

Perilaku dan Desain Struktur Beton Lanjut

M_07 Strut and Tie Model

Strut and Tie Model

(Model Penunjang dan Pengikat)

ANALOGI RANGKA BATANG

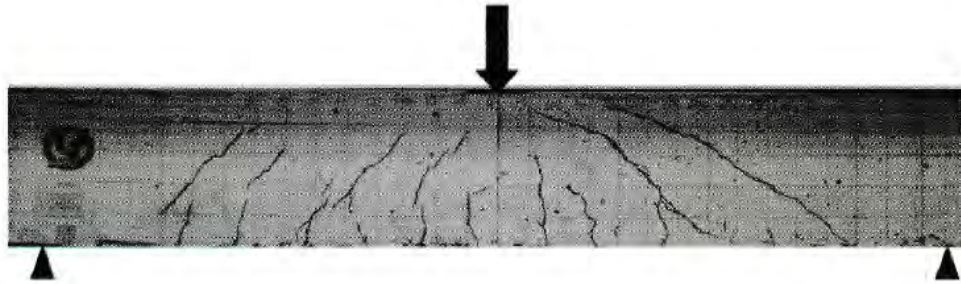
Cikal bakal dari "Strut-and-Tie Model" adalah dari konsep Analogi Rangka Batang (*Truss-analogy-model*) yang untuk pertama kalinya diperkenalkan oleh Ritter (1899), Mörsch (1902). Dengan memperhatikan pola retak yang terjadi pada struktur balok beton bertulang akibat beban P (gambar 1-1), Mörsch menjelaskan aliran gaya (*load path*) untuk transfer beban P ke tumpuan, yang terjadi pada struktur beton bertulang dalam keadaan retak (*cracked condition*).

Transfer gaya P terjadi tidak bisa langsung (*direct path*) ke tumpuannya. Alur gaya yang terjadi dimodelkan sebagai alur yang merupakan alur gaya tekan dan tarik, seperti terlihat pada gambar (1-2). Alur gaya yang terjadi tersebut disempurnakan untuk memenuhi syarat keseimbangan pada setiap titik pertemuan gaya, dengan menganalogikannya sebagai model rangka batang (*Truss*) seperti pada gambar 1-3, untuk menjelaskan aliran gaya (*load path*) untuk transfer beban F ke tumpuan, yang terjadi pada struktur beton bertulang dalam keadaan retak (*cracked condition*).

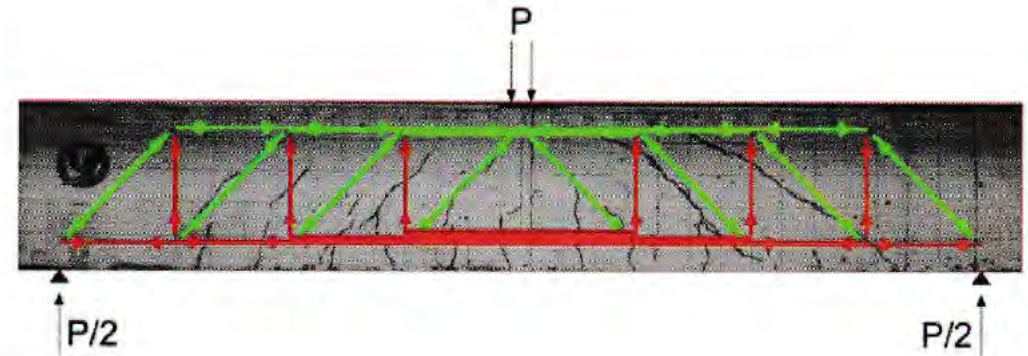
"*Strut-and-tie model*" adalah suatu "*engineering-model*" yang mendasarkan pada asumsi bahwa aliran gaya-gaya dalam struktur beton dan terutama pada daerah D dapat didekati sebagai suatu rangka batang yang terdiri dari *Struts* (batang tekan atau penunjang) dan *Ties* (batang Tarik atau pengikat). Dapat disimpulkan bahwa *Strut* dan *Tie* merupakan *resultant* dari medan tegangan (*stress field*), di mana pada *Strut* yang bekerja adalah beton-nya, sedangkan pada *Tie* yang bekerja adalah tulangan baja terpasang. Dengan demikian, suatu sistem struktur beton dapat dinyatakan sebagai suatu sistem rangka batang yang terdiri dari batang-batang tekan dan batang-batang tarik, yang dikenal sebagai *Strut and-Tie Model* [Schlaich, dkk (1987); Schlaich, dkk (1993)] atau model Penunjang dan Pengikat [Reineck, 2002].

Dari SNI 2847:2019:

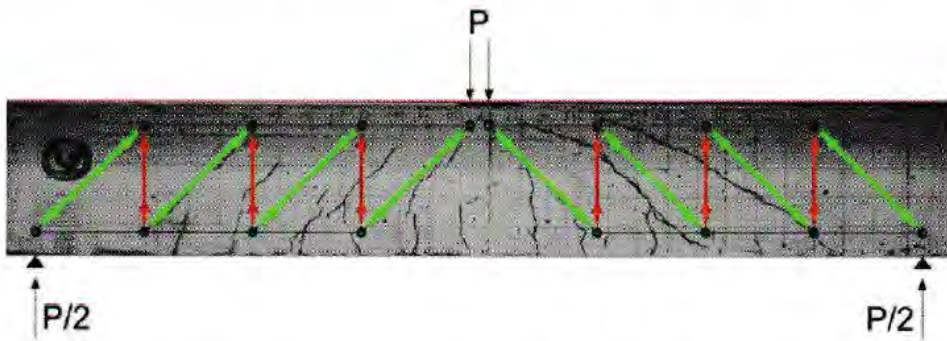
R23.2.1 Untuk rangka batang idealisasi, *strut* merupakan komponen tekan, *tie* adalah komponen tarik, dan nodal adalah titik hubung (*joint*). Rincian penggunaan model *strut and tie* terdapat dalam Schlaich et al. (1987), Collins and Mitchell (1991), MacGregor (1997), FIP (1999), Menn (1986), Muttoni et al. (1997), dan ACI 445R. Contoh desain untuk metode *strut-and-tie* terdapat pada ACI SP-208 (Reineck 2002) dan ACI SP-273 (Reineck and Novak 2010).



Gambar 1-1: Pola retak pada balok beton bertulang akibat beban P



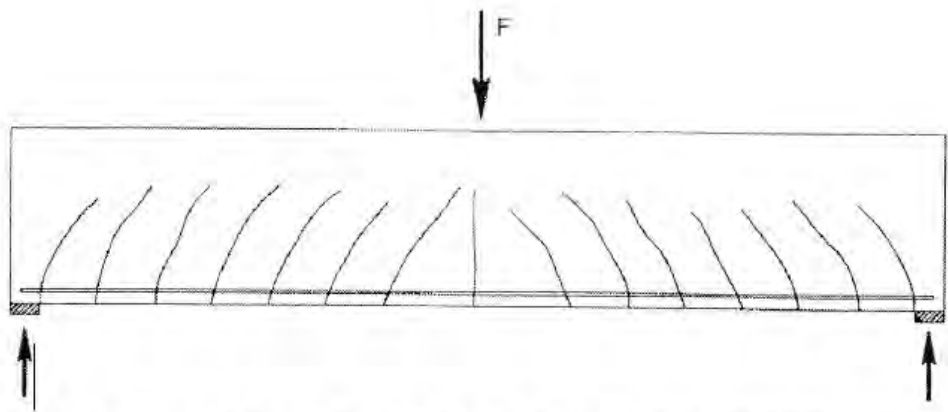
Gambar 1-3: Truss analogi untuk balok beton bertulang sesuai Morsch



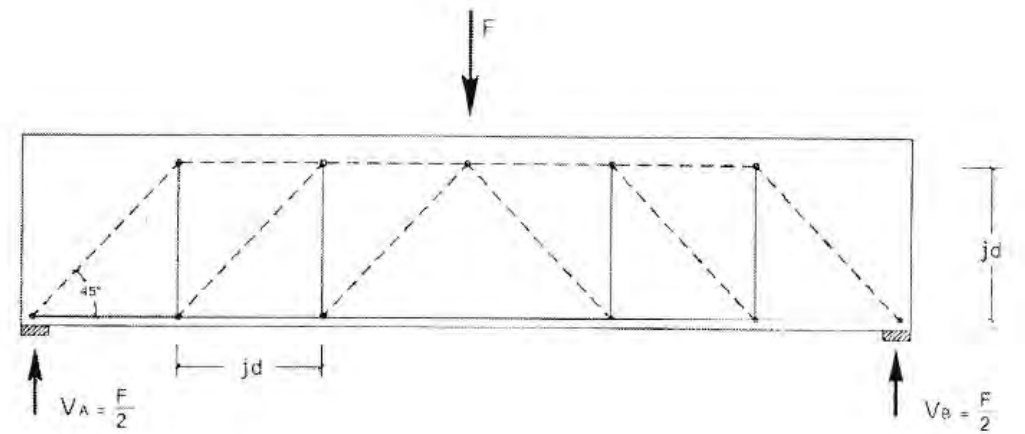
Gambar 1-2: Alur gaya (*load Path*) pada balok dari gaya P (aksi) menuju ke tumpuannya.

Jadi sejak awal perkembangan struktur beton bertulang, strut-and-tie model dalam istilahnya sebagai *Truss* model sudah dikenal pada perancangan beton struktural, khususnya untuk menentukan penulangan yang diperlukan pada batang tarikannya, dengan mengasumsikan bahwa beton hanya untuk memikul gaya tekan saja.

Rangka batang, yang diusulkan oleh Mörsch terdiri dari batang tekan dan tarik, sejajar dengan arah memanjang dari balok, batang tekan diagonal dengan sudut 45° dan batang tarik vertikal. Batang tekan dan batang tarik yang sejajar diperlukan untuk memikul momen lentur, yang kita peroleh dari standard penulangan lentur. Tinggi dari rangka batang ini ditentukan oleh jarak lengan momen dalam yaitu jd , yang dihitung untuk posisi dengan momen maksimum. Batang tarik vertikal adalah penulangan geser yang dipasang untuk memikul gaya lintang, sedangkan batang tekan diagonal akan dipikul oleh betonnya sendiri.

