

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tiang Pancang dan Pile Cap (Poer)

Suatu pondasi tiang umumnya terdiri lebih dari satu tiang atau disebut tiang kelompok. Tiang kelompok ini biasanya disatukan oleh kepala tiang yang juga disebut *pile cap* atau *poer*.

Pile cap tersebut biasanya dibuat dari beton bertulang, dituangkan langsung pada tanah kecuali jika tanah bersifat ekspansif. *Pile cap* untuk konstruksi lepas pantai sering dicetak dari *form* baja. *Pile cap* tersebut mempunyai suatu reaksi yang merupakan sederet beban terpusat (tiang pancang). Perencanaan *pile cap* juga mempertimbangkan beban kolom dan momen dari setiap tanah yang mendasari *pile cap* (jika *poer* berada di bawah permukaan tanah), dan berat *pile cap*.

Dalam perhitungan, *poer* dianggap/dibuat kaku sempurna sehingga :

- Bila beban-beban yang bekerja pada kelompok tiang tersebut menimbulkan penurunan maka setelah penurunan bidang *poer* tetap akan merupakan bidang datar.
- Gaya-gaya yang bekerja pada tiang berbanding lurus dengan penurunan tiang-tiang tersebut.

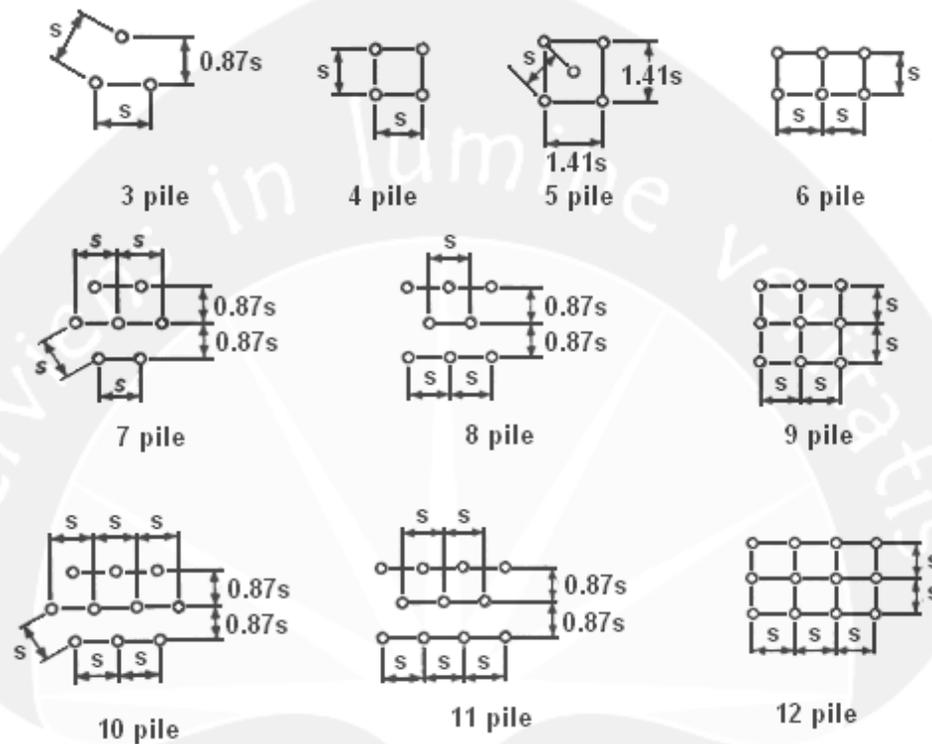
Anggapan bahwa setiap tiang pancang di dalam sebuah kelompok mengangkut beban yang sama mungkin hampir benar bila hal berikut dipenuhi :

- *Pile cap* bersentuhan dengan tanah
- Tiang pancang semuanya tegak lurus
- Beban diletakkan pada pusat kelompok tiang pancang
- Kelompok tiang pancang adalah simetris.

Umumnya, jarak antar tiang dalam kelompok berkisar antara $2,5D$ sampai $3D$. Dimana D adalah diameter atau lebar tiang pancang. Ketentuan ini berdasarkan pada pertimbangan-pertimbangan sebagai berikut :

- Bila jarak antar tiang $s < 2,5D$ kemungkinan tanah di sekitar kelompok tiang akan naik terlalu berlebihan karena terdesak oleh tiang-tiang yang dipancang terlalu berdekatan. Selain itu dapat menyebabkan terangkatnya tiang-tiang di sekitarnya yang telah dipancang lebih dahulu.
- Bila jarak antar tiang $s > 3D$ akan menyebabkan perencanaan menjadi tidak ekonomis sebab akan memperbesar ukuran/dimensi dari *poer*, jadi memperbesar biaya.

Berdasarkan hal tersebut di atas, telah direkomendasikan pola-pola kelompok tiang pancang sebagaimana ditampilkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.1 Pola susunan tiang pancang; ($s = \text{minimum pile spacing}$)
(sumber : Teng, Wayne C., *Foundation Design*)

2.2 Strut and Tie Model

Strut and tie model pertama kali diperkenalkan oleh Ritter (1989), Morsch (1902) sebagai *Truss Analogy Model*. Morsch menggunakan bentuk rangka batang (*truss*) dengan memperhatikan pola retak pada beton bertulang akibat beban. Rangka batang ini terdiri dari batang desak dan batang tarik, sejajar dengan arah memanjang dari balok, batang desak diagonal dan batang tarik vertikal. Berbagai *truss-model* dikembangkan oleh para peneliti yang akhirnya pada tahun 1982-1993 Schaich, Schafer dan Jenewein mengembangkan suatu model *strut and tie model*. Di dalam *ACI 318-02 strut and tie model* didefinisikan sebagai suatu

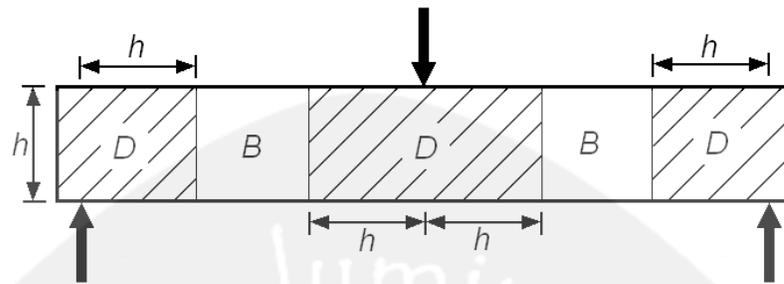
model struktur rangka dari suatu elemen struktural atau dari sebuah *D-Region* dalam elemen tersebut, yang terdiri dari batang-batang desak dan batang-batang terfaktor ke titik tumpuan atau ke *B-Region* di dekatnya. Sehingga metode *strut and tie model* sesuai bila digunakan pada struktur yang mengalami *D-Region*.

