untuk pelat atap sebesar 333,33 kg/m dan pelat lantai sebesar 833,33 kg/m.
3. Beban gempa yang digunakan merupakan beban gempa statik ekuivalen. Beban gempa untuk masing-masing variasi dimensi portal dirangkum pada tabel berikut:

Tabel 1. Beban Gempa Pada Tiap Variasi Portal

Letak beban	Variasi 1 (kN)	Variasi 2 (kN)	Variasi 3 (kN)	Variasi 4 (kN)
Lantai Atap	74,74	76,08	81,29	82,69
Lantai 2	99,76	106,94	106,56	113,84

4. Beban-beban di atas akan dihitung menurut kombinasi pembebanan yang dianjurkan dalam SNI-1726-2002 yaitu pada sub bab 11.2. Sehingga kombinasi pembebanan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$1,4D \tag{2}$$

$$1,2D + 1,6L \tag{3}$$

$$1,2D + 1,0L \pm 1,0E \tag{4}$$

$$0,9D \pm 1,0E \tag{5}$$

Analisa Gaya Dalam Portal

Analisa gaya dalam portal dilakukan dengan menggunakan program SAP2000. Gaya dalam yang diperhatikan hanyalah pada elemen struktur yang berhubungan langsung dengan *joint interior* yang ditinjau sesuai Gambar 1. Berikut adalah hasil analisa gaya dalam portal untuk tiap variasi.

Tabel 2. Gaya Dalam Portal Untuk Tiap Variasi

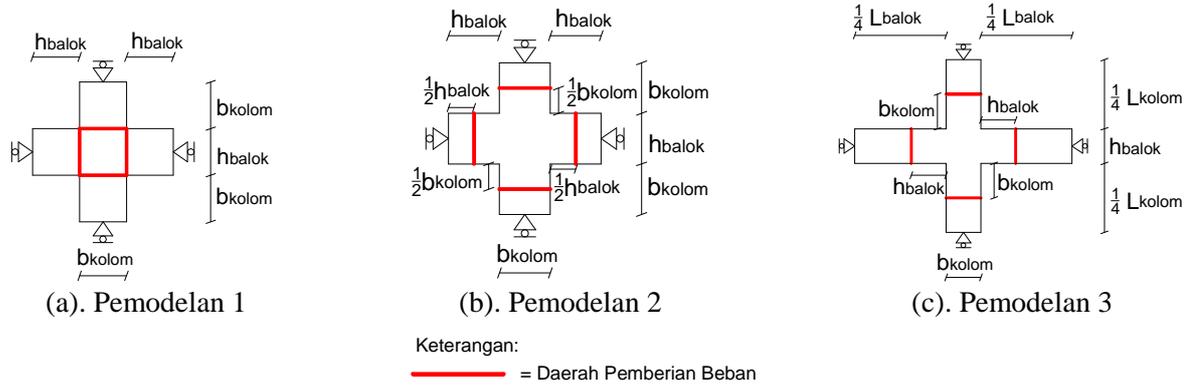
Komponen Struktur	Gaya Dalam		Variasi 1	Variasi 2	Variasi 3	Variasi 4
Balok Lantai Kiri (B.A1)	Gaya Geser (kN)	Maksimum	140,90	161,10	133,73	158,26
		Minimum	19,756	13,47	23,57	10,227
	Momen Lentur (kNm)	Maksimum	43,17	55,04	35,41	67,69
		Minimum	-181,42	-208,97	-168,39	-212,70
Balok Lantai Kanan (B.A2)	Gaya Geser (kN)	Maksimum	70,97	78,28	74,03	82,54
		Minimum	-59,38	-64,62	-63,19	-70,33
	Momen Lentur (kNm)	Maksimum	42,70	54,13	34,83	66,33
		Minimum	-180,95	-208,07	-167,81	-211,36
Kolom Lantai 1 (K.B1)	Gaya Geser (kN)	Maksimum	41,62	44,75	42,44	44,46
		Minimum	-30,03	-31,09	-31,60	-32,26
	Momen Lentur (kNm)	Maksimum	67,62	70,29	71,48	78,10
		Minimum	-67,62	-70,29	-71,48	-78,10
Kolom Lantai 2 (K.B2)	Gaya Geser (kN)	Maksimum	106,13	132,01	75,92	129,87
		Minimum	-106,13	-132,01	-75,92	-129,87
	Momen Lentur (kNm)	Maksimum	-188,54	-199,45	-193,13	-201,65
		Minimum	-348,32	-366,57	-352,76	-366,91
Kolom Lantai 2 (K.B2)	Gaya Geser (kN)	Maksimum	38,26	36,76	39,89	40,02
		Minimum	-38,26	-36,76	-39,89	-40,02
	Momen Lentur (kNm)	Maksimum	81,98	91,92	92,90	112,28
		Minimum	-81,98	-91,92	-92,90	-112,28
Kolom Lantai 2 (K.B2)	Gaya Aksial (kN)	Maksimum	-69,71	-69,81	-76,84	-76,80
		Minimum	-120,07	-120,41	-129,31	-129,38

Pemodelan *Strut and Tie*

Pemodelan pada masing-masing variasi model portal dilakukan dengan 3 pemodelan dan 2 bentuk pembebanan.

Jenis Pemodelan

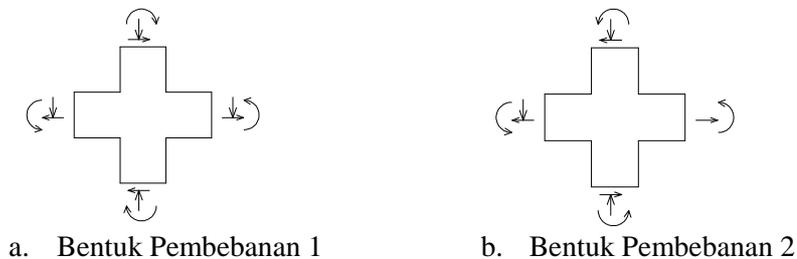
Dalam penelitian ini, pertemuan balok kolom *interior* dimodelkan dalam 3 pemodelan. Ketiga jenis pemodelan ini sudah mengakomodir pemodelan *joint* terhadap mode keruntuhan geser (Pemodelan 1 dan Pemodelan 2) dan mode keruntuhan lentur (Pemodelan 3). Ketiga pemodelan tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Jenis Pemodelan

Bentuk Pembebanan

Berdasarkan literatur-literatur terdahulu, daerah pertemuan balok kolom didesain agar mampu menahan retak diagonal. Atas dasar tersebut, bentuk pembebanan dimodelkan dengan mempertimbangkan kemungkinan pola retak yang terjadi agar berbentuk diagonal. Kedua bentuk pembebanan tersebut diberikan pada gambar di bawah ini.



