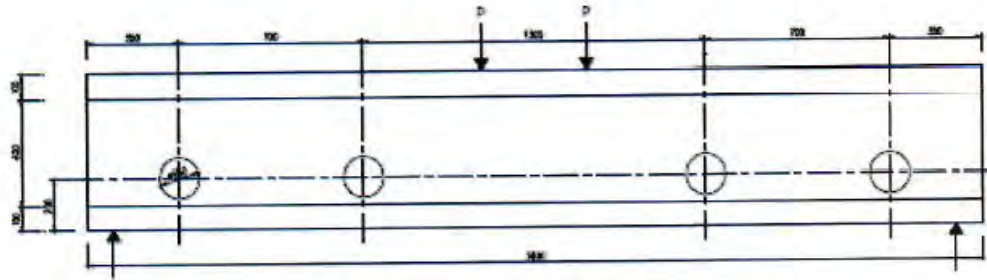
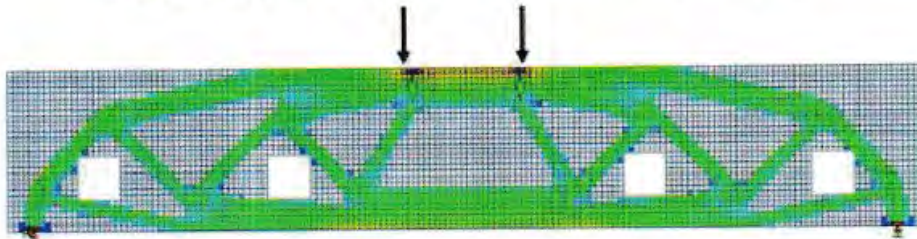


Contoh 11-1:

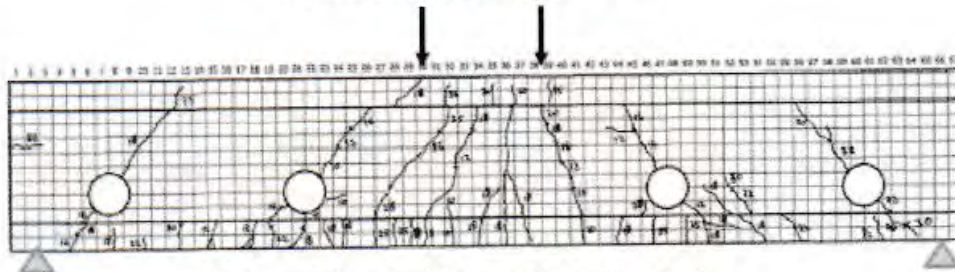
Struktur Balok langsing A dengan $L/h=5.4$ mempunyai lubang dengan diameter 150 mm pada daerah tarik.



Balok I $L/h = 340/60$ dengan bukaan $\varnothing = 150\text{mm}$



Optimisasi topologi struktur

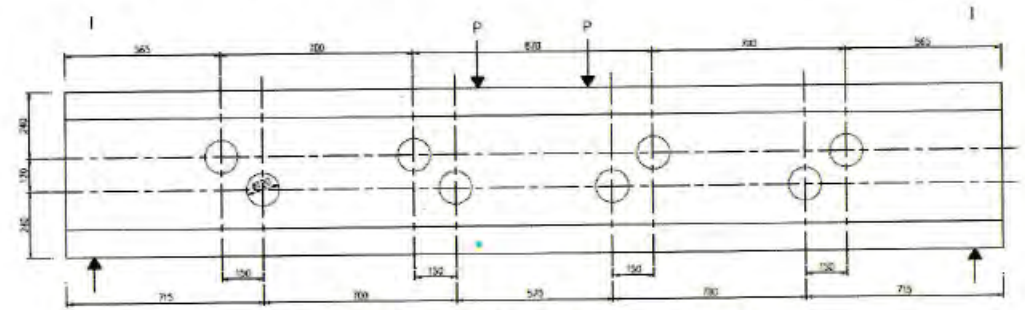


Pola retak struktur pada beban batas

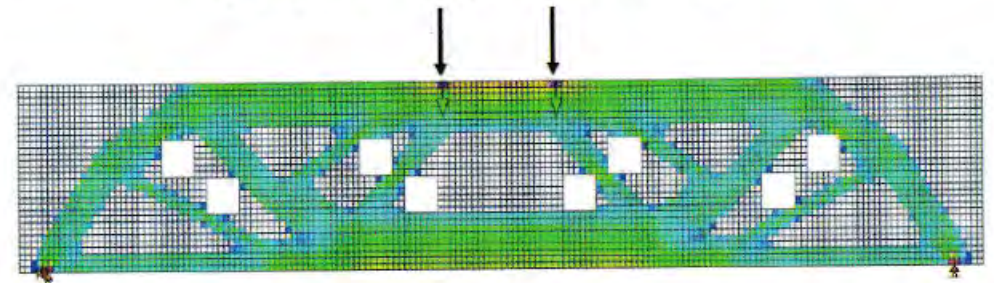
Gambar 4-20: Hasil optimisasi topologi struktur balok standar dengan bukaan dan beban terpusat P pada tengah bentang.

Contoh 11-2:

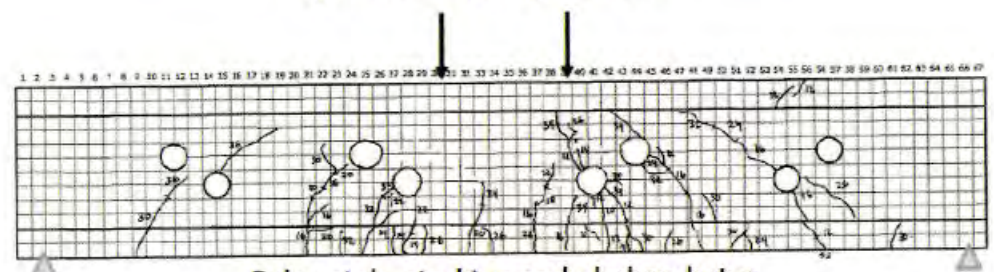
Struktur Balok langsing B dengan $L/h=5.4$ mempunyai deretan lubang dengan diameter 120 mm pada daerah badan.



Balok I $L/h = 340/60$ bukaan $\varnothing = 150\text{mm}$



Optimisasi topologi struktur

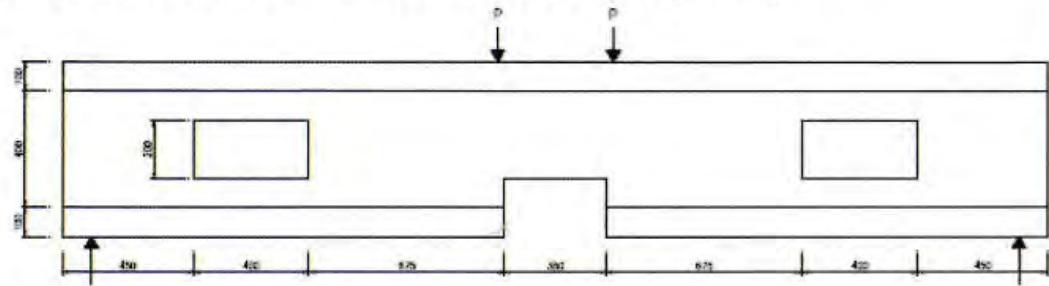


Pola retak struktur pada beban batas

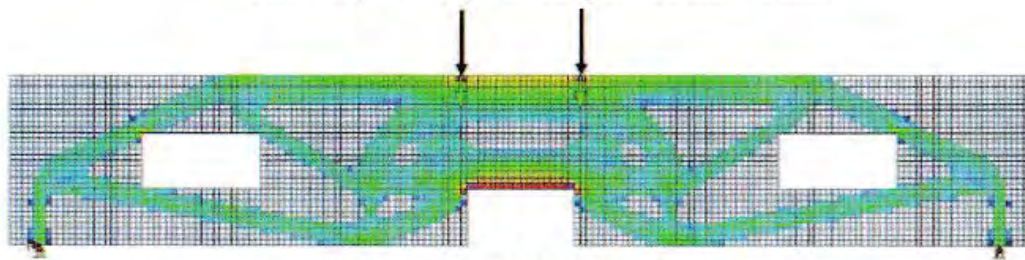
Gambar 4-21: Hasil optimisasi topologi struktur balok standar dengan bukaan dan beban terpusat P pada tengah bentang.

Contoh 11-3:

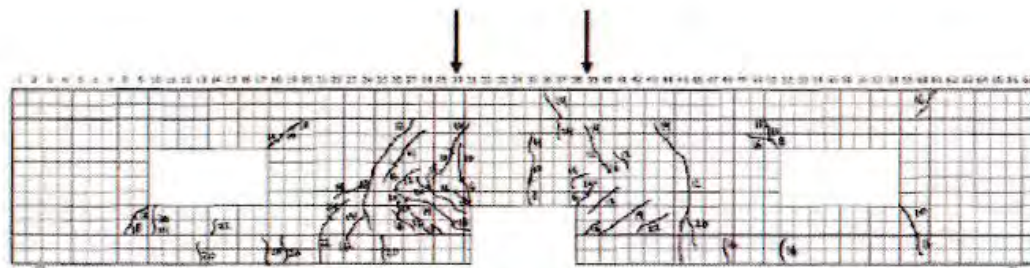
Struktur Balok langsing C dengan $L/h=5.4$ mempunyai 2 bukaan besar pada daerah badan dan daerah Tarik yang terpotong.



Balok I $L/h = 60/340$ dengan bukaan besar

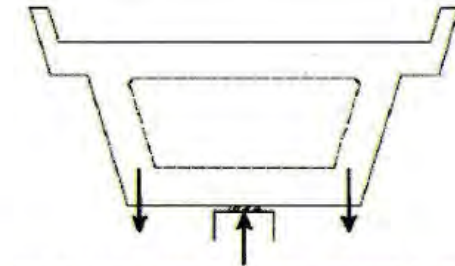


Optimisasi topologi struktur

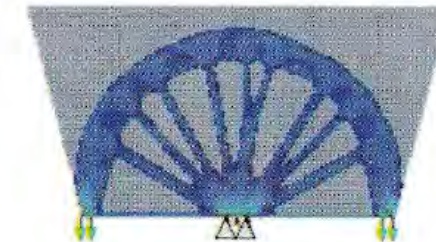


Pola retak struktur pada beban batas

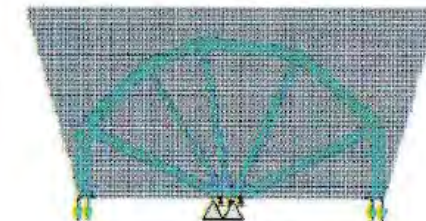
Gambar 4-21: Hasil optimisasi topologi struktur balok standar dengan bukaan lebar dan beban terpusat P pada tengah bentang.



Dinding Diaphragma pada Box Girder dengan 1 pilar tumpuan



Optimisasi topologi struktur 30%



Optimisasi topologi struktur 25%

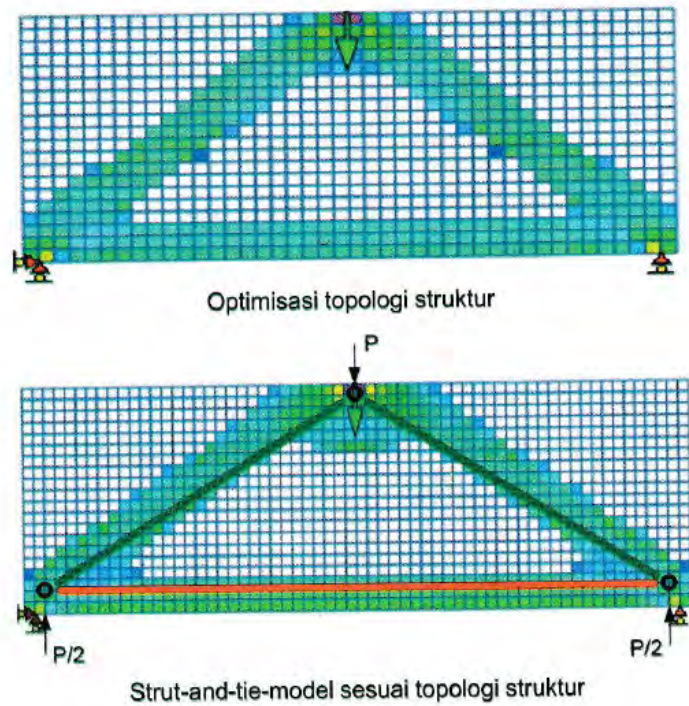
Gambar 4-24: Hasil optimisasi topologi struktur *diaphragm* box girder.

- Bentuk struktur yang semula utuh berubah bentuk (berevolusi) menjadi struktur yang tidak utuh, tetapi sebagai struktur yang menyerupai rangka.
- Walaupun topologi struktur tersebut menyerupai rangka, tetapi rangka tersebut terdiri dari batang-batang struktur yang dimensinya berlainan dan terdiri elemen-elemen struktur yang mengalami tegangan berbeda. Hal ini sesuai dengan hasil *finite elemen analysis* pada sistem rangka tersebut.
- Demikian pula, pertemuan batang-batang struktur (join) tetap merupakan satu kesatuan yang terdiri dari elemen-elemen struktur dengan berbagai variasi tegangan.
- Apabila jarak antara beban dan tumpuan terlalu jauh, maka transfer beban “secara langsung” berubah menjadi “tidak langsung” dengan perantara batang-batang diagonal. Alur gaya ini dapat dipelajari melalui pola garis trajektori.
- Apabila kedua metoda ini dibandingkan, maka metoda optimisasi topologi struktur ini lebih sederhana dan mudah memberikan sistem transfer gaya secara langsung dan jelas.