2.3 Daerah B dan Daerah D

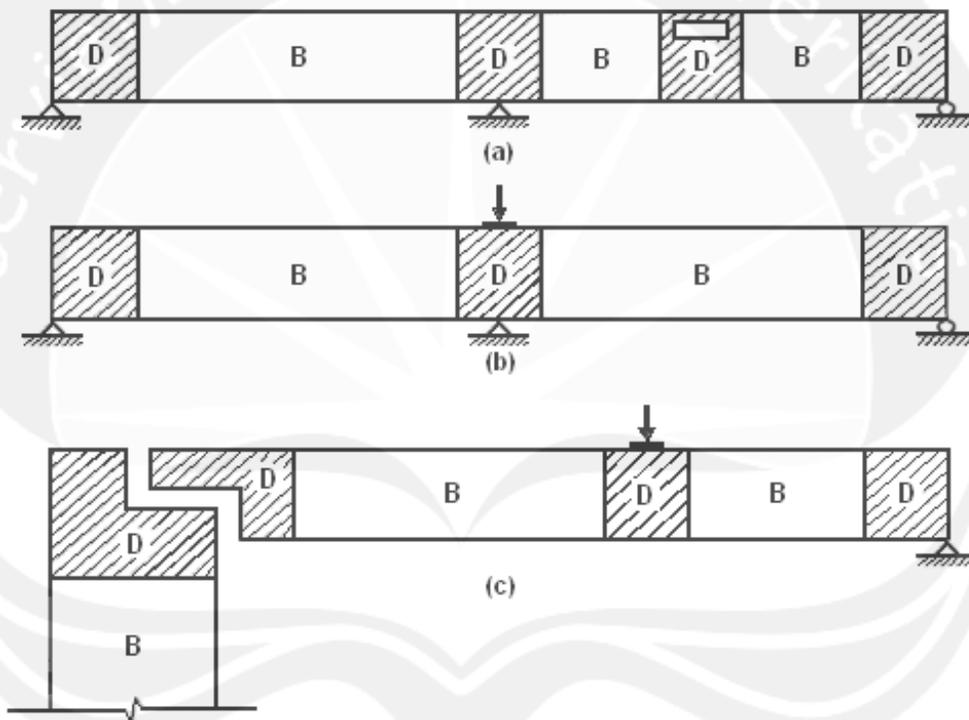
Munculnya penampang yang mengalami distribusi tegangan nonlinier yang tidak sesuai dengan hipotesa *Bernoulli*, menghasilkan daerah pada elemen balok yang selain memiliki daerah *B (Balance)*, juga terdapat daerah *D (Disturbed)*. Daerah *B* adalah daerah yang memenuhi asas *Bernoulli* yaitu penampang dianggap rata dan tegak lurus garis netral sebelum dan sesudah lentur. Daerah ini dapat dirancang dengan hitungan standar yang ditetapkan dalam peraturan struktur beton seperti *SNI 03-2847-2002*. Sedangkan daerah *D* adalah daerah yang tidak memenuhi asas *Bernoulli* karena distribusi regangannya tidak linier dan mengalami beban terkonsentrasi, sehingga hitungan standar yang ditetapkan dalam peraturan struktur beton umumnya tidak dapat diterapkan.

Sebelum dilakukan perancangan struktur, terlebih dahulu diperlukan penentuan daerah *B* dan *D*. Perancangan menggunakan *strut and tie model* diutamakan untuk daerah *D*, sedangkan pada daerah *B* *strut and tie model* dapat digunakan dalam perancangan terhadap geser dan torsi.

Dengan azas *Saint Venant*, dimana $d = h$ dari titik keseimbangan gaya-gaya, dapat diketahui pembagian *D-region* dan *B-region* secara praktis seperti pada gambar dibawah ini.



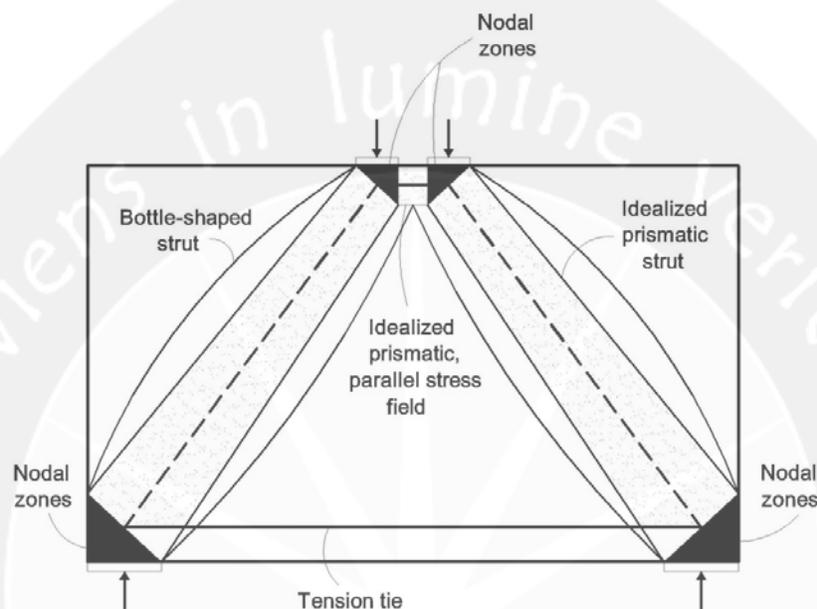
Gambar 2.2 *B-region* dan *D-region* pada menurut azas Saint Venant



Gambar 2.3 *B-region* dan *D-region* pada struktur balok; (a) balok menerus dengan lubang bukaan; (b) balok dengan beban terpusat; (c) balok ujung berteras dengan tumpuan pada kolom (sumber: Nawy, Edward G., *Reinforced Concrete A Fundamental Approach*)

2.4 Komponen *Strut and Tie Model*

Sebagai pemodelan yang menggunakan rangka batang (*truss*), *strut and tie* sendiri terdiri dari batang desak (*strut*), batang tarik (*tie*) dan joint (*node*).