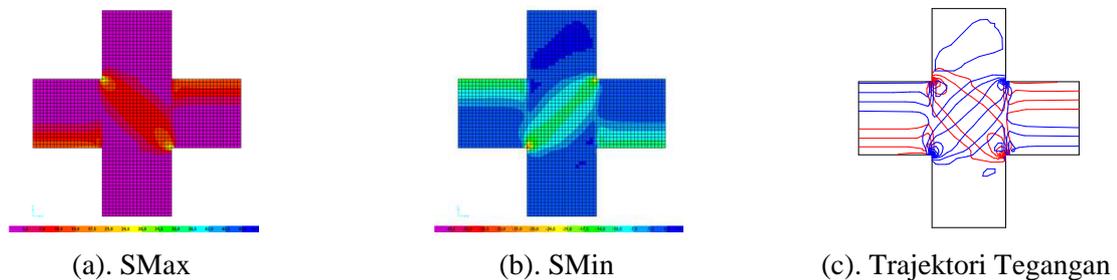
Gambar 3. Bentuk Pembebanan

Trajektori Tegangan

Berikut diuraikan gambar-gambar trajektori tegangan berdasarkan variasi dimensi portal.

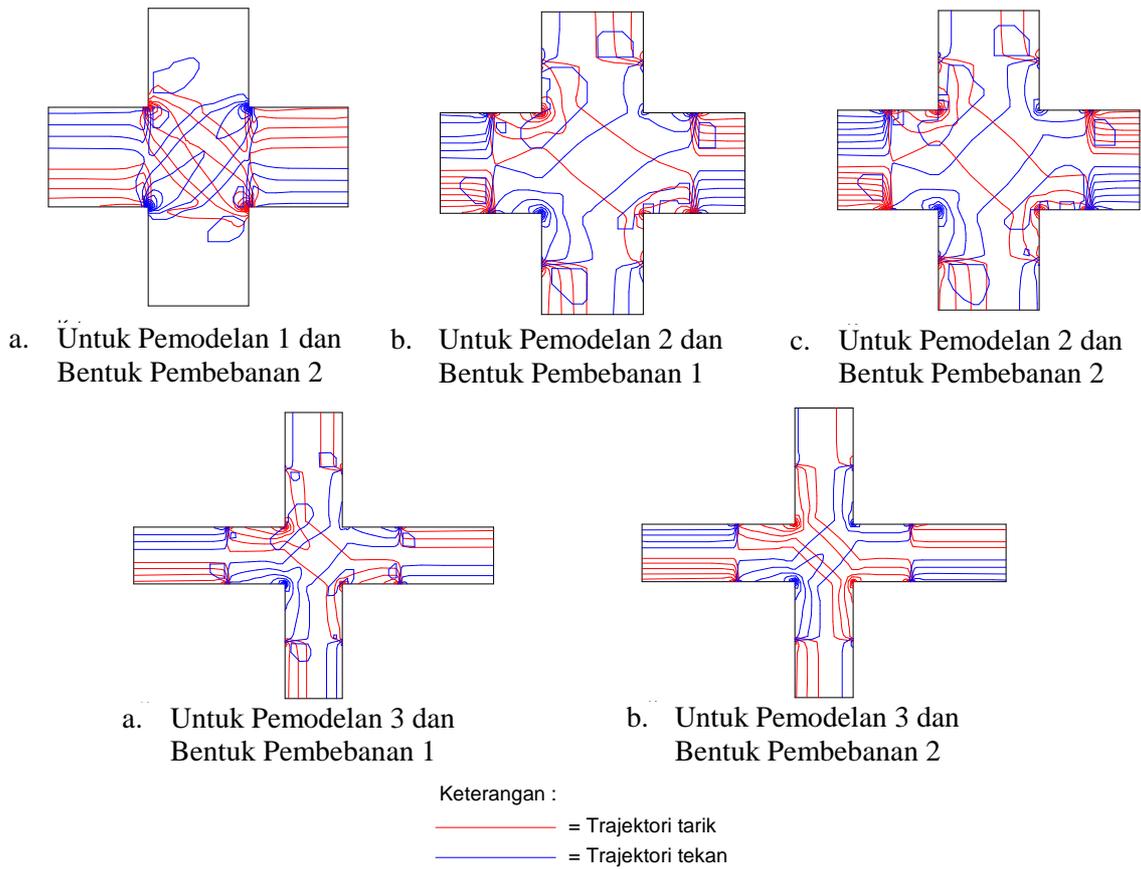
1. Portal Variasi 1

Portal variasi 1 memiliki dimensi balok lantai 2 berukuran 25/40 serta dimensi kolom berukuran 40/40. Analisa dengan program SAP2000 menghasilkan gambar SMax (Gambar 4 (a)) dan SMin (Gambar 4 (b)). Gambar SMax dan SMin disatukan menjadi gambar trajektori tegangan (Gambar 4 (c)) dengan menggambar manual menggunakan program AutoCAD.



Gambar 4. SMax, SMin, dan Trajektori Tegangan Portal Variasi 1 Untuk Pemodelan 1 dan Bentuk Pembebanan 1