Langkah-langkah yang perlu dilakukan untuk proses transformasi dari topologi struktur menjadi *strut-and-tie model* adalah sebagai berikut:

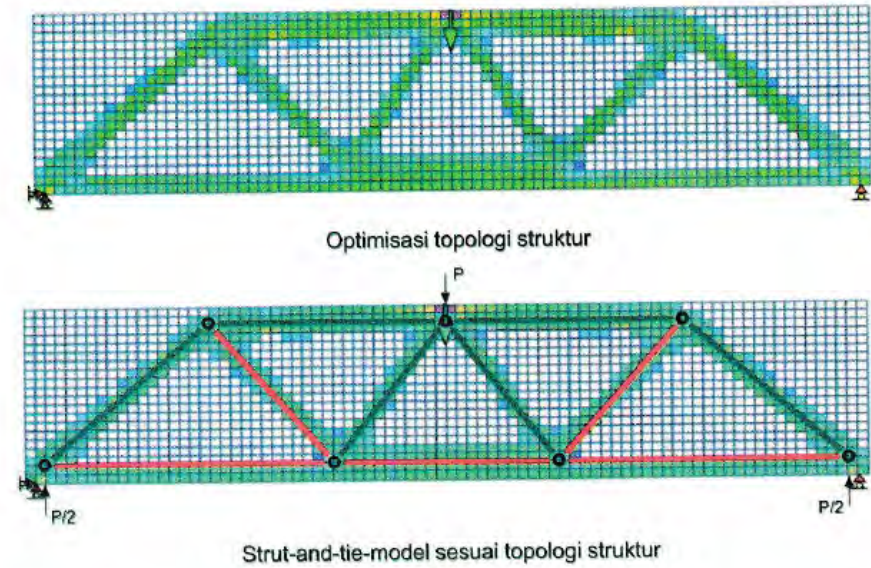
1. Lengkapi pada gambar optimisasi topologi struktur dengan mencantumkan gaya-gaya keseimbangan luarnya, yaitu beban dan reaksi tumpuan.
2. Elemen-elemen struktur pada optimisasi topologi struktur disederhanakan sebagai batang tarik (*tie*) atau batang tekan (*strut*) yang *uniform*.
3. Pertemuan batang-batang struktur disederhanakan sebagai sendi, sesuai asumsi pada struktur rangka batang.
4. Penentuan batang tekan ataupun batang tarik harus berdasarkan pengertian/ pengetahuan pola alur gaya, seperti yang telah dibahas pada bab 3.
5. Syarat keseimbangan gaya pada semua titik-titik pertemuan batang-batang tersebut harus terpenuhi.
6. Untuk membedakan batang tarik dan tekan pada *strut-and-tie model* dapat dilakukan dengan memberikan tanda warna ataupun tanda lainnya. Misalnya, garis hijau menunjukkan batang TEKAN, sedangkan garis merah menunjukkan batang TARIK.

Contoh 1: Struktur balok tinggi $L/h=2$ dengan satu beban terpusat P .



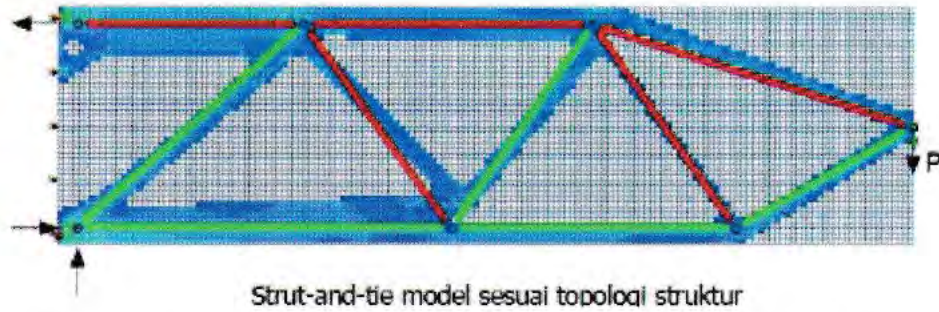
Gambar 4-25: Optimisasi topologi struktur balok tinggi dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 2: Struktur balok $L/h=4$ dengan satu beban terpusat P .



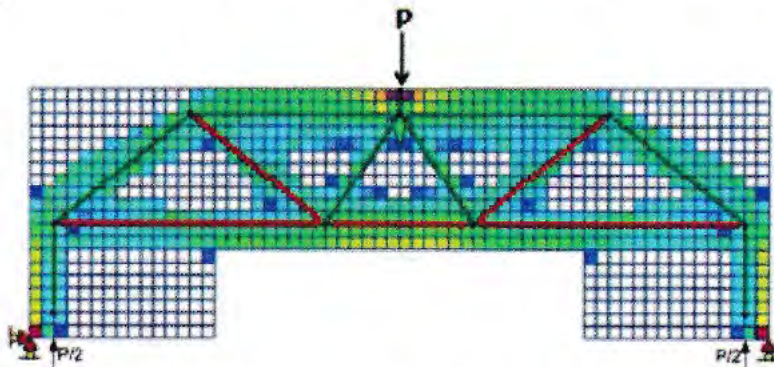
Gambar 4-26: Optimisasi topologi struktur balok dengan $L/h=4$ dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 3: Balok kantilever dengan beban terpusat P.



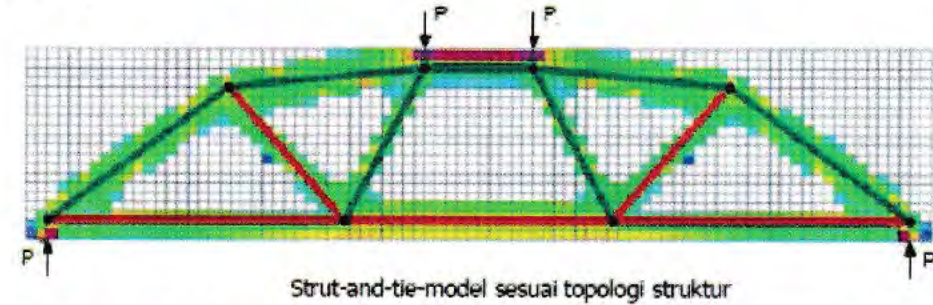
Gambar 4-27: Optimisasi topologi struktur balok kantilever dan transformasinya sebagai strut-and-tie model.

Contoh 5:
Struktur Balok tinggi $L/h=3$ non prismatic yang dibebani satu beban terpusat P.



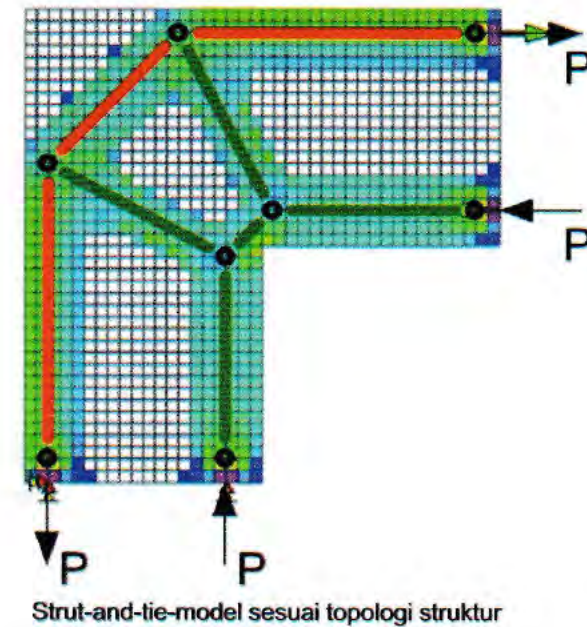
Gambar 4-29: Optimisasi topologi struktur balok non-prismatik dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 4:
Struktur Balok langsing $L/h=5$ yang dibebani DUA beban terpusat P pada daerah tengah balok.



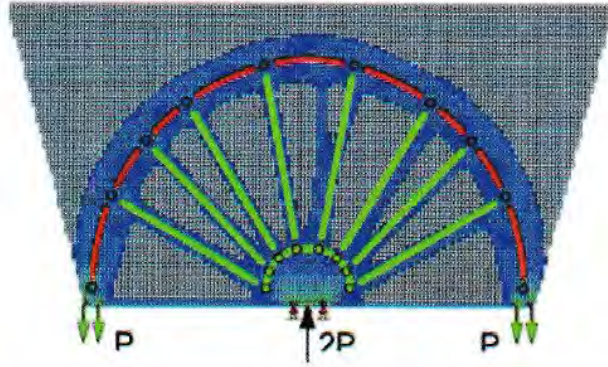
Gambar 4-26: Optimisasi topologi struktur balok dengan $L/h=5$ dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 6: Pertemuan balok dan kolom sudut dengan momen lentur pada kedua ujungnya.



Gambar 4-30: Optimisasi topologi struktur pertemuan kolom dan balok dengan beban momen lentur dan transformasinya sebagai strut-and-tie model.

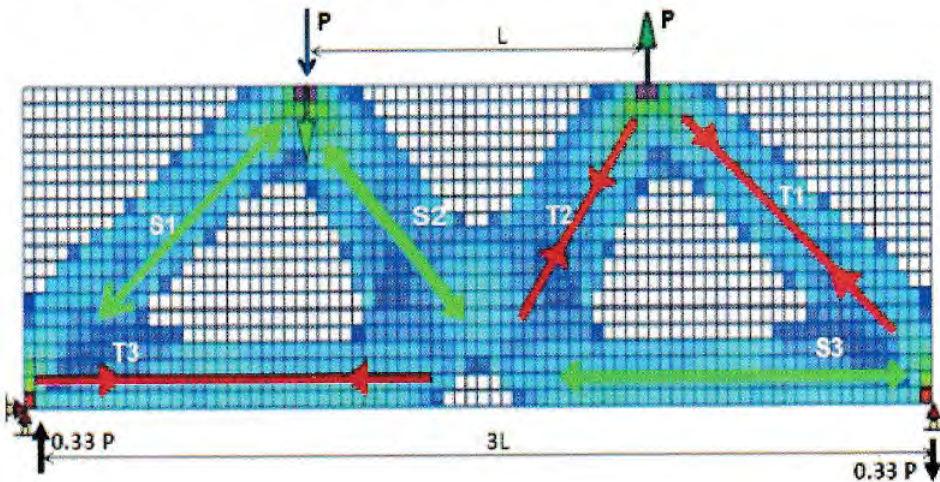
Contoh 7: Struktur diafragma *box girder* dengan tumpuan tunggal pada bagian tengah.



Strut-and-tie model sesuai topologi struktur

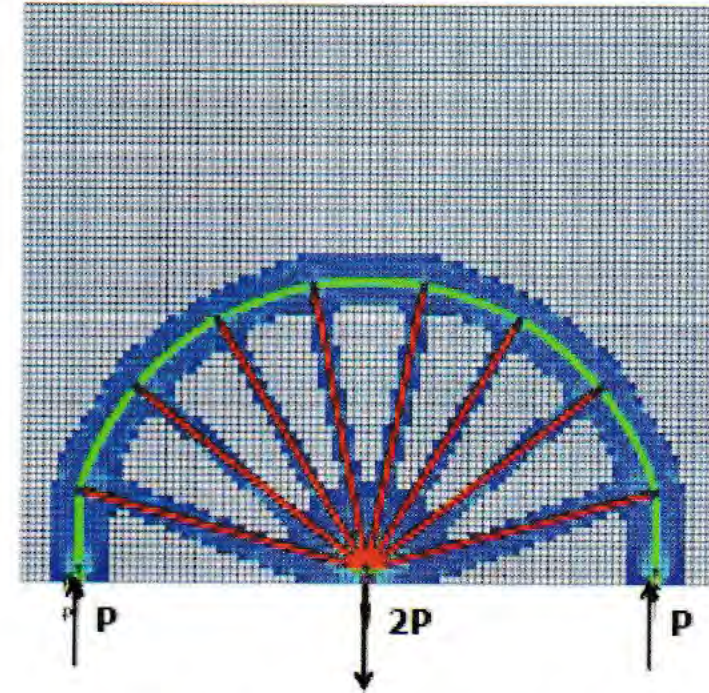
Gambar 4-31: Optimisasi topologi struktur penyekat box girder dengan tumpuan tunggal dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 9: Struktur Balok tinggi dengan $L/h=3$ dengan beban kopel (beban terpusat P tarik dan P tekan).



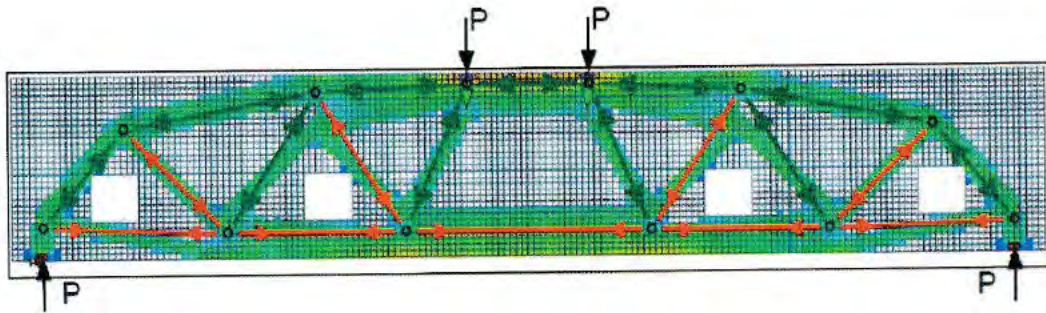
Gambar 4-33: Optimisasi topologi balok tinggi $L/h=3$ dengan beban P kopel dan transformasinya sebagai strut-and-tie Model.

Contoh 8: Struktur dinding diatas dua tumpuan yang dibebani beban terpusat $2P$ pada bagian bawahnya.

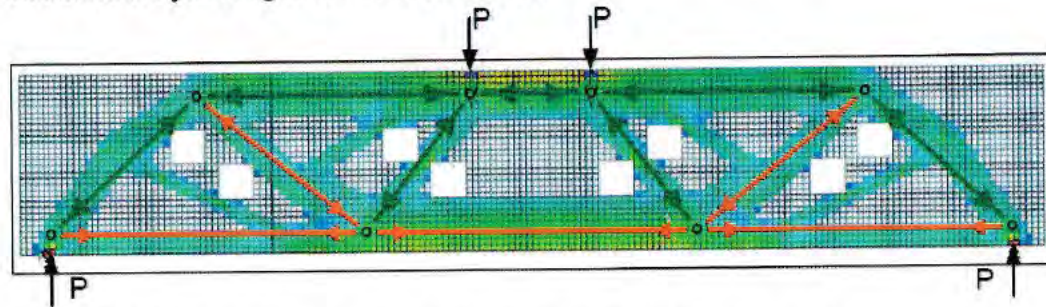


Strut-and-tie-model sesuai topologi struktur

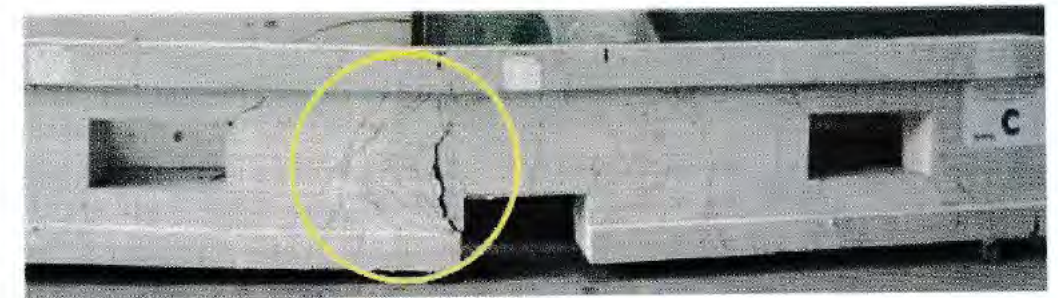
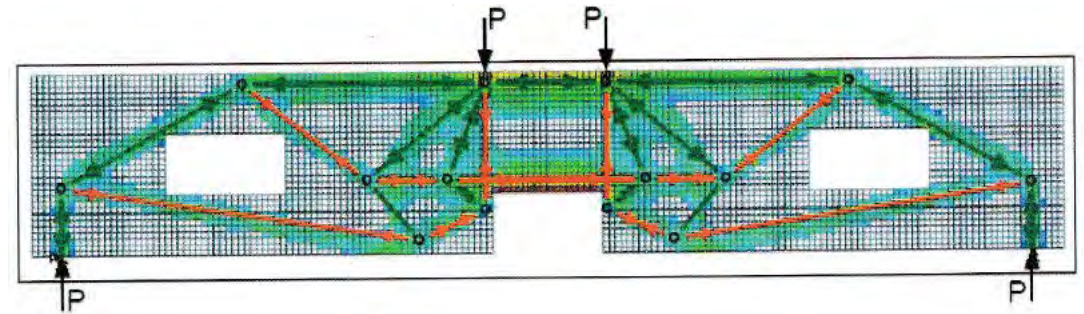
Gambar 4-32: Optimisasi topologi struktur dinding diatas 2 tumpuan dengan beban terpusat pada bagian bawah tunggal dan transformasinya sebagai strut-and-tie model.