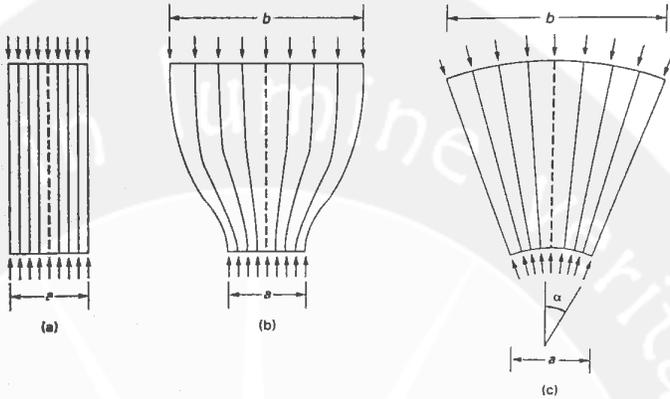


Gambar 2.4 Alur tegangan dalam dan *strut and tie model* pada balok tinggi sederhana dengan tumpuan (sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., *Reinforced Concrete Design*)

2.4.1 Batang Desak (*Strut*)

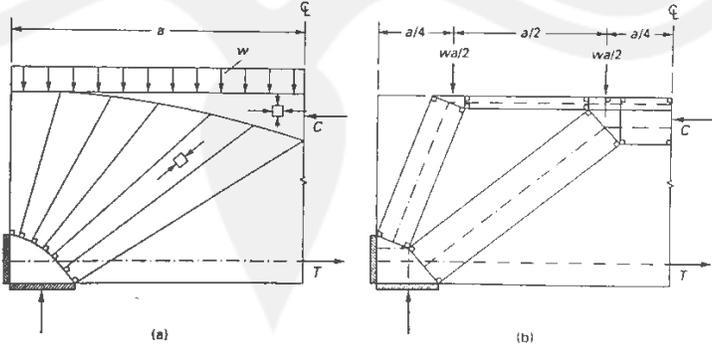
Elemen *strut* adalah resultan dari batang desak pada model *strut and tie*. Pada prakteknya, bentuk dari area desak dapat bermacam-macam bergantung pada geometri, pembebanan dan kondisi tumpuan batang. Schlaich telah memberikan tiga bentuk dari area desak ini. Bentuk yang dasar berupa potongan area berbentuk prismatic (*prismatic strut*), dimana daerah desaknya paralel dan konsisten sepanjang batangnya. Bentuk kedua adalah *bottle-shaped*, dengan tegangan desak menyebar pada jarak tertentu dari titik pusat beban. Untuk sederhananya dalam desain, *bottle-shaped* ini sering diidealkan sebagai *strut* prismatic. Bentuk ketiga

adalah *fan-shaped*, pada desainnya bentuk ini juga sering dimodelkan sebagai kumpulan *strut* prismatik.

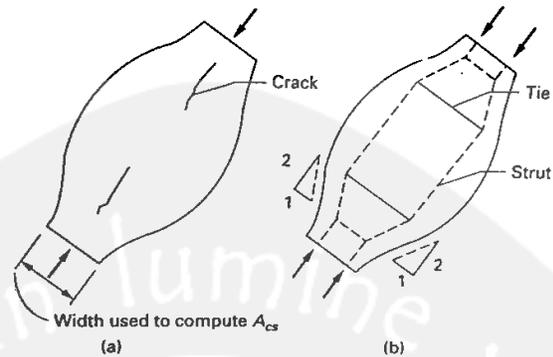


Gambar 2.5 Bidang desak dasar: (a) bidang parallel; (b) bidang *bottle-shaped*; (c) bidang *fan-shaped* (sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., *Reinforced Concrete Design*)

Kemampuan *strut* bergantung pada bentuknya dan tulangan (bila ada) searah tegak lurus aksis *strut*. Pada *bottle-shaped strut*, penyebaran tegangan desak dari ujung ke tengah batang *strut* akan cenderung terbagi-bagi di dekat ujungnya. Hal ini menyebabkan *strut* akan melemah. Pada prakteknya, aliran gaya dalam *bottle-shaped strut* dapat diidealkan sebagai *strut and tie model*.



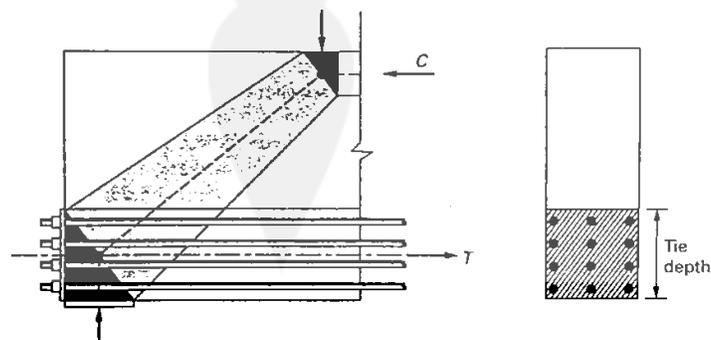
Gambar 2.6 Perilaku *fan* (kipas) pada balok tinggi: (a) bidang tegangan *fan-shaped*; (b) *strut and tie model* (sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., 2007, *Reinforced Concrete Design*)



Gambar 2.7 *Strut bottle-shaped*; (a) sebaran retak di dekat ujung *strut*; (b) bentuk ideal *strut and tie model* dari sebuah *strut* (sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., *Reinforced Concrete Design*)

2.4.2 Batang Tarik (*Tie*)

Tie merupakan batang tarik pada *strut and tie model*. *Tie* terdiri dari tulangan (*non-prestressed* atau *prestressed*) ditambah sebagian dari beton disekelilingnya. Sebuah *tie* dapat terdiri satu atau beberapa lapisan tulangan. Untuk kontrol retakan, direkomendasikan untuk menyebarkan tulangan searah melintang *tie*. Sebagai catatan, pusat dari tulangan harus bertepatan dengan aksis *tie* pada model. Pada kenyataannya, daya dukung *tie* hanya diberikan oleh tulangan saja (dengan asumsi bahwa beton disekitarnya tidak mendukung gaya tarik), sering diasumsikan sebagai kondisi leleh.



