

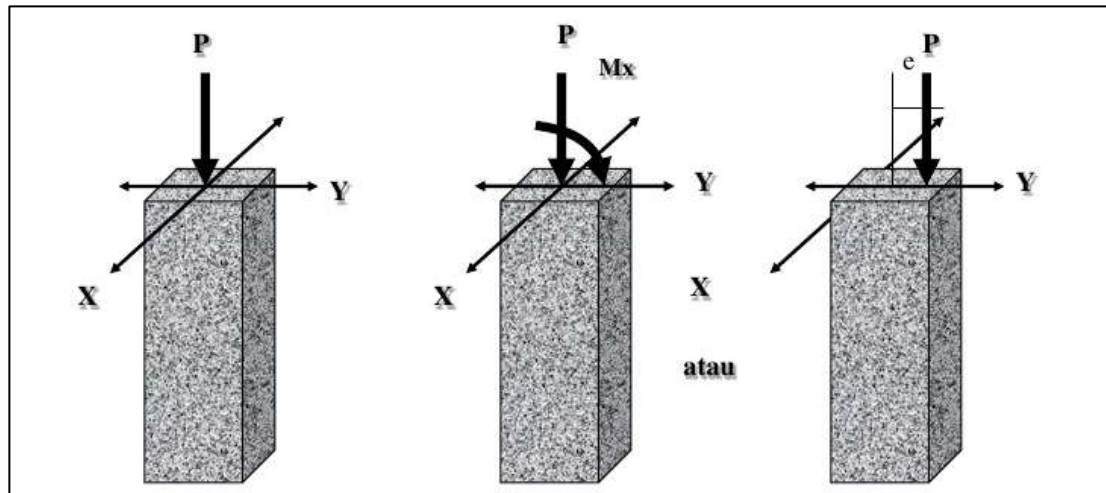
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kolom

Secara sederhana yang dimaksud dengan kolom yakni bagian dari rangka bangunan dan memegang peranan penting dalam struktur bangunan. Gagalnya suatu kolom dapat menyebabkan keruntuhan komponen lain yang terkait, dan bahkan menyebabkan keruntuhan total seluruh struktur bangunan (Dipohusudo, 1999). Kolom memindahkan beban dari atas ke bawah hingga mencapai tanah melalui pondasi. Sehingga semakin bawah, beban yang dipikul oleh kolom akan semakin besar pula.

Dari segi posisi pembebanan kolom dibedakan menjadi tiga jenis, yaitu kolom dengan pembebanan sentris, eksentris uniaxial (hanya pada satu sumbu), dan eksentris biaxial (berada di dua sumbu). Beban sentris merupakan beban aksial yang berposisi tepat di titik berat penampang kolom sehingga beban yang dipikul oleh struktur kolom hanyalah beban tekan saja. Sementara beban eksentris merupakan beban yang berposisi tidak tepat di titik berat penampang kolom sehingga terdapat beban momen yang akan dipikul oleh struktur kolom tersebut. Pada kondisi sebenarnya, pembebanan sentris hampir tidak mungkin untuk dilakukan mengingat sulitnya menjaga ketelitian posisi pada pelaksanaan pekerjaan. Pada **Gambar 2.2** menunjukkan contoh posisi pembebanan sentris (paling kiri), perletakan eksentris awal (paling kanan), dan perletakan eksentris setelah dikonversikan menjadi beban momen (tengah).



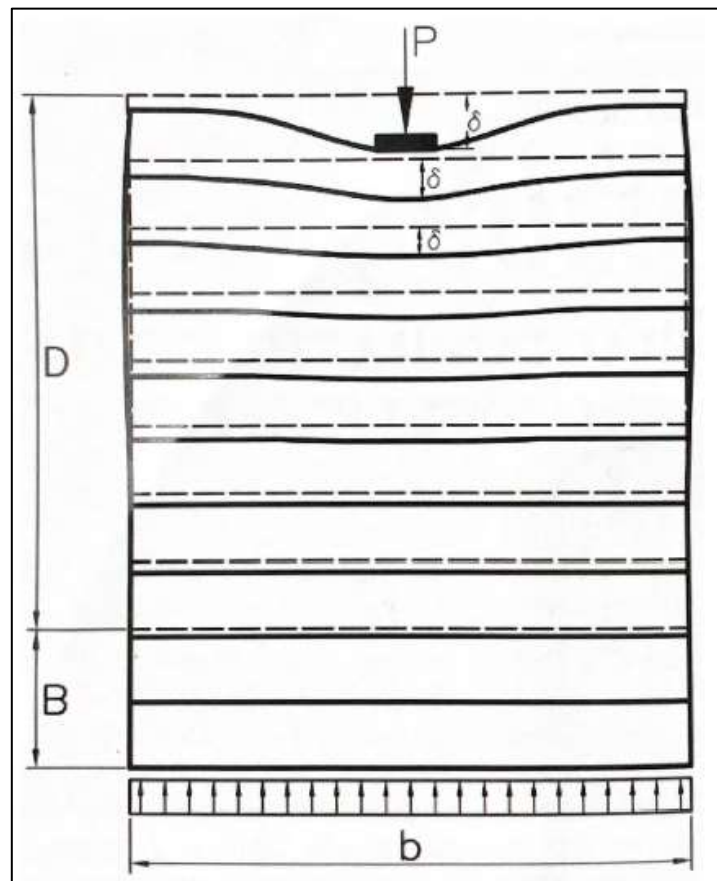
Gambar 2.1 Kolom Konsentris dan Kolom Eksentris
(Sahnihilhami, 2011)

2.2 Daerah B dan Daerah D

Schlaich, dkk (1987) menyimpulkan bahwa sebagai dasar untuk perancangan elemen, struktur bisa dibedakan menjadi dua daerah. Daerah dengan hipotesis Bernoulli berlaku, yaitu daerah dengan distribusi regangan bersifat linier, dinamakan sebagai B-Region (B adalah singkatan dari Bernoulli). Sedangkan untuk daerah di mana distribusi regangan bersifat nonlinier dinamakan sebagai D Region (D adalah singkatan dari discontinuity, disturbance, disturbed). Pada D Region (daerah-D) ini ditandai dengan adanya diskontinuitas yang disebabkan karena adanya perubahan geometri, statika, ataupun kombinasi dari keduanya. Untuk itu, pada tahap awal perancangan seluruh bagian struktur perlu dilakukan pembagian dalam dua daerah, yaitu sebagai daerah-B dan daerah-D. Pada struktur beton, pada daerah-B dikenal dimana hipotesis Bernoulli berlaku, sehingga perencana dapat memberikan rencana penulangan berdasarkan standar penulangan yang sudah tersedia, dimana perhitungan penulangan memang didasarkan pada kondisi hipotesis Bernoulli berlaku. Sebaliknya pada daerah-D di mana terjadi adanya diskontinuitas pada bagian struktur maka di daerah tersebut hipotesis Bernoulli tidak berlaku. Untuk itulah dikatakan pada daerah-

D beton struktural harus direncanakan dengan cara tersendiri, yaitu menggunakan *strut-and-tie model* (model strut dan pengikat).

Guna memahami perbedaan daerah D dan B secara fisik, kita dapat memerhatikan perbedaan perubahan deformasi atau bentuk pada daerah sekitar terjadinya diskontinuitas dibandingkan dengan daerah yang jauh dari tempat terjadinya diskontinuitas tersebut. Sebagai contoh pada **Gambar 2.2** bagaimana pola deformasi kolom pendek yang memiliki lebar b yang diberikan pembebanan beban terpusat P .



Gambar 2.2 Deformasi struktur dinding yang dibebani beban terpusat P
(Hardjasaputra, 2016)

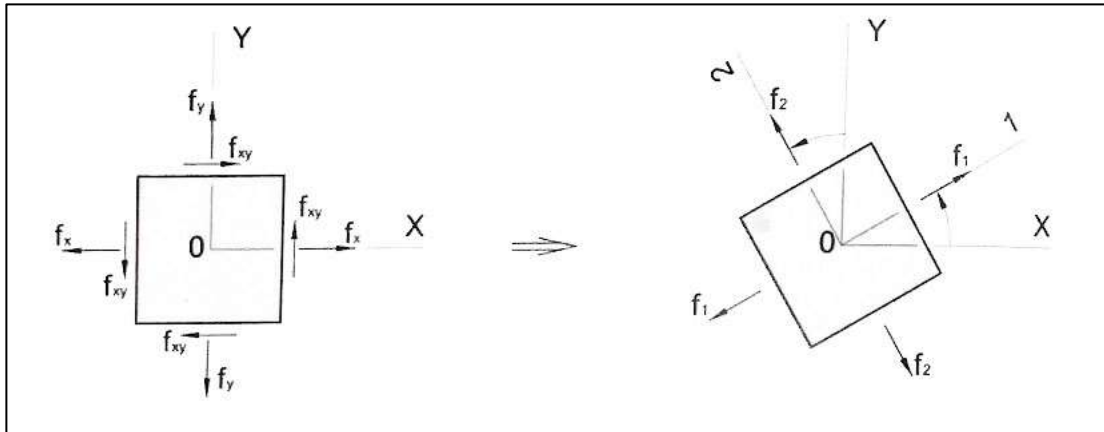
Pada **Gambar 2.2** memperlihatkan deformasi yang terjadi pada dinding akibat beban terpusat P. Pada daerah sekitar beban P terjadi deformasi yang tidak merata, deformasi terbesar terjadi pada daerah yang langsung dan dekat di bawah beban P. Maka pada daerah tersebut disimpulkan hipotesis Bernoulli tidak berlaku, karena keadaan penampang akibat beban P tersebut tidak rata.