Gambar 4-34: Optimisasi topologi balok I dengan bukaan kecil dan transformasinya sebagai strut-and-tie model.



Gambar 4-35: Optimisasi topologi balok I dengan bukaan banyak dan transformasinya sebagai strut-and-tie model.



Gambar 4-36: Optimisasi topologi balok I dengan bukaan besar dan transformasinya sebagai strut-and-tie model. Bandingkan pola retak pada balok dan strut-and-tie model yang ada di daerah dengan tanda lingkaran.

PERANCANGAN BATANG TEKAN (STRAT), BATANG TARIK (PENGKIKAT) DAN TITIK HUBUNG (NODAL)

Dari SNI 2847:2013 Lampiran A.2:

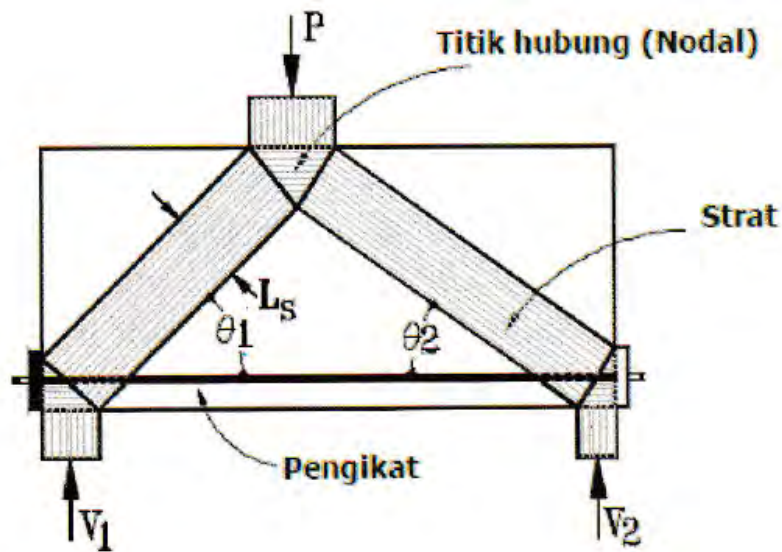
- a. *Strut-and-tie model* didasarkan pada *static limit-analysis (lowerbound theorem of plasticity)*. Berdasarkan teori *lower-bound-plasticity*, suatu struktur tidak akan berada di ambang keruntuhan bila terjadi keseimbangan antara beban dan distribusi tegangan, di mana setiap titik pada struktur mengalami tegangan di bawah tegangan lelehnya. Model dengan alur gaya yang dipilih memberikan kapasitas struktur yang terendah (model dengan alur gaya yang lain menghasilkan kapasitas struktur yang lebih besar dibandingkan dengan model alur gaya yang dipilih sebelumnya). Dengan demikian penggunaan metoda ini dianggap konservatif.
- b. *Strut-and-tie* model dapat digunakan pada berbagai bentuk geometri struktur dan semua pola pembebanan.
- c. Bentuk *strut-and-tie* model **haruslah berdasarkan arah alur gaya (*load path*) maupun pola distribusi tegangan-tegangan utama**. Diharapkan tidak berbeda jauh antara sebelum dan sesudah beton mengalami keretakan.

Struktur yang ditinjau diidealisasikan sebagai suatu sistem rangka batang plastis (*plastic truss analogy*) yang berada dalam keseimbangan. Keseimbangan rangka batang terpenuhi jika:

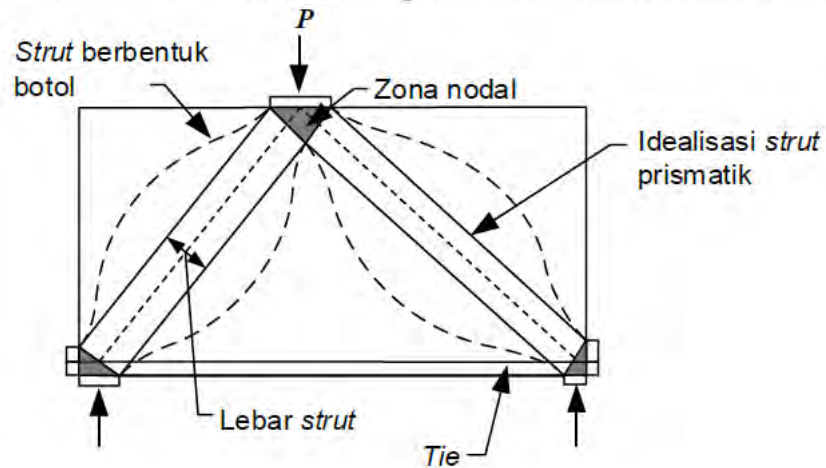
- (1) Beban luar dan reaksi-reaksi tumpuan serta semua titik simpul berada dalam keseimbangan.
- (2) Kuat tekan efektif beton (f_{cc}) yang diproporsikan untuk memikul tekan $\leq \nu f'_c$, dengan ν adalah faktor efisiensi yang nilainya lebih kecil dari satu, sesuai SNI 2847-2013-Lampiran A3.2.
- (3) Semua gaya tarik dipikul oleh baja tulangan dengan atau tanpa tendon prategang.
- (4) Titik simpul atau hubung merupakan titik tangkap yang diasumsikan sebagai sendi, dari sumbu-sumbu batang dengan atau tanpa garis-garis gaya luar termasuk reaksi perletakan. Semua garis-garis gaya tersebut bertemu pada titik sendi tersebut.
- (5) Strat dan pengikat merupakan *resultant* dari berbagai medan tegangan.

Ada lima unsur pokok dalam pembentukan keseimbangan rangka batang dalam strut-and-tie model, yaitu strat (*compression*), pengikat (*tension*), titik hubung sebagai nodal (*nodes*) yang kadangkala disebut "*hydrostatic element*", aksi kipas (*fan actions*) berupa *compression fans* dan aksi pelengkung (*arching action*), serta medan tekan diagonal (*diagonal compression field*).

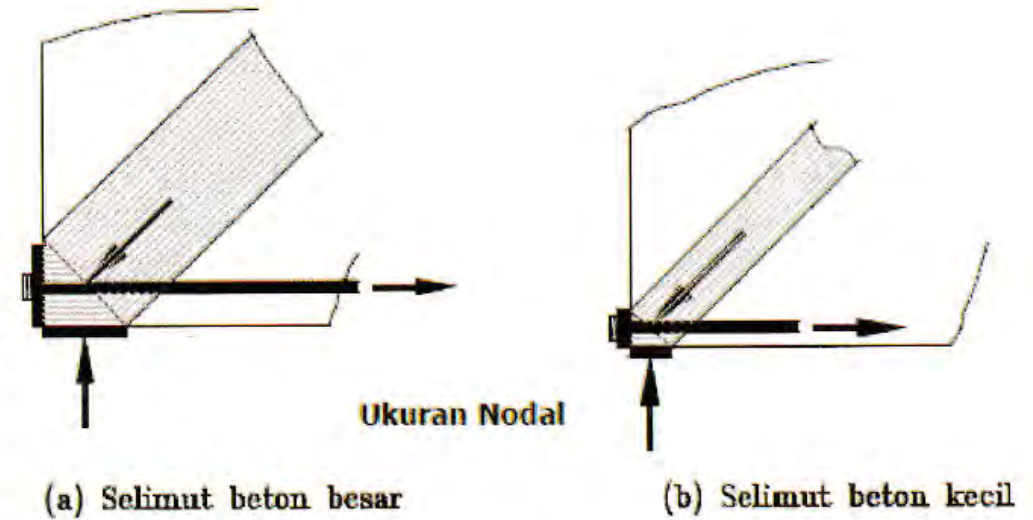
- a. Strat beton pada gambar 5-1 dan 5-2 merupakan batang uniaxial tekan dan tegangannya adalah f_{ce} pada saat beban mencapai beban batasnya. Strat tersebut memiliki lebar dan tebal tertentu yang besarnya tergantung pada gaya batang serta tingkat tegangan yang diizinkan. Sisi muka ujung-ujung strat tegak lurus sumbu strut.
- b. Pengikat sebagai batang tarik dapat berupa baja tulangan tunggal atau kelompok termasuk baja prategang bila ada. Karena keruntuhan tarik dari baja tulangan bersifat daktail, maka dalam perancangan struktur keadaan batasnya ditentukan oleh tegangan leleh tulangan. Lihat SNI 2847-2013 Lampiran A.4.1. Penempatan pengikat harus diperhatikan karena dapat mengakibatkan perubahan dimensi dari nodal. Penempatan yang salah seperti ditunjukkan pada gambar 5-2b, dapat membahayakan struktur, yaitu terjadinya peningkatan tegangan baik pada strat maupun nodal.



Gambar 5-1: Gambar *plastic-truss-model* dari suatu balok tinggi.



Gambar R23.2.1 – Deskripsi model *strut-and-tie*



Gambar 5-2: Gambar (a) menunjukkan titik pertemuan antara strat dan pengikat pada posisi yang baik, dan gambar (b) pengikat digeser ke bawah (selimut beton menipis) sehingga terjadi pengecilan dimensi pada nodal yang dapat meningkatkan tegangan pada strat dan nodal.

Dalam pendimensian, pada umumnya dihadapi 2 jenis pengikat yaitu:

- T_c batang pengikat dalam keadaan tarik tanpa tulangan, artinya gaya tariknya kecil sehingga cukup dipikul oleh kuat tarik dari betonnya.
- T_s batang pengikat berupa baja tulangan dengan atau tanpa baja prategang.

- c. Titik hubung atau nodal membentuk suatu elemen yang dinamakan nodal elemen atau *hydrostatic-element*. Daerah ini merupakan daerah titik tangkap gaya-gaya yang bertemu pada satu titik sehingga tegangan yang terjadi cukup rumit karena daerah ini mengalami tegangan biaxial atau triaxial. Pada gambar 5-1 daerah nodal yang dibebani oleh tegangan tekan dua arah memiliki tegangan induk pada kedua sisinya yang sama besarnya, yaitu f_{ce} , sehingga disebut sebagai *hydrostatic-element*. Walaupun demikian kondisi ini tidak selalu terpenuhi sehingga daerah ini lebih umum disebut dengan *truss-node* atau nodal. Sebagaimana diungkapkan di depan bahwa tegangan pada elemen nodal akan menjadi kritis bila dimensi nodal yang terbentuk tidak memadai (terlalu kecil). Dalam perancangan, nodal harus mendapat perhatian yang baik, khususnya pada pertemuan dengan batang-batang tarik yang harus dijangkar. Penjangkaran batang tarik yang tidak baik akan mengakibatkan keruntuhan lebih awal. Penjangkaran dapat dilakukan dengan memberikan panjang penjangkaran, panjang penyaluran dan kait yang cukup. Kadangkala penjangkaran juga dilakukan dengan menggunakan jangkar pelat baja berupa "end-plates".
- d. Strat bentuk kipas berupa kumpulan batang tekan berbentuk kipas pada umumnya terjadi pada daerah sekitar beban terpusat atau pada daerah sekitar tumpuan.
- e. Medan tekan diagonal (*diagonal compression field*) terdiri dari strut diagonal paralel yang biasanya terletak pada daerah B.

Desain

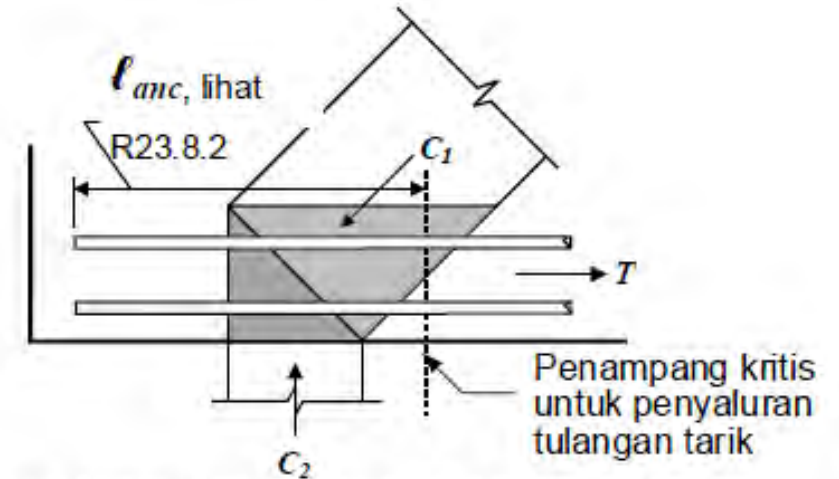
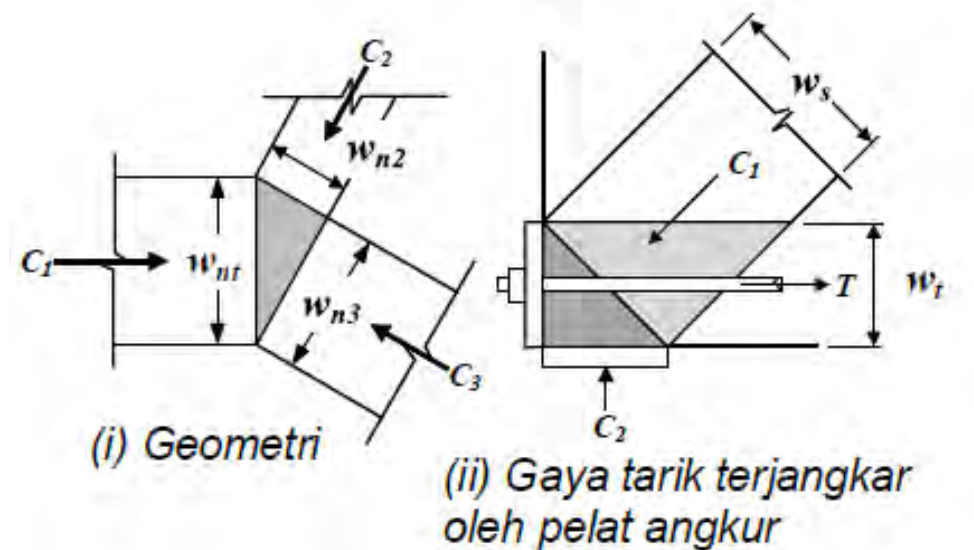
Proses desain model *strut-and-tie* untuk memikul gaya yang diberikan yang bekerja dalam daerah-D disebut sebagai metode *strut-and-tie*, mencakup empat langkah berikut (SNI 2847: 2019 pasal R23.2.1):

1. Menemukan dan memisahkan setiap daerah-D.
2. Menghitung gaya resultan pada setiap batas daerah-D.
3. Memilih model dan menghitung kekuatan dalam *strut* dan *tie* untuk mentransfer gaya resultan melintasi daerah-D. Sumbu *strut* dan *tie* dipilih kira-kira berhimpit dengan sumbu medan tekan dan tarik.
4. Merancang *strut*, *tie*, dan zona nodal sehingga mereka memiliki kekuatan yang cukup.