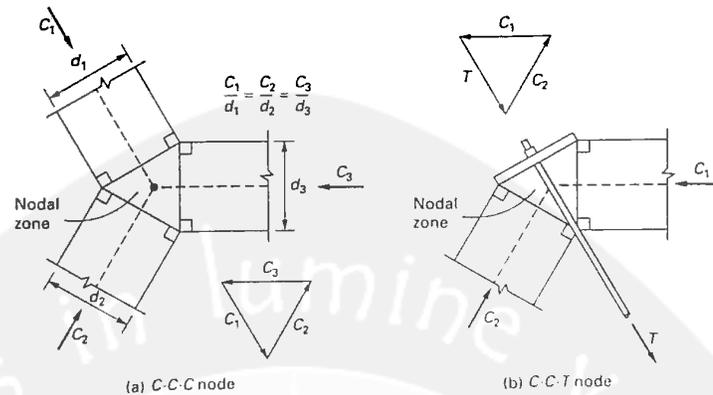
Gambar 2.8 *Tie* tarik terdiri dari beberapa lapisan tulangan ditambah dengan sebagian beton di sekelilingnya (sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., *Reinforced Concrete Design*)

2.4.3 Node

Pertemuan antara dua atau lebih *strut* dan *tie* didefinisikan sebagai *node*. Daerah di sekitar *node* disebut *nodal zone*. Pada model struktur, sedikitnya tiga buah gaya harus bertemu pada sebuah *node*, dengan maksud untuk memenuhi kesetimbangan. Berdasarkan jenis gaya yang bertemu, *node* sering diklasifikasikan sebagai *C-C-C node* dengan tiga buah batang *strut* yang bertemu dalam satu *node*, *C-C-T node* dengan dua batang *strut* dan satu batang *tie* bertemu dalam *node*.

Pada perancangan, dimensi awal sebuah *nodal zone* ditentukan dari ukuran *strut*, *tie* dan *bearing area* akibat beban yang bekerja, seperti ukuran kolom maupun pelat *bearing*. Dimensi-dimensi awal ini dimungkinkan mengalami perubahan apabila pada perhitungan ditemukan bahwa salah satu atau lebih sisi pada *node* tidak mampu mendukung tegangan dari *strut* dan *tie*.

Apabila sisi dari *nodal zone* tegak lurus dengan aksis *strut*, gaya desaknya akan sama besarnya di setiap sisi. Pada kondisi tersebut, dimensi *nodal zone* memiliki bagian yang sama dengan gaya yang bekerja. *Nodal zone* tersebut sering disebut sebagai *hydrostatic nodal zones*.



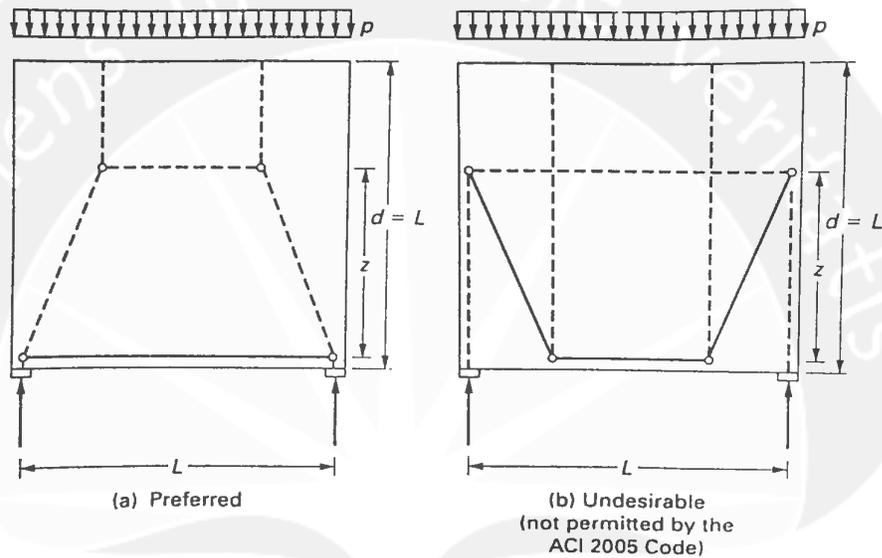
Gambar 2.9 Hydrostatic nodal zones (sumber : Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A., *Reinforced Concrete Design*)

Schlaich menyampaikan bahwa *nodal zone* dinyatakan aman apabila gaya desak pada area yang melintang diletakkan tegak lurus terhadap *strut* atau *tie*, di bawah batas desak *nodal zone*. Pendekatan ini dapat juga digunakan untuk *nodal zone* dengan empat atau lebih *strut* atau *tie* yang bertemu pada satu *node*.

2.5 Penentuan Bentuk *Strut and Tie Model*

Dalam desain, langkah pertama dan yang paling penting adalah memilih sebuah rangka batang yang secara statik dapat diterima (*statically truss*). Sebuah model *strut and tie* merepresentasikan *lower bound theorem of plasticity*, yang menyatakan bahwa suatu struktur tidak akan berada di ambang keruntuhan bila terjadi keseimbangan antara beban dan distribusi tegangannya sehingga setiap titik pada struktur mengalami tegangan dibawah tegangan lelehnya. Oleh karena itu dimungkinkan terbentuknya lebih dari satu bentuk model *truss* yang setimbang dan memenuhi batas kekuatan. Meskipun bermacam-macam bentuk model dengan kondisi tersebut di atas adalah aman, beberapa bentuk lainnya dapat juga dipilih. Karena *tie* pada umumnya lebih fleksibel daripada *strut*, sebuah model dengan

jumlah *tie* minimum dan terpendek dapat dipilih. Pada gambar di bawah terlihat model (a) sebagai model yang lebih dipilih, dibandingkan dengan model (b) yang selain lebih kompleks, juga memiliki batang *tie* yang lebih panjang serta terdapat batang *strut* yang saling bersilangan. Kondisi model (b) tidak diijinkan oleh peraturan *ACI*.



Gambar 2.10 *Strut and tie model* pada balok tinggi dengan beban merata
(sumber: Wang, Chu-Kia, Salmon, Charles G., Pincheira, Jose A.,
Reinforced Concrete Design)

Pemilihan geometri *truss* dapat terselesaikan dengan memvisualisasikan daerah desak yang terjadi pada struktur. Untuk elemen yang terisolasi atau struktur yang sederhana, misalnya *simple beam* dengan tumpuan di kedua ujungnya, arah tegangan desak dapat dengan mudah divisualisasikan. Untuk struktur yang lebih kompleks, pemilihan model *truss* yang sesuai akan lebih sulit untuk ditentukan, bahkan untuk seorang perencana yang sudah berpengalaman. Dalam persoalan ini Schlaich merekomendasikan bahwa model dapat didasarkan pada trajektori tegangan yang dihasilkan dari analisis *finite element*.