Hardjasaputra dan Steffie (2016) menyebutkan bahwa daerah-D pada dasarnya dapat dibedakan dalam 3 tipe, yaitu:

- a. Daerah-D yang disebabkan adanya beban terpusat P pada bagian struktur, dinamakan daerah-D dengan diskontinuitas statik.
- b. Daerah-D yang disebabkan adanya perubahan geometri pada bagian struktur, dinamakan daerah-D dengan diskontinuitas geometri, misal daerah pertemuan balok kolom, adanya bukaan, pertemuan kolom dan pile cap, dll.
- c. Daerah-D yang disebabkan oleh diskontinuitas geometri maupun statik pada bagian struktur. Umumnya tipe ini adalah yang terbanyak dijumpai pada struktur.

2.3 Trajektori Tegangan Utama

Hardjasaputra (2016) menyatakan keadaan tegangan pada bidang x,y (*planestress*) seperti pada **Gambar 2.3**, dapat dibagi dalam tegangan f_x , f_y , dan f_{xy} (tegangan geser). Dari kondisi tegangan ini, dapat dicari tegangan utama (*principal stress*) bidang, disebut juga dengan tegangan utama f_1 dan f_2 , yang membentuk sudut θ terhadap sumbu x , dengan $f_{xy} = 0$.



Gambar 2.3 Kondisi tegangan pada bidang x,y
(Hardjasaputra, 2016)

Adapun rumus-rumus transformasi untuk mencari tegangan utama f_1 dan f_2 berikut arahnya yang membentuk sudut θ bisa ditemukan dengan persamaan berikut:

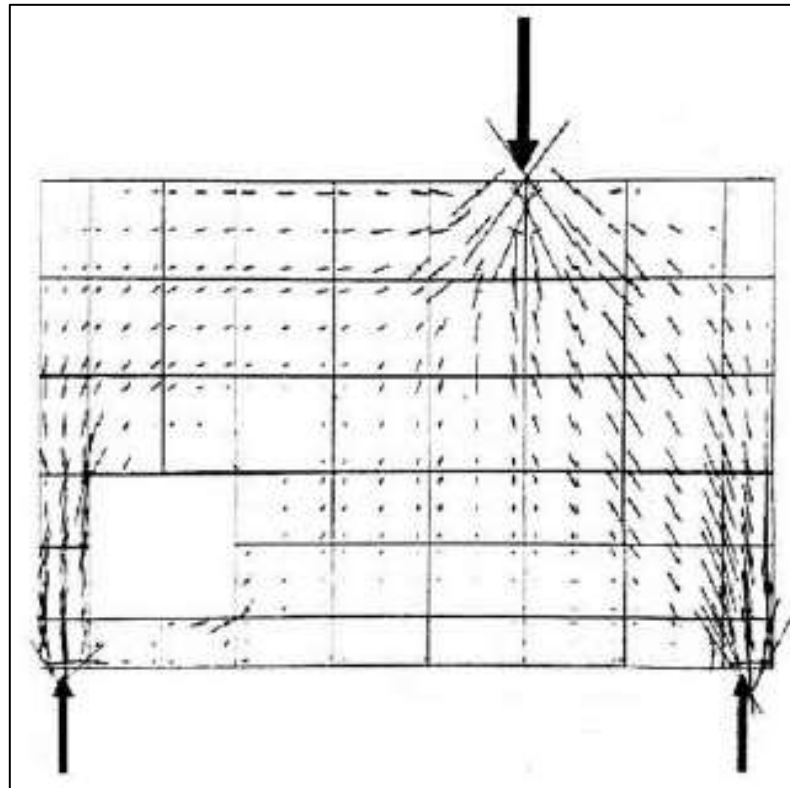
$$f_{1,2} = \frac{f_x + f_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{f_x - f_y}{2}\right)^2 + f_{xy}^2} \quad (2.1)$$

$$\tan 2\theta_p = \frac{2f_{xy}}{f_x - f_y} \quad (2.2)$$

Apabila keadaan tegangan utama ini dapat digambarkan pada seluruh bidang struktur dalam kondisi elastis, maka akan diperoleh Gambaran suatu kelompok tegangan utama yang bekerja sebagai *compression field* (medan tekan) dan *tension field* (medan tarik) elastis.

Berdasarkan Gambaran penyebaran tegangan utama pada struktur yang terlihat pada **Gambar 2.4** dapat dijelaskan bahwa daerah-daerah dimana terjadi seperti pada lokasi beban terpusat bekerja, perubahan geometri bidang struktur seperti lubang, dan lain-lain. Melalui Gambaran ini perencana beton struktural dapat mengerti dan menaruh perhatian yang intensif untuk penempatan dan perhitungan penulangannya. Tetapi untuk dapat mengerti secara kualitatif tentang alur gaya atau mekanisme transfer

gaya dari aksi sampai ke reaksinya, garis trajektori tegangan utama yang dapat membantu Gambaran tersebut. (Leonhard & Moning, 1973).



Gambar 2.4 Contoh Pola Tegangan Utama Berdasarkan Hasil Finite Element Analysis untuk Struktur Dinding dengan Bukaan yang Dibebani Beban Terpusat (Schlaich, et al., 1987)

Garis “tempat kedudukan” titik-titik dari *principal stress* (tegangan utama) dengan kesamaan nilai (aljabar) mencakup garis trajektori tarik serta garis trajektori tekan adalah definisi dari garis trajektori. Beberapa garis trajektori memperlihatkan arah tegangan utama di masing-masing titik yang dilihat. Sehingga, bisa disebutkan bahwa trajektori tegangan utama yakni sekumpulan beberapa garis kedudukan dari titik dengan tegangan utama yang memiliki suatu nilai.

Dalam ilmu struktur, garis trajektori tegangan dapat diaplikasikan juga sebagai Gambaran mengenai alur gaya yang paling optimal yang terjadi pada struktur dalam memikul beban.

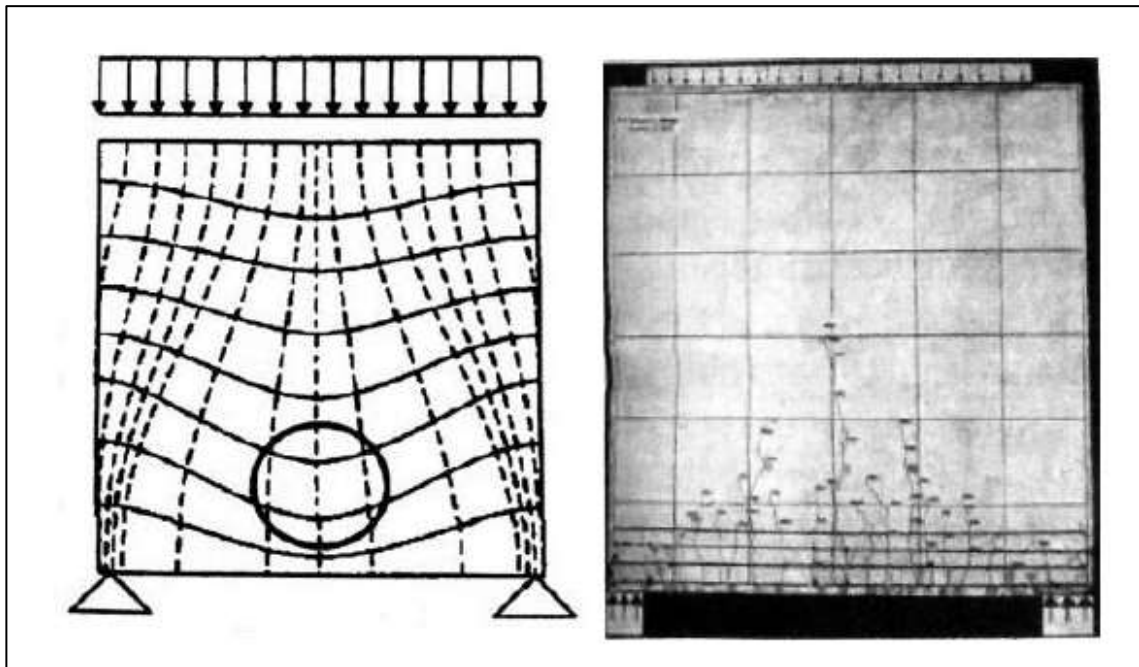
Trajektori tegangan memiliki beberapa karakteristik penting yaitu:

- a. Pada setiap titik terdapat trajektori tarik dan trajektori tekan yang saling tegak lurus.
- b. Ada suatu keluarga trajektori tarik dan keluarga trajektori tekan dalam komponen struktur yang dibebani, serta dua keluarga trajektori ini ialah orthogonal. Hal tersebut dikarenakan tegangan utama tarik dan tekanan udara tekan dalam suatu titik yang saling tegak lurus arahnya, sehingga keluarga trajektori tarik dan keluarga trajektori tekan menghasilkan sebuah sistem yang *orthogonal*.
- c. Trajektori tarik dan trajektori tekan berakhir dengan sudut 90° pada sisi tepi.
- d. Pada setiap titik di garis netral arah trajektori-trajektori ialah 45° .
- e. Nilai tekanan utama akan lebih besar bila jarak antara trajektori-trajektori lebih dekat.
- f. Trajektori tegangan pada daerah B daripada daerah D (*turbulent*) jauh lebih teratur (*smooth*).