23.2.6 *Strut* harus berpotongan atau saling tumpang tindih hanya boleh terjadi pada nodal.

Gambar R23.2.6a(i) menunjukkan zona nodal C-C-C. Jika tegangan pada permukaan zona nodal adalah sama di ketiga *strut*, rasio panjang dari sisi zona nodal, $w_{n1}:w_{n2}:w_{n3}$, berada dalam proporsi yang sama dengan tiga gaya, $C1:C2:C3$.

Zona nodal C-C-T dapat direpresentasikan sebagai zona nodal hidrostatik jika *tie* diasumsikan diteruskan melalui nodal dan diangkur dengan pelat di sisi yang jauh dari nodal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar R23.2.6a(ii), disediakan ukuran pelat yang menghasilkan tegangan tumpu yang sama dengan tegangan pada *strut*. Pelat tumpu di sisi kiri



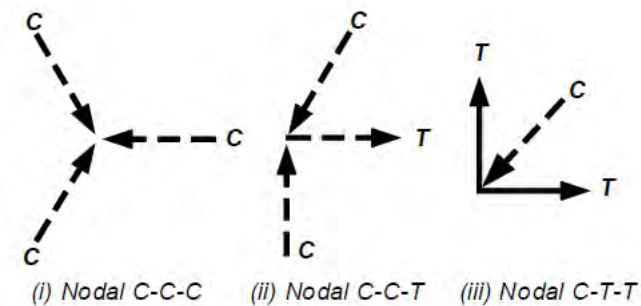
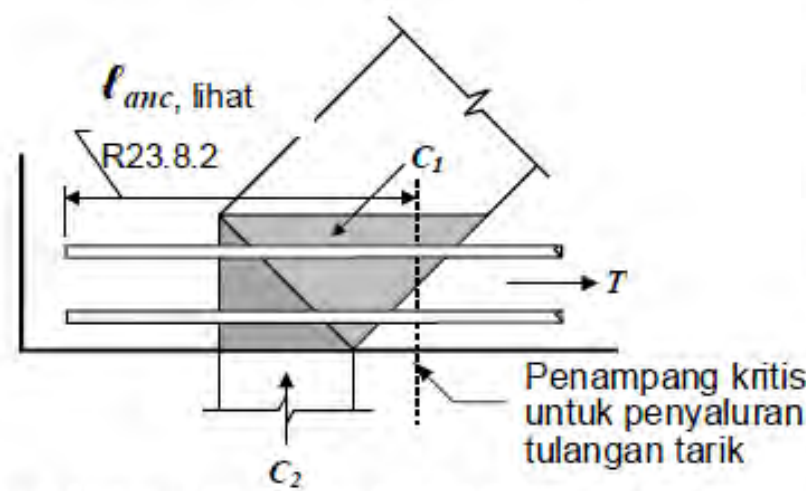
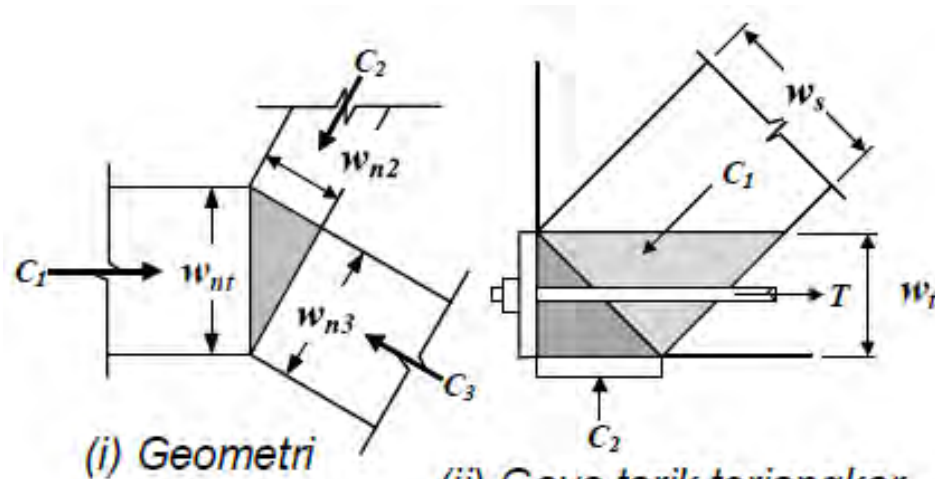
(iii) Gaya tarik terjangkar karena penanaman

Gambar R23.2.6a – Nodal hidrostatik

Gambar. R23.2.6a(ii) digunakan untuk merepresentasikan pengangkur *tie* yang sebenarnya. Gaya *tie* dapat diangkur oleh sebuah pelat atau melalui penanaman batang lurus (Gambar. R23.2.6a(iii)), batang berkepala, atau batang berkait. Untuk nodal nonhidrostatik, permukaan dengan tegangan tertinggi akan mengontrol dimensi nodal.

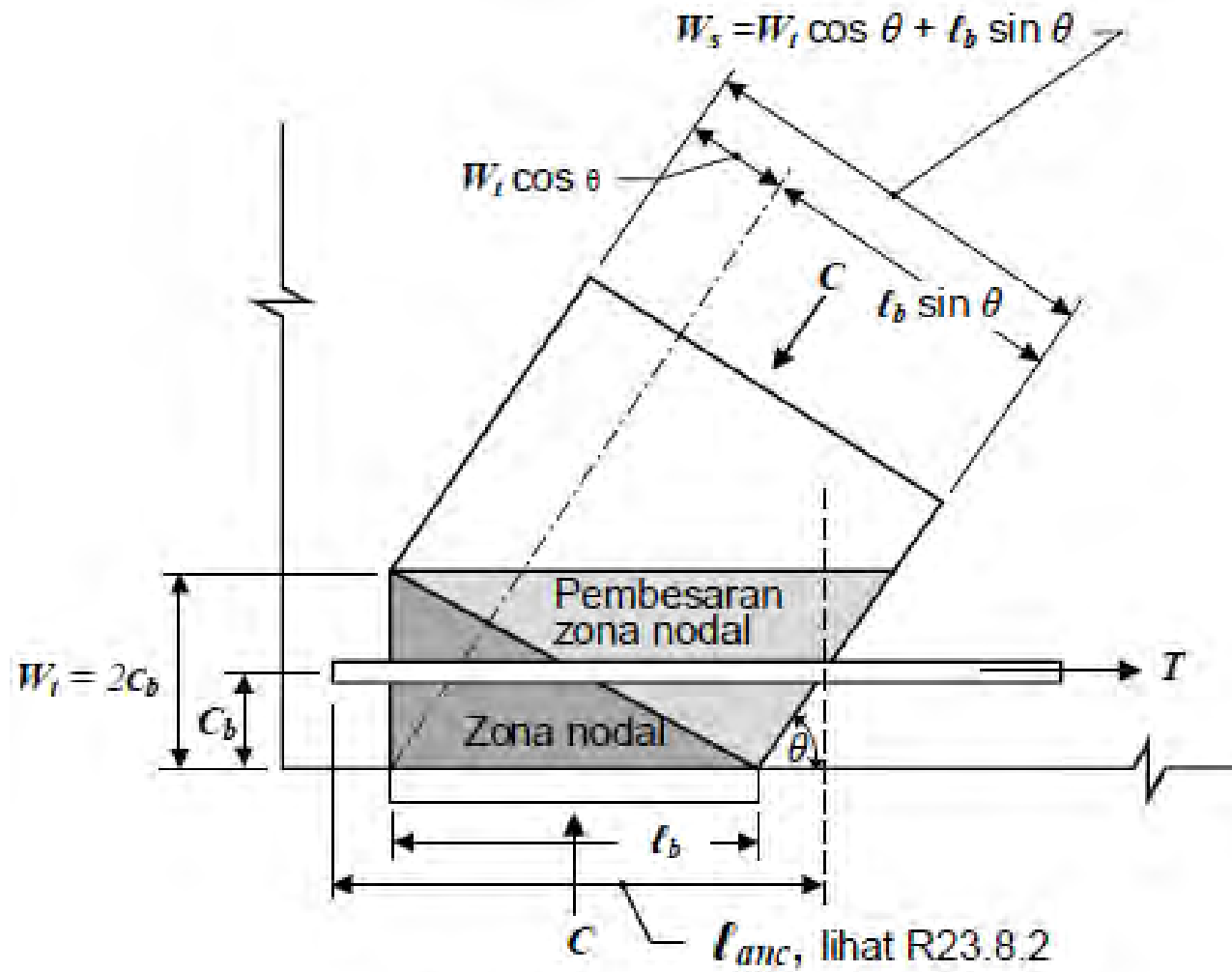
Daerah yang diarsir lebih terang pada Gambar R23.2.6a(ii) adalah zona nodal yang diperpanjang. Zona nodal yang diperpanjang merupakan bagian dari komponen yang diikat dengan perpotongan lebar *strut* efektif w_s dan lebar *tie* efektif w_t .

Untuk keseimbangan, setidaknya tiga gaya harus bekerja pada setiap nodal dalam model *strut-and-tie*, seperti yang ditunjukkan Gambar R23.2.6c. Nodal diklasifikasikan menurut tanda-tanda gaya ini. Nodal C-C-C menahan tiga gaya tekan, Nodal C-C-T menahan dua gaya tekan dan satu gaya tarik, dan Nodal C-T-T menahan satu gaya tekan dan dua gaya tarik.

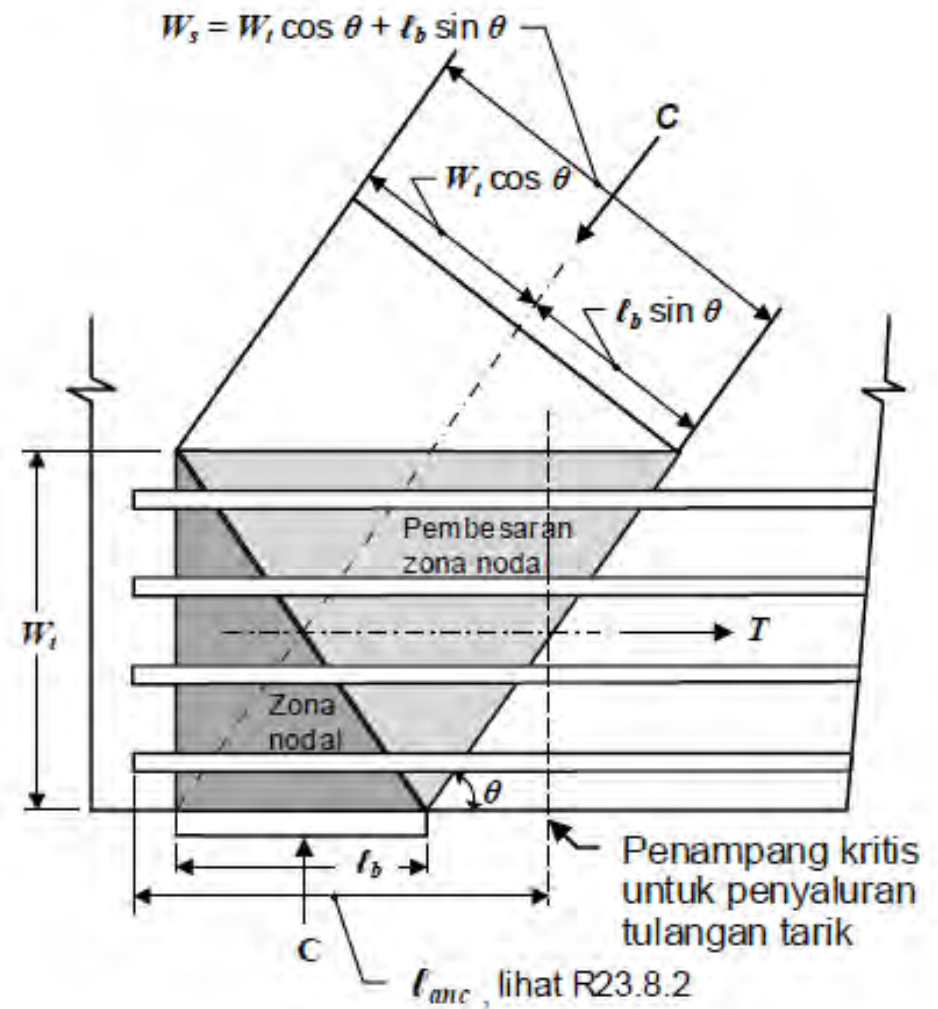


Gambar R23.2.6c – Klasifikasi nodal

Gambar R23.2.6a – Nodal hidrostatik



(i) Satu lapis tulangan



(ii) Tulangan terdistribusi

Gambar R23.2.6b – Zona nodal yang diteruskan menunjukkan efek distribusi gaya

Kekuatan *Strut* (Strat)

23.3 - Kekuatan desain

23.3.1 Untuk setiap kombinasi beban terfaktor yang ada, Kekuatan desain setiap *strut*, *tie*, dan zona nodal dalam suatu model *strut and tie* harus memenuhi $\phi S_n \geq U$ termasuk a) hingga c):

- a) *Strut*: $\phi F_{ns} \geq F_{us}$
- b) *Tie*: $\phi F_{nt} \geq F_{ut}$
- c) Zona nodal: $\phi F_{nn} \geq F_{us}$

23.3.2 ϕ harus sesuai dengan 21.2

23.3.2 ϕ harus sesuai dengan 21.2

23.4 - Kekuatan *strut*

23.4.1. Kekuatan tekan nominal *strut*, F_{ns} , harus dihitung dengan a) atau b):

a) *Strut* tanpa tulangan longitudinal

$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} \quad (23.4.1a)$$

b) *Strut* dengan tulangan longitudinal

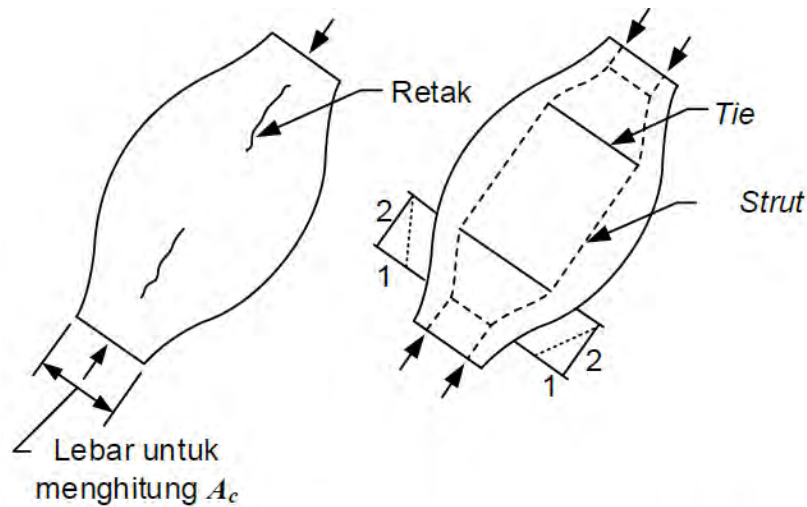
$$F_{ns} = f_{ce} A_{cs} + A_s' f_s' \quad (23.4.1b)$$

Dimana F_{ns} harus dievaluasi pada setiap ujung *strut* dan diambil nilai terkecil; A_{cs} merupakan luas penampang pada ujung *strut* yang ditinjau; f_{ce} diberikan dalam 23.4.3; A_s' merupakan luasan tulangan tekan sepanjang *strut*; dan f_s' merupakan tegangan tulangan tekan pada kekuatan tekan nominal *strut*. Harus diizinkan untuk menggunakan f_s' sama dengan f_y untuk tulangan Mutu 280 dan Mutu 420.