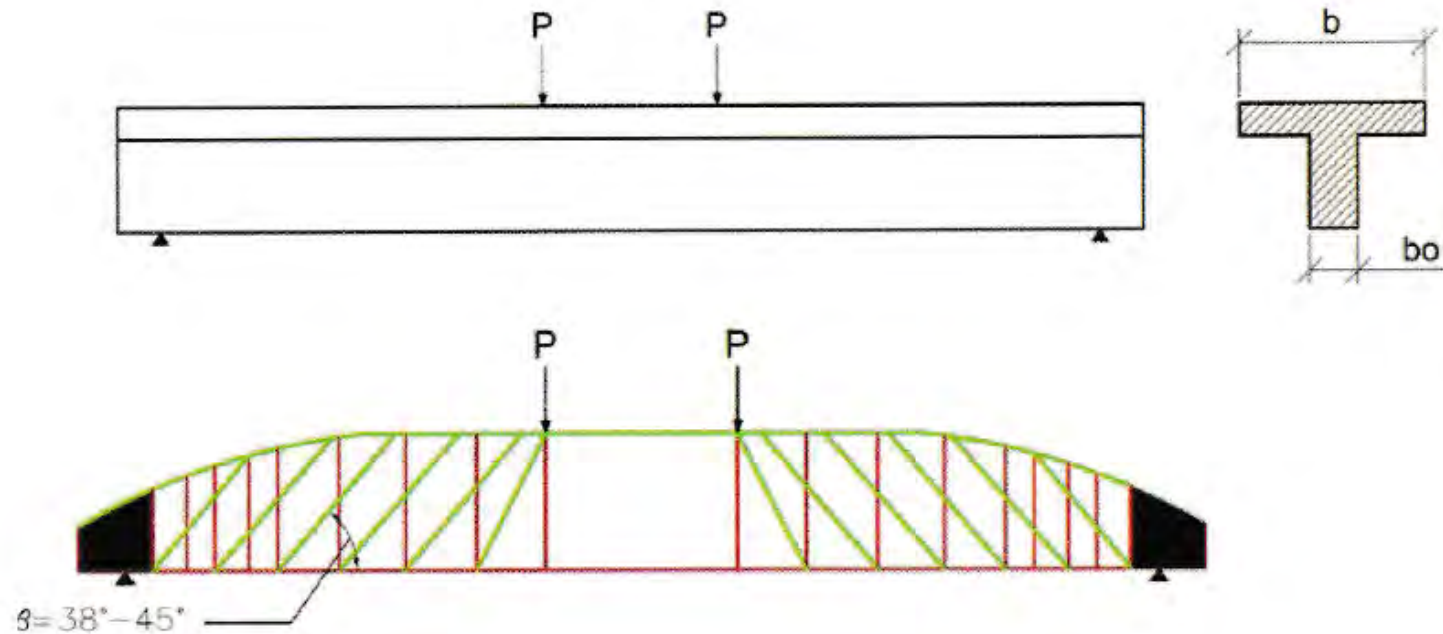


Gambar 2-1 : Pola retak pada balok akibat beban F (momen dan gaya lintang)

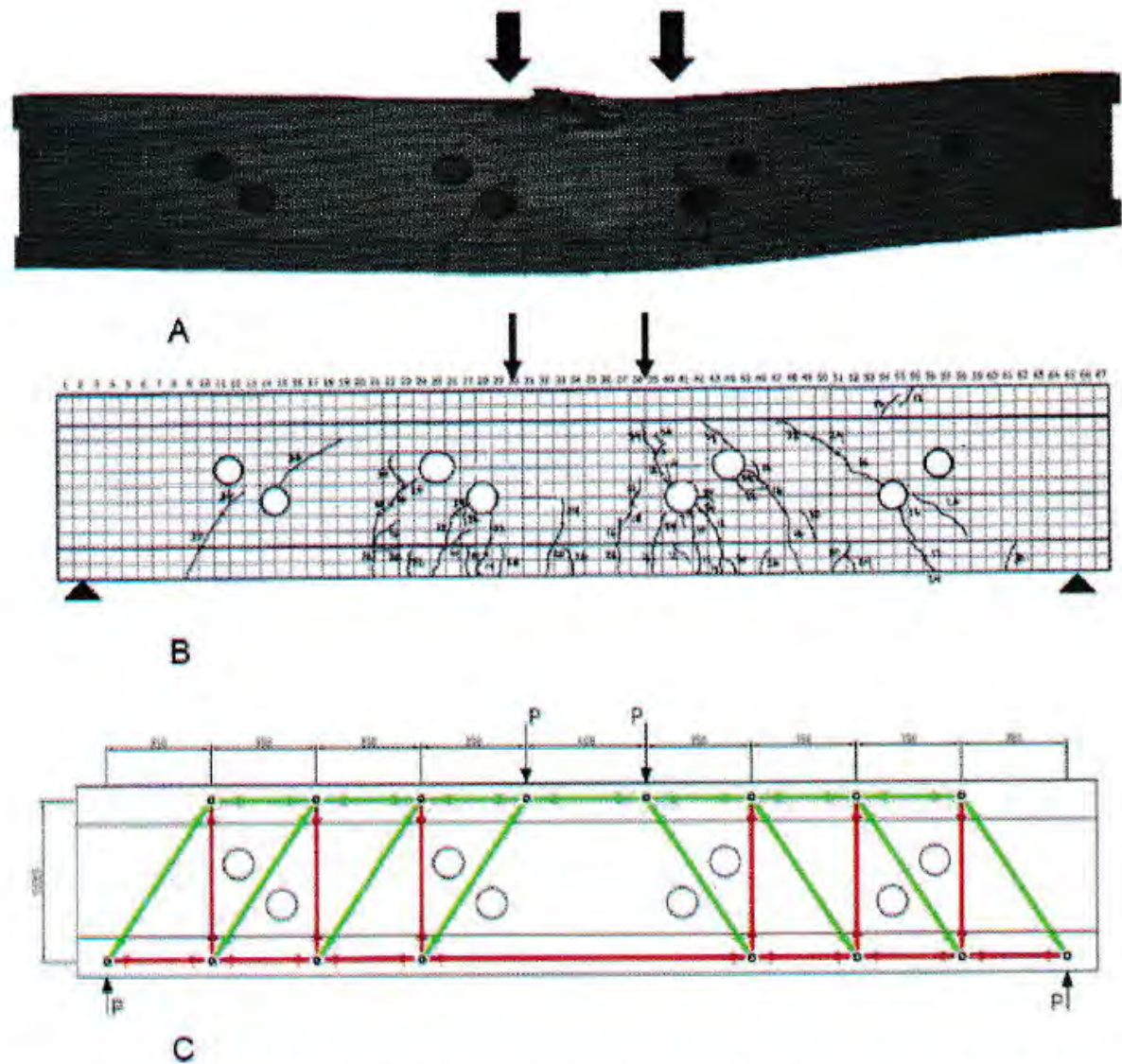


Gambar 2-2 : Truss analogi untuk balok beton bertulang sesuai Mörsch

Seperti pada gambar 1-4, Leonhard (1965) berdasarkan hasil test pada balok T beton struktural dengan berbagai variasi untuk b/b_o , mengusulkan model analogi rangka batang yang disempurnakan, dimana batang tekan atas tidak lagi sejajar dengan batang tarik bawah, dan menggunakan sudut $< 45^\circ$ untuk batang diagonal tekan.

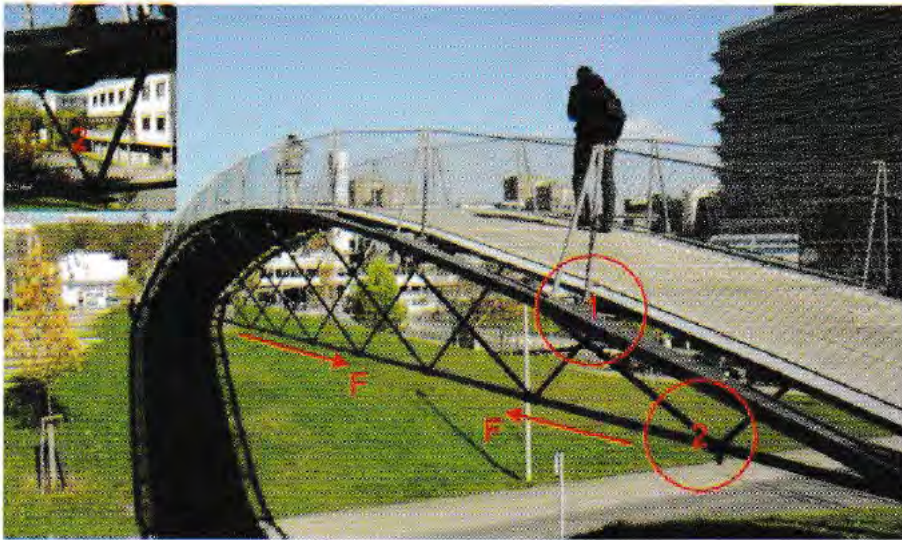


Gambar 1-4: Rangka batang yang diperluas oleh Leonhardt dan Mönning [14].



Gambar 1-5: A. Keruntuhan balok uji dengan banyak bukaan yang dibebani dua beban terpusat P . B. Pola retak balok uji. C. Model Analogi Rangka Batang yang dipakai untuk perancangan tulangan balok dengan banyak bukaan sesuai Hardjasaputra dkk [25].

Jembatan pejalan kaki pada gambar 1-7 strukturnya mencapai kriteria sebagai bangunan yang ringan, ramping dan indah karena topologi struktur dirancang dengan konsep *form follow the force*, yaitu dengan elemen struktur terdiri dari struktur busur tekan (*strut*), sistim penopang (*strut*) yang menumpu pada kabel baja prategang (*tie*).



Gambar 1-7: Jembatan Pejalan Kaki di kampus *University of Stuttgart*. (1) Struktur busur tekan. (2) Penopang yang menumpu pada kabel baja prategang.

Aplikasi strut-and-tie model pada beton struktural adalah hanya sebagai model rangka batang yang imajiner. Strut-and-tie yang nyata dapat kita jumpai pada struktur kabel seperti pada gambar 1-8, dimana terlihat elemen struktur *strut* (tekan), *tie* (tarik) dan daerah *node*.