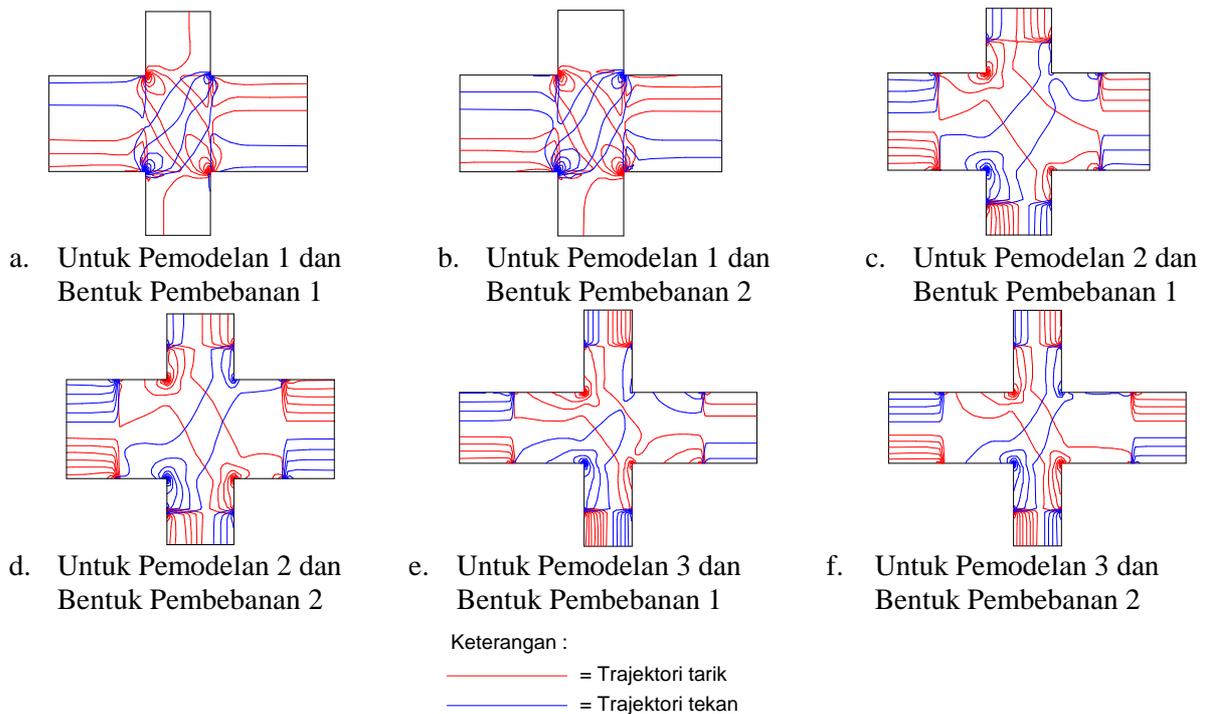
Gambar trajektori tegangan untuk portal variasi 1 dengan pemodelan dan bentuk pembebanan yang lain dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Trajektori Tegangan Portal Variasi 1

2. Portal Variasi 2

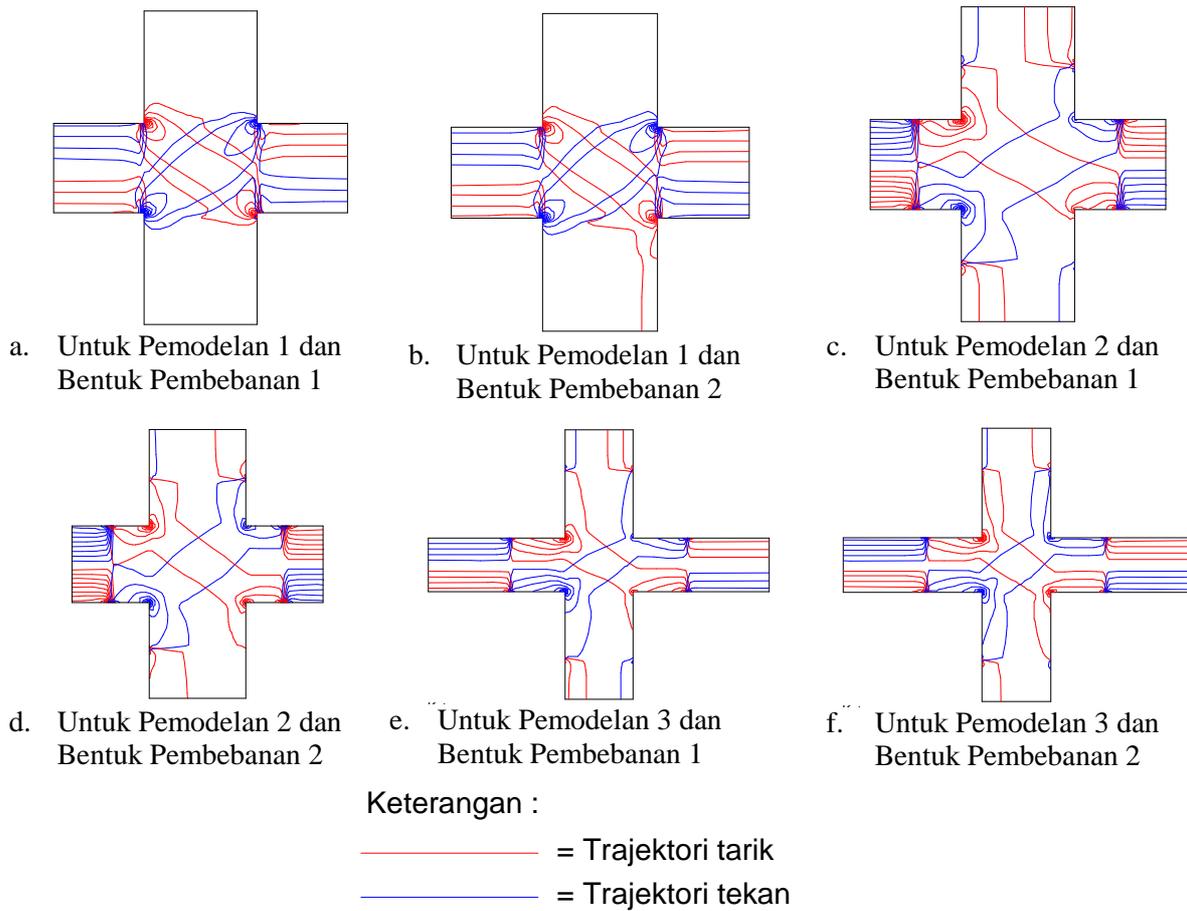
Portal variasi 2 memiliki dimensi balok lantai 2 berukuran 25/60 serta dimensi kolom berukuran 40/40. Gambar trajektori tegangan portal variasi 2 dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Trajektori Tegangan Portal Variasi 2