Beberapa tahun belakangan ini telah dikembangkan beberapa alat bantu berbasis komputer untuk membantu dalam pemilihan model *strut and tie*. Banyak dari perangkat tersebut berdasarkan pada trajektori tegangan untuk mendapatkan model *truss*. Contohnya CAST (*Computer Aided Strut-and-Tie*) yang dikembangkan oleh Kuchma dan timnya. *Software* ini berupa perangkat berbasis desain grafis yang secara baik memudahkan penggunaan model *strut and tie*.

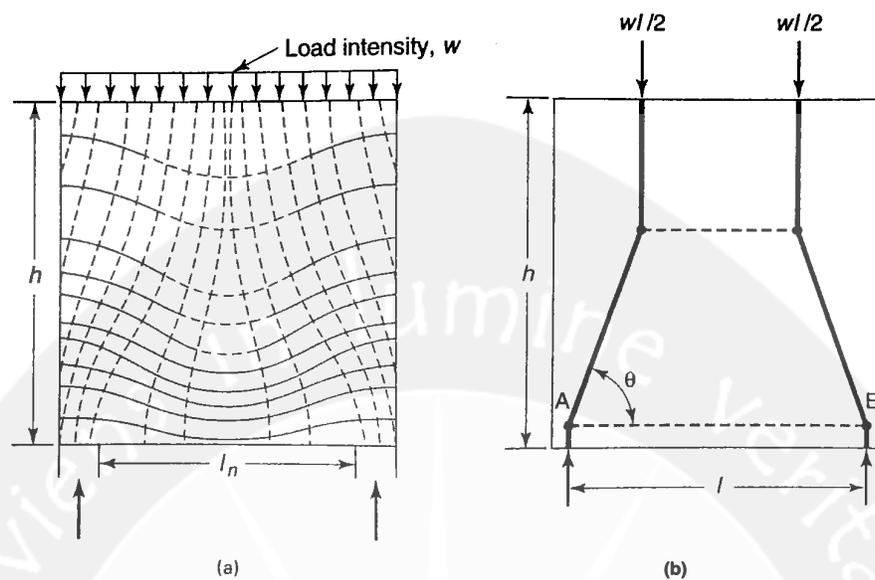
Setelah model *strut and tie* yang sesuai diperoleh, kemampuan elemen-elemennya (*strut, tie* dan *nodal*) harus diperiksa. Perencana harus menyadari bahwa penentuan dimensi *strut, tie* dan *nodal zone* adalah sebuah prosedur iterasi, yang di banyak kasus akan memerlukan perubahan bentuk model *strut and tie*.

Pemilihan model struktur *truss* dari *Strut and Tie Model* yang dapat dilakukan adalah sebagai berikut :

a. Trajektori tegangan dan analisis linier elastik

Metode penyebaran tegangan yang digunakan untuk menentukan bentuk *strut and tie model* dari elemen adalah sebagai berikut :

1. Analisis dilakukan pada struktur menggunakan analisis statik bentuk dengan metode *finite element*.
2. Dari analisis tersebut akan didapatkan arah dan distribusi tegangan-tegangan utama (trajektori tegangan) pada struktur.
3. Model *truss strut and tie model* dibuat dengan mengikuti pola penyebaran tegangan utama dan desak yang terkonsentrasi.



Gambar 2.11 Model *truss* dan sebaran tegangan pada balok tinggi; (a) garis trajektori tegangan pada balok yang dibebani beban merata; (b) bentuk ideal *truss* yang mengikuti pola garis trajektori (sumber: Nawy, Edward G., *Reinforced Concrete A Fundamental Approach*)

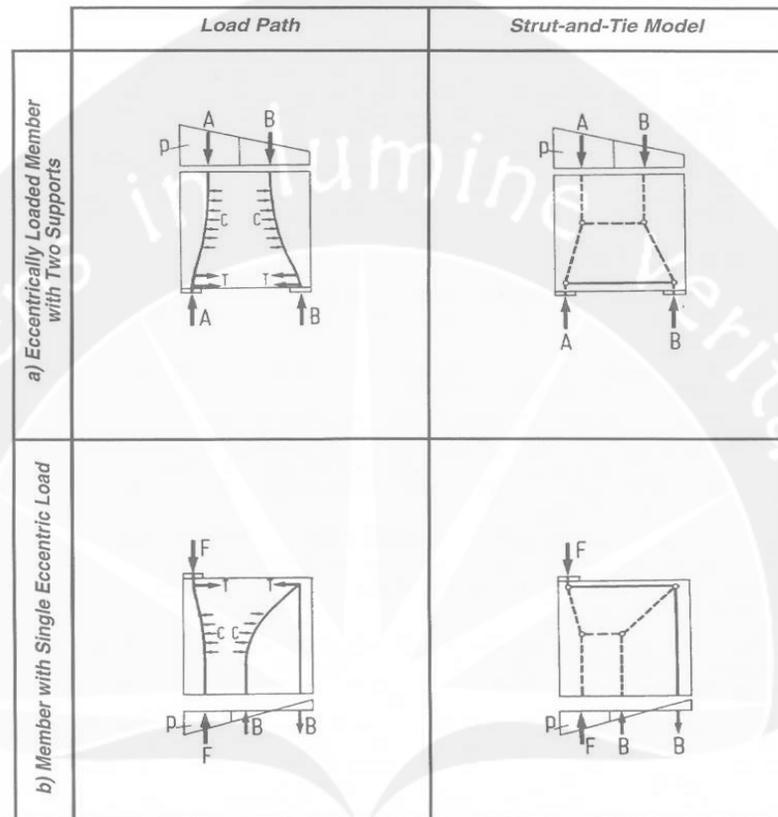
b. *Load path method* (metode perambanan beban)

Metode ini lebih sederhana dan lebih populer di kalangan perencana.