Gambar 1-8: Strut-and-tie pada struktur kabel (Sumber: Hardjasaputra H. [24])

Pembagian daerah *beam*/Bernoulli (B) dan *discontinuity/disturbance* (D)

Distribusi tegangan dan regangan pada daerah B dan D

Sebagai dasar untuk perancangan elemen struktur Schlaich, Schäfer, dkk [4,5] menyimpulkan bahwa struktur dapat dibagi dalam dua daerah. Daerah di mana hipotesa Bernoulli berlaku, yaitu daerah dengan distribusi regangan bersifat linear, dinamakan sebagai daerah B (*beam, Bernoulli*).

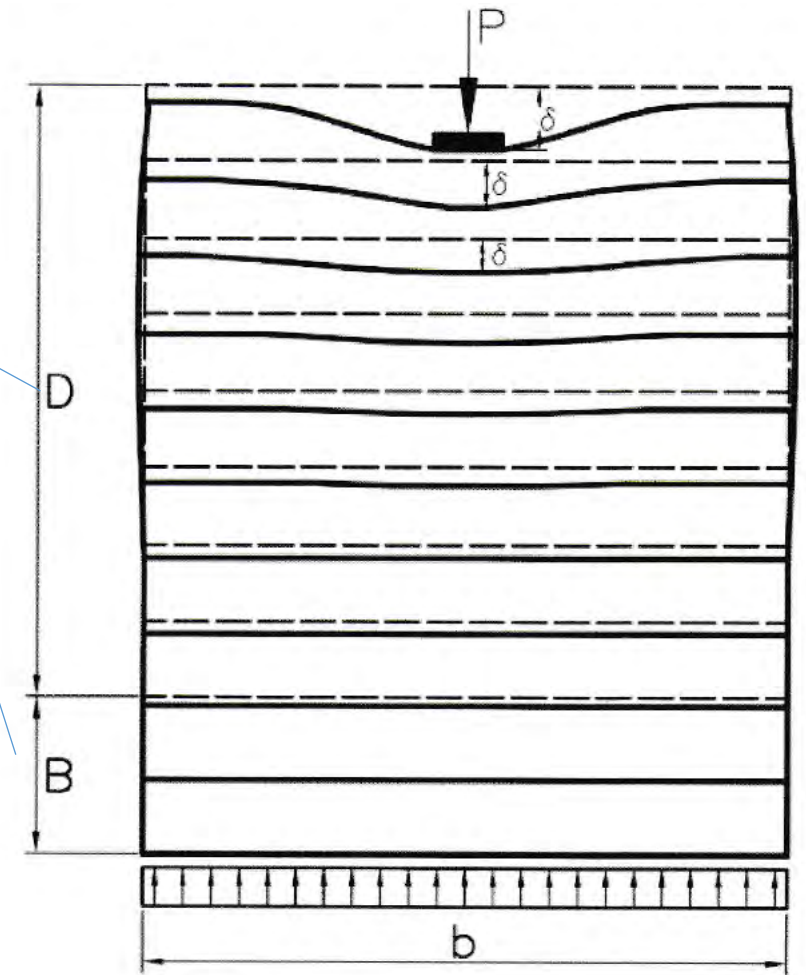
Sedangkan untuk daerah di mana distribusi regangan bersifat non-linear dinamakan sebagai daerah D (*discontinuity, disturbance*). Pada daerah D ini ditandai dengan adanya diskontinuitas yang disebabkan karena adanya perubahan geometri, statika, ataupun kombinasi dari keduanya. Untuk itu, pada tahap awal perancangan

Untuk memahami perbedaan daerah D dan B secara fisik, kita dapat memperhatikan perbedaan perubahan deformasi atau bentuk pada daerah sekitar terjadinya diskontinuitas dibandingkan dengan daerah yang jauh dari tempat terjadinya diskontinuitas tersebut. Sebagai contoh, perhatikan bagaimana pola deformasi suatu kolom pendek dengan lebar b yang dibebani beban terpusat P , seperti ditunjukkan pada Gambar 2-1.

Di daerah D: hukum Bernoulli tidak berlaku, tegangan: $f = P/A$ tidak berlaku

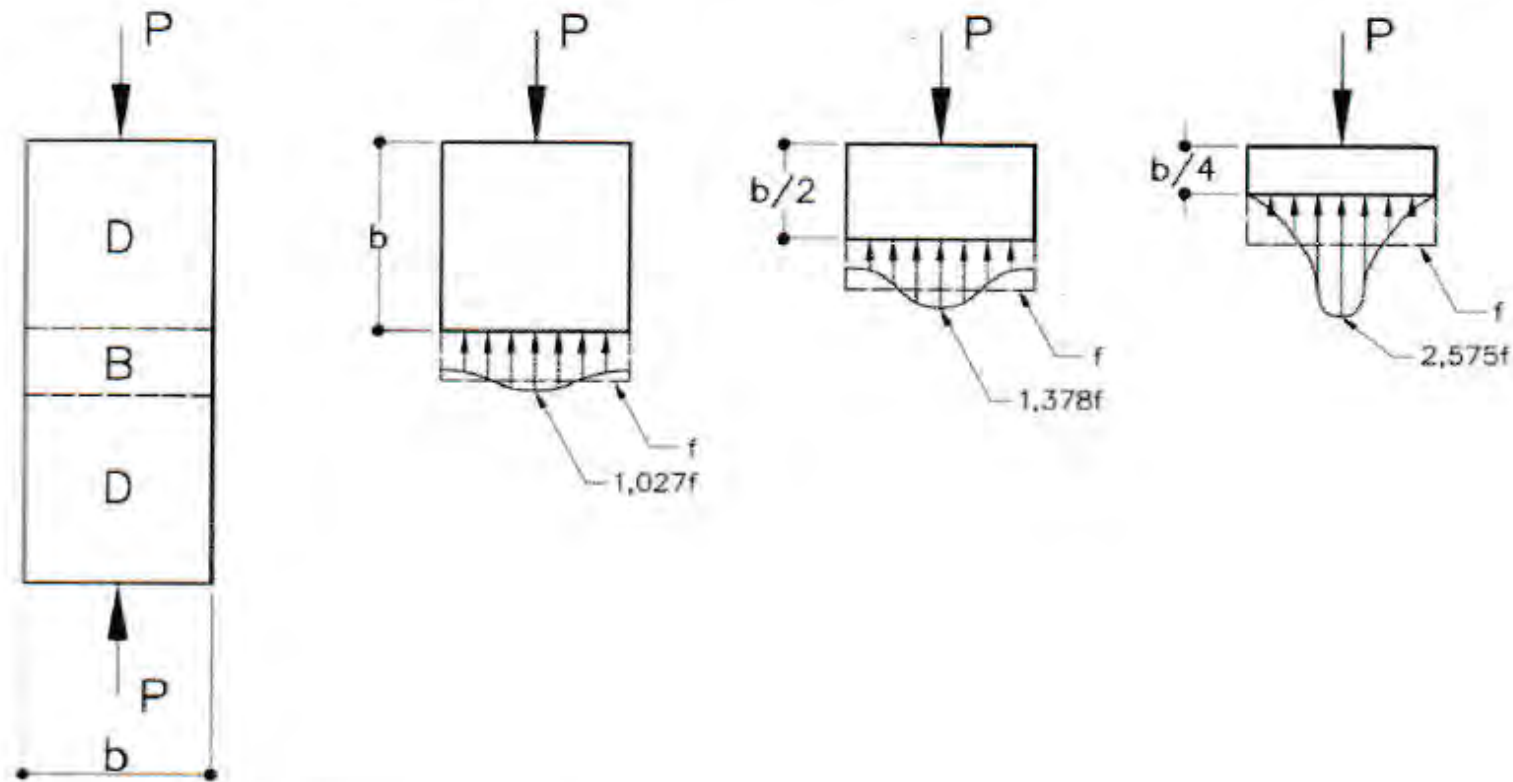
Di daerah B: hukum Bernoulli berlaku

Gambar 2-1 memperlihatkan deformasi yang terjadi pada dinding akibat beban terpusat P . Pola deformasi yang terjadi digambarkan mulai dari daerah sekitar beban P sampai pada daerah yang jauh dari beban 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 hipotesa Bernoulli tidak berlaku, karena keadaan penampang akibat beban P tersebut tidak rata. Tetapi, pada daerah yang terletak makin menjauhi beban terpusat P , maka deformasi pada penampang makin terdistribusi merata, sampai kondisi di mana praktis deformasi dapat dianggap sudah merata. Kondisi ini terjadi pada penampang yang berada pada jarak sejauh atau lebih besar dari lebar kolom b . Hal ini berarti pada daerah yang jaraknya dari beban terpusat P lebih besar dari b hipotesa Bernoulli berlaku.

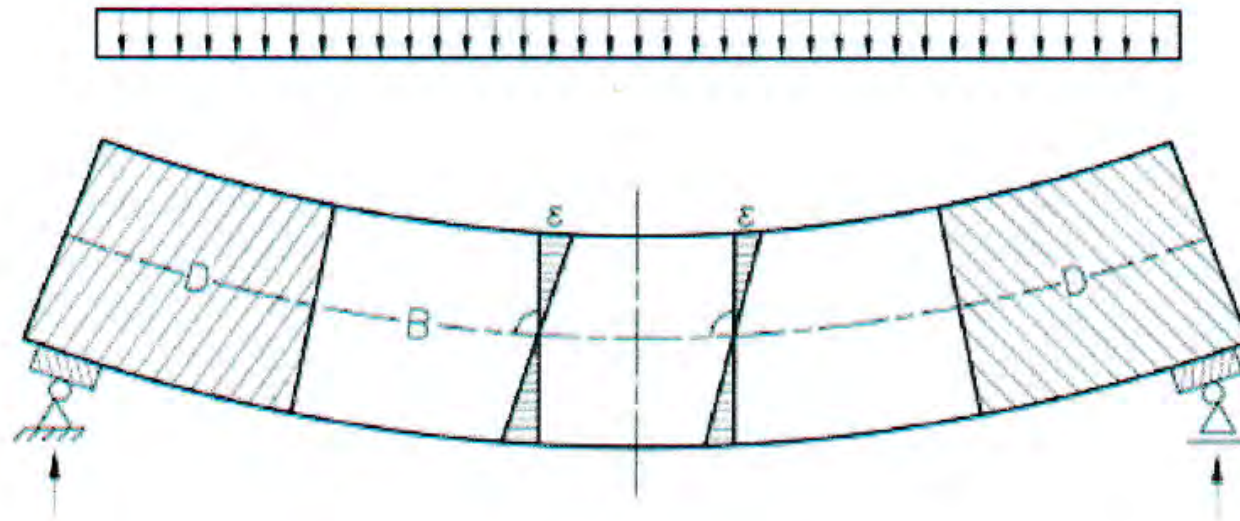


Gambar 2-1: Deformasi struktur dinding yang dibebani beban terpusat P

Menurut teori elastisitas dari Timoshenko dan Goodier (1951) disimpulkan bahwa regangan dan tegangan maksimum terjadi pada daerah sekitar beban kerja.