2.4 Trajektori Tegangan Utama dan Pola Retak pada Beton

Metode *strut and tie* dalam penggunaannya perlu didorong oleh pengertian medan tegangan utama dimana ini berdasarkan teori plastisitas selanjutnya digunakan pada perancangan model struktur. Struktur beton tidak termasuk bahan yang elastis linear homogen dan sempurna sebab adanya perbedaan kuat tekan beton terhadap kuat tariknya yang besar. Karena kuat tarik beton lemah, maka beton akan mengalami keretakan terlebih dahulu, mengikuti besarnya tegangan utama Tarik yang terjadi. Pola retak yang terjadi pada uji beban pada

kedua balok tinggi pada **Gambar 2.5** memperlihatkan bahwa pola retak yang terjadi akan mengikuti atau berorientasi pada garis trajektori tegangan utama tekan. Hal ini terjadi tegak lurus dari trajektori tekan bekerja tegangan utama tarik, yang menyebabkan retak pada beton.



Gambar 2.5 Pola retak beton yang mengikuti pola garis dari Trajektori Tekan
(Leonhard & Moning, 1973)

Dalam keadaan retak, ketika tegangan tarik pada beton pada retak berubah dari nol menjadi maksimum pada retak, tegangan tersebut mendistribusikan kembali, sehingga struktur beton mengalami perubahan kekakuan struktural. Namun, hasil eksperimen dan penelitian memperlihatkan hasil bahwa masih cukup konservatif model struktur beton dengan berdasar pada teori plastisitas dari trajektori tegangan, dimana hal tersebut juga disebabkan oleh kekuatan ikatan beton yang sangat rendah di bawah tarik dibandingkan dengan kekuatannya.

Mitchell dan Cook (1988) menyarankan penggunaan *nonlinier-finite-element*, untuk mendapatkan trajektori tegangan dan distribusi yang akurat. Pavlovich dan

Kotsovos (1995) memaparkan analisis elemen hingga (*finite-element*) dari desain batas struktur beton (*limitstate design*), namun pada praktiknya tidak sedikit pedoman untuk distribusi serta trajektori tegangan utama, sebab dinilai cenderung praktis dan tidak harus dari perspektif yang lebih konservatif. Selain itu, *software* komputer untuk struktur beton nonlinier dalam aplikasi praktis masih sangat terbatas. Maka dari hal tersebut, pembahasan berikut masih brdasarkan distribusi tegangan dan trajektori, yakni mengacu struktur elastis beton, serta kemudian perhitungan berdasarkan teori plastisitas.

2.5 Metode *Strut and Tie*

Ritter (1899) dan Morsch (1902) merupakan orang yang pertama kali memperkenalkan metode *strut and tie* ini yang termasuk konsep analogi dari rangka batang. Pada struktur balok beton bertulang, terlihat pola retak yang terjadi dikarenakan adanya beban P, Morsch menjelaskan *load path* (aliran gaya) untuk memindahkan beban P ke tumpuan, dimana ini terjadi dalam *cracked condition* (keadaan retak) pada struktur beton bertulang.

Untuk mendesain struktur beton pada daerah-D melalui pemanfaatan metode *Strut and tie* diperlukan beberapa tahapan analisis yang secara umum dapat dikelompokkan menjadi:

1. Pemodelan Struktur, yaitu pembuatan *strut and tie model* sesuai keadaan aktual struktur.
2. Optimasi Model, yaitu memilih *strut and tie model* yang paling baik berdasarkan kriteria optimasi dari beberapa model yang diusulkan.
3. Penentuan dimensi komponen-komponen *strut and tie model* menurut keadaan batas struktur dan kriteria kekuatan batas yang disyaratkan.
4. Desain tulangan yang dibutuhkan berdasarkan prinsip kesetimbangan dan pembuatan detailnya.

Berdasarkan analisis elastik, seperti analisis elemen hingga, kontur tegangan pada daerah D dalam kondisi belum retak dapat diturunkan. Tegangan yang dihasilkan yaitu tegangan utama atau tegangan normal. Kontur tegangan kemudian dibuat dengan mengkaitkan daerah yang sama nilai tegangan utamanya. Menurut kontur tegangan, terjadinya aliran tegangan bisa ditetapkan. Selanjutnya Aliran tegangan tersebut kemudian dinamakan trajektori tegangan. Dari trajektori tegangan, bisa diperoleh dua informasi yakni; jenis trajektori tegangan yaitu arah aliran tegangan, trajektori tegangan tarik serta trajektori tegangan tekan. Penentuan trajektori tegangan ini diperlukan dalam proses pemodelan *strut dan tie*, terutama untuk trajektori tegangan tekan, yang akan memberikan arah dalam pemodelan strut. Metode *strut and tie* menganalogikan terjadinya aliran gaya di suatu elemen struktur dengan menggunakan elemen rangka batang atau *Truss*. Elemen rangka batang ini berwujud elemen struktur yang sebatas dapat menerima gaya aksial. Selanjutnya ada yang disebut *strut* dan *tie*, dimana *strut* ialah batang yang menerima gaya aksial tekan serta *tie* ialah gaua aksial tarik. Serta antara batang tersebut memiliki titik pertemuan yang dinamakan dengan *nodal*. (Imran & Hendrik, 2014)

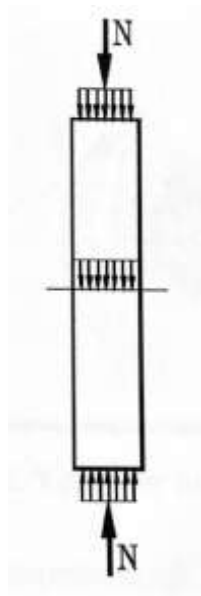
Dalam SNI 2847-2019 pasal 23 dijelaskan proses desain menggunakan metode *strut-and-tie* model meliputi tahapan yaitu:

- 1) “Mencari serta memisahkan masing-masing daerah D;
- 2) Masing-masing batas daerah D dihitung gaya resultannya;
- 3) Menentukan model serta melakukan penghitungan kekuatan dalam *strut* dan *tie* untuk memindahkan gaya resultan melintasi daerah D. Kira-kira pemilihan sumbu *strut* dan *tie* berhimpit dengan sumbu medan tarik dan tekan.
- 4) Merancang zona *nodal*, *tie*, dan *strut* sehingga mereka tidak cukup mempunyai kekuatan. Penentuan lebar zona *nodal* dan *strut* melalui pertimbangan kekuatan beton efektif yang dijelaskan pada pasal 23.4.3 dan pasal 23.9.2. pemberian tulangan dengan tujuan mengikat dengan memperhatikan kekuatan baja yang

ditetapkan pada pasal 23.7.2. peletakan tulangan wajib di luar atau di dalam zona *nodal*.”

2.5.1 Elemen *Strut*

Dimensi batang tekan dengan gambaran yang lebih realistis sesuai dengan keadaan tegangannya. Beton yang dibebani akan mempengaruhi distribusi gaya tekan, sehingga ketika menghitung *strut* yang dimaksud, kuat tekan beton serta ukuran *strut* adalah faktor yang krusial. Kolom yang dibebani normal adalah sebagai suatu contoh batang tekan yang sederhana seperti pada **Gambar 2.6** dimana tegangan tekan dapat terdistribusi merata hampir pada seluruh penampang kolom.