3. Portal Variasi 3

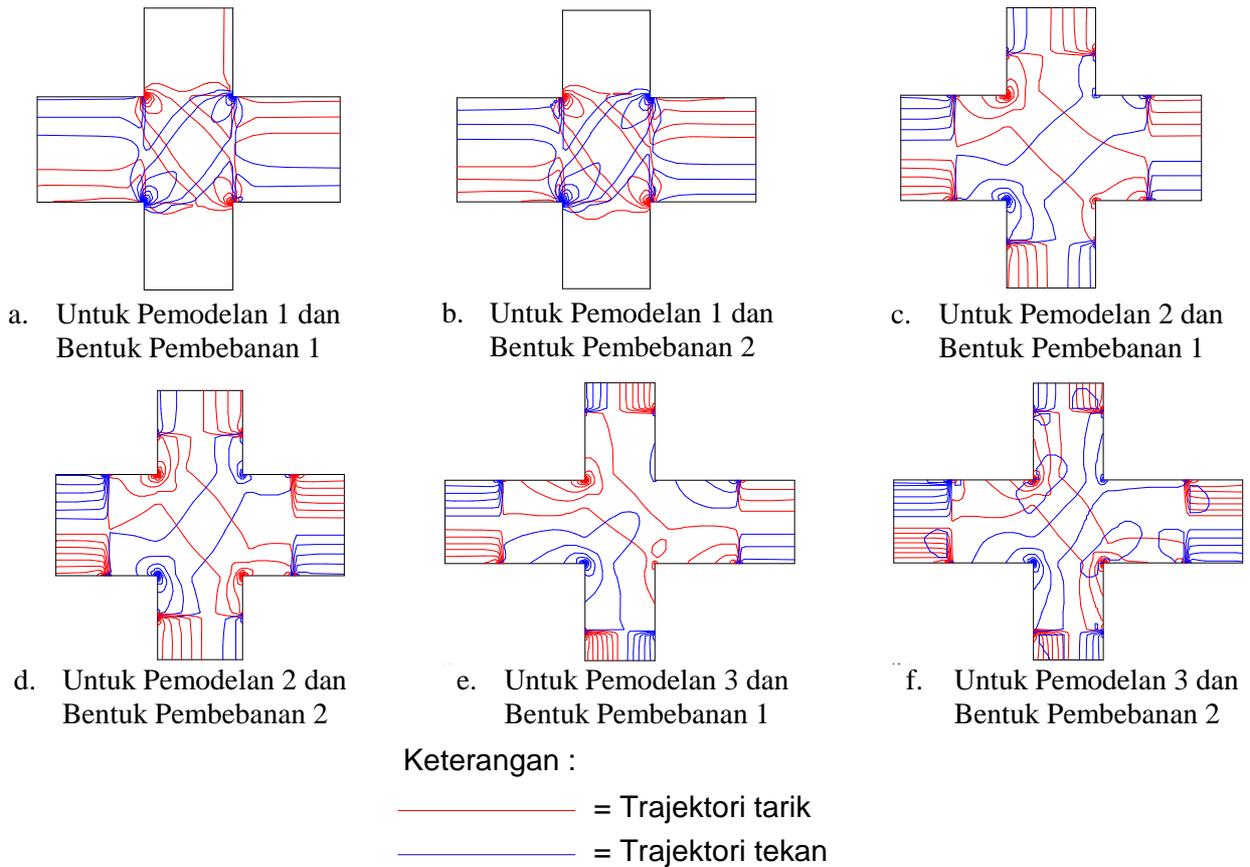
Portal variasi 3 memiliki dimensi balok lantai 2 berukuran 25/40 serta dimensi kolom berukuran 50/50. Gambar trajektori tegangan portal variasi 3 dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Trajektori Tegangan Portal Variasi 3

4. Portal Variasi 4

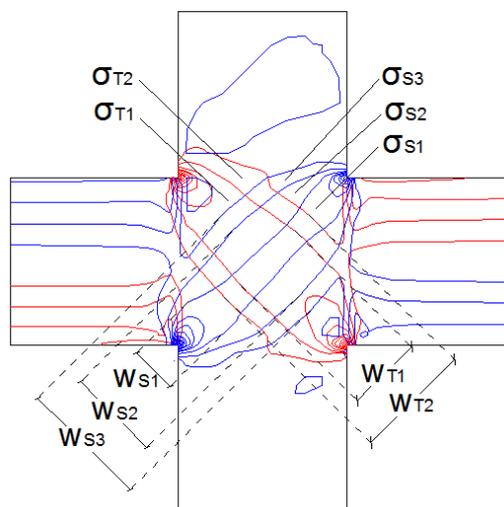
Portal variasi 4 memiliki dimensi balok lantai 2 berukuran 25/60 serta dimensi kolom berukuran 50/50. Gambar trajektori tegangan portal variasi 4 dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Trajektori Tegangan Portal Variasi 4

Pembahasan

Cara melihat besar tegangan dan lebar tegangan bisa dilihat pada Gambar 9. Nilai tegangan serta lebar *strut* dan *tie* berturut-turut direkap pada Tabel 3 dan Tabel 4.



Gambar 9. Cara Melihat Tegangan Strut, Tegangan Tie, Lebar Strut, dan Lebar Tie Pada Pertemuan Balok Kolom Interior

Tabel 3. Rekapitulasi Tegangan Pada Pertemuan Balok Kolom Interior

Portal	Pemo- delan	Bentuk Pembe- banan	Tegangan Tie (Tarik)				Tegangan Strut (Tekan)			
			σ_{T1} (MPa)	σ_{T2} (MPa)	σ_{T3} (MPa)	Rata- rata (MPa)	σ_{S1} (MPa)	σ_{S2} (MPa)	σ_{S3} (MPa)	Rata- rata (MPa)
Variasi 1	P1	BP 1	10,5	7	-	8,75	10,5	7	3,5	7
		BP 2	12	9	6	9	10,5	7	3,5	7
	P2	BP 1	6	-	-	6	3,5	-	-	3,5
		BP 2	6	-	-	6	3,5	-	-	3,5
	P3	BP 1	11	-	-	11	6,5	-	-	6,5
BP 2		15	10	-	12,5	6	-	-	6	
Tegangan Tie Max						12,5	Tegangan Strut Max			7
Variasi 2	P1	BP 1	6,6	4,4	-	5,5	7	3,5	-	5,25
		BP 2	6,6	4,4	-	5,5	6	3	-	4,5
	P2	BP 1	4,4	-	-	4,4	3	-	-	3
		BP 2	4,4	-	-	4,4	2,8	-	-	2,8
	P3	BP 1	7	-	-	7	4,5	-	-	4,5
BP 2		7	-	-	7	4,5	-	-	4,5	
Tegangan Tie Max						7	Tegangan Strut Max			5,25
Variasi 3	P1	BP 1	9	6	-	7,5	6	3	-	4,5
		BP 2	9	6	-	7,5	6	3	-	4,5
	P2	BP 1	6,2	-	-	6,2	2,8	-	-	2,8
		BP 2	5,6	-	-	5,6	3	-	-	3
	P3	BP 1	10	-	-	10	5	-	-	5
BP 2		10	-	-	10	5	-	-	5	
Tegangan Tie Max						10	Tegangan Strut Max			5
Variasi 4	P1	BP 1	6,6	4,4	-	5,5	4,8	2,4	-	3,6
		BP 2	6	4	-	5	4,4	2,2	-	3,3
	P2	BP 1	4,4	-	-	4,4	2,6	-	-	2,6
		BP 2	3,8	-	-	3,8	2,5	-	-	2,5
	P3	BP 1	6	-	-	6	3,5	-	-	3,5
BP 2		5,2	-	-	5,2	3,5	-	-	3,5	
Tegangan Tie Max						6	Tegangan Strut Max			3,6