Gambar 2-2: Distribusi tegangan normal yang terjadi pada daerah sekitar beban terpusat P pada penampang sejauh b , $b/2$ dan $b/4$.



Gambar 2-3: Distribusi tegangan linear menurut hipotesa Bernoulli, yaitu di mana penampang dianggap rata dan tegak lurus garis netral sebelum dan sesudah lentur.

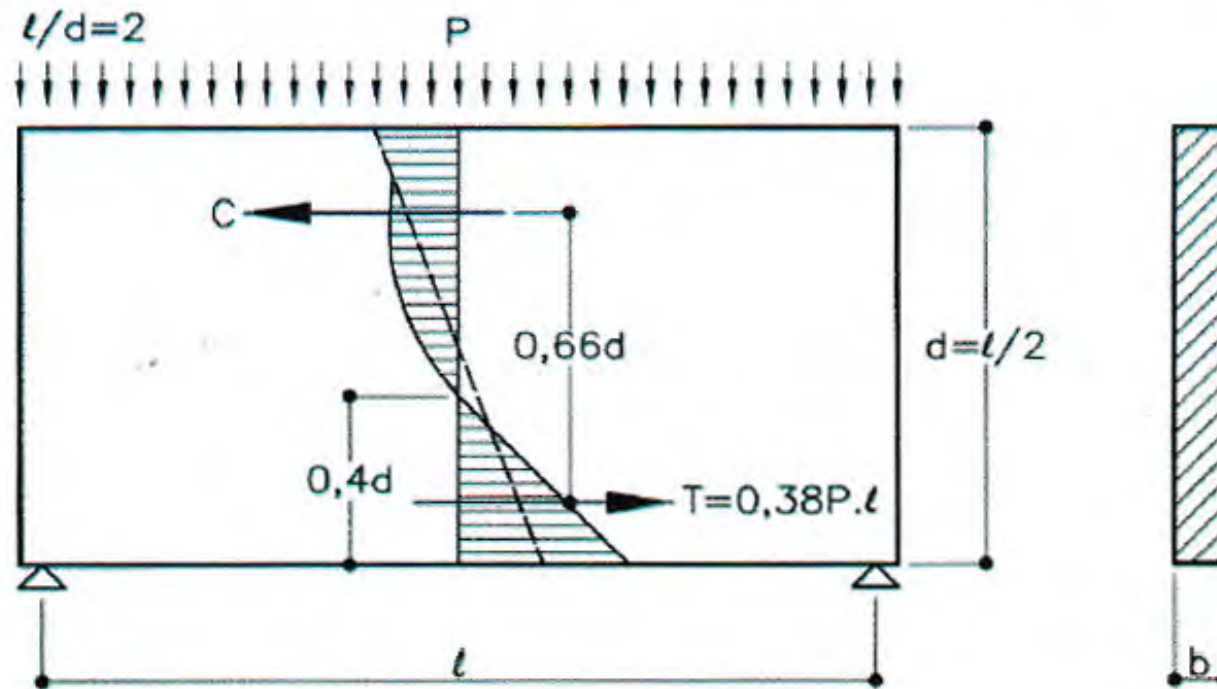
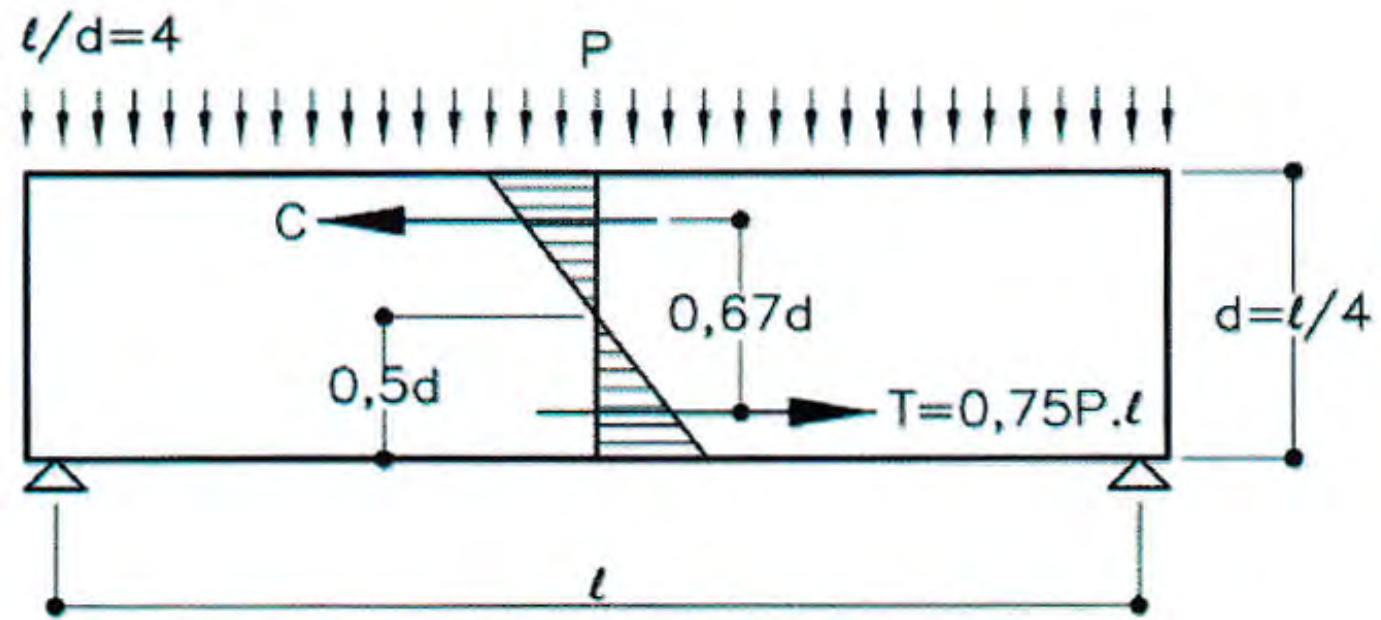
Untuk balok lentur dengan beban merata seperti pada gambar 2-3, maka daerah yang mengikuti hipotesa berlaku hanya terdapat pada daerah tengah saja, sedangkan pada daerah sekitar tumpuan, hipotesa Bernoulli tidak berlaku lagi, karena pada tumpuan bekerja beban terpusat sebagai reaksi dari beban merata. Untuk itu, maka pada daerah B, dapat digunakan distribusi regangan yang linear seperti tergambar pada gambar 2-3. Asumsi ini menjadi dasar pada semua standar perhitungan penulangan penampang beton struktural akibat lentur dan aksial, seperti yang dapat dijumpai juga pada SNI 2847: 2019 pasal 23.2.8

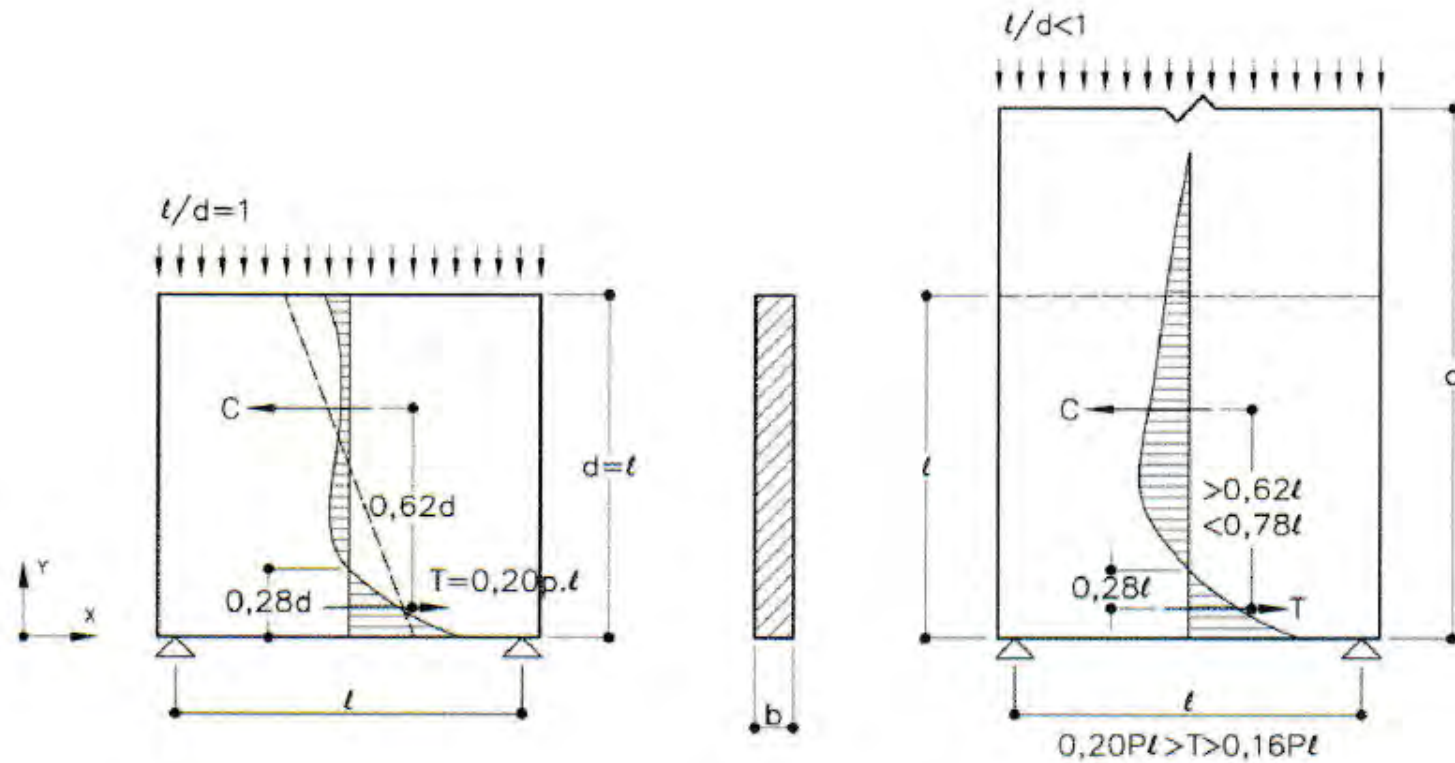
Sesuai kondisi distribusi regangan yang linier pada daerah B tersebut, maka kita dapat menurunkan perhitungan tegangan elastis (longitudinal) f_x akibat momen lentur pada balok sebagai:

$$f_x = M/I.y$$

sedangkan tegangan vertikal $f_y = 0$.