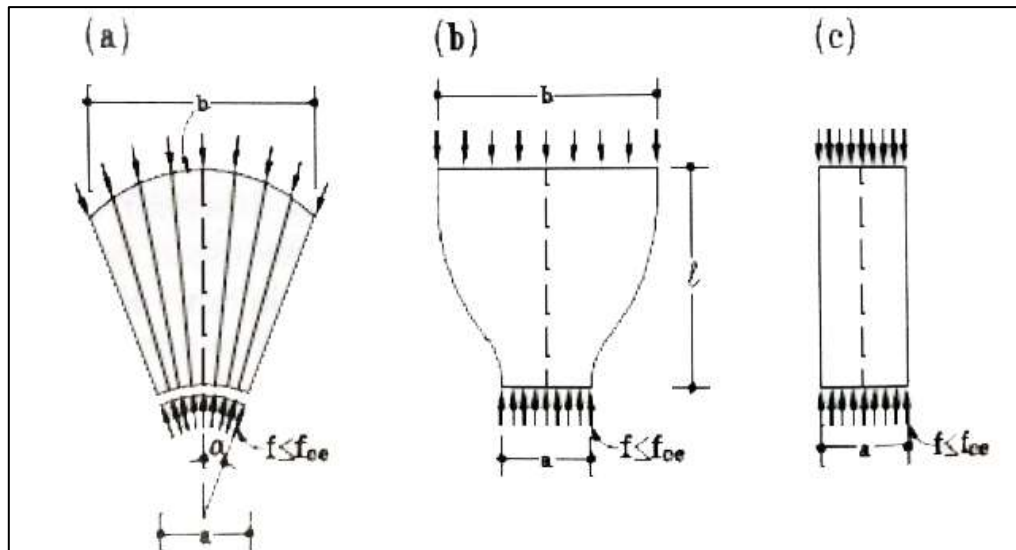


Gambar 2.6 Distribusi beban normal pada struktur kolom

(Hardjasaputra, 2016)

Pada umumnya dalam pemeriksaan kekuatan batang *strut* digunakan bentuk prisma, sebagai bentuk yang sederhana dimana lebar batang adalah konstan. Bentuk botol pada *strut* dimana *strut* melebar ataupun mengecil sepanjang batang *strut*,

digunakan bila pada batang *strut* tersebut diperlukan adanya pemasangan tulangan tarik. Pada **Gambar 2.7** memperlihatkan tipe-tipe dari bentuk *strut*.



Gambar 2.7 Tiga tipe dari bentuk strut, kipas, botol dan prisma
(Schlaich dkk. 1987)

Syarat kekuatan strut pada SNI 2847-2019 pada pasal 23.3 menyatakan desain *strut*, *tie* dan *nodal zone* harus didasarkan kepada:

$$\phi F_n \geq F_u \quad (2.3)$$

F_u merupakan gaya terfaktor yang bekerja pada *nodal* (satu muka daerah titik hubung), atau dalam *strut* dan *tie*; dan Φ ditetapkan dalam pasal 21.2 yakni bernilai 0.75 yang merupakan faktor reduksi untuk kekuatan *strut*, *tie*, dan *nodal zone*. Kekuatan tekan strut tanpa tulangan longitudinal, F_{ns} dicari melalui:

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} \quad (2.4)$$

Kekuatan tekan strut dengan tulangan longitudinal, F_{ns} dicari melalui:

$$F_{ns} = f_{ce} \cdot A_{cs} + A_s' \cdot F_s' \quad (2.5)$$

Pada kedua ujung *strut*, di mana f_{ce} pada satu ujung *strut* adalah luas penampang, serta f_{ce} dibandingkan (a) dan (b) lebih kecil:

- a) Kekuatan efektif beton pada strut yang diberikan pada pasal 23.4.3
- b) Kekuatan tekan efektif pada daerah nodal (titik hubung) yang diberikan pada pasal 23.4.4

Pada pasal 23.4.3, kekuatan tekan efektif beton pada strut harus diambil sebesar:

$$f_{ce} = 0.85\beta_s f_c' \quad (2.6)$$

β_s adalah faktor yang ditentukan sesuai dengan bentuk strut yang diambil pada perhitungan kekuatan. Faktor β_s yang diambil sesuai data di bawah ini:

Tabel 2.1 Koefisien Strut β_s

Geometri dan lokasi <i>strut</i>	Tulangan melewati <i>strut</i>	β_s	
<i>Strut</i> yang memiliki luas penampang seragam pada pada semua panjangnya	NA	1,0	(a)
Letak <i>strut</i> di area sebuah komponene di mana letak lebar beton pada tengah panjang <i>strut</i> arahnya bisa melebar lateral (<i>strut</i> Memiliki bentui botol)	Memenuhi	0,75	(b)
	Tidak memenuhi	0,60 λ	(c)
Letak <i>strut</i> di daerah tarik komponen struktur atau di komponen struktur tarik NA	NA	0,40	(d)
Kasus yang lainnya	NA	0,60 λ	(e)

(Sumber : SNI 2847:2019)

2.5.2 Elemen *Tie*

Komponen paling penting dari model *strut and tie* yang kedua yaitu *tie* (komponen Tarik). Gaya tarik dari *tie* akan menghancurkan area nodal (*nodal zone*). Sangat penting untuk pengukuran *tie* di area nodal agar *tie* dapat mencapai batas

elastisnya (Patria, 2017). Pada metode *strut and tie*, batang tarik digambarkan hanya sebagai garis lurus. Tetapi batang tarik pada struktur beton berwujud kumpulan atau satu baja tulangan biasa atau bisa pula berbentuk kumpulan atau satu tendon prategang yang di jangkar secara baik. Dalam SNI beton secara spesifik diatur hal-hal yang harus diperhatikan dalam pengaturan posisi tulangan sebagai berikut:

- a) Titik berat tulangan atau gabungan beberapa tulangan pada pengikat dalam metode *strut and tie* harus berimpit dengan sumbu pengikat.
- b) Tulangan pengikat harus diangkur menggunakan penyaluran batang tulangan, kait standar, ataupun perangkat mekanis.
- c) Pada daerah titik penghubung tulangan pengikat harus didesain agar pengikat dapat terjamin mengembangkan kekuatannya untuk menyalurkan gaya tarik dari sisi satu ke sisi lainnya

Dalam SNI 2847-2019 pasal 23.7.2, pengambilan besar kekuatan nominal pengikat F_{nt} melalui:

$$F_{nt} = A_{ts} \cdot f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (2.7)$$

dimana $(f_{se} + \Delta f_p)$ dilarang melampaui f_{py} serta A_{tp} pada komponen struktur bukan prategang adalah nol.

Pengambilan Δf_p untuk tulangan prategang dengan lekatan diperbolehkan 420 MPa serta 70 MPa untuk tulangan prategang tanpa lekatan. Δf_p dengan nilai yang melebihi diperbolehkan untuk diambil bila dibuktikan berdasarkan analisis.

Catatan:

A_{ts} = luas tulangan baja biasa

A_{tp} = luas tendon baja prategang

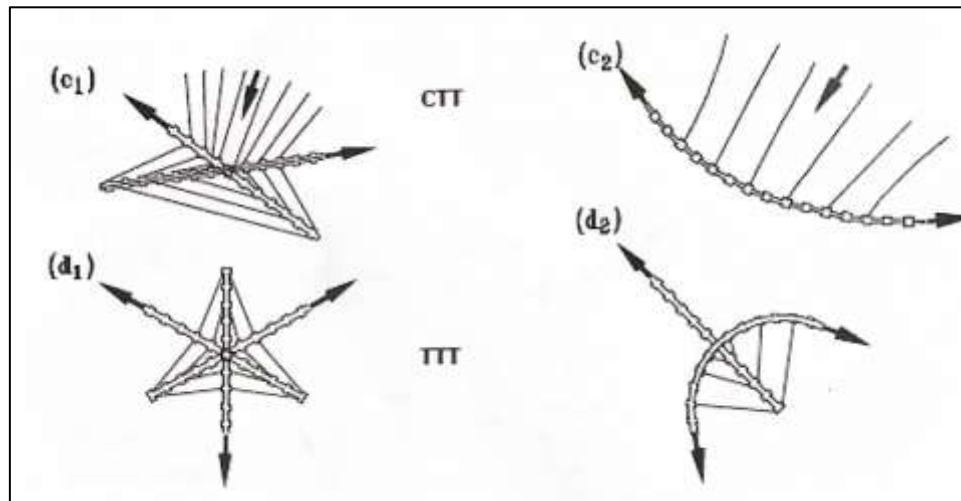
f_y = kuat leleh baja tulangan biasa

f_{py} = kuat tarik tendon prategang

2.5.3 Elemen Nodal Zone

Secara sederhana yang dimaksud dengan nodal adalah titik pertemuan atau titik tangkap dari tiga atau lebih gaya batang dari strat, pengikat, beban terpusat, rekasi tumpuan dengan beragam varian. Sambungan pertemuan umumnya bisa dibedakan menjadi empat jenis, yakni:

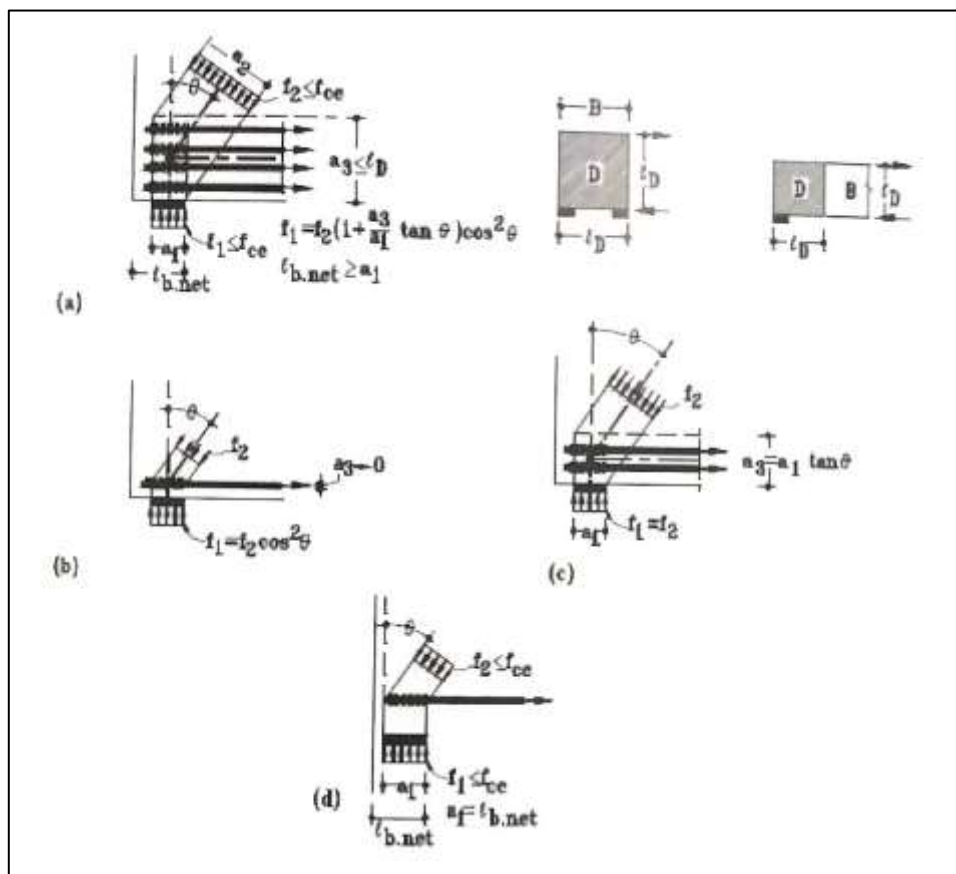
- CCC-nodal maknanya pada nodal tersebut terdapat tiga gaya tekan (strat) yang bertemu.
- CCT-nodal, maknanya pada nodal tersebut terdapat satu gaya tarik (lengikap) dan dua gaya tekan (strat) yang bertemu.
- CTT-nodal, maknanya pada nodal tersebut terdapat dua gaya tarik (pengikat) dan satu gaya tekan (strat) yang bertemu.
- TTT-nodal, maknanya pada nodal tersebut terdapat tiga gaya Tarik (pengikat) yang bertemu. **Gambar 2.8** memperlihatkan jenis nodal CTT dan TTT



Gambar 2.8 Dua jenis nodal tipe CTT dan TTT
(Hardjasaputra, 2016)

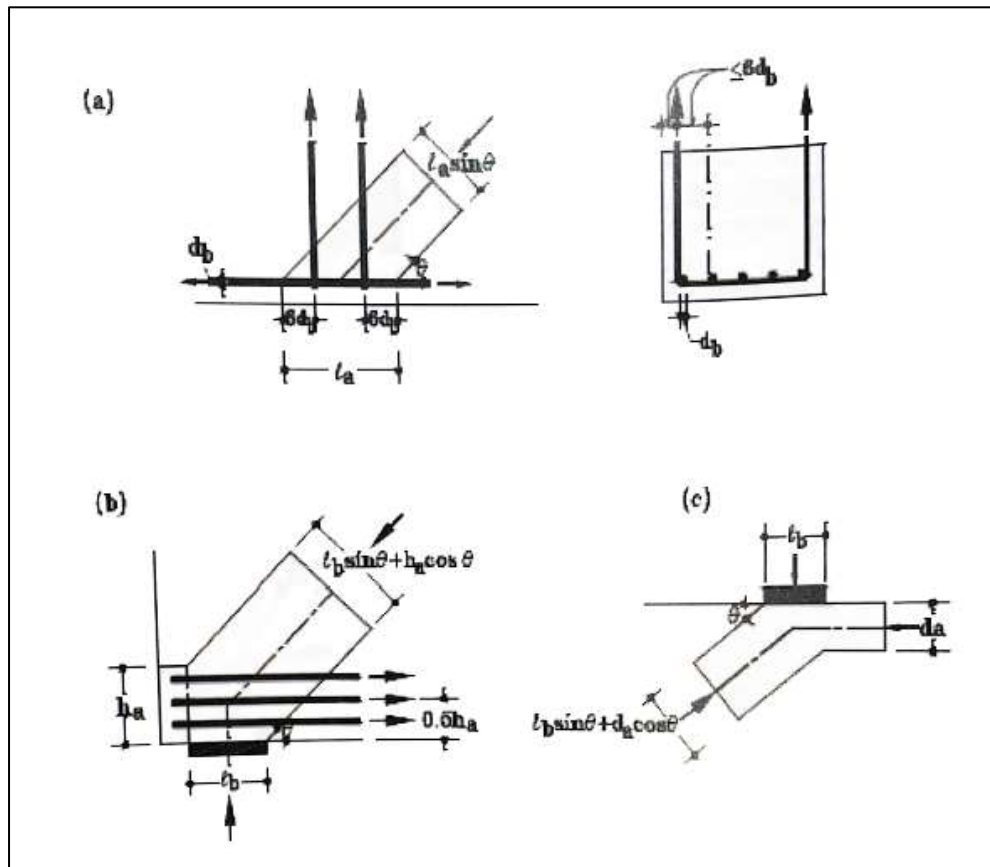
Perencanaan titik hubung nodal memerlukan perhatian khusus, karena untuk memeriksa kekuatan strat perlu dilakukan perhitungan luas efektif strat. Besarnya luas efektif strat harus mempertimbangkan luas penampang beton, perletakan yang ada serta kondisi penjangkaran penulangan pada nodal. Kondisi penjangkaran ini akan mempengaruhi luas efektif penampang strut tekan tersebut.

Pada **Gambar 2.9** ditunjukkan pertemuan dimana pengikat berupa tulangan tunggal, sedangkan untuk gaya tarik yang besar mungkin dibutuhkan tulangan majemuk (kelompok) yang terdiri lebih dari satu lapis tulangan. Perhatikan gambaran perbandingan besarnya tegangan yang terjadi pada tumpuan dan strat dari berbagai jenis lapisan tulangan ini.



Gambar 2.9 Contoh nodal CCT berbagai jenis lapisan tulangan
(Hardjasaputra, 2016)

Pada **Gambar 2.10** Mitchell dan Collins (1991) menunjukkan bahwa lebar strat dipengaruhi oleh kekakuan batang tarik tulangan yang di jangkar/di angkur oleh sengkang.



Gambar 2.10 Pengaruh penjangkaran tulangan Tarik, pelat tumpuan terhadap dimensi strat

(Hardjasaputra, 2016)

Gambar 2.10(b) memperlihatkan lebar efektif strat tergantung dari panjang pelat landasan dan tinggi kelompok tulangan tarik, dan **Gambar 2.10(c)** memperlihatkan pelat landasan dan strut tekan lainnya yang mempengaruhi lebar efektif penjangkaran

strut tekan. Ketika dimensi dan bentuk geometris *nodul* telah ditentukan, maka area titik hubung F_{nn} (*nodal*) memiliki kekuatan tekan nominal yaitu:

$$F_{nn} = f_{ce} \cdot A_{nz} \quad (2.8)$$

Dimana f_{ce} merupakan kekuatan tekan efektif beton pada *nodal* (daerah titik) dan A_{nz} lebih kecil di dibandingkan a dan b:

- a. Luas muka daerah titik hubung (*nodal*) dimana F_u bekerja, diambil tegak lurus terhadap garis aksi F_u .
- b. Luas penampang yang melewati daerah titik hubung (*nodal*), diambil tegak lurus terhadap garis aksi gaya resultan pada penampang.

Jika di daerah titik *nodal* tidak dipasang tulangan pengekang serta fungsinya belum diverifikasi oleh analisis uji, maka perhitungan untuk tegangan tekan efektif dengan f_{ce} dari batang *skrut* dan *tie* yang bekerja pada permukaan sambungan dilarang melampaui nilai yang ditentukan rumus yaitu:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_n f_c' \quad (2.9)$$

Seperti halnya pada *strut*, maka verifikasi kekuatan daerah *nodal* ditentukan oleh kekuatan tekan efektif dari beton pada daerah *nodal*, maka diperkenalkan parameter β_n untuk menentukan tegangan tekan beton efektif pada *nodal zone*. Faktor β_n yang diambil sesuai **Tabel 2.2** yakni:

Tabel 2.2 Koefisien Zona Nodal β_n

Konfigurasi Zona <i>nodal</i>	β_n	
Zona <i>nodal</i> yang dibatasi oleh <i>strut</i> , area tumpuan atau keduanya (CCC)	1,0	(a)
Zona <i>nodal</i> yang mengangkurkan satu <i>tie</i> (CCT)	0,80	(b)
Zona <i>nodal</i> yang mengangkurkan dua atau lebih <i>tie</i> (CTT)	0,60	(c)

(Sumber : SNI 2847:2019)