Langkah-langkah penentuan metode ini adalah sebagai berikut :

1. Dicari gaya-gaya reaksi
2. Beban yang bekerja pada daerah D dibagi dalam beberapa segmen sebagai berikut :
 - a. Beban merata digantikan dengan resultan gaya
 - b. Untuk beban tidak simetris digunakan resultan kopel gaya.
3. *Strut and tie* disediakan untuk membelokkan arah beban di dalam jalur antara beban dan reaksi.
4. Lokasi batang tarik harus memperhitungkan selimt beton dan jarak antar tulangan.

5. Bila ada beberapa pola aliran beban yang mungkin, maka digunakan pola aliran yang paling sederhana.



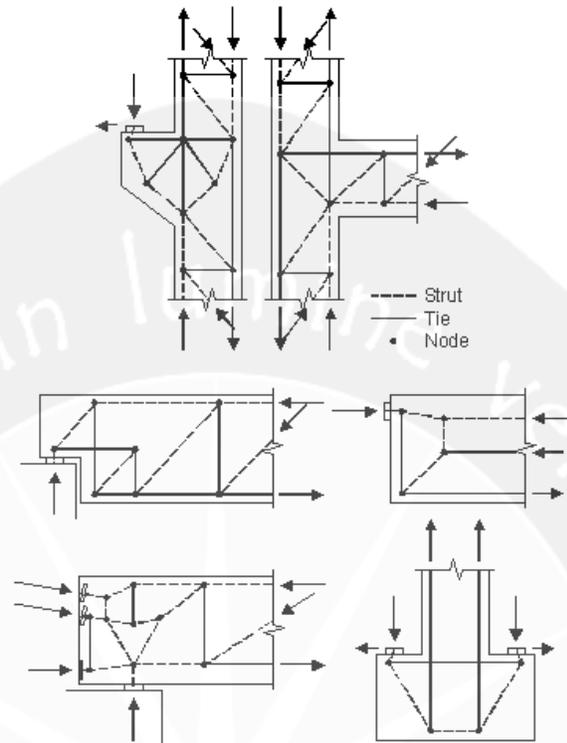
Gambar 2.12 Metode perambatan beban (*load path method*) (sumber: Fu, C. C., *The Strut-and-Tie Model Of Concrete Structures*)

Sebagai penjelasan dari gambar di atas, pada awalnya harus ditentukan terlebih dahulu keseimbangan luar sehingga beban kerja dan reaksi berada dalam keseimbangan. Kemudian beban P dibagi menjadi dua bagian yang masing-masing beban mempunyai kopel gaya. Kemudian diasumsikan bahwa jalur pembebanan sampai pada tumpuan untuk masing-masing beban A dan B tidak saling berpotongan. *Load path* pada A dan B akan bermuara pada titik berat tumpuan masing-masing A dan B . Akhirnya akan terbentuk model *load path* $A-A$ dan $B-B$. *Load path* $A-A$ harus berhubungan dengan

load path B-B, yaitu dengan menambahkan batang-batang horisontal berupa *strut* dan *tie* sehingga keseimbangan horisontal dapat tercapai. Dengan mengidealisasikan *load path A-A* dan *B-B* dengan suatu poligon yang terdiri dari batang tarik dan batang desak, maka terbentuklah *strut and tie model*.

c. Pemilihan dari Bentuk-bentuk Standar yang Sudah Ada

Dalam menentukan bentuk dari *strut and tie model* dapat dengan melihat bentuk yang sudah umum digunakan maupun bentuk yang sudah pernah diteliti sebelumnya. Pada suatu struktur, umumnya hanya terdapat beberapa bentuk standar, karena itu dapat dibuat analisis mendetail untuk menentukan model standar yang dapat diterapkan pada bentuk yang sama dengan ukuran yang berbeda. Standarisasi ini dapat memudahkan pekerjaan seorang perencana dan menghindari variasi penggunaan model oleh perencana yang berbeda. Model-model *strut and tie* yang dianjurkan pada beberapa bentuk struktur ditampilkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.13 Pemodelan *strut and tie* pada bermacam-macam bentuk struktur.

Dalam pembentukan model dari *strut and tie* diperlukan asumsi-asumsi yang sebagian telah digunakan dalam pemodelan, diantaranya adalah :

1. *Strut and tie model* didasarkan pada *static limit analysis (lower bound theorem of plasticity)* yang menyatakan bahwa suatu struktur tidak akan berada di ambang keruntuhan bila terjadi keseimbangan antara beban dan distribusi tegangannya sehingga setiap titik pada struktur mengalami tegangan di bawah tegangan lelehnya. Dengan demikian *load path* yang dipilih harus memberikan kapasitas struktur yang lebih rendah (tidak ada *load path* yang mengalami *overstressed*)

2. *Strut and tie model* berlaku untuk semua geometrik dan semua pola pembebanan.
3. *Strut and tie model* yang dipilih harus mampu mengakomodasi tegangan yang berubah akibat keretakan yang terjadi pada beton.
4. Struktur yang ditinjau diidealisasikan sebagai suatu sistem rangka batang plastis (*plastis truss analogy*) yang berada dalam keadaan seimbang.

Keseimbangan ini terpenuhi jika :

- a. Beban luar dan reaksi-reaksi tumpuan serta semua titik nodal berada dalam keadaan seimbang.
- b. Semua gaya tarik didukung oleh baja tulangan dengan atau tanpa baja prategang.
- c. Titik simpul (nodal) merupakan titik tangkap dari gaya-gaya pada *strut* dan *tie* dengan/tanpa gaya-gaya luar (beban) serta reaksi tumpuan, sehingga tidak timbul momen pada titik simpul tersebut.
- d. Kehilangan keseimbangan rangka batang terjadi jika beton mengalami kehancuran akibat desak atau baja tulangan mengalami pelelehan sehingga mengakibatkan rangka batang dalam mekanisme labil.
- e. *Strut and tie model* merupakan resultan dari medan-medan tegangan yang terbentuk di dalam struktur akibat suatu pembebanan.

Pada saat pembentukan model *strut and tie* perlu juga diperhatikan beberapa hal, sehingga model yang dibentuk merupakan suatu bentuk yang optimal dan sesuai dengan prinsip-prinsip perencanaan struktur. Hal-hal tersebut diantaranya adalah :

1. Bentuk tulangan harus praktis dan mudah untuk dilaksanakan
2. Pada permukaan yang luas perlu dipasang tulangan permukaan (suhu dan susut)
3. Susunan batang tarik (baja tulangan) hendaknya juga berlaku untuk kasus/pola pembebanan yang lain, sehingga diperlukan pengecekan terhadap kondisi beban yang lain.
4. Retak-retak pada beton akan menimbulkan redistribusi tegangan dalam struktur sehingga struktur akan berusaha menahan beban luar dengan kemampuan gaya-gaya dalam dengan deformasi yang seminimal mungkin, sehingga model dengan batang-batang tarik yang pendek dan sedikit mungkin akan lebih realistis.