Tabel 4. Rekapitulasi Lebar Strut dan Lebar Tie

Portal	Pemo- delan	Bentuk Pembe- banan	Lebar Tie (Tarik)				Lebar Strut (Tekan)			
			W_{T1} (mm)	W_{T2} (mm)	W_{T3} (mm)	Rata- rata (mm)	W_{S1} (mm)	W_{S2} (mm)	W_{S3} (mm)	Rata- rata (mm)
Variasi 1	P1	BP 1	182,22	281,21	-	231,71	112,76	222,30	309,80	214,95
		BP 2	108,30	202,05	286,60	198,98	110,12	208,54	298,03	205,56
	P2	BP 1	232,01	-	-	232,01	235,02	-	-	235,02
		BP 2	218,90	-	-	218,90	223,20	-	-	223,20
	P3	BP 1	257,82	-	-	257,82	241,30	-	-	241,30
BP 2		124,50	269,16	-	196,83	253,70	-	-	253,70	
Lebar Tie Max						257,82	Lebar Strut Max			253,70
Variasi 2	P1	BP 1	236,24	356,70	-	296,47	197,37	317,16	-	257,27
		BP 2	196,23	335,28	-	265,76	218,44	312,70	-	265,57
	P2	BP 1	284,38	-	-	284,38	229,46	-	-	229,46
		BP 2	228,60	-	-	228,60	190,70	-	-	190,70
	P3	BP 1	289,55	-	-	289,55	210,05	-	-	210,05
BP 2		246,24	-	-	246,24	185,10	-	-	185,10	
Lebar Tie Max						296,47	Lebar Strut Max			265,57

Lanjutan Tabel 4.

Portal	Pemo- delan	Bentuk Pembe- banan	Lebar <i>Tie</i> (Tarik)				Lebar <i>Strut</i> (Tekan)			
			W _{T1} (mm)	W _{T2} (mm)	W _{T3} (mm)	Rata- rata (mm)	W _{S1} (mm)	W _{S2} (mm)	W _{S3} (mm)	Rata- rata (mm)
Variasi 3	P1	BP 1	154,89	291,50	-	223,20	226,43	345,71	-	286,07
		BP 2	143,73	284,70	-	214,22	215,21	335,27	-	275,24
	P2	BP 1	213,48	-	-	213,48	259,00	-	-	259,00
		BP 2	196,25	-	-	196,25	237,03	-	-	237,03
	P3	BP 1	227,71	-	-	227,71	238,58	-	-	238,58
		BP 2	248,10	-	-	248,10	256,12	-	-	256,12
	Lebar <i>Tie</i> Max					248,10		Lebar <i>Strut</i> Max		286,07
Variasi 4	P1	BP 1	241,10	385,70	-	313,40	272,52	408,13	-	340,33
		BP 2	241,27	374,10	-	307,69	266,45	396,53	-	331,49
	P2	BP 1	287,85	-	-	287,85	288,45	-	-	288,45
		BP 2	288,11	-	-	288,11	258,36	-	-	258,36
	P3	BP 1	275,52	-	-	275,52	201,40	-	-	201,40
		BP 2	296,71	-	-	296,71	203,48	-	-	203,48
	Lebar <i>Tie</i> Max					313,40		Lebar <i>Strut</i> Max		340,33

Desain Penulangan Menggunakan Metode *Strut and Tie*

Pada bahasan ini, contoh kasus dilakukan untuk portal variasi 1 dengan mutu beton (f_c') 35 MPa dan mutu baja tulangan (f_y) 400 MPa. Lebar terkecil antara balok dan kolom (b) adalah 250 mm. Lebar *tie* (W_T) = 257,82 mm, lebar *strut* (W_S) = 253,70 mm, tegangan *tie* (σ_T) = 12,5 MPa, tegangan *strut* (σ_S) = 7 MPa, momen maksimum = 43,17 kNm, dan momen minimum = -181,42 kN.

Perhitungan Gaya Pada Rangka Batang

Gambar rangka batang pada pertemuan balok kolom *interior* ditampilkan pada Gambar 10 (a). Berdasarkan nilai tegangan *strut*, tegangan *tie*, lebar *strut*, dan lebar *tie*, gaya-gaya yang membebani pertemuan balok kolom *interior* sesuai Gambar 10 (a) dihitung sebagai berikut:

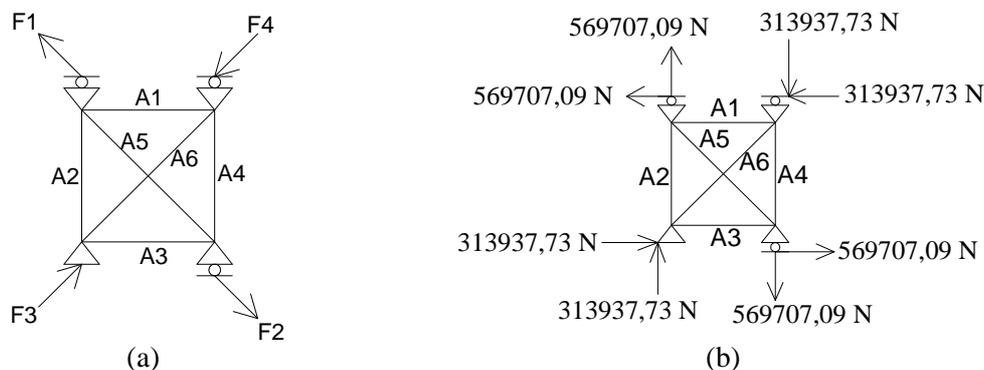
$$F_1 = F_2 = \sigma_T \times \text{Luas } tie = \sigma_T \times W_T \times b = 12,5 \text{ MPa} \times 257,82 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} = 805687,50 \text{ N}$$

$$F_3 = F_4 = \sigma_S \times \text{Luas } strut = \sigma_S \times W_S \times b = 7 \text{ MPa} \times 253,7 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} = 443975,00 \text{ N}$$