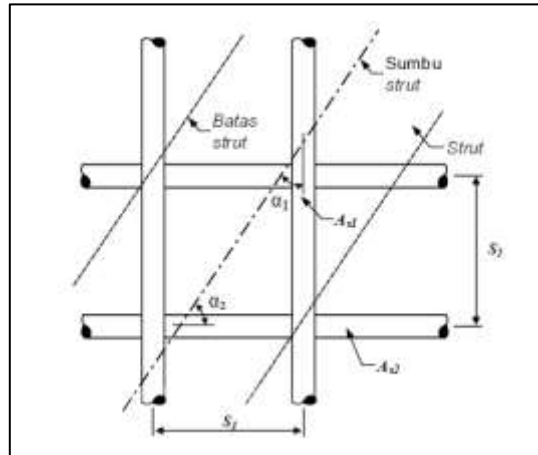
2.5.4 Tulangan Minimum

Dengan metode *strut and tie*, dapat dihitung dan ditentukan posisi tulangan pokok pada daerah-D sesuai dengan kondisi beban dan geometri. Tetapi pada daerah di luar *tie*, pada penampang struktur lainnya, perlu pula dipasang tulangan minimum. Pemasangan minimum diperlukan untuk kontrol retak, menjamin daktilitas struktur dan memberi efek pengekanan pada *strut*. Adapun persyaratan tulangan minimum selaras akan SNI 2847-2019 pada pasal 9.9.3.1 yakni:

1. Sekurang-kurangnya distribusi luas tulangan yang tegak lurus dengan sumbu longitudinal balok, A_v , adalah $0.0025b_w s_2$, di mana s_2 merupakan jarak tulangan transversal terdistribusi.
2. Sekurang-kurangnya distribusi luas tulangan yang sejajar dengan sumbu longitudinal balok, A_{vh} , adalah $0.0025b_w s_2$, dimana s_2 adalah spasi tulangan transversal terdistribusi.
3. Jarak tulangan horizontal dengan tulangan vertikal dilarang melampaui $d/5$ atau 300 mm.

Selain memenuhi syarat di atas, khusus untuk perancangan dengan metode *strut and tie* seperti pada **Gambar 2.11**, ditetapkan pula bahwa tulangan minimum yang dipasang harus memenuhi syarat:

$$\sum \frac{A_{si}}{b_{si}} \sin \alpha_i \geq 0,003 \quad (2.10)$$



Gambar 2.11 Penulangan Minimum pada Daerah Strut
(Sumber : SNI 2847:2019)

Dimana, α adalah sudut antara sumbu tulangan minimum dan sumbu dari strut yang ada. Syarat ini sebenarnya dihubungkan dengan penggunaan parameter β_s pada saat menghitung kekuatan strut yang diambil sebesar 0,75.

2.6 Panjang Penyaluran

Dalam memikul momen lentur, diperlukan luasan tulangan tertentu guna memikul gaya Tarik yang dihasilkan pada tulangan. Gaya Tarik yang terjadi pada setiap tulangan longitudinal, akibat momen lentur, harus disediakan panjang penyaluran yang cukup agar tidak terjadi fenomena *pull out* atau *split* sehingga bisa menyebabkan balok mengalami keruntuhan, meskipun secara kekuatan, balok mampu memikul momen lentur tersebut.

2.6.1 Panjang Penyaluran dalam Kondisi Tarik

Pada kondisi tarik penyaluran memiliki panjang berupa panjang penyaluran terhadap tulangan yang mengalami gaya tarik selama proses pembebanan (tulangan tarik). Umumnya, bila sebuah penampang menerima momen negatif maka sisi tekan serta bawah serta sisi tarik pada serat atas. Sedangkan saat menerima momen positif, sisi tarik terletak pada serat bawah serta terletak pada serat atas untuk sisi tekan.

Panjang penyaluran tulangan tarik secara umum termuat pada aturan SNI 2847-2019: Pasal 25.4.2; Hal-565. Notasi panjang penyaluran pada kondisi tarik ditulis dengan simbol l_d . Rumus yang digunakan berdasarkan SNI 2847-2019; Pasal 25.4.2.3; Hal-566 dijabarkan pada **Tabel 2.3** dalam menghitung panjang penyaluran tulangan kondisi Tarik serta Faktor modifikasi untuk panjang penyaluran batang ulir di **Tabel 2.4**, adalah :

Tabel 2.3 Panjang Penyaluran Batang Ulir dan Kawat Ulir dalam Kondisi Tarik

Spasi dan Selimut	Batang D19 dan yang lebih kecil dan kawat ulir	Batang D22 dan yang lebih besar
<p>Spasi bersih kawat atau batang yang disambungkan atau disalurkan lewatkan melebihi d_b, paling sedikit selimut beton sama dengan d_b, serta sengkang atau sengkang ikat sepanjang l_d melebihi standar minimum atau spasi bersih kawat atau batang yang disambungkan atau disalurkan lewatkan minimal $2d_b$ serta paling sedikit selimut beton adalah d_b</p>	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_t}{2,1 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b$	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_t}{1,7 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b$
Kasus-kasus lainnya	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_t}{1,4 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b$	$\left(\frac{f_y \times \psi_t \times \psi_t}{1,1 \times \lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b$

(Sumber : SNI 2847:2019)

Tabel 2.4 Faktor Modifikasi untuk Panjang Penyaluran Batang Ulir

Faktor Modifikasi	Kondisi	Faktor
Bobot beton, λ	Beton ringan	0,75
	Jika f_{ct} ditentukan, maka beton ringan	$\frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0$
	Beton normal	1,0
Epoksi, ψ_e	Tulangan dengan pelapis seng atau epoksi serta pelapis ganda epoksi dengan spasi di bawah 6_{db} atau selimut bersih di bawah 3_{db}	1,5
	Tulangan dengan pelapis seng atau epoksi serta pelapis ganda epoksi berkondisi yang lainnya	1,2
	Tulangan pelapis seng (galvanis) atau tanpa pelapis	1,0
Ukuran, ψ_s	Batang D22 serta yang besarnya melebihi	1,0
	Kawat ulir dan batang D19 serta yang lebih kecil	0,8
Posisi pengecoran, ψ_t	Peletakan beton segar yang melebihi 30 mm di bawah tulangan horizontal	1,3
	Lainnya	1,0

(Sumber : SNI 2847:2019)

2.6.2 Panjang Penyaluran dalam Kondisi Tekan

Penyaluran pada kondisi tekan memiliki panjang yang sama dengan panjang penyaluran terhadap tulangan yang mengalami gaya tekan selama proses pembebanan (tulangan tekan). Umumnya, bila sebuah penampang menerima momen negatif maka sisi tekan terletak pada serat bawah dan sisi tarik pada serat atas. Sedangkan saat menerima momen positif, sisi tekan terletak pada serat atas dan sisi tarik pada serat bawah. Panjang penyaluran tulangan tekan secara umum diatur dalam SNI 2847-2019; Pasal 25.4.9; Hal-582.

Notasi panjang penyaluran pada kondisi tekan ditulis dengan simbol l_{dc} . Syarat umum dengan mengacu SNI 2847-2019; Pasal 25.4.9. 1; Hal-582, maka yang digunakan dalam menghitung panjang penyaluran tulangan kondisi tekan, yaitu nilai terbesar dari:

$$l_{dc} = \left(\frac{0,24 \times f_y \times \psi_r}{\lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b \quad (2.11)$$

atau

$$l_{dc} = 0,043 \times f_y \times \psi_r \times d_b \quad (2.12)$$

atau

$$l_{dc} = 200 \text{ mm}$$

Dimana:

l_{dc} = Panjang penyaluran kondisi tekan (tulangan tekan)

d_b = Diameter tulangan

ψ_r = Faktor yang dipergunakan dalam memodifikasi panjang penyaluran berdasarkan tulangan pengekang

λ = Faktor modifikasi yang merefleksikan property mekanis

Nilai faktor modifikasi pada persamaan (2.11) dan (2.12) bisa ditentukan berdasarkan SNI 2847-2019; Tabel 25.4.9.3; Hal-583 atau pada **Tabel 2.5**. Secara umum, panjang penyaluran kondisi tekan relatif lebih pendek dibandingkan panjang penyaluran kondisi tarik dikarenakan efek perlemahan yang dipicu retak sebab tidak terdapatnya gaya tarik lentur pada tulangan tekan. Bahkan daya dukung ujung dari batang tekan sangat bermanfaat terhadap beton.

Tabel 2.5 Faktor Modifikasi Batang Ulir dalam Kondisi Tekan

Faktor Modifikasi	Kondisi	Faktor
Bobot beton, λ	Beton ringan	0,75
	Beton ringan, bila f_{ct} ditentukan	$\frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0$
	Beton normal	1,0
Tulangan pengekang, ψ_r	Tulangan dilingkupi oleh (1), (2), (3), atau (4): (1) tulangan spiral (2) tulangan lingkaran menerus dengan jarak 100 mm serta $db \geq 6$ mm (3) Pengikat kawat D10 atau Sengkang D13, dengan spasi pusatnya ≤ 100 mm yang sesuai 25.7.2 (4) Sengkang pengekang, dengan spasinya ≤ 100 mm yang sesuai 25.7.4	0,75
	Lainnya	1,0

(Sumber : SNI 2847:2019)

2.6.3 Panjang Penyaluran Kait Standar

Secara umum penggunaan panjang penyaluran kait standar pada tulangan dalam kondisi tarik (tulangan tarik). Istilah "kait" mengandung arti bahwa ujung tulangan dibengkokkan (90° & 180°) agar besaran panjang penyaluran bisa tercapai. Alasan umum pembengkokan ujung tulangan adalah kurangnya *space* (ruang) pada elemen struktur untuk panjang tulangan yang harus diberikan sehingga kelebihan panjang tersebut harus dibengkokkan.