Daerah tumpuan kita kelompokkan sebagai daerah D, karena distribusi regangannya adalah nonlinier, atau dengan perkataan lain tidak mengikuti hipotesa Bernoulli. Untuk menjelaskan apa yang dimaksud dengan balok tinggi, seperti yang tercantum dalam pasal 10.2.2 SNI 2847-2013, dapat kita pelajari dari kondisi distribusi tegangan elastis yang terjadi pada berbagai balok yang mempunyai rasio $l/d = 4, 2, 1$ dan < 1 , seperti pada gambar 2-4 di bawah ini.





Gambar 2-4: Tegangan longitudinal (tegangan arah x) pada tengah bentang dari berbagai balok dengan rasio bentang dan tinggi balok $l/d = 4, 2, 1$ dan < 1 , akibat beban merata (sumber : Leonhardt dan Mönning, 1975).

Tegangan elastis pada tengah bentang balok arah x (longitudinal) yang terjadi, pada balok $l/d = 4$ distribusinya masih bersifat linier, sedangkan pada balok $l/d=2$ mulai bersifat non linier.

Pasal 9.9 SNI 2847:2019 mengkategorikan balok-balok dengan $l/d < 2$ sebagai balok tinggi, dan perancangan beton struktural pada kondisi ini TIDAK lagi menggunakan standar penulangan yang ada, dan kita boleh menggunakan strut- and-tie model.

9.9 - Balok tinggi

9.9.1 Umum

9.9.1.1 Balok tinggi adalah komponen struktur yang dibebani satu sisi dan ditopang pada muka yang berlawanan sedemikian hingga komponen tekan seperti-strut dapat terbentuk di antara beban dan tumpuan dan memenuhi a) atau b):

- a) Bentang bersih tidak melebihi empat kali tinggi keseluruhan komponen h
- b) Beban terpusat berada dalam jarak $2h$ dari muka tumpuan.

9.9.1.2 Balok tinggi harus didesain dengan mempertimbangkan distribusi nonlinear dari regangan longitudinal sepanjang tinggi balok.

R9.9 - Balok tinggi

R9.9.1 Umum

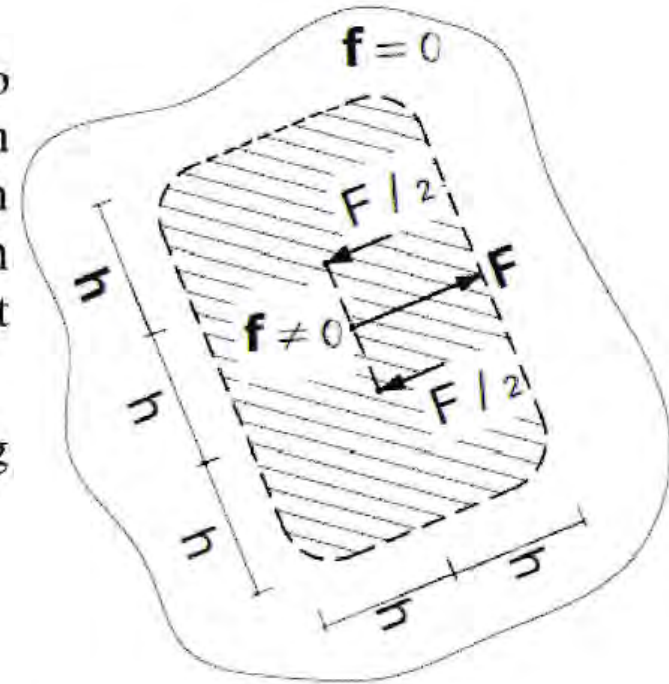
R9.9.1.1 Perilaku balok tinggi didiskusikan dalam [Schlaich et al. \(1987\)](#), [Rogowsky and MacGregor \(1986\)](#), [Marti \(1985\)](#), dan [Crist \(1966\)](#). Untuk balok tinggi memikul beban gravitasi, ketentuan ini berlaku jika beban dikerjakan pada bagian atas balok dan balok ditumpu pada sisi bawahnya. Jika beban dikerjakan hingga ke tepi atau bagian bawah komponen tersebut, model *strut and tie*, seperti dijelaskan di [Pasal 23](#) harus digunakan untuk mendesain tulangan yang mentransfer secara internal beban ke sisi atas balok dan mendistribusikannya ke tumpuan terdekat.

R9.9.1.2 Standar ini tidak berisi syarat mendetail untuk mendesain balok tinggi untuk momen, kecuali jika distribusi regangan nonlinier harus dipertimbangkan. Pedoman untuk desain balok tinggi untuk lentur ada pada [Chow et al. \(1953\)](#), [Portland Cement Association \(1946\)](#) dan [Park and Paulay \(1975\)](#).

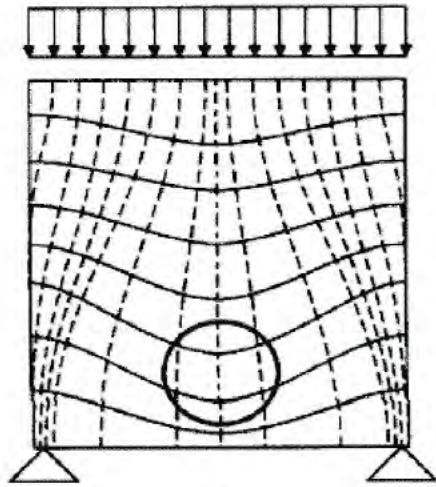
Azas Saint Venant

Pada teori elasisitas kita mengenal prinsip Saint-Venant, yaitu prinsip yang menyatakan bahwa bila suatu kelompok gaya yang dalam keadaan seimbang (Jumlah Gaya = 0) yang bekerja pada bidang struktur akan menyebabkan tegangan pada struktur, di mana besaran tegangan akan cepat mengecil semakin jauh dari tempat kelompok gaya tersebut bekerja.

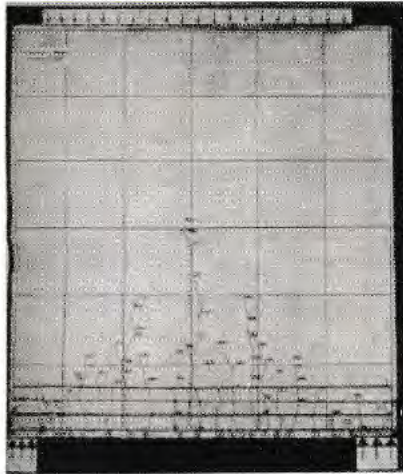
Prinsip Saint-Venant ini menyatakan jauhnya penyebaran tegangan yang terlokalisasi pada daerah sejauh h sekitar kelompok gaya tersebut.



Gambar 2-5: Daerah yang diarsir disebut sebagai daerah Saint Venant, di mana akibat sekelompok gaya yang bekerja dalam keadaan seimbang, tegangan elastis f pada daerah tersebut tidak sama dengan NOL, di luar daerah diarsir barulah tegangannya menjadi nol.

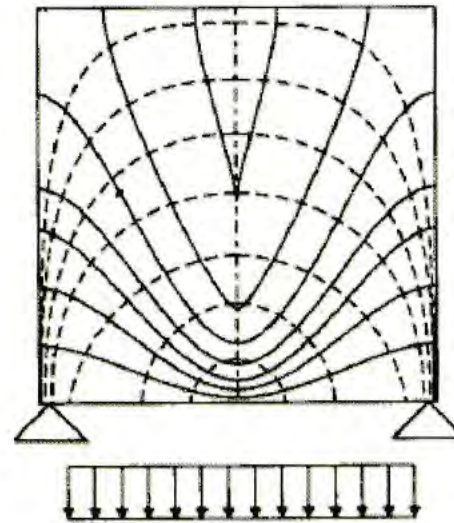


A

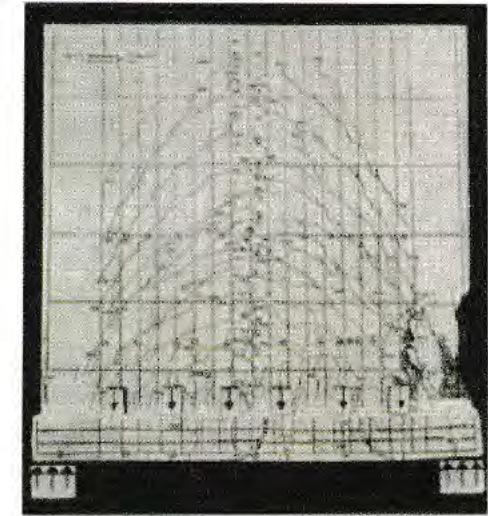


B

Gambar 2-13: A. Trajektori tegangan utama pada dinding di atas dua tumpuan akibat beban merata. Pada perpotongan trajektori tarik dan tekan, akan ada tegangan utama tarik yang menyebabkan keretakan pada beton. B. Pola retak yang terjadi pada struktur dinding beton bertulang akibat beban merata tersebut, "mengikuti" pola dari garis trajektori tekan.