Gaya-gaya di atas perlu diuraikan ke sumbu ortogonalnya sebelum diinput ke dalam program SAP2000 (Gambar 10 (b)). Perhitungannya sebagai berikut:

$$F_1 \cos 45 = F_1 \sin 45 = F_2 \cos 45 = F_2 \sin 45 = 569707,09 \text{ N}$$

$$F_3 \cos 45 = F_3 \sin 45 = F_4 \cos 45 = F_4 \sin 45 = 313937,73 \text{ N}$$



Gambar 10. Gaya-Gaya Pada Rangka Batang Untuk Portal Variasi 1

Gaya Batang Hasil Analisa

Gaya-gaya batang hasil analisa SAP2000 untuk portal variasi 1 di atas direkap sebagai berikut :

$$A1 = 94480,72 \text{ N (tarik) ;}$$

$$A2 = 0 ;$$

$$A3 = 94480,63 \text{ N (tarik) ;}$$

$$A4 = 0 ;$$

$$A5 = 672071,58 \text{ N (tarik) ;}$$

$$A6 = -577590,91 \text{ N (tekan)}$$

$$\text{Tegangan tekan batang A6} = \frac{\text{Gaya batang A6}}{\text{Luas Strut}} = \frac{577590,91 \text{ N}}{253,7 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}} = 9,11 \text{ MPa}$$

$$0,45 \cdot f'_c = 0,45(35) = 15,75 \text{ MPa}$$

Kontrol

9,11 MPa < 15,75 MPa (Beton tidak hancur, sehingga tidak dibutuhkan tulangan tekan).

$$\text{Koefisien tulangan atas} = \frac{|\text{Momen minimum}|}{|\text{Momen minimum}| + |\text{Momen maksimum}|} = \frac{|-181,42|}{|-181,42| + |43,17|} = 0,81$$

$$\text{Koefisien tulangan bawah} = 1 - \text{koefisien tulangan atas} = 1 - 0,81 = 0,19$$

Sehingga total gaya pada bagian atas, bawah, kiri, dan kanan dihitung sebagai berikut:

$$\text{Gaya tulangan atas} = A1 + 0,81 \cdot (A5 \cdot \cos 45) = 94480,72 + 0,81(475226,37) = 479414,08 \text{ N}$$

$$\text{Gaya tulangan bawah} = A3 + 0,19 \cdot (A5 \cdot \cos 45) = 94480,63 + 0,19(475226,37) = 184773,64 \text{ N}$$

$$\text{Gaya tulangan kiri} = A2 + 0,5 \cdot (A5 \cdot \sin 45) = 0 + 0,5(475226,37) = 237613,19 \text{ N}$$

$$\text{Gaya tulangan kanan} = A4 + 0,5 \cdot (A5 \cdot \sin 45) = 0 + 0,5(475226,37) = 237613,19 \text{ N}$$

Perhitungan Luas Tulangan (A_s)

Luas tulangan pada tiap sisi dari pertemuan balok kolom *interior* dihitung sebagai berikut:

$$A_{s,atas} = \frac{\text{Gaya tulangan atas}}{\phi \cdot f_y} = \frac{479414,08 \text{ N}}{0,8 \times 400 \text{ MPa}} = 1498,17 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,bawah} = \frac{\text{Gaya tulangan bawah}}{\phi \cdot f_y} = \frac{184773,64 \text{ N}}{0,8 \times 400 \text{ MPa}} = 577,42 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,kiri} = \frac{\text{Gaya tulangan kiri}}{\phi \cdot f_y} = \frac{237613,19 \text{ N}}{0,8 \times 400 \text{ MPa}} = 742,54 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,kanan} = \frac{\text{Gaya tulangan kanan}}{\phi \cdot f_y} = \frac{237613,19 \text{ N}}{0,8 \times 400 \text{ MPa}} = 742,54 \text{ mm}^2$$

Perhitungan Jumlah Tulangan

$$\text{Luas 1 tulangan} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D^2 = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot 19^2 = 283,643 \text{ mm}^2$$

Maka, jumlah tulangan pada tiap sisi pertemuan balok kolom *interior* adalah:

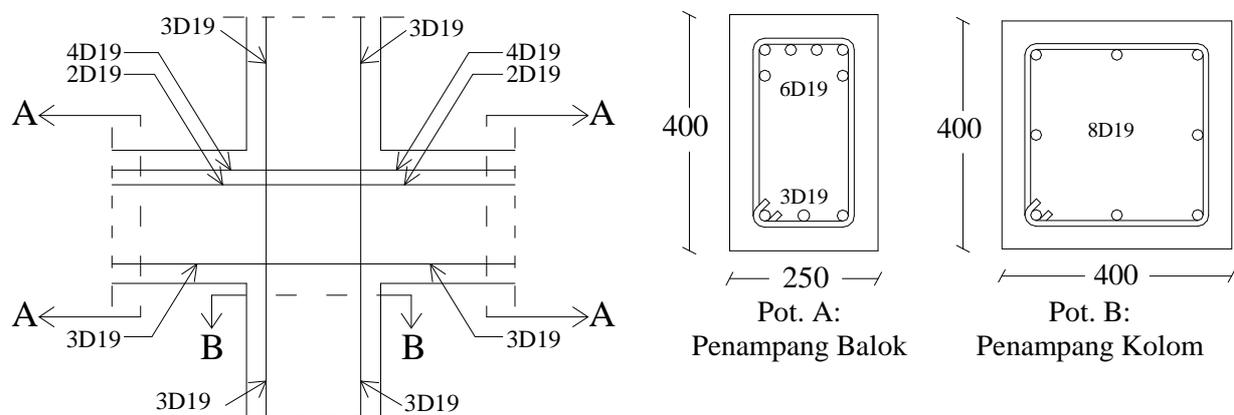
$$\text{Jumlah tulangan atas} = \frac{A_{s,atas}}{\text{Luas 1 tulangan}} = \frac{1498,17 \text{ mm}^2}{283,643 \text{ mm}^2} = 5,28 \approx 6 \text{ tulangan}$$

$$\text{Jumlah tulangan bawah} = \frac{A_{s,bawah}}{\text{Luas 1 tulangan}} = \frac{577,42 \text{ mm}^2}{283,643 \text{ mm}^2} = 2,03 \approx 3 \text{ tulangan}$$

$$\text{Jumlah tulangan kiri} = \frac{A_{s,kiri}}{\text{Luas 1 tulangan}} = \frac{742,54 \text{ mm}^2}{283,643 \text{ mm}^2} = 2,62 \approx 3 \text{ tulangan}$$

$$\text{Jumlah tulangan kanan} = \frac{A_{s,kanan}}{\text{Luas 1 tulangan}} = \frac{742,54 \text{ mm}^2}{283,643 \text{ mm}^2} = 2,62 \approx 3 \text{ tulangan}$$