23.4.3 Kekuatan tekan efektif beton dalam sebuah *strut*, f_{ce} , harus dihitung dengan :

$$f_{ce} = 0,85\beta_s f_c' \quad (23.4.3)$$

dimana β_s , sesuai dengan dengan Tabel 23.4.3, yang mengikutsertakan pengaruh retak dan tulangan kontrol retak pada kekuatan tekan efektif beton.



Gambar R23.4.3 – *Strut* berbentuk botol: (a) retakan dari *strut* berbentuk botol; dan (b) model *strut* and *tie* berbentuk botol

Tabel 23.4.3 – Koefisien *strut* β_s

Gemetri dan lokasi <i>strut</i>	Tulangan melewati <i>strut</i>	β_s	
<i>Strut</i> dengan luas penampang pada seluruh panjangnya seragam	NA	1,0	(a)
<i>Strut</i> yang terletak di daerah sebuah komponen dimana lebar beton yang tertekan pada tengah panjang <i>strut</i>	Memenuhi 23.5	0,75	(b)
	Tidak memenuhi 23.5	$0,60\lambda$	(c)
dapat melebar ke arah lateral (<i>strut</i> berbentuk botol)			
<i>Strut</i> yang terletak di komponen struktur tarik atau di daerah tarik komponen struktur	NA	0,40	(d)
Kasus lainnya	NA	$0,60\lambda$	(e)

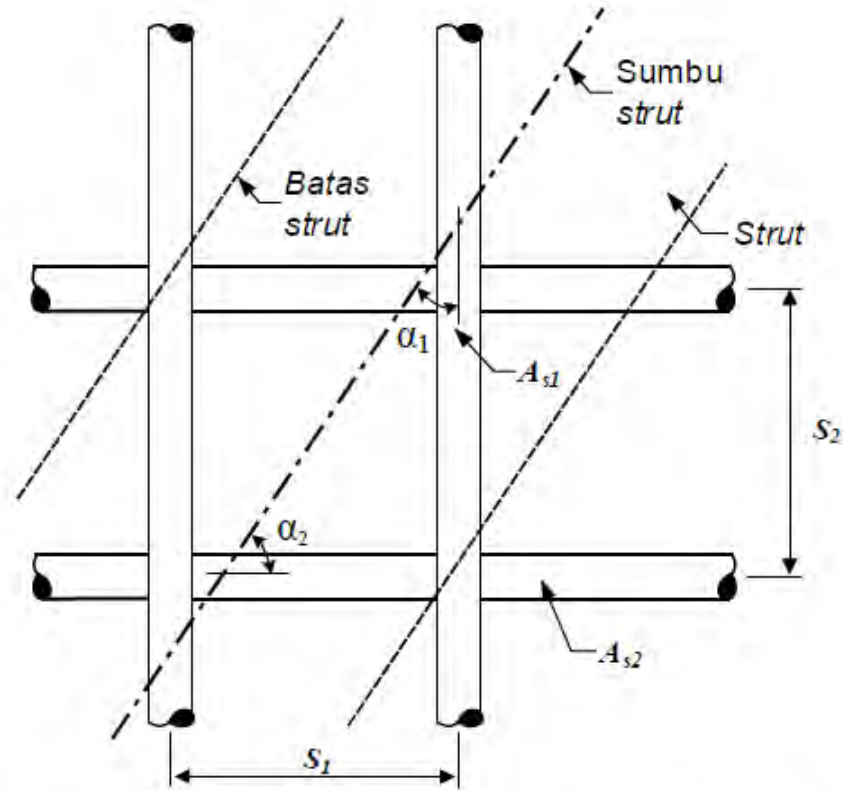
Gambar R23.2.6a(i) menunjukkan zona nodal C-C-C. Jika tegangan pada permukaan zona nodal adalah sama di ketiga *strut*, rasio panjang dari sisi zona nodal, $w_{n1}:w_{n2}:w_{n3}$, berada dalam proporsi yang sama dengan tiga gaya, $C1:C2:C3$.

Zona nodal C-C-T dapat direpresentasikan sebagai zona nodal hidrostatis jika *tie* diasumsikan diteruskan melalui nodal dan diangkur dengan pelat di sisi yang jauh dari nodal, seperti yang ditunjukkan pada Gambar R23.2.6a(ii), disediakan ukuran pelat yang menghasilkan tegangan tumpu yang sama dengan tegangan pada *strut*. Pelat tumpu di sisi kiri Gambar. R23.2.6a(ii) digunakan untuk merepresentasikan pengangkuran *tie* yang sebenarnya. Gaya *tie* dapat diangkur oleh sebuah pelat atau melalui penanaman batang lurus (Gambar. R23.2.6a(iii)), batang berkepala, atau batang berkait. Untuk nodal nonhidrostatis, permukaan dengan tegangan tertinggi akan mengontrol dimensi nodal.

Daerah yang diarsir lebih terang pada Gambar R23.2.6a(ii) adalah zona nodal yang diperpanjang. Zona nodal yang diperpanjang merupakan bagian dari komponen yang diikat dengan perpotongan lebar *strut* efektif w_s dan lebar *tie* efektif w_t .

Untuk keseimbangan, setidaknya tiga gaya harus bekerja pada setiap nodal dalam model *strut-and-tie*, seperti yang ditunjukkan Gambar R23.2.6c. Nodal diklasifikasikan menurut tanda-tanda gaya ini. Nodal C-C-C menahan tiga gaya tekan, Nodal C-C-T menahan dua gaya tekan dan satu gaya tarik, dan Nodal C-T-T menahan satu gaya tekan dan dua gaya tarik.

R23.5.3 Gambar R23.5.3 menunjukkan dua lapisan tulangan memotong retak *strut*. Tulangan ini akan membantu mengendalikan retak dalam suatu *strut* berbentuk botol (merujuk Gambar R23.4.3) dan menghasilkan kapasitas *strut* yang lebih besar daripada apabila tulangan terdistribusi ini tidak dimasukkan. Subskrip i dalam Pers. (23.5.3) adalah 1 untuk batang vertikal dan 2 untuk batang horizontal. Pers. (23.5.3) tertulis dalam bentuk suatu rasio tulangan, bukan dalam bentuk tegangan, untuk menyederhanakan perhitungan.



Gambar R23.5.3 – Tulangan melintasi sebuah *strut*

Kekuatan Tie (pengikat)

23.7.1 Tulangan *tie* dapat berupa tulangan nonprategang atau prategang.

23.7.2 Kekuatan tarik nominal dari *tie*, F_{nt} , harus dihitung sebagai berikut:

$$F_{nt} = A_{ts}f_y + A_{tp}(f_{se} + \Delta f_p) \quad (23.7.2)$$

dimana $(f_{se} + \Delta f_p)$ tidak boleh melebihi f_{py} , dan A_{tp} adalah nol untuk komponen struktur nonprategang.

23.7.3 Pada Pers. (23.7.2), Δf_p boleh diambil sama dengan 420 MPa untuk tulangan prategang dengan lekatan dan 70 MPa untuk tulangan prategang tanpa lekatan. Nilai Δf_p yang lebih tinggi boleh diambil jika dibuktikan dari analisis.

R23.8 - Pendetailan tulangan *tie*

R23.8.1 Lebar *tie* efektif yang diasumsikan dalam desain, w_t , bisa bervariasi antara batasan-batasan berikut, tergantung pada distribusi tulangan *tie*:

- Apabila tulangan-tulangan *tie* berada dalam satu lapisan, lebar *tie* yang efektif bisa diambil sebagai diameter dari tulangan *tie* ditambah dua kali selimut beton menuju permukaan dari tulangan-tulangan tersebut seperti ditunjukkan dalam Gambar R23.2.6b(i).
- Batas atas yang praktis dari lebar *tie* dapat diambil sebagai lebar yang sesuai dengan lebar hidrostatis zona nodal, terhitung seperti $W_{t,max} = F_{nt}/(f_{ce}b_s)$, dimana f_{ce} dihitung untuk zona nodal sesuai dengan 23.9.2.

Apabila lebar *tie* melebihi nilai dari a), tulangan *tie* harus didistribusikan secara merata kira-kira sepanjang lebar dan ketebalan *tie*, seperti yang ditunjukkan dalam Gambar R23.2.6b(ii).

Kekuatan zona nodal

23.9 - Kekuatan zona nodal

23.9.1 Kekuatan nominal dari zona nodal, F_m , harus dihitung dengan:

$$F_m = f_{ce} A_{nz} \quad (23.9.1)$$

dimana f_{ce} ditetapkan dalam 23.9.2. atau 23.9.3 dan A_{nz} diberikan dalam 23.9.4 atau 23.9.5.

23.9.2 Kekuatan tekan efektif beton pada muka dari zona nodal, f_{ce} , harus dihitung dengan:

$$f_{ce} = 0,85 \beta_n f_c' \quad (23.9.2)$$

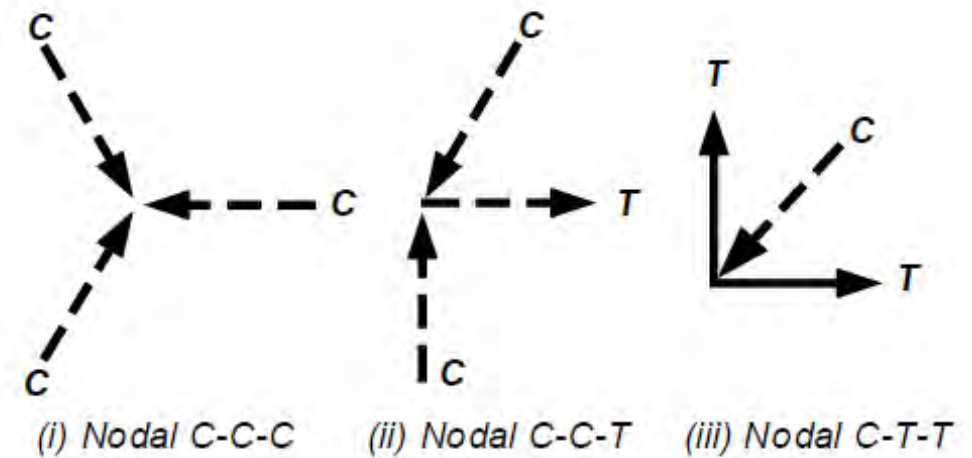
dimana β_n harus di sesuai Tabel 23.9.2.

Tabel 23.9.2 – Koefisien zona nodal β_n

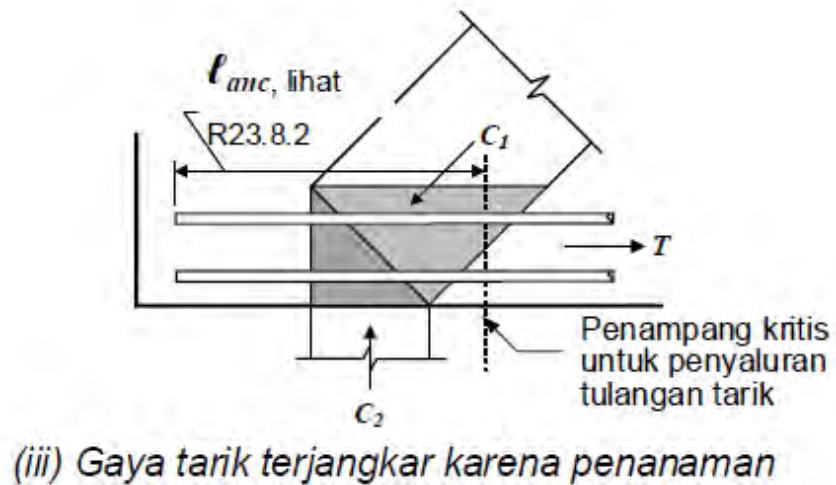
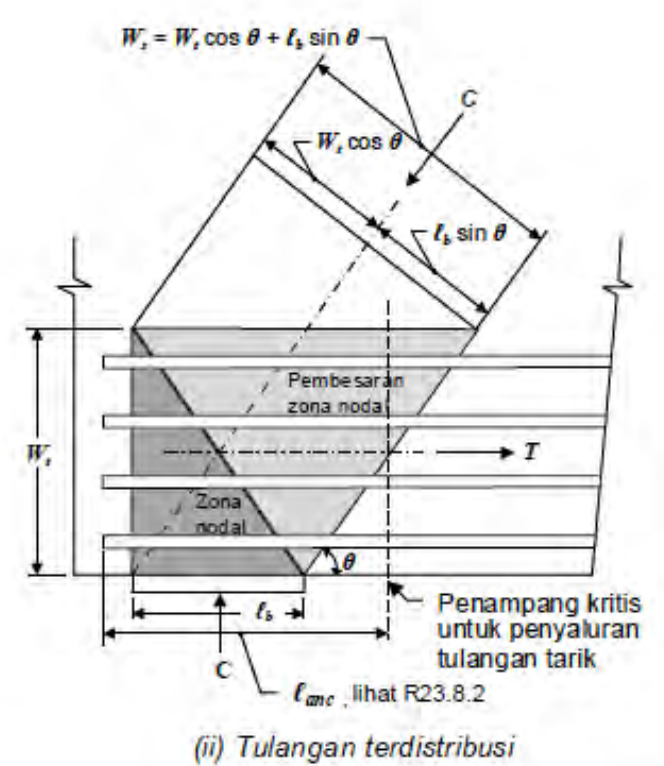
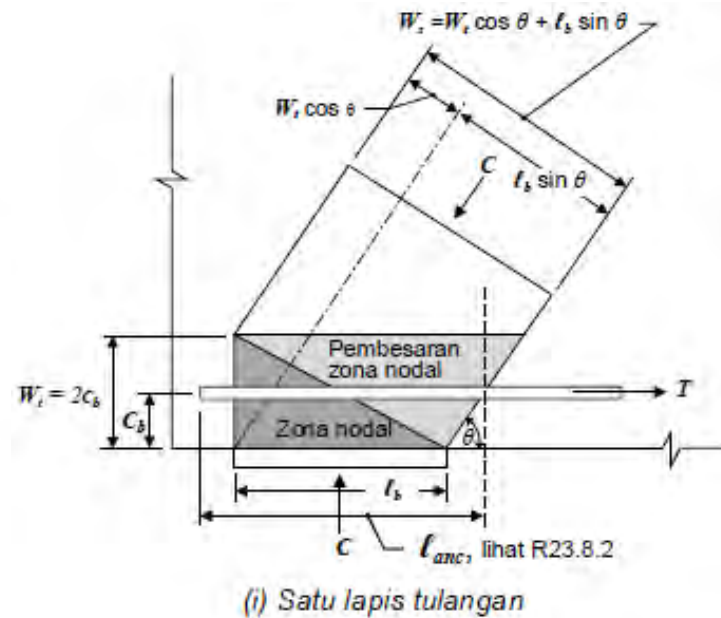
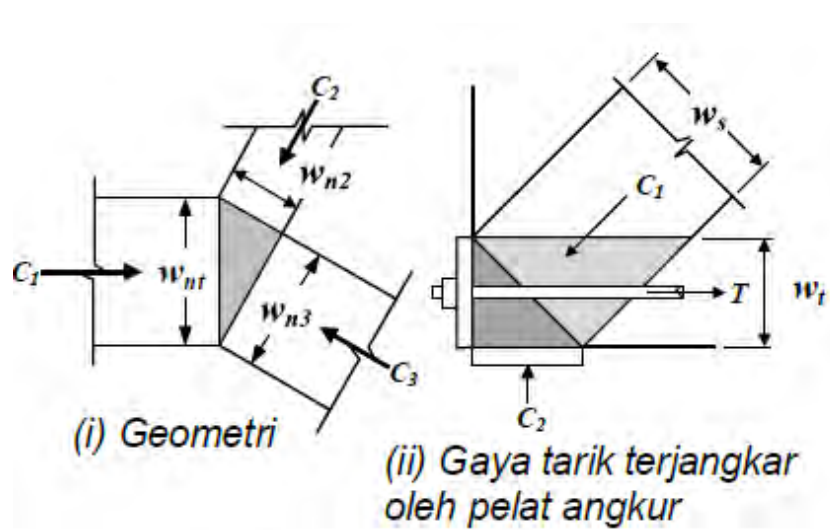
Konfigurasi zona nodal	β_n	
Zona nodal yang dibatasi oleh <i>strut</i> , area tumpuan atau keduanya	1,0	(a)
Zona nodal yang mengangkurkan satu <i>tie</i>	0,80	(b)
Zona nodal yang mengangkurkan dua atau lebih <i>tie</i>	0,60	(c)