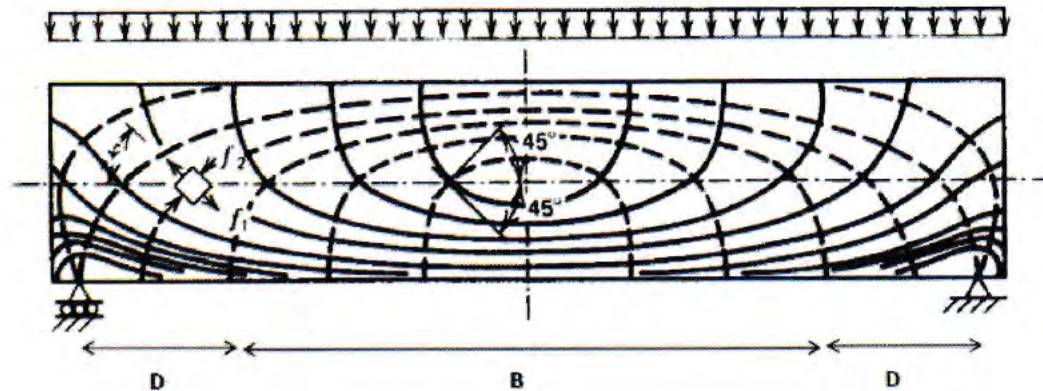


A

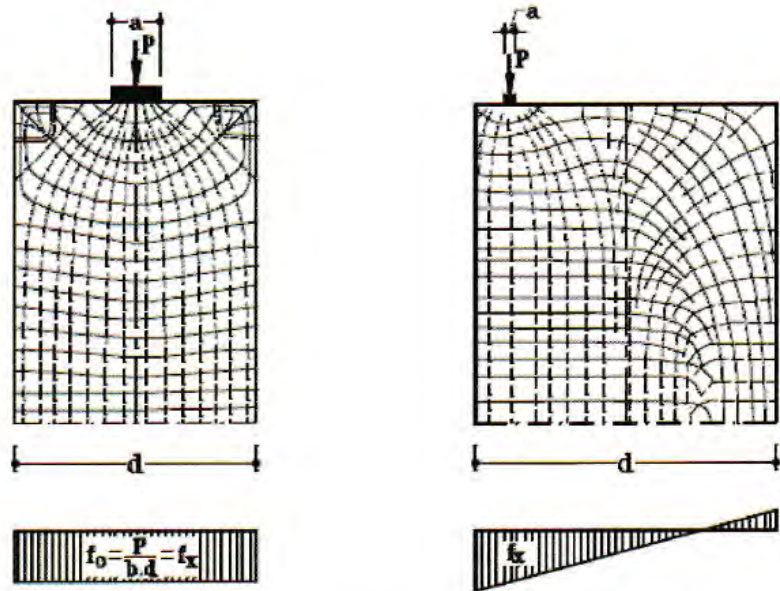


B

Gambar 2-14: A. Trajektori tegangan utama pada dinding di atas dua tumpuan akibat beban merata yang bekerja pada bagian bawah dinding. B. Seperti pada gambar 2-9B didapati pola retak yang terjadi pada struktur dinding beton bertulang akibat beban merata tersebut, "mengikuti" pola dari garis trajektori tekan.

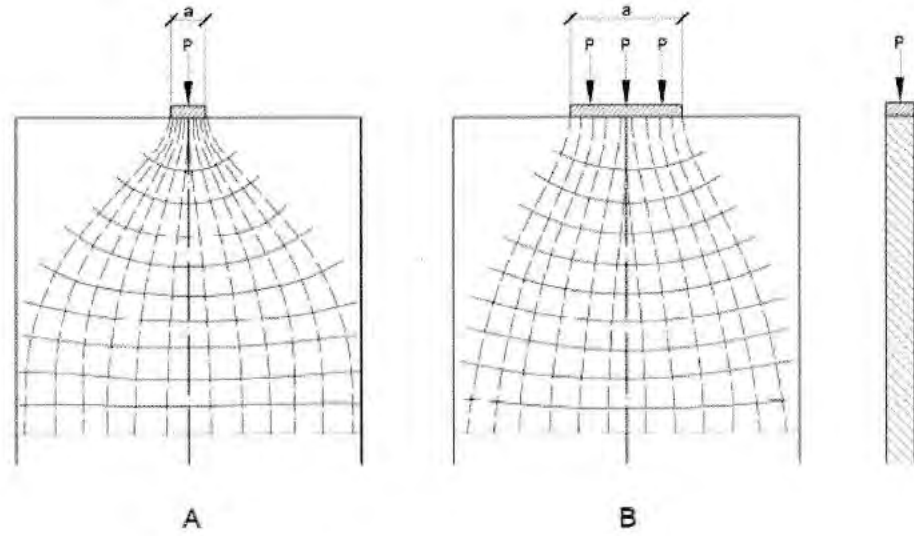


Gambar 2-15: Trajektori tegangan utama pada daerah B dan D pada balok dua tumpuan dengan beban merata.

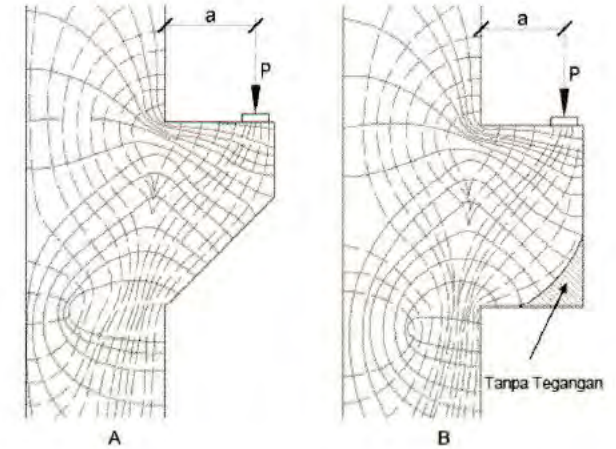


Persamaan dan bentuk tegangan hanya berlaku untuk daerah B.

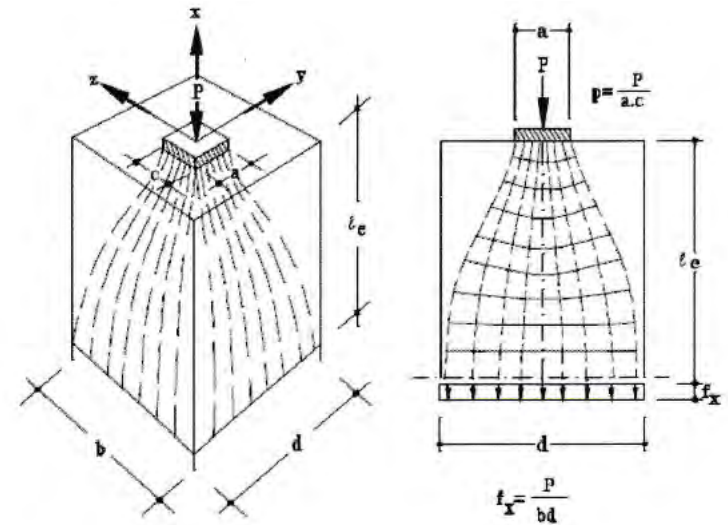
Gambar 2-16: A. Trajektori tegangan utama pada dinding dengan beban P sentris. B. Trajektori tegangan utama pada dinding dengan beban P eksentris.



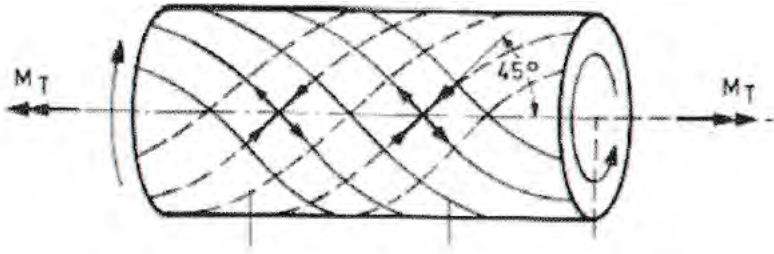
Gambar 2-22: Trajektori tegangan utama dengan beban terpusat.
A. Lebar penyebaran beban P dengan a yang sempit.
B. Lebar penyebaran beban P dengan a yang lebar



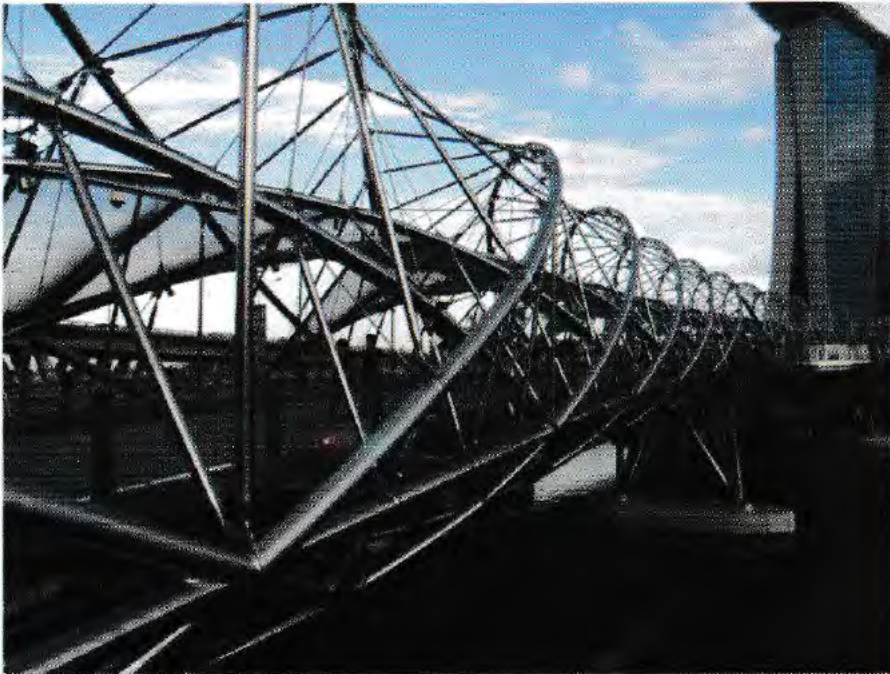
Gambar 2-21: Trajektori tegangan utama dari Konsol dengan beban terpusat. A. Konsol dengan bentuk trapesium. B. Konsol dengan bentuk persegi [15].