Aturan dalam SNI 2847 2019; Pasal 25.4.3; Hal-569 memuat mengenai panjang penyaluran kait standar. Notasi yang digunakan untuk panjang penyaluran kait standar adalah l_{dh} . Sementara dalam SNI 2847-2019; Pasal 25.4.3.1; Hal-569 memuat aturan terkait besaran panjang penyaluran kait standar harus diambil paling besar dalam kondisi tarik yaitu:

$$l_{dh} = \left(\frac{0,24 \times f_y \times \psi_e \times \psi_c \times \psi_r}{\lambda \times \sqrt{f'_c}} \right) \times d_b \quad (2.13)$$

atau

$$l_{dh} = 8d_b \quad (2.14)$$

atau

$$l_{dh} = 150 \text{ mm}$$

Dimana:

l_{dh} = Panjang penyaluran kait standar dalam kondisi tarik

d_b = Diameter tulangan

ψ_e = Faktor yang dipergunakan dalam memodifikasi panjang penyaluran berdasarkan pelapis tulangan

ψ_c = Faktor yang dipergunakan dalam memodifikasi panjang penyaluran berdasarkan selimut

ψ_r = Faktor yang dipergunakan dalam memodifikasi panjang penyaluran berdasarkan tulangan pengekang

λ = Faktor modifikasi yang merefleksikan property mekanis

Nilai faktor modifikasi pada persamaan (2.13) dan (2.14) bisa ditentukan berdasarkan SNI 2847-2019; Tabel 25.4.9.3; Hal-583 atau pada **Tabel 2.6.** dan untuk penyaluran batang ulir pada kondisi tarik, ketentuan geometri kait standar termuat dalam aturan SNI 2847-2019; Pasal 25.3.1; Tabel 25.3.1; Hal 560 atau pada **Tabel 2.7.**

Tabel 2.6 Panjang Penyaluran Batang Ulir dan Kawat Ulir dalam Kondisi Tarik

Faktor Modifikasi	Kondisi	Faktor
Bobot beton, λ	Beton ringan	0,75
	Beton ringan, bila f_{ct} ditentukan	$\frac{f_{ct}}{0,56\sqrt{f_{cm}}} \leq 1,0$
	Beton normal	1,0
Epoksi, ψ_e	Tulangan dengan pelapis ganda epoksi dan pelapis epoksi atau seng	1,2
	Tulangan pelapis seng (galvanis) atau tanpa pelapis	1,0

(Sumber : SNI 2847:2019)

Tabel 2.6 Panjang Penyaluran Batang Ulir dan Kawat Ulir dalam Kondisi Tarik

(Lanjutan)

Selimut, ψ_c	Untuk tulangan sama dengan dan lebih kecil dari D36 dengan tebal selimut	0,7
-------------------	--	-----

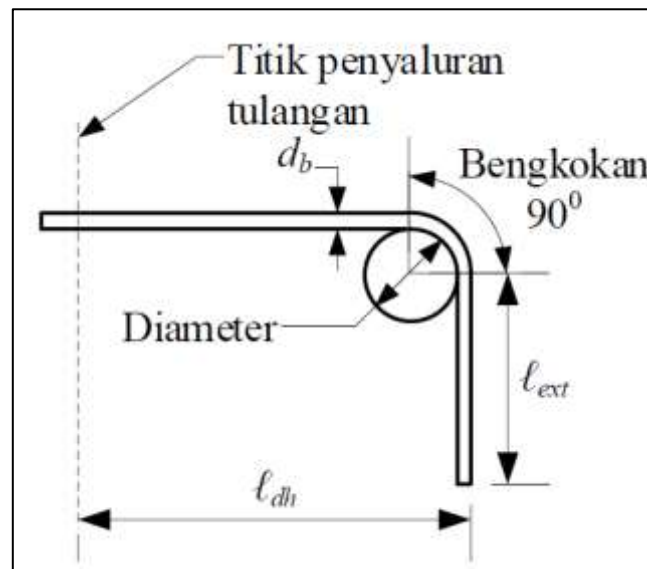
	pada perpanjangan tulangan diluar kait ≥ 50 mm dan dengan tebal selimut samoing (normal terhadap bidang kait) ≥ 65 mm dan untuk kait 90°	
	Lainnya	1,0
Tulangan pengekang, ψ_r	Untuk kait sama dengan atau lebih kecil 90° tulangan D36 (1) dilingkupi sepanjang l_{dh} Sengkang yang tegak lurus terhadap l_{dh} pada $s \leq$ $3d_b$ atau sengkang ikat atau (2) dilingkupi sepanjang perpanjangan tulangan melewati kait termasuk bengkokan dengan Sengkang ikat atau senkang yang tegak lurus terhadap l_{ext} pada $s \leq 3d_b$	0.8
	Untuk kait sama dengan atau lebih kecil 180° D36 d dilingkupi sepanjang l_{dh} dengan Sengkang yang tegak lurus terhadap l_{dh} pada $s \leq 3d_b$ atau dengan sengkang ikat	
	Lainnya	1,0

(Sumber : SNI 2847:2019)

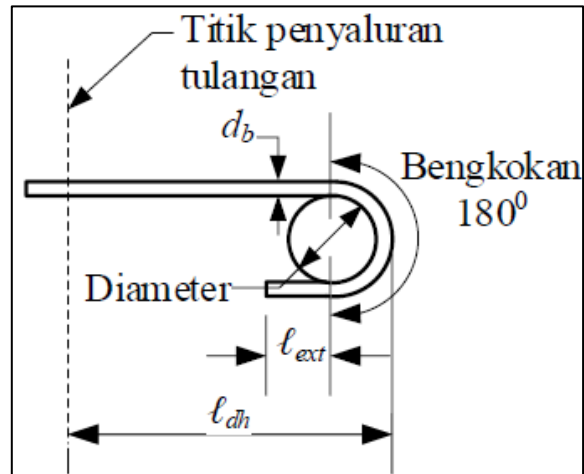
Tabel 2.7 Geometri Kait Standar dalam Kondisi Tarik

Tipe Kait Standar	Ukuran Tulangan	Diameter Sisi dalam Bengkokan Minimum	Perpanjangan Lurus, l_{ext}	Gambar Kait Standar
Kait 90°	D10 s/d D25	$6d_b$	$12d_b$	Gambar 2.12
	D29 s/d D36	$8d_b$		
	D43 s/d D57	$10d_b$		
Kait 180°	D10 s/d D25	$6d_b$	Terbesar dari $4d_b$ dan 65 mm	Gambar 2.13
	D29 s/d D36	$8d_b$		
	D43 s/d D57	$10d_b$		

(Sumber : SNI 2847:2019)

**Gambar 2.12** Kait Standar 90°

(Sumber : SNI 2847:2019)



Gambar 2.13 Penulangan Kait Standar 180°

Sumber : (SNI 2847:2019)

2.7 Metode Elemen Hingga

Mekanika struktural memperhitungkan sifat material yang terkena tegangan nonlinier karena dapat mengakibatkan keruntuhan atau rangkai dan tekuk lokal. Ketika sifat-sifat suatu material merupakan fungsi dari kondisi tegangan atau regangan meliputi elastisitas nonlinier, rangkai dan plastisitas, bahan tersebut disebut bahan nonlinier. Masalah dengan material adalah bahwa kekakuannya membuatnya tidak linier, yang mungkin termasuk beban sebagai fungsi perpindahan atau deformasi.

Terdapat beragam jenis elemen yang dipilih serta digunakan berdasarkan keperluan serta jenis strukturnya. Pembagiannya secara umum, yakni:

- 1 Elemen simetris-aksial
- 2 Elemen tiga dimensi
- 3 Elemen selaput (*shell*)
- 4 Elemen dua dimensi
- 5 Elemen satu dimensi

Pada analisis untuk struktur hubungan balok-kolom digunakan elemen bidang (*plane element*) sebagai pemodelan strukturnya. Elemen bidang (*plane element*) digunakan untuk memodelkan perilaku bidang tegangan (*plane-stress*) dan bidang regangan (*plane-strain*) dalam elemen dua dimensi. Elemen bidang terdiri atas tiga atau empat titik nodal untuk memodelkan dua dimensi solid.

Elemen bidang digunakan untuk memodelkan perilaku tegangan bidang dan regangan bidang pada benda padat dua-dimensi. Elemen bidang adalah salah satu tipe dari *object* elemen luasan. Tergantung pada tipe potongan yang dipilih pada daerah yang akan dimodelkan, elemen ini merupakan elemen dengan tiga atau empat node untuk memodelkan benda padat dua dimensi yang memiliki ketebalan yang seragam. Elemen ini dihitung berdasarkan formulasi isoparametrik. Struktur yang dapat digambarkan dengan elemen ini antara lain:

- a. Struktur bidang yang tipis dalam kondisi tegangan bidang.
- b. Struktur prismatic yang panjang dalam kondisi regangan bidang.