Gambar konfigurasi penulangan pada pertemuan balok kolom interior berdasarkan metode *strut and tie* bisa dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Konfigurasi Penulangan Pada Pertemuan Balok Kolom Interior Untuk Portal Variasi 1 dengan $f'_c = 35 \text{ MPa}$ dan $f_y = 400 \text{ MPa}$ Berdasarkan Metode *Strut and Tie*

Dengan prosedur yang sama, dihitung jumlah tulangan untuk portal variasi 2, 3, dan 4 dengan kombinasi mutu beton (f'_c) dan mutu tulangan (f_y). Selengkapnya, jumlah tulangan berdasarkan metode *strut and tie* dan metode konvensional bisa dilihat pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Rekapitulasi Jumlah Tulangan Metode *Strut and Tie*

		Jumlah Tulangan							
		Balok kiri		Balok Kanan		Kolom Atas		Kolom Bawah	
		Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)
$f'_c = 20 \text{ MPa}$ dan $f_y = 200 \text{ MPa}$	Variasi 1	11	5	11	5	6	6	6	6
	Variasi 2	6	3	6	3	5	5	5	5
	Variasi 3	10	4	10	4	4	4	4	4
	Variasi 4	6	3	6	3	4	4	4	4
$f'_c = 20 \text{ MPa}$ dan $f_y = 400 \text{ MPa}$	Variasi 1	6	3	6	3	3	3	3	3
	Variasi 2	3	2	3	2	3	3	3	3
	Variasi 3	5	2	5	2	2	2	2	2
	Variasi 4	3	2	3	2	2	2	2	2
$f'_c = 35 \text{ MPa}$ dan $f_y = 200 \text{ MPa}$	Variasi 1	11	5	11	5	6	6	6	6
	Variasi 2	6	3	6	3	5	5	5	5
	Variasi 3	10	4	10	4	4	4	4	4
	Variasi 4	6	3	6	3	4	4	4	4
$f'_c = 35 \text{ MPa}$ dan	Variasi 1	6	3	6	3	3	3	3	3
	Variasi 2	3	2	3	2	3	3	3	3

		Jumlah Tulangan							
		Balok kiri		Balok Kanan		Kolom Atas		Kolom Bawah	
		Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)
f _y = 400 MPa	Variasi 3	5	2	5	2	2	2	2	2
	Variasi 4	3	2	3	2	2	2	2	2

Tabel 6. Rekapitulasi Jumlah Tulangan Metode Konvensional

			Jumlah Tulangan							
			Balok kiri		Balok Kanan		Kolom Atas		Kolom Bawah	
			Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Atas (D19)	Tul. Bawah (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)	Tul. Kiri (D19)	Tul. Kanan (D19)
Berdasarkan SNI 03-2847-2002	f _c ' = 20 MPa dan f _y = 200 MPa	Variasi 1	16	7	16	7	6	6	7	7
		Variasi 2	11	4	11	4	7	7	9	9
		Variasi 3	15	6	15	6	4	4	2	2
		Variasi 4	11	4	11	4	7	7	7	7
	f _c ' = 20 MPa dan f _y = 400 MPa	Variasi 1	8	5	8	5	3	3	4	4
		Variasi 2	6	2	6	2	4	4	5	5
		Variasi 3	7	4	7	4	3	3	2	2
		Variasi 4	6	2	6	2	4	4	4	4
	f _c ' = 35 MPa dan f _y = 200 MPa	Variasi 1	16	3	16	3	4	4	5	5
		Variasi 2	10	4	10	4	6	6	9	9
		Variasi 3	13	3	13	3	2	2	2	2
		Variasi 4	10	4	10	4	4	4	4	4
	f _c ' = 35 MPa dan f _y = 400 MPa	Variasi 1	8	2	8	2	3	3	3	3
		Variasi 2	5	2	5	2	3	3	5	5
		Variasi 3	7	2	7	2	2	2	2	2
		Variasi 4	5	2	5	2	3	3	3	3
Berdasarkan Park dan Paulay	f _c ' = 20 MPa dan f _y = 200 MPa	Variasi 1	13	3	13	3	6	6	6	6
		Variasi 2	9	3	9	3	7	7	8	8
		Variasi 3	13	3	13	3	5	5	2	2
		Variasi 4	9	3	9	3	6	6	5	5
	f _c ' = 20 MPa dan f _y = 400 MPa	Variasi 1	7	2	7	2	3	3	4	4
		Variasi 2	5	2	5	2	4	4	5	5
		Variasi 3	6	2	6	2	3	3	2	2
		Variasi 4	5	2	5	2	3	3	3	3
	f _c ' = 35 MPa dan f _y = 200 MPa	Variasi 1	13	3	13	3	6	6	5	5
		Variasi 2	9	3	9	3	6	6	8	8
		Variasi 3	12	3	12	3	4	4	2	2
		Variasi 4	9	3	9	3	6	6	5	5
	f _c ' = 35 MPa dan f _y = 400 MPa	Variasi 1	7	2	7	2	3	3	3	3
		Variasi 2	5	2	5	2	3	3	4	4
		Variasi 3	6	2	6	2	3	3	2	2
		Variasi 4	5	2	5	2	3	3	3	3

Besarnya persentase perbedaan jumlah tulangan (P) berdasarkan metode *strut and tie* terhadap metode konvensional (SNI 03-2847-2002) pada portal variasi 1 dengan mutu beton (f_c') 35 MPa dan mutu baja tulangan (f_y) 400 MPa dihitung sebagai berikut:

$$P_{\text{Tulangan atas balok}} = \frac{n_{\text{strut and tie}} - n_{\text{konvensional}}}{n_{\text{konvensional}}} \times 100\% = \frac{6-8}{8} \times 100\% = -25\%$$

$$P_{\text{Tulangan bawah balok}} = \frac{n_{\text{strut and tie}} - n_{\text{konvensional}}}{n_{\text{konvensional}}} \times 100\% = \frac{3-2}{2} \times 100\% = 50\%$$

$$P_{\text{Tulangan kiri kolom}} = \frac{n_{\text{strut and tie}} - n_{\text{konvensional}}}{n_{\text{konvensional}}} \times 100\% = \frac{3 - 3}{3} \times 100\% = 0\%$$

$$P_{\text{Tulangan kanan kolom}} = \frac{n_{\text{strut and tie}} - n_{\text{konvensional}}}{n_{\text{konvensional}}} \times 100\% = \frac{3 - 3}{3} \times 100\% = 0\%$$

Pada perhitungan di atas, tulangan balok bagian atas memiliki persentase negatif (lebih hemat dibanding metode konvensional). Sedangkan tulangan balok bagian bawah memiliki persentase yang positif (lebih boros dibanding metode konvensional SNI 03-2847-2002). Persentase perbedaan jumlah tulangan pada variasi portal yang lain direkap pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi Persentase Perbedaan Jumlah Tulangan Metode Strut and Tie Terhadap Metode Konvensional