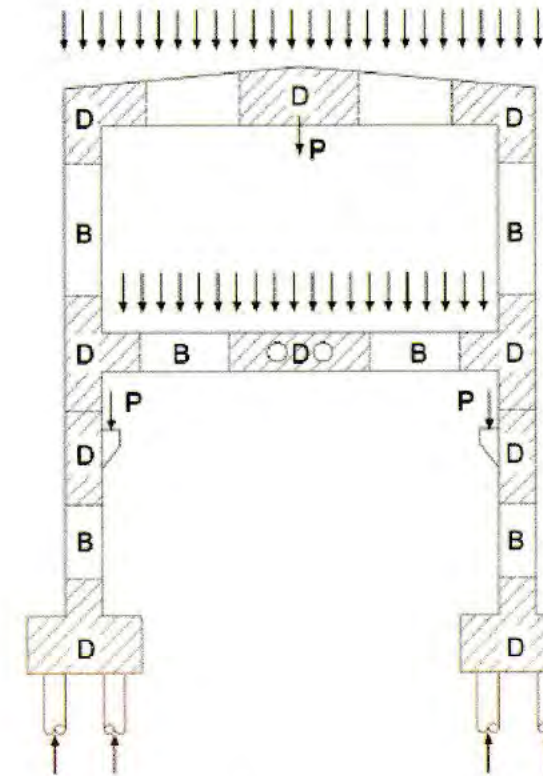
Gambar 2-23: Pola trajektori tegangan utama ruang (3D) untuk kolom pendek dengan beban terpusat.



Gambar 2-24: Pola trajektori tegangan utama ruang untuk silinder akibat torsi. Garis trajektori tegangan utama tarik dan tekan berbentuk spiral saling tegak lurus, yang melingkari permukaan silinder

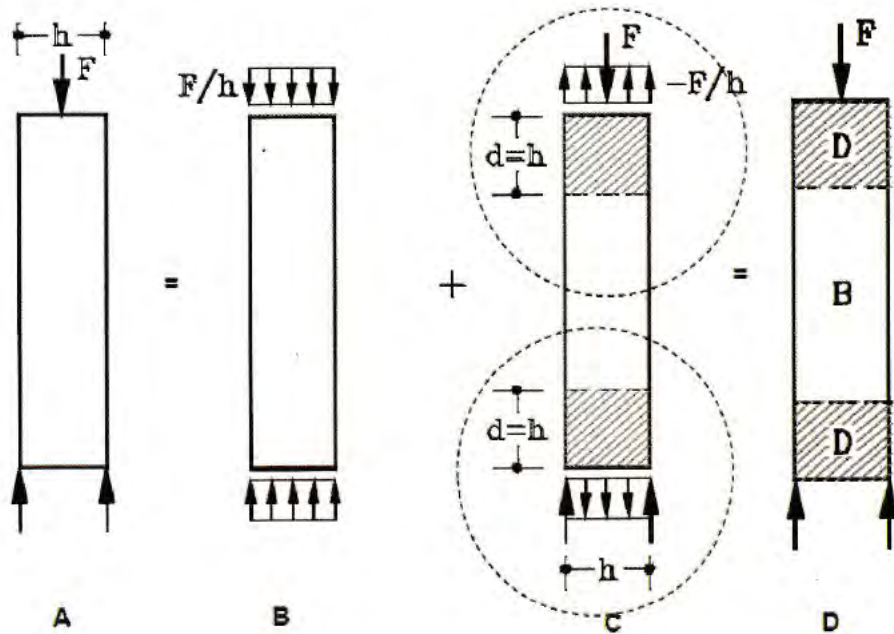


Gambar 2-25: Topologi struktur jembatan pejalan kaki di Singapura yang mengikuti pola trajektori pada silinder.



Gambar 3-1: Gambar struktur portal dengan pembagian daerah D dan B.

Penentuan Batas Daerah B dan D pada Struktur

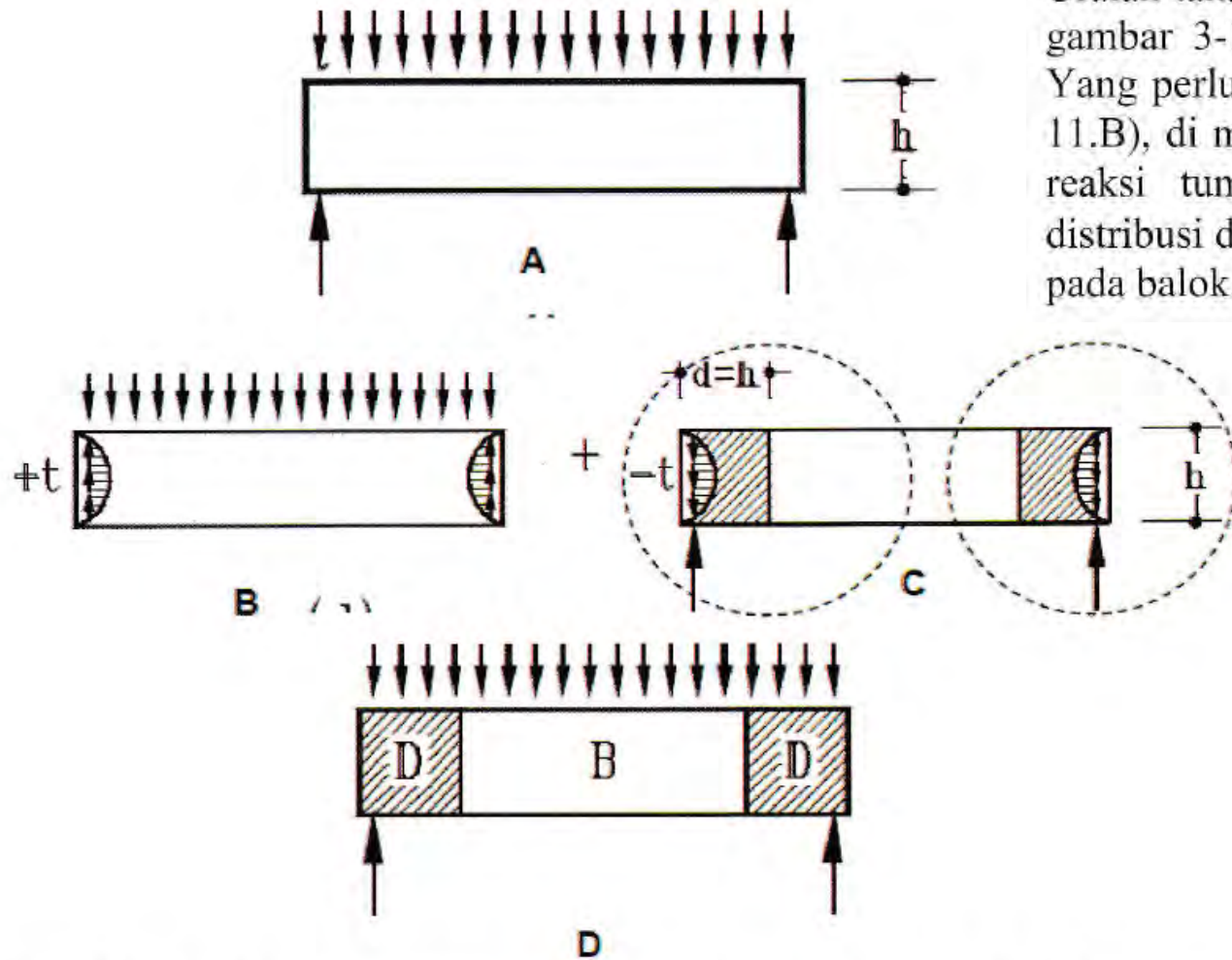


Gambar 3-10: Gambar menunjukkan tahapan penentuan daerah D dan B pada kolom dengan 2 tumpuan dan beban terpusat F .

Daerah D terbentuk akibat beban terpusat (F)