R23.9.2 Nodal dalam model dua dimensi bisa diklasifikasikan seperti ditunjukkan dalam Gambar R23.2.6c. Kekuatan tekan efektif dari zona nodal diberikan oleh Pers. (23.9.2) dimana nilai β_n diberikan dalam Tabel 23.9.2.

Nilai β_n yang lebih rendah mencerminkan peningkatan derajat gangguan di zona nodal karena inkompatibilitas regangan tarik dalam *tie* dan regangan tekan dalam *strut*. Tegangan pada setiap zona nodal atau pada setiap penampang yang melewati zona nodal tidak boleh melebihi nilai yang diberikan oleh Pers. (23.9.2).

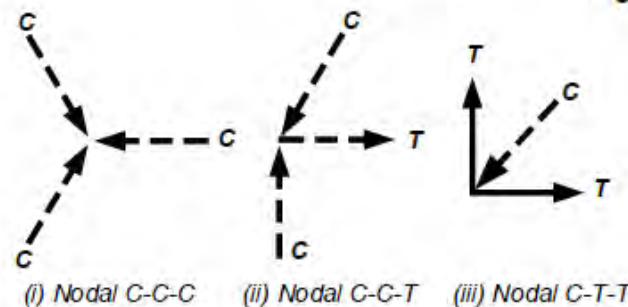


Gambar R23.2.6c – Klasifikasi nodal



Gambar R23.2.6a – Nodal hidrostatis

Gambar R23.2.6b – Zona nodal yang diteruskan menunjukkan efek distribusi gaya



Gambar R23.2.6c – Klasifikasi nodal

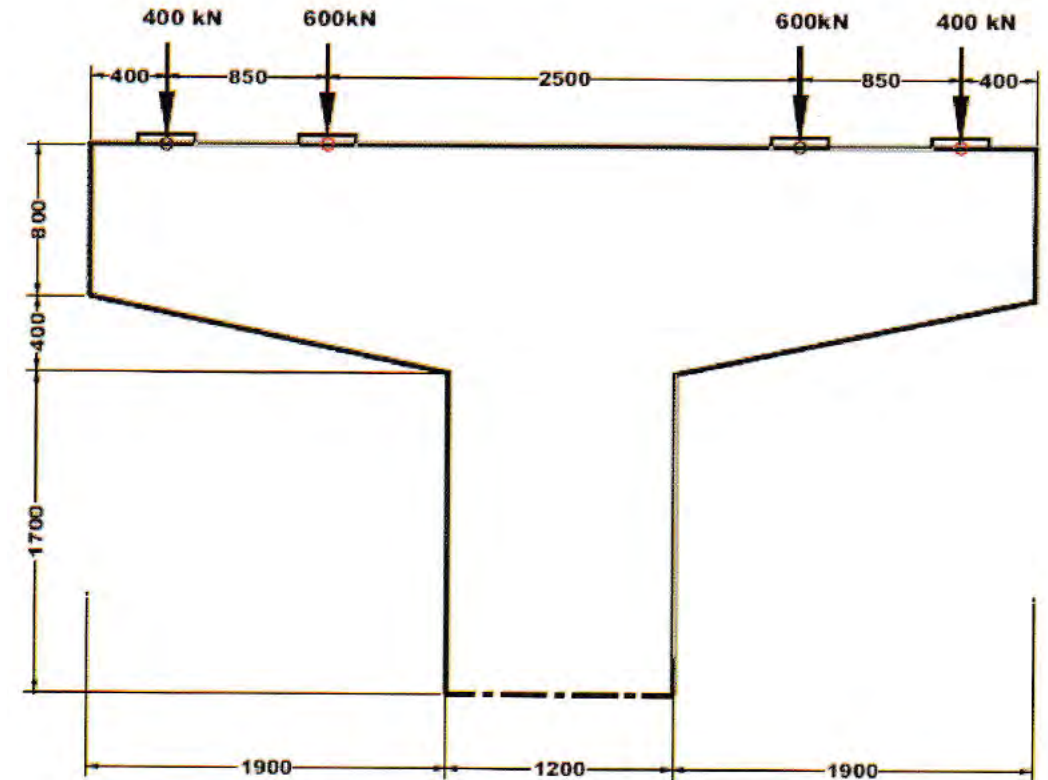
CONTOH

Sebagai contoh perhitungan pemeriksaan kekuatan strat, nodal dan perhitungan penulangan pengikat, diambil perancangan untuk pilar jembatan dengan 4 tumpuan untuk girder (sumber: Hardjasaputra[27]).

Tebal struktur	: 600 mm
Mutu beton	: $f'_c = 29 \text{ MP}_a$
Mutu baja	: $f_y = 420 \text{ MP}_a$

Pier jembatan memikul 4 beban terpusat yang berasal dari empat buah balok girder yang menumpu pada pier. Ukuran *bearing plate* : 300 X 300 mm².

Pada masing-masing pelat tumpuan bekerja beban terpusat terfaktor (ultimate) sebesar 400 kN (tapi) dan 600 kN (tengah).



Gambar 5-13.1: Kepala Pilar Jembatan T dengan 4 pembebanan

Langkah pertama:

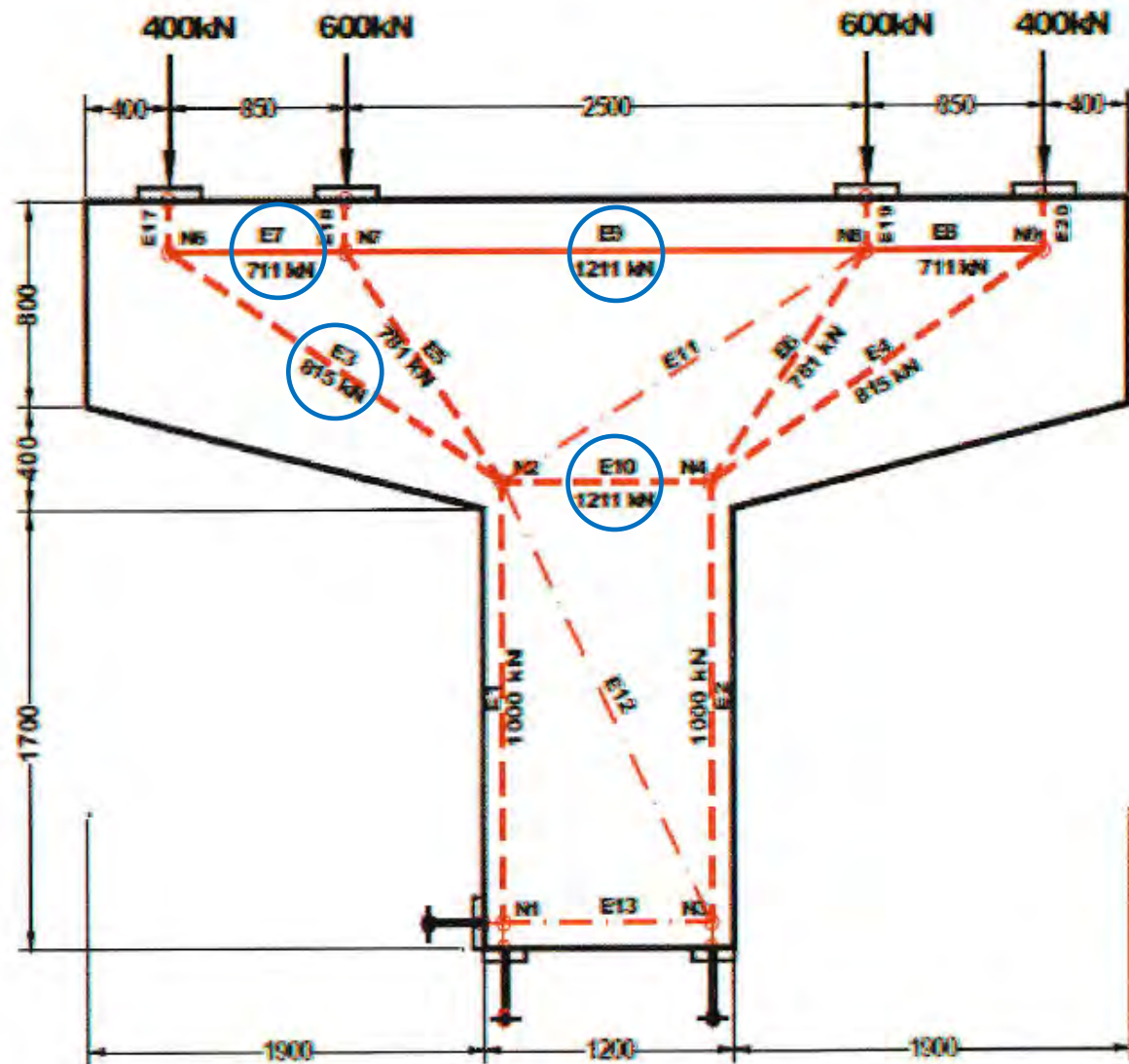
Tentukan daerah D pada pilar jembatan. Sesuai dengan geometri dan beban terpusat maka seluruh kepala pilar jembatan tersebut adalah termasuk daerah D.

Langkah kedua:

Berdasarkan beban dan reaksi tumpuan, direncanakan internal rangka batang yang terdiri dari strat dan pengikat. Reaksi tumpuan dimodelkan sebagai resultan dari tegangan pada batas daerah D dan B.

Pendel vertikal, pendel horizontal, dan batang diagonal atau batang nol (garis putus tipis) diperlukan sebagai syarat statik untuk keseimbangan pada perhitungan analisa rangka batang dengan bantuan program komputer.

Secara manual, besarnya gaya-gaya batang pada strat dan pengikat dapat dihitung dengan cara keseimbangan titik untuk statis tentu rangka batang.



Gambar 5-13.2: Strut-and-tie model beserta gaya batang F_u pada strat dan pengikat

Langkah ketiga:

Perhitungan kekuatan strat,
pengikat, dan daerah nodal.

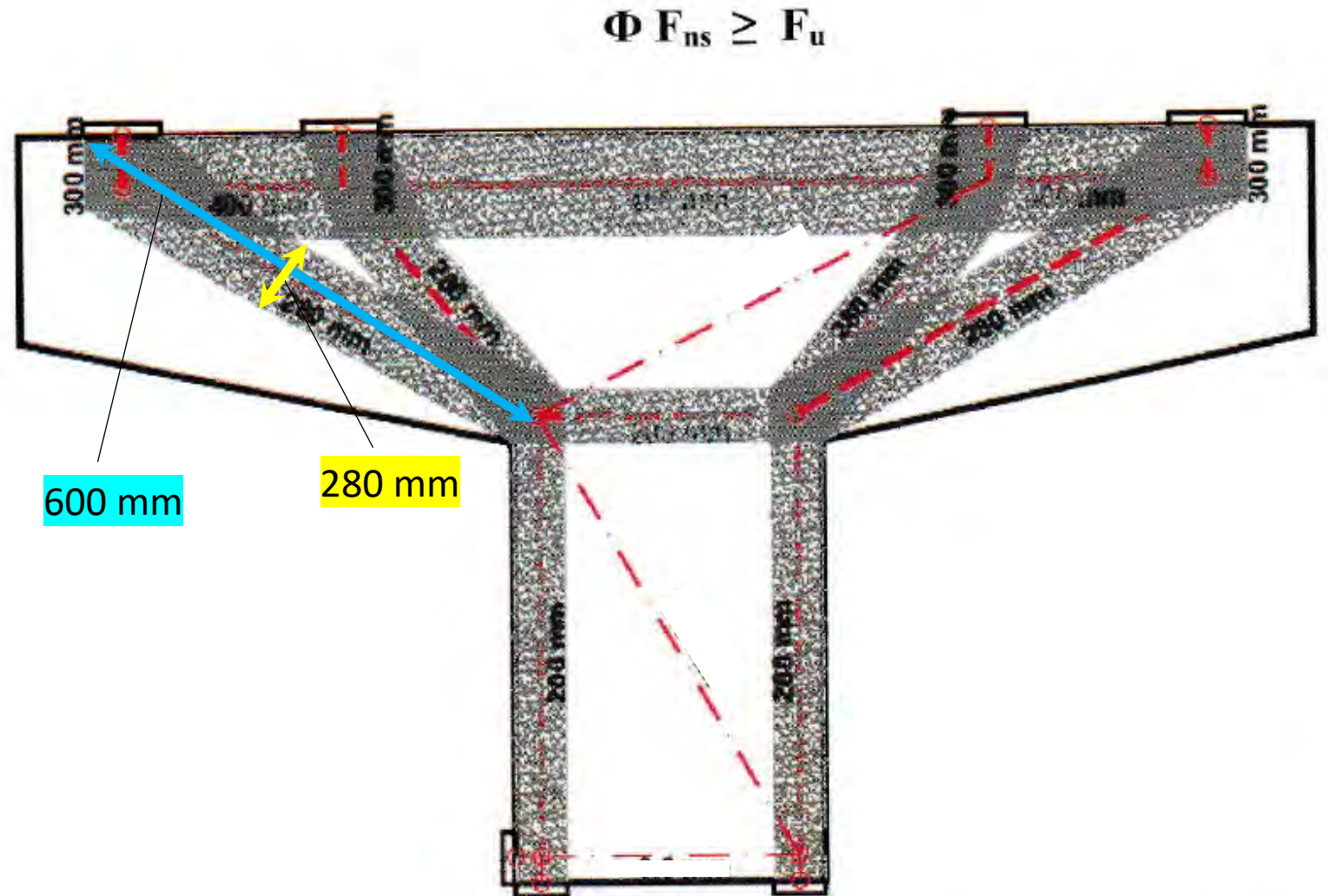
Syarat kekuatan: $F_u \leq \phi F_n$

Untuk menghitung kuat
nominal F_n strat, pengikat
maupun nodal, tentukan
dimensi strat dan pengikat,
kemudian verifikasi kekuatan
strat, *nodal zone*.