		Terhadap SNI 03-2847-2002					Terhadap Park dan Paulay				
		Balok		Kolom		Rata-rata	Balok		Kolom		Rata-rata
		Tul. Atas	Tul. Bawah	Tul. Kiri	Tul. Kanan		Tul. Atas	Tul. Bawah	Tul. Kiri	Tul. Kanan	
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
$f_c' = 20$ MPa dan $f_y = 200$ MPa	Variasi 1	-31,25	-28,57	-14,29	-14,29	-22,10	-15,38	66,67	0,00	0,00	12,82
	Variasi 2	-45,45	-25,00	-44,44	-44,44	-39,84	-33,33	0,00	-37,50	-37,50	-27,08
$f_c' = 20$ MPa dan $f_y = 400$ MPa	Variasi 3	-33,33	-33,33	100,00	100,00	33,33	-23,08	33,33	100,00	100,00	52,56
	Variasi 4	-45,45	-25,00	-42,86	-42,86	-39,04	-33,33	0,00	-20,00	-20,00	-18,33
$f_c' = 35$ MPa dan $f_y = 200$ MPa	Variasi 1	-25,00	-40,00	-25,00	-25,00	-28,75	-14,29	50,00	-25,00	-25,00	-3,57
	Variasi 2	-50,00	0,00	-40,00	-40,00	-32,50	-40,00	0,00	-40,00	-40,00	-30,00
$f_c' = 35$ MPa dan $f_y = 400$ MPa	Variasi 3	-28,57	-50,00	0,00	0,00	-19,64	-16,67	0,00	0,00	0,00	-4,17
	Variasi 4	-50,00	0,00	-50,00	-50,00	-37,50	-40,00	0,00	-33,33	-33,33	-26,67
$f_c' = 20$ MPa dan $f_y = 200$ MPa	Variasi 1	-31,25	66,67	20,00	20,00	18,85	-15,38	66,67	20,00	20,00	22,82
	Variasi 2	-40,00	-25,00	-44,44	-44,44	-38,47	-33,33	0,00	-37,50	-37,50	-27,08
$f_c' = 20$ MPa dan $f_y = 400$ MPa	Variasi 3	-23,08	33,33	100,00	100,00	52,56	-16,67	33,33	100,00	100,00	54,17
	Variasi 4	-40,00	-25,00	0,00	0,00	-16,25	-33,33	0,00	-20,00	-20,00	-18,33
$f_c' = 35$ MPa dan $f_y = 200$ MPa	Variasi 1	-25,00	50,00	0,00	0,00	6,25	-14,29	50,00	0,00	0,00	8,93
	Variasi 2	-40,00	0,00	-40,00	-40,00	-30,00	-40,00	0,00	-25,00	-25,00	-22,50
$f_c' = 35$ MPa dan $f_y = 400$ MPa	Variasi 3	-28,57	0,00	0,00	0,00	-7,14	-16,67	0,00	0,00	0,00	-4,17
	Variasi 4	-40,00	0,00	-33,33	-33,33	-26,67	-40,00	0,00	-33,33	-33,33	-26,67
Persentase Rata-Rata						-14,18	Persentase Rata-Rata				-3,58

Jumlah tulangan metode *strut and tie* memiliki persentase negatif terhadap metode SNI 03-2847-2002 serta Park dan Paulay. Dari perhitungan persentase di atas, dapat diketahui persentase jumlah tulangan metode *strut and tie* terhadap SNI 03-2847-2002 adalah sebesar -14,18% dan terhadap Park dan Paulay sebesar -3,58%. Sehingga dapat disimpulkan bahwa jumlah tulangan berdasarkan metode *strut and tie* lebih hemat dibanding metode konvensional.

PENUTUP

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisa yang sudah dibahas pada bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Trajektori tegangan pada pertemuan balok kolom *interior* memiliki bentuk yang menyilang antara trajektori tekan dan trajektori tarik.
2. Perhitungan dengan metode *Strut and Tie* pada pertemuan balok kolom *interior* mendapatkan jumlah tulangan yang lebih sedikit dibanding metode konvensional dengan persentase perbedaan secara keseluruhan terhadap metode SNI 03-2847-2002 sebesar 14,18%, sedangkan terhadap metode R. Park dan T. Paulay sebesar 3,58%.

Saran

Beberapa saran yang terkait penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lanjutan pada daerah struktur selain pertemuan balok kolom *interior* yang masih termasuk ke dalam *D-region* menggunakan metode *Strut and Tie* agar pengetahuan tentang metode *Strut and Tie* semakin berkembang.
2. Pada pertemuan balok kolom *interior*, bentuk trajektori tegangan berbentuk menyilang atau diagonal. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan tentang perkuatan pada pertemuan balok kolom *interior* dengan penulangan secara diagonal atau perkuatan eksternal.
3. Dalam mencari bentuk trajektori tegangan, bisa digunakan *software* lain seperti ETABS, ABAQUS, maupun ANSYS.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318. 2002. **Building Code Requirements For Structural Concrete (ACI-318-02) and Commentary (ACI 318R-02)**. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- Asroni, A. 2010. **Balok Dan Pelat Beton Bertulang**. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Asroni, A. 2010. **Kolom Fondasi & Balok T Beton Bertulang**. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Hardjasaputra, H., dan Tumilar, S. 2002. **Model Penunjang dan Pengikat (Strut – And – Tie Model) Pada Perancangan Struktur Beton**. Jakarta: Universitas Pelita Harapan – Press.
- Kusumo, T. 2012. **Studi Analisis Pertemuan Balok Kolom Berbentuk T Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Pemodelan Strut And Tie**. Bandung: Universitas Kristen Maranatha.
- Nasution, P. M. H. 2014. **Analisa dan Perencanaan Balok Tinggi Dengan Variasi Perletakan Menggunakan Metode Strut and Tie**. Jurnal Teknik Sipil USU (Volume 3, No 3, 2014), 2.
- Park, K., dan Paulay, T. 1974. **Reinforced Concrete Structures**. Christchurch: University of Canterbury.
- Riyadi, B. P. 2010. **Analisis Pertemuan Balok – Kolom Struktur Rangka Beton Bertulang Menggunakan Metode Strut And Tie**. Bandung: Universitas Kristen Maranatha.
- Wight, J. K., dan MacGregor, J. G. 2012. **Reinforced Concrete Mechanics & Design (6th ed)**. New Jersey: Pearson Education Inc