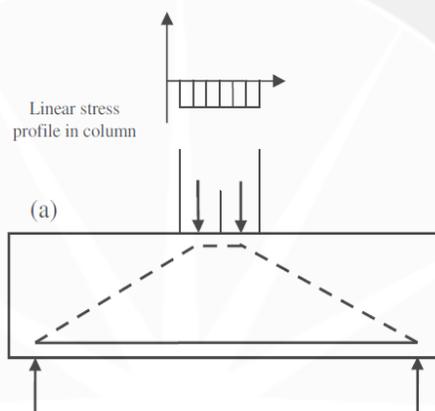
2.6 Strut and Tie Model Pile Cap Dengan Kombinasi Beban

Pile cap cenderung dibebani oleh kombinasi beban yang besar dengan beberapa variabel yang mempengaruhinya seperti beban angin, salju dan gempa. Oleh karena itu, *pile cap* harus dirancang agar mampu mendukung kombinasi beban yang ada.

Dengan asumsi bahwa semua tiang pancang memiliki kekakuan yang sama dan *pile cap* dibebani oleh sebuah kolom, maka ada empat kondisi bentuk desain

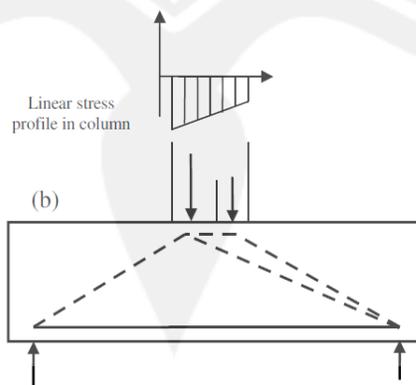
yang dibedakan menurut rasio beban aksial dan momen yang terjadi pada kolomnya. Sebagai catatan, penggambaran bentuk desain tersebut menurut dua-dimensi seperti pada balok. Pada *pile cap*, pemilihan bentuk *strut and tie model* dapat lebih kompleks. Adapun kondisinya sebagai berikut:

- a) Tidak ada resultan momen pada tegangan desak konstan dari kolom, tegangan desak terbagi rata untuk setiap tiang pancang.



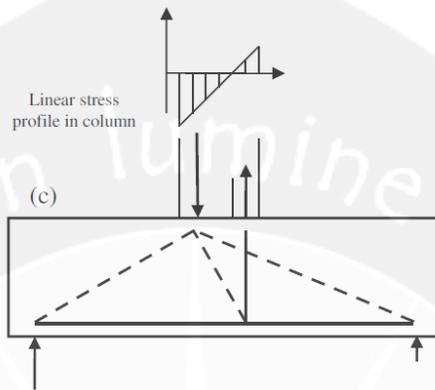
Gambar 2.14 *Strut and tie model* dengan kondisi kolom tanpa momen

- b) Resultan momen kecil pada tegangan desak normal dari kolom, tegangan desak bervariasi untuk setiap tiang pancang.



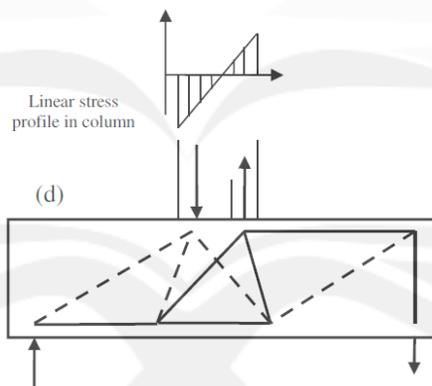
Gambar 2.15 *Strut and tie model* dengan kondisi momen kecil pada kolom

- c) Resultan momen merata untuk desak dan tarik normal pada kolom tetapi hanya tegangan desak yang terjadi pada tiang pancang.



Gambar 2.16 Strut and tie model dengan kondisi momen sedang pada kolom

- d) Resultan momen besar untuk desak dan tarik pada kolom dan kombinasi tegangan desak dan tarik terjadi pada tiang pancang.

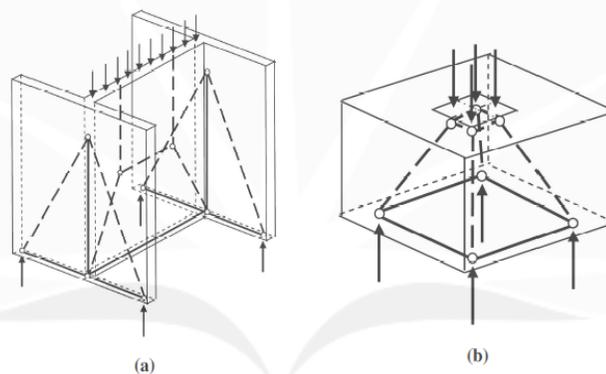


Gambar 2.17 Strut and tie model dengan kondisi momen besar pada kolom

Dikarenakan bentuk di atas merupakan penggambaran dua-dimensi, maka pemakaian analogi desainnya akan menyesuaikan dengan bentuk *pile cap* tiga-dimensi.

2.7 Strut and Tie Model 3D

Bila bagian pembebanan tidak berada pada bidang datar utama, Schlaich menyarankan penggunaan *strut and tie model* tiga-dimensi (3D). Pada beberapa literatur, kasus 3D diselesaikan dengan kombinasi model dua-dimensi (2D) pada setiap bidang sisinya. Misalnya pada sebuah balok-I (*I-beam*) yang dapat dianalisa dengan menggunakan dua buah model 2D, pada bidang *flange* dan *web*, dengan beberapa node di antara kedua model tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.18 Kondisi *strut and tie model* 3D yang di selesaikan dengan analogi 2D; (a) balok-I dengan *strut and tie model* pada setiap bidanganya; (b) *strut and tie model* 3D *pile cap* empat tiang pancang membutuhkan penyederhanaan 2D pada *nodal zone*-nya

Analisis *pile cap* empat tiang pancang, seperti ilustrasi pada gambar (b), dapat dilakukan dengan mempertimbangkan bidang diagonal (di luar bidang datar utama) berupa dua batang *strut* yang berseberangan.