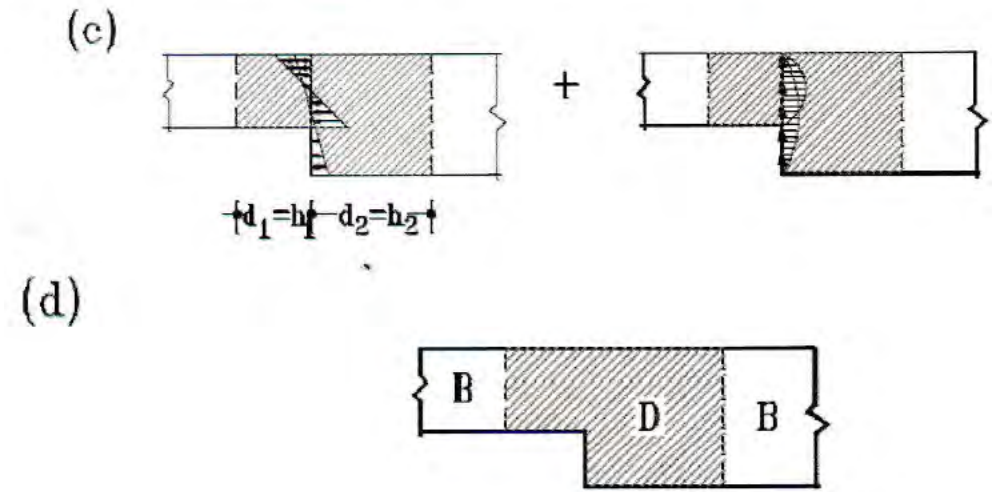
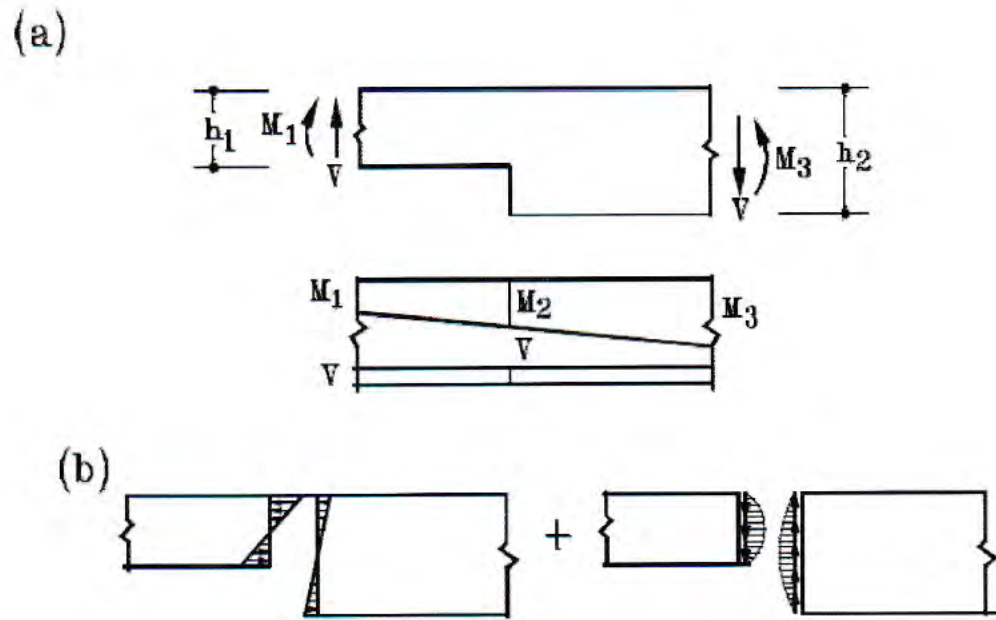
- Gantilah struktur pada gambar A dengan struktur fiktif seperti pada gambar B yang dibebani sedemikian rupa hingga hukum Bernoulli dapat berlaku, yaitu dengan mengubah beban terpusat F dengan beban merata. Ingat prinsip keseimbangan dari semua gaya-gaya tetap terpenuhi.
- Tentukan pada struktur gambar C suatu kelompok pembebanan yang bila disuperposisikan dengan gaya-gaya pada struktur gambar B akan kembali SAMA seperti struktur pada gambar A tersebut.
- Tetapkan bagian pada sistem struktur gambar (C) di mana prinsip Saint Venant dapat diterapkan, di mana batas daerah Saint Venant tersebut adalah **sejarak** $d=h$ dari posisi di mana kelompok gaya yang dalam keseimbangan tersebut terjadi.
- Dari gabungan gambar (B) dan (C) akan dapat dihasilkan gambar (D) yang kondisinya sama persis seperti struktur pada gambar A, tetapi kini disertai dengan gambar, letak, dan batas daerah D dan B. Ingat: Pada daerah B tegangan sudah tidak dipengaruhi lagi oleh unsur diskontinuitas.

Uraian tahapan penentuan dan batas daerah D dan B struktur balok pada gambar 3-11 adalah sama seperti yang diuraikan pada gambar 3-10. Yang perlu diperhatikan adalah yang terjadi pada struktur B (gambar 3-11.B), di mana agar hukum Bernoulli berlaku untuk seluruh balok maka reaksi tumpuan digantikan oleh sekelompok gaya gesernya yang distribusi dan besarnya sama seperti tegangan geser akibat gaya lintang pada balok.



Gambar 3-11: Gambar menunjukkan tahapan penentuan daerah D dan B pada balok dengan dua tumpuan dan beban merata.

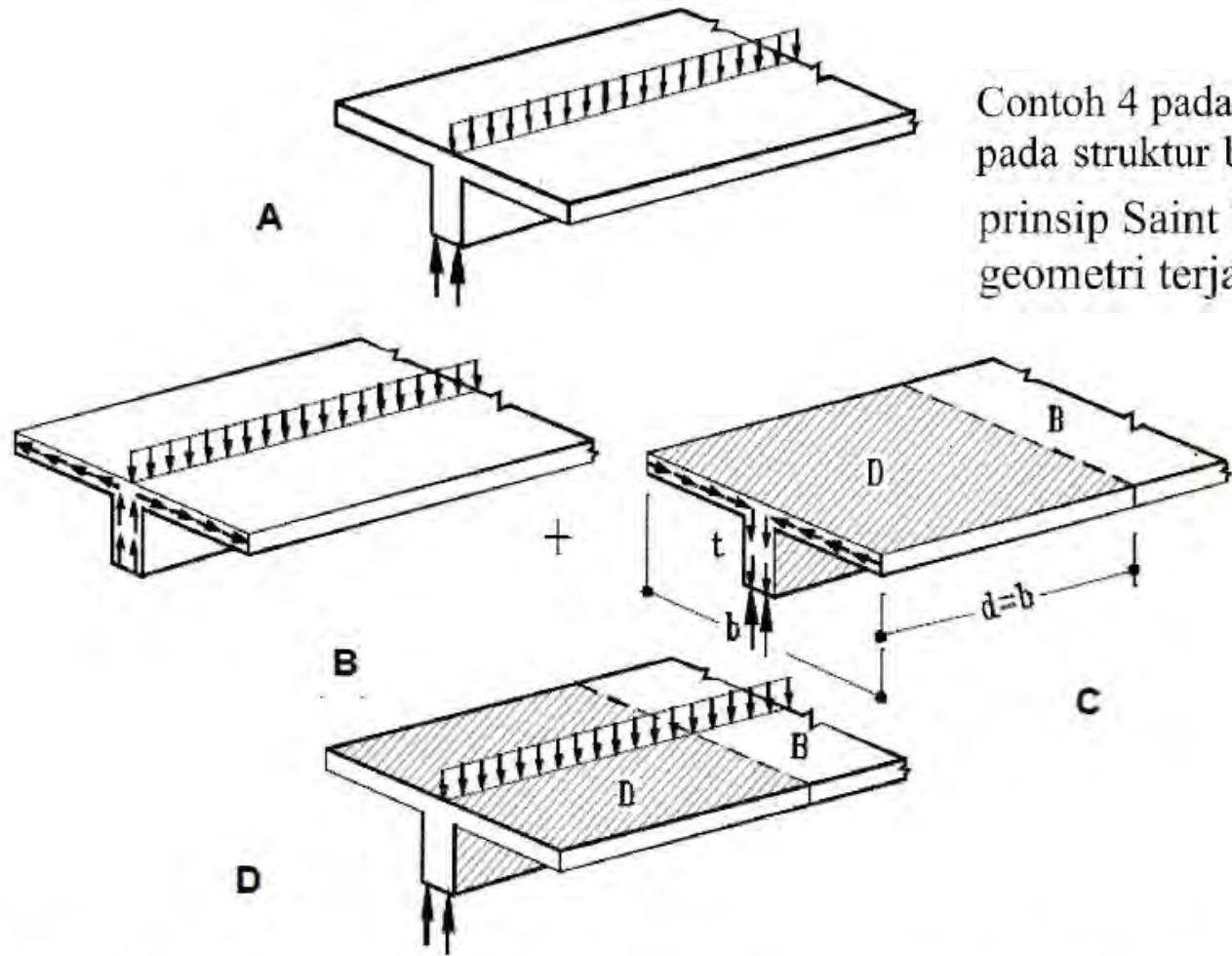
Daerah D terbentuk akibat beban merata



Daerah D terbentuk akibat diskontinuitas geometri (perubahan bentuk) penampang

Gambar 3-12: Gambar ini menunjukkan prosedur penentuan B dan D-region pada balok yang mempunyai perbedaan tinggi balok h_1 dan h_2 , dan dikategorikan sebagai balok yang mengalami diskontinuitas geometri.

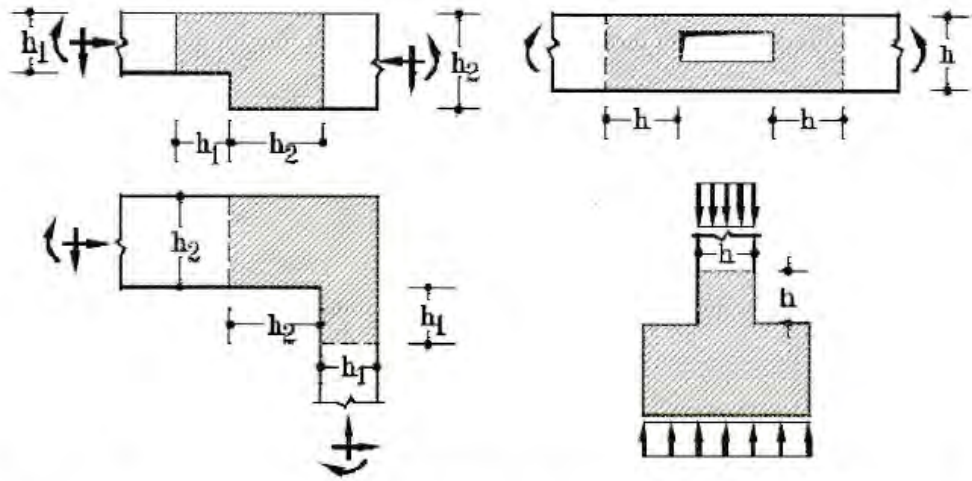
Balok pada gambar 3-12 adalah balok non prismatic dengan tinggi h_1 dan h_2 , dimana $h_1 < h_2$ dengan momen dan gaya lintang M_2 dan V pada lokasi perbedaan ketinggian. Untuk mendapatkan struktur fiktif B di mana hukum Bernoulli berlaku untuk seluruh balok, maka momen M_2 dan gaya lintang diubah sebagai sekelompok tegangan lentur dan tegangan geser (lihat contoh 2 seperti pada gambar 3-12B). Bila daerah Saint Venant sudah teridentifikasi maka batas daerah D sama dengan batas daerah Saint Venant, yang dalam hal ini sejauh h_1 dan h_2 .



Contoh 4 pada gambar 3-13 adalah penentuan pembagian daerah D dan B pada struktur balok T, secara sistematis dengan mencari daerah di mana prinsip Saint Venant dapat diterapkan. Pada contoh 4 diskontinuitas geometri terjadi antara bagian badan dan sayap balok.