Tegangan dan regangan diasumsikan tidak bervariasi pada arah tebal elemen. Untuk tegangan bidang, elemen tidak memiliki kekakuan diluar bidang.

Solusi dengan menggunakan Metode Elemen Hingga meliputi prosedur atau langkah berikut:

Langkah 1. Deskritesasi dan pemilihan konfigurasi elemen.

Langkah 2. Memilih model atau persamaan polinomial.

Langkah 3. Menentukan elemen.

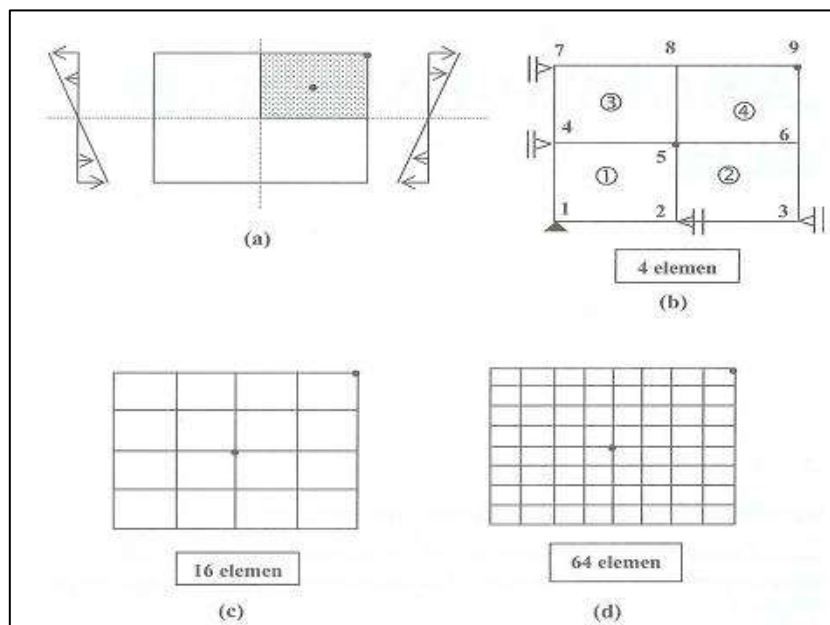
Langkah 4. Perakitan persamaan elemen menjadi persamaan global.

Langkah 5. Menyelesaikan primary unknowns.

Langkah 6. Menyelesaikan besaran kedua.

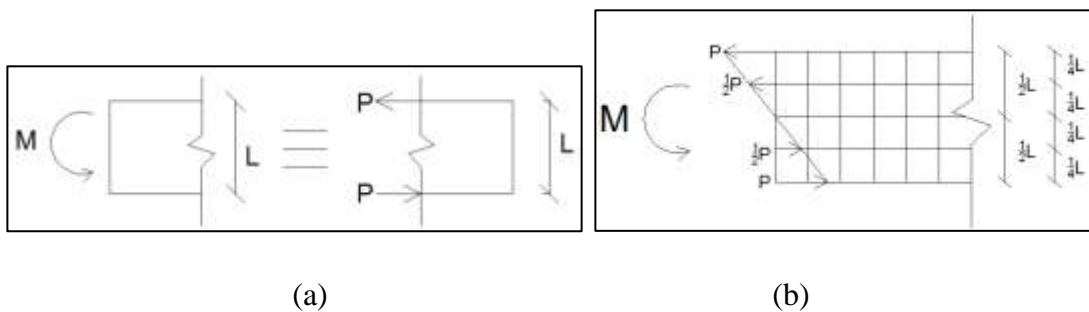
Langkah 7. Interpretasi hasil.

Metode Elemen Hingga merupakan solusi pendekatan, bukan solusi eksak. Dengan menambahkan jumlah elemen, solusi akan menjadi upper bound solution yang aman. Langkah pertama ini mencakup pembagian (*descretization*), kesinambungan (*continuity*), kompatibilitas (*compatibility*), konvergensi, kesalahan atau penyimpangan atau (*error*). Dalam diskretisasi kontinum perlu diperhatikan jumlah aspek rasio yang akan dijelaskan pada **Gambar 2.12**.



Dengan pembagian seperti pada **Gambar 2.12** pembagian yang mendekati hasil eksak adalah pembagian yang paling banyak 64 elemen. Momen yang bekerja pada ujung suatu elemen, dapat digambarkan sebagai kopel gaya. Jadi suatu momen M dapat diubah menjadi : $M = P \times L$.

Untuk elemen yang didiskretisasi menjadi sejumlah elemen bujursangkar, momen M yang bekerja pada ujung elemen dapat digambarkan sebagai sejumlah kopel gaya yang bekerja pada titik nodal tiap elemen di ujung elemen tadi.



Gambar 2.13 Pemodelan gaya pada deskretisasi elemen, (a) Model elemen dengan momen M di satu sisi, (b) Deskretisasi dan pemodelan input gaya

Sebagai contoh, bila pada elemen yang didiskretisasi seperti pada Gambar 2.13 dan menerima momen pada salah satu sisinya, maka momen tersebut dapat digambarkan sebagai 2 buah kopel gaya dengan besaran sebagai berikut:

$$M = 2 \times \left(P \times \frac{1}{2}L \times \frac{1}{2}P \times \frac{1}{4}L \right) \quad (2.15)$$

$$M = P \times L + \frac{1}{4}PL = \frac{5}{4}PL \rightarrow P = \frac{4M}{5L} \quad (2.16)$$

Dengan demikian bukan M yang di input, melainkan nilai P sebagai pengganti M . Penggunaan metode elemen hingga hanya meliputi diskretisasi elemen saja, yang kemudian dicari kontur tegangannya menggunakan program SAP2000 Versi 23.

2.8 Penelitian Terkait Sebelumnya

Pada sebuah penelitian diperlukan adanya pembandingan antara hal yang sedang diteliti dengan hasil penelitian sebelumnya supaya dapat membuktikan perbedaan tersendiri dari penelitian yang dilakukan. Pemodelan menggunakan metode *strut and tie* telah banyak dilakukan pada berbagai penelitian. Dalam hal ini akan ditunjukkan beberapa contoh penelitian sebelumnya terkait penggunaan metode *strut and tie*.

Tidaryo Kusumo, dari Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha, telah melakukan penelitian dengan judul “Studianalisis Pertemuan Balok Kolom Berbentuk T Struktur Rangka Beton Bertulang Dengan Pemodelan” pada tahun 2012. Penelitian tersebut membandingkan hasil luas tulangan metode analisis penampang dengan metode *strut and tie* seperti dalam **Gambar 2.14** yang menyimpulkan bahwasanya yang lebih ekonomis adalah metode analisis penampang.

Penampang	<i>Strut-and-tie</i> (mm ²)	Analisis Penampang (mm ²)	% beda
Balok	1854,50	1520	18,04 %
Kolom	820,62	$\frac{1}{2} \times 1500 = 750$	8,61 %

Gambar 2.14 Perbandingan hasil luas tulangan menurut strut-and-tie dengan analisis penampang

(Sumber : Kusumo, Tidaryo. 2017)

Penelitian terkait selanjutnya mengambil referensi berdasarkan Jurnal Teknik Sipil Universitas Nusa Cendana berjudul “Studi Parametrik Pertemuan Balok Kolom Interior Pada Portal Beton Bertulang Menggunakan Metode Strut and Tie” yang ditulis oleh Aditya Ina, Partogi Simatupang, dan Elia Hunggurami pada tahun 2016. Pada tulisan tersebut dijelaskan bahwa penulis melakukan penelitian dengan membandingkan jumlah tulangan dengan metode konvensional dengan metode *strut and tie* serta metode T. Paulay dan R. Park yang dijabarkan, yaitu:

		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
	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
$f_c' = 20$ MPa dan $f_y = 400$ 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
	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
$f_c' = 35$ 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
	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 $f_y = 400$ 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
	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

Gambar 2.15 Perbandingan hasil luas tulangan menurut strut and tie dengan analisis penampang

(Sumber : Simatupang, Partogi, Elia Hunggurami dan Aditya Ina. 2017)

Contoh dari penelitian terkait berikutnya yaitu dari Budi Piyung Riyadi Jurusan Teknik Sipil Universitas Kristen Maranatha pada tahun 2010 dengan judul “Analisis Pertemuan Balok-Kolom Struktur Rangka Beton Bertulang Menggunakan Metode *Strut and Tie*”. Pada penelitian tersebut penulis membandingkan hasil desain menggunakan analisis penampang metode ACI318-02 dengan luas tulangan metode *strut and tie* yang menyimpulkan bahwa hasil luas tulangan yang didapatkan melalui metode *strut and tie* lebih kecil dari penggunaan metode ACI 318-02 yang dijabarkan, yaitu:

Penampang	Strut and Tie	Analisis Penampang	% beda
Balok	561,387 kN	580.823	3,3463
Kolom (arah membuka)	842,08 kN	1584.264	46,8472
Kolom (arah menutup)	842,08 kN	1299,644	35,2069

Gambar 2.16 Perbandingan hasil luas tulangan menurut strut and tie dengan analisis penampang

(Sumber : Riyadi, Budi Piyung. 2010)