Lebar masing-masing strat telah
ditentukan (Gambar 5.13.3).

Berdasarkan gaya *ultimate*
akibat beban luar pada strat
(F_u), kekuatan nominal strat
tersebut harus memenuhi
syarat kekuatan, yaitu:

$$F_u \leq \phi F_{ns}$$



Gambar 5-13.3:Strut-and-tie model disertai dimensi strat, pengikat dan nodal

Periksa strat E3:

$$F_u = 815,9 \text{ kN} \quad b = 280 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{STM} F_{ns} &= \Phi_{STM} (0,85 f_c') \cdot \beta_s \cdot A_c \\ &= 0,75 (0,85 \cdot 29) \cdot 0,75 \cdot 280 \cdot 600 \\ &= 2329 \text{ kN} > F_u\end{aligned}$$

Faktor β_s diambil 0,75 untuk strut diagonal

Periksa strut E5:

$$F_u = 781 \text{ kN} \quad b = 280 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned}\Phi_{STM} F_{ns} &= 0,75 (0,85 \cdot 29) \cdot 0,75 \cdot 280 \cdot 600 \\ &= 2329 \text{ kN} > F_u\end{aligned}$$

Periksa strat E10 :

$$\begin{aligned}F_u &= 1211 \text{ kN} \\ \Phi_{STM} F_{ns} &= 0,75 (0,85 \cdot 29) \cdot 1,0 \cdot 200 \cdot 600 \\ &= 2218 \text{ kN} > F_u\end{aligned}$$

Faktor β_s diambil 1,0 untuk strat pada daerah tekan.

Perhitungan tulangan untuk pengikat

Sebagai batang tarik maka perlu dihitung jumlah tulangan yang diperlukan:

$$A_s = \frac{F_u}{\Phi_{STM} f_y}$$

Untuk pengikat E9:

$$F_u = 1211 \text{ kN}$$

$$A_s = \frac{1211 \cdot 10^3}{0,75 \cdot 420}$$

$$A_s = 3844 \text{ mm}^2 \text{ (dipasang : 12 D-22 = 4560 mm}^2 \text{)}$$

Untuk pengikat E7 :

$$F_u = 711 \text{ kN}$$

$$A_s = \frac{711 \cdot 10^3}{0,75 \cdot 420}$$

$$A_s = 2257 \text{ mm}^2 \text{ (6 D22 = 2280 mm}^2 \text{)}$$

SNI 2847: 2019 pasal R23.8.1:

b) Batas atas yang praktis dari lebar *tie* dapat diambil sebagai lebar yang sesuai dengan lebar hidrostatis zona nodal, terhitung seperti $W_{t,max} = F_{nt}/(f_{ce}b_s)$, dimana f_{ce} dihitung untuk zona nodal sesuai dengan 23.9.2.

Lebar minimum untuk distribusi tulangan yang diperlukan,

$$w_t = \frac{F_{nt}}{(f_{ce})b_s} = \frac{F_{nt}/\phi}{0,85(\beta_n f'_c)b_s} = \frac{F_{nt}/\phi}{0,85(0,8 f'_c)b_s}$$
$$= \frac{1121 \times 10^3 \times 0,75}{0,85(0,8 \times 29')600} = 136 \text{ mm}$$

Direncanakan, lebar untuk distribusi tulangan 12 D 22, sebanyak 6 lapis, adalah 400 mm, lebih besar dari w_t .

Tulangan Minimum

Perhitungan untuk persyaratan tulangan minimum pada daerah D, adalah:

Tulangan minimum vertikal

$$\begin{aligned} \text{Luas 1 tulangan Sengkang} \\ &= 0,25 \pi(D)^2 \\ &= 0,25 \pi(10)^2 \\ &= 79 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$A_v = 0,0025 A_{cv} = 0,0025 b s$$

dimana $b = 600 \text{ mm}$ dan $s = 100 \text{ mm}$ (jarak tulangan vertical)

$$A_v = 0,0025 (600) 100 = 150 \text{ mm}^2$$

Gunakan sengkang D 10 – 100 ($A_v = 2 \times 79 \text{ mm}^2$)
 $= 158 \text{ mm}^2 > 150 \text{ mm}^2$ (OK)

Jumlah kaki sengkang: 2

Tulangan minimum horisontal

$$A_{vh} = 0,0015 A_{cv} = 0,0015 b s_2$$

dimana $b = 600 \text{ mm}$ $s_2 = 120 \text{ mm}$ (jarak tulangan horizontal)

$$A_{vh} = 0,0015 \cdot 600 \cdot 120 = 108 \text{ mm}^2$$

Luas 1 tulangan Sengkang

$$= 0,25 \pi (D)^2$$

$$= 0,25 \pi (10)^2$$

$$= 79 \text{ mm}^2$$

$$A_{vh} = 2 \text{ kaki sengkang} \times 79 = 158 \text{ mm}^2 > 108 \text{ mm}^2 \text{ (OK)}$$

Gunakan D 10 – 120 pada setiap sisi bidang

Syarat tulangan minimum pada perancangan dengan strut-and-tie model harus pula memenuhi syarat :

$$\sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0.003$$

$$= \frac{160}{600 \cdot 100} \sin 61^\circ + \frac{160}{600 \cdot 120} \sin 29^\circ$$

$$= 0,0023 + 0,0008 = 0,0031 > 0,0030$$

23.5.3 Distribusi tulangan yang dihitung sesuai dengan Pers. (23.5.3) dan melewati sumbu *strut* harus memenuhi 23.5.1 jika $f_c' < 40$ MPa.

$$\sum \frac{A_{si}}{b_s s_i} \sin \alpha_i \geq 0,003 \quad (23.5.3)$$

dimana A_{si} adalah luasan total tulangan yang terdistribusi dengan spasi s_i pada arah i dari tulangan yang melewati *strut* pada sudut α_i terhadap sumbu *strut* dan b_s adalah lebar dari *strut*.

Pengankuran Tie pada Nodal Zone

Horizontal standard hook digunakan untuk pengankuran pengikat E9 dan E7, dan untuk praktisnya tulangan untuk pengikat E7 dan E9 digunakan sama, yaitu 12D-22

Panjang pengankuran sesuai SNI 2847-2013 12.3.2

$$l_{dh} = (0,24\psi_e f_y / \lambda \sqrt{f'_c}) d_b$$

d_b = diameter tulangan

λ = 1 (untuk beton normal)

ψ_e = 1 (untuk tulangan D-22 dan yang lebih besar)

Untuk Nodal N9:

$$l_{dh} = (0,24 \cdot 1 \cdot 420 / 1 \cdot \sqrt{29}) 22$$

$$l_{dh} = 412 \text{ mm}$$

syarat panjang pengankuran ini mudah dicapai, karena panjang pengankuran yang tersedia, dihitung dari penampang kritis pada Nodal N9 adalah, $(390 + 400 - 50) = 740 \text{ mm}$ (lihat gambar 5-13.4)

25.4.9.2 Nilai l_{dc} harus yang terbesar dari a) dan b), menggunakan faktor modifikasi sesuai dengan 25.4.9.3:

$$a) \left(\frac{0,24 f_y \Psi_r}{\lambda \sqrt{f'_c}} \right) d_b$$

$$b) 0,043 f_y \Psi_r d_b$$

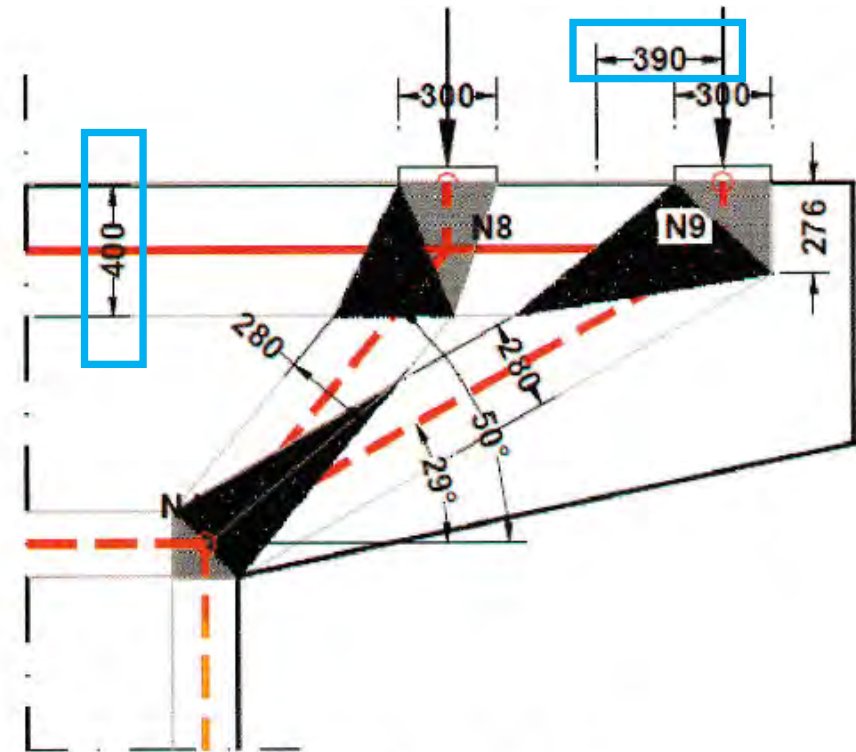
Sumber: SNI 2847: 2019

Verifikasi kekuatan daerah Nodal

Dimensi lebar dari Strat, pengikat yang bertemu pada nodal harus sama atau lebih besar dari w_{req} , dimana :

$$w_{req} = \frac{F_u}{\Phi (0,85 f_c') \beta_n \cdot b_s}$$

b_s = tebal struktur



Gambar5-13.4: Extended daerah nodal N8 dan N9

Sebagai contoh perhitungan, perhatikan geometri nodal N8 dan N9 pada gambar 5-13.4

Nodal N9 adalah tipe nodal CCT, yaitu pertemuan E8, E4 dan beban maka $\beta_n = 0,8$

Gaya tumpuan :

$$F_u = 400 \text{ kN}$$

$$w_{req} = \frac{400 \cdot 10^3}{0,75 (0,85 \cdot 29) 0,8 \cdot 600} = 45 \text{ mm}$$

dimensi yang tersedia 300 mm > w_{req}

Strat E4 $F_u = 815 \text{ kN}$

$$w_{reqx} = \frac{815 \cdot 10^3}{0,75 (0,85 \cdot 29) 0,8 \cdot 600} = 92 \text{ mm}$$

dimensi yang tersedia 280 mm > w_{req}

Pengikat E8 $F_u = 711 \text{ kN}$

$$w_{req} = \frac{711 \cdot 10^3}{0,75 (0,85 \cdot 29) 0,8 \cdot 600} = 80 \text{ mm}$$

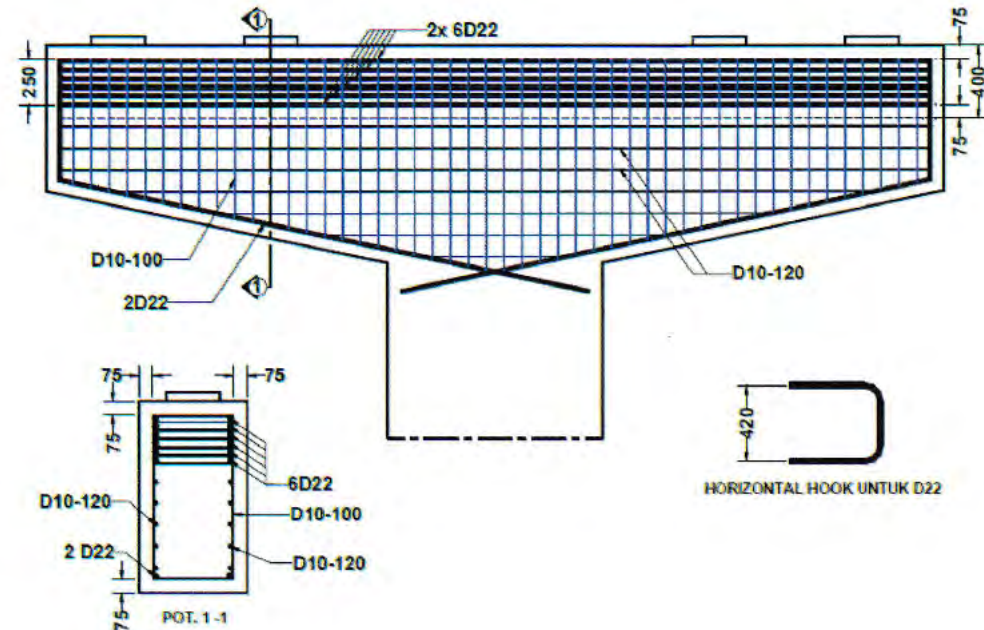
dimensi yang tersedia 400 mm > w_{req}

Nodal N8

Nodal N8 adalah tipe CCTT pertemuan dari E6, E8, E9 dan beban, maka $\beta_n=0,80$ seperti pada nodal CCT. Selanjutnya pemeriksaan kekuatan nodal zone sama seperti N9