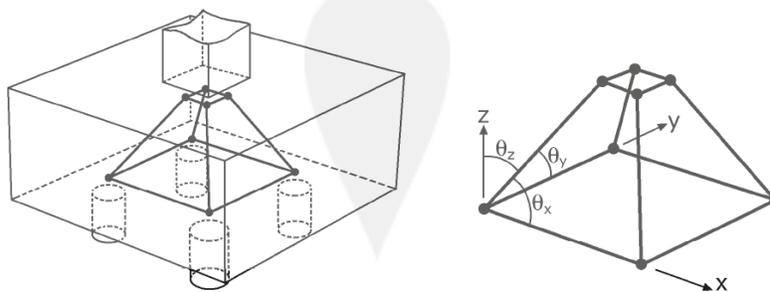
Ada beberapa asumsi penyederhanaan, sebagai berikut:

- Asumsi *strut* berbentuk persegi diperlukan untuk menyederhanakan geometri yang kompleks, dimana *strut* saling bertemu pada bidang tiga-dimensi

- Perbedaan geometri antara *strut* dan *node* harus diabaikan (tetapi pengecekan harus dilakukan untuk memastikan bahwa penempatan *strut* benar-benar berada pada titik pusat dan area *node* memiliki ruang yang cukup)

Prosedur yang paling logis, dengan analogi *2D*, adalah menganggap resultan beban pada *strut* dan *tie* berada pada satu bidang yang sama. Kemudian memprosesnya dengan menganggap resultan gaya *tie* berada pada bidang vertikal *strut*. Mudahnya seperti yang terlihat pada gambar (b) di atas, *pile cap* empat tiang yang terdapat bidang diagonal di dalamnya. Pada bidang diagonal tersebut kondisi *pile cap* dapat dianggap *2D*.

Sementara itu, keterbatasan analogi dua-dimensi muncul ketika beberapa *strut* bertemu pada satu *node* yang sama. Pada kasus perencanaan *pile cap*, yang elemen-elemennya berdimensi besar pada tiga arah (*3D*), perencanaan dengan *strut and tie model* ditentukan oleh *nodal zone* dari kolom dan tiang pancang. *Nodal zone* tersebut diperuntukkan bagi bentuk *3D* yang kompleks dari pembebanan. Sehingga penggunaan analogi tiga-dimensi ini tepat bila diaplikasikan pada kasus *pile cap*.

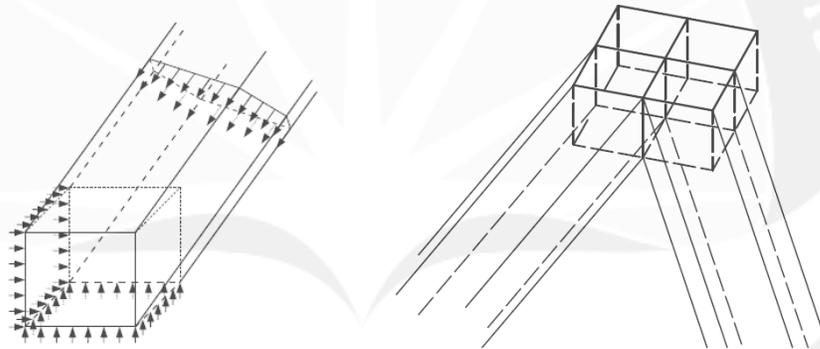


Gambar 2.19 Distribusi tegangan pada pile cap empat tiang pancang tiga-dimensi yang membentuk *strut and tie model*

Parameter *nodal zone* yang seharusnya diketahui untuk menentukan kebutuhan *strut* adalah sebagai berikut:

- Dimensi dari area pembebanan (kolom) dan area tumpuan (tiang pancang)
- Tinggi node, ditentukan oleh tinggi *strut* horisontal atau tinggi pengaruh batang tarik (dua kali jarak tepi ke pusat area tulangan baja)

Sebagai catatan, luas penampang *strut* diagonal merupakan area yang tegak lurus terhadap garis diagonal.



Gambar 2.20 Nodal zone tiga-dimensi (3D) beserta batang *strut*

2.8 Ketentuan Peraturan ACI

Peraturan *ACI* berisi ketentuan untuk mendesain *D-region* menggunakan *strut and tie model*. Desain pendekatan dasar dapat menunjukkan bahwa pemodelan *strut and tie* yang terpilih (*truss ideal*) mampu untuk mentransfer beban ke tumpuan dan ke daerah di dekat *B-region*. Berdasarkan hal itu, *strut and tie model* harus memenuhi beberapa ketentuan, sebagai berikut :

1. *Strut and tie model* harus berada dalam kondisi setimbang terhadap beban terfaktor yang diberikan serta reaksi tumpuannya.
2. *Strut* tidak diperbolehkan saling menyilang atau saling bertemu, kecuali pada daerah *nodal*. Kekuatan *strut* berdasarkan pada ukurannya dan kekuatan beton. Dengan demikian apabila *strut* saling menyilang, maka bagian dari *strut* akan mengalami *over stressed*.
3. *Tie* diperbolehkan bersilangan dengan *strut* atau *tie* lainnya. *Tie* yang bersilangan dengan *strut* akan menyebabkan regangan pada arah melintang yang akan menurunkan kemampuan *strut*. Oleh karena itu, *ACI* mereduksi kemampuan *strut* yang disilang oleh *tie* atau ketika tegangan desak diarahkan menyilang melewati retakan di daerah tarik.
4. Sudut antara garis *strut* dan *tie* pada sebuah *node* tidak boleh kurang dari 25°. Hal ini dimaksudkan untuk mengurangi retakan dan untuk menghindari ketidaksesuaian hasil oleh pemendekan *strut* dan pemanjangan *tie* pada arah yang sama.
5. Kekuatan *strut*, *tie* dan *node* harus memenuhi kebutuhan dasar yakni :

$$\phi F_n > F_u$$

Dimana, F_n adalah kuat nominal dari *strut*, *tie* dan *node*, F_u adalah gaya pada *strut* dan *tie*, atau gaya yang mengarah pada *node*, ϕ adalah faktor reduksi konstan bernilai 0,75 yang digunakan *strut*, *tie* dan *node*.