Nodal N4

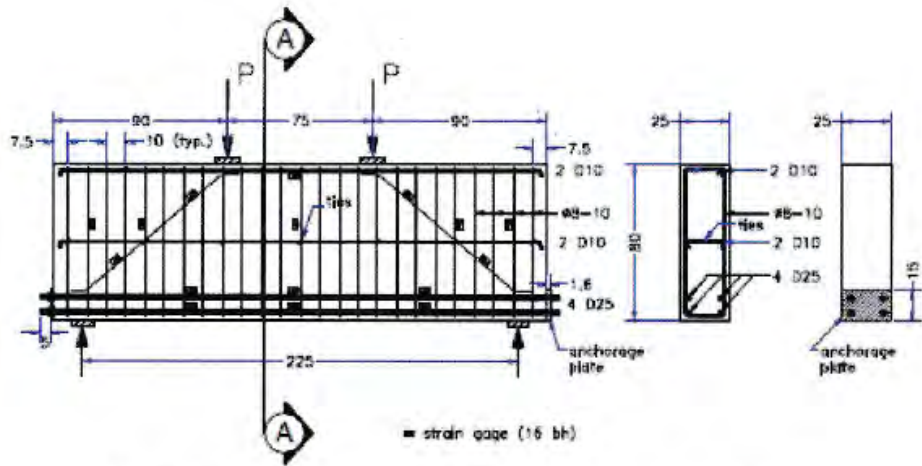
Nodal N4 adalah tipe CCCC pertemuan E6, E4, E10 dan E2, maka $\beta_n=1,0$ seperti pada nodal CCC. Selanjutnya pemeriksaan kekuatan nodal sama seperti N9



Gambar 5-14: Rencana Penulangan Kepala Pier Jembatan

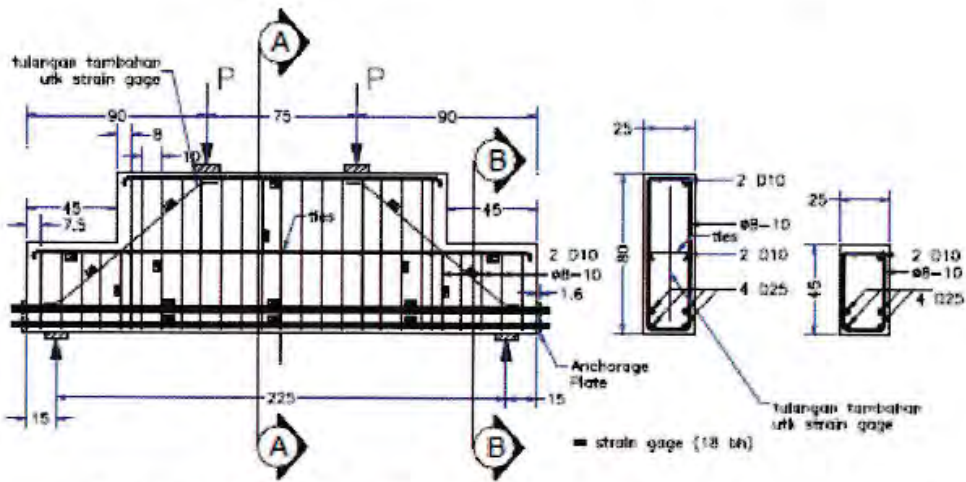
Verifikasi *Strut-and-Tie Model* Dengan Uji Beban Tiga Balok Tinggi

Pada ketiga pengujian balok tinggi: verifikasi bahwa pendekatan dengan menggunakan *strut-and-tie model* dapat dikategorikan sebagai suatu pendekatan *lower bound* dalam menentukan kekuatan batas struktur.



Gambar 1 : Balok Tinggi Type 1

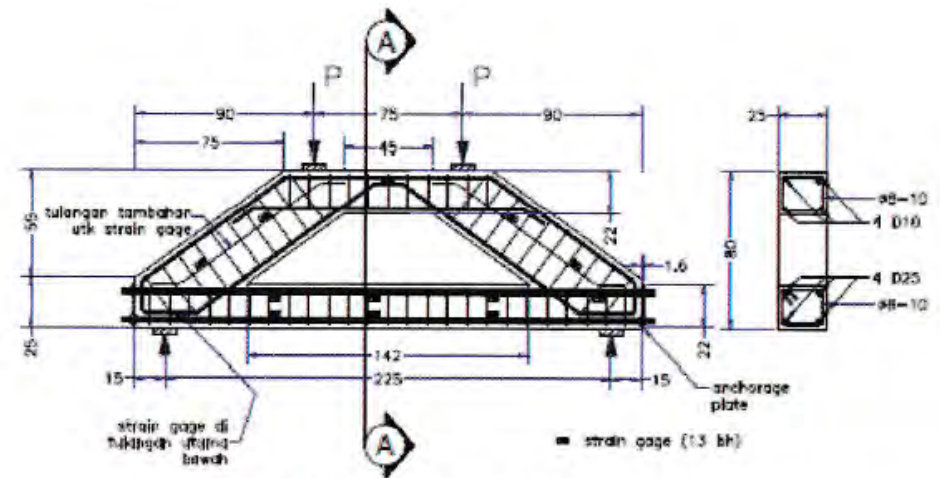
POT. A-A



Gambar 2 : Balok Tinggi Type 2

POT. A-A

POT. B-B

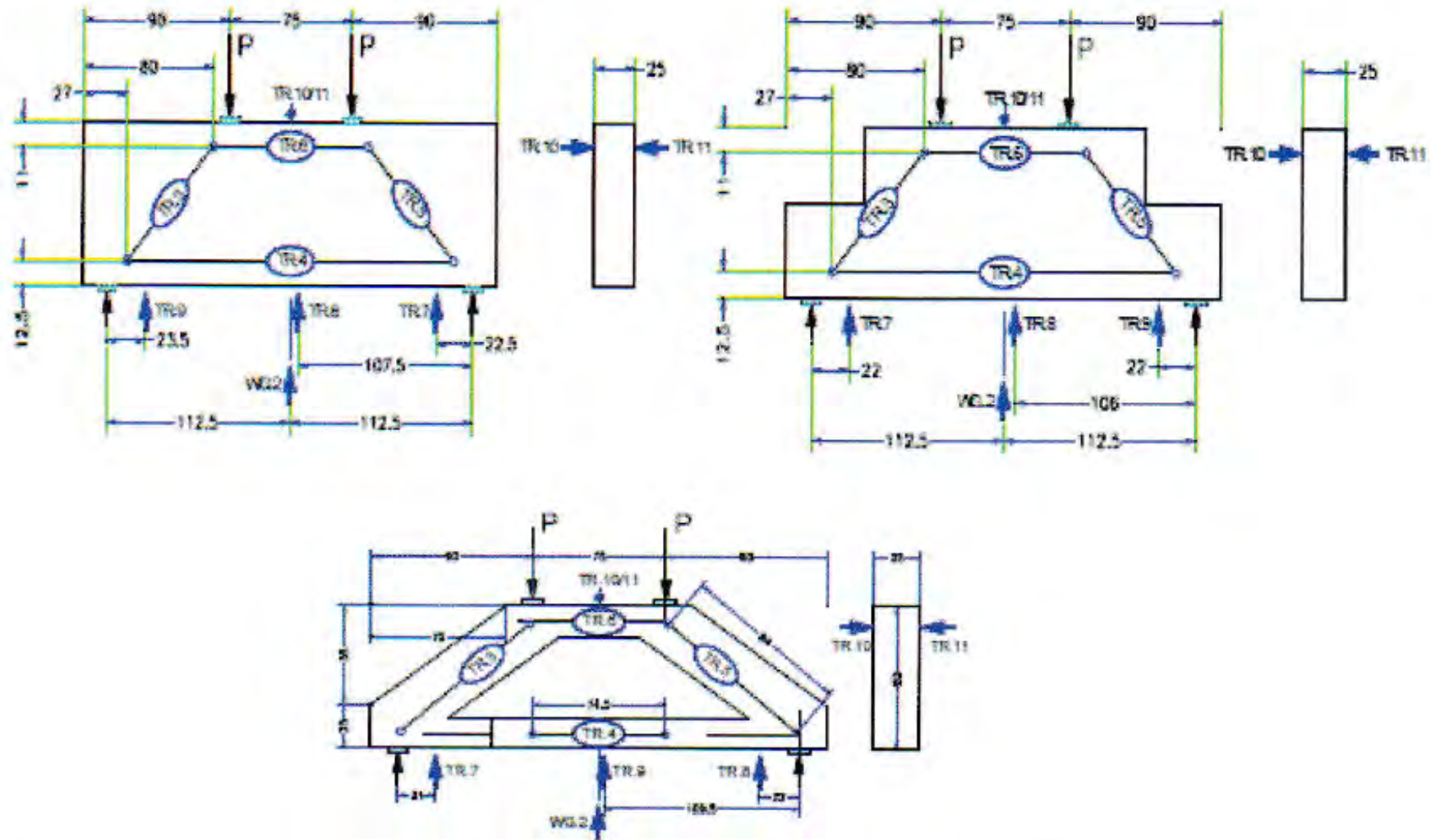


Gambar 3 : Balok Tinggi Type 3

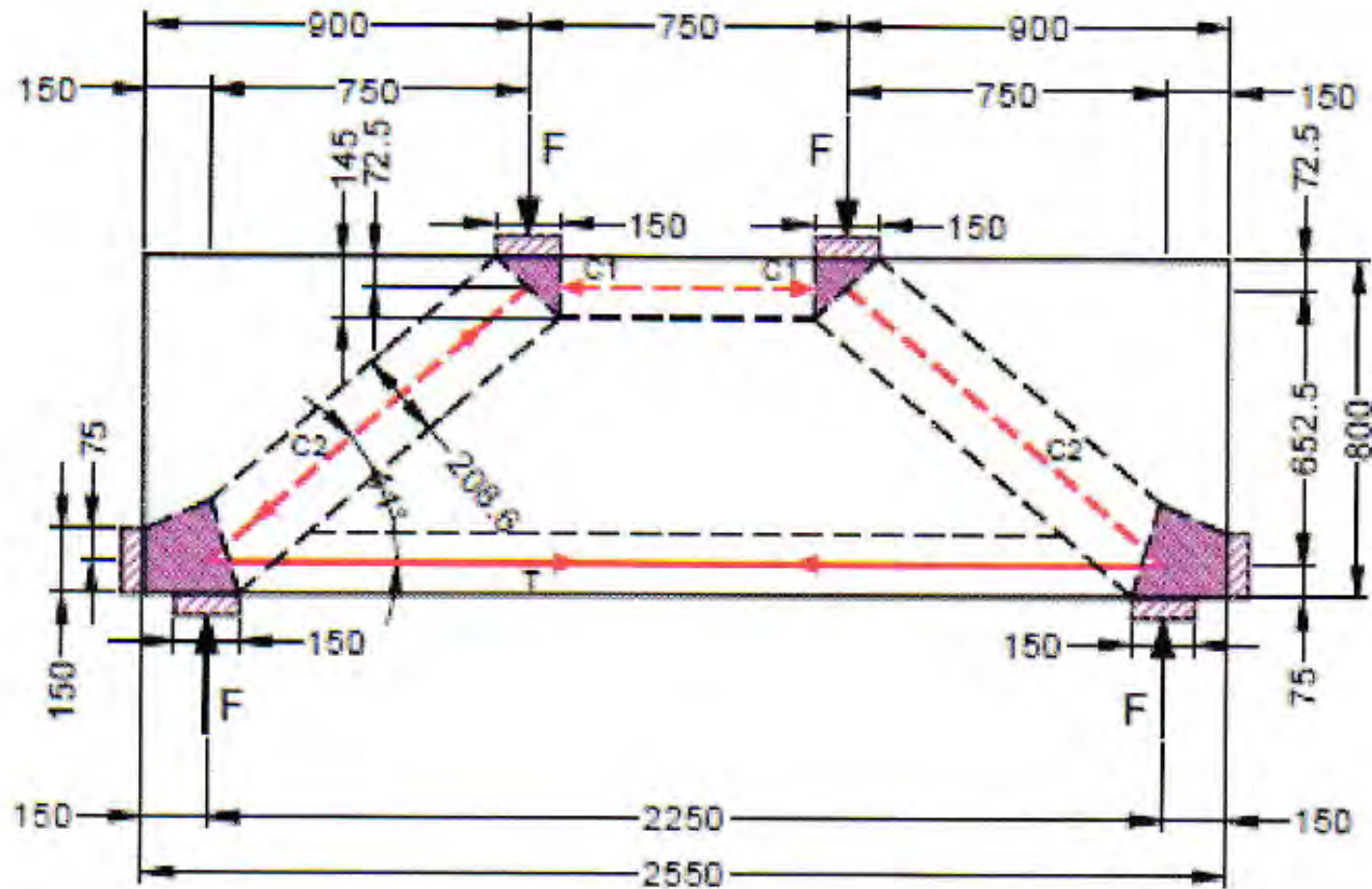
POT. A-A

Gambar 5-15: Rancangan tulangan seri pengujian 3 buah tipe balok tinggi

Sumber: Hardjasaputra (2016)



Gambar 5-16: Pola pemasangan LVDT pada ke tiga balok uji



Gambar 5-17: Strut-and-tie model untuk balok uji yang digambarkan sebagai *Plastic truss*.

Referensi

- ACI Committee 318, (2014): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- ACI Committee 318, (2019): *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hills, USA.
- Badan Standardisasi Nasional. (2013). Standar Nasional Indonesia 2847:2013 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). Standar Nasional Indonesia 2847:2019 Persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung dan penjelasan, Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Hardjasaputra, H. (2016). Perancangan Beton Struktural: Berdasarkan Model Strat dan Pengikat (Strut-and-Tie Model), SNI 2847:2013, Ref Graphika, Jakarta.
- Hardjasaputra, H. dan Tumilar, S. (2002). Model Penunjang dan Pengikat (Strut-and-Tie Model) pada Perancangan Struktur Beton, CV. Hidup Baru, Jakarta.
- Karl-Heinz Reineck (Editor) "Example for the Design of structural Concrete with Strut-and-Tie Models", ACI International SP-208, 2002.
- Leonhard, F. and Monnig, E., "Vorlesungen Uber Massivbau: Grundlagen zur Bemessung im Stahlbetonbau", Part 1, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-Newyork, 1973.
- Leonhard, F. and Monnig, E., "Vorlesungen Uber Massivbau: Sondeffalle der Bemessung im Stahlbetonbau", Part 2, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-Newyork, 1975.
- Schlaich, Jorg, Kurt Schafer, and Mattias Jennewein. "Special Report: Toward a Consistent Design of Structural Concrete." Prestressed Concrete Institute Journal Vol. 32, No.3 (May-June 1987):74-150.
- Schlaich, J. and Schtifer , K. "Konstruieren in Stahlbetonbau", Beton Kalender, Wihelm Ernst&Sohn, Berlin-Munich, 1984, 1989, 1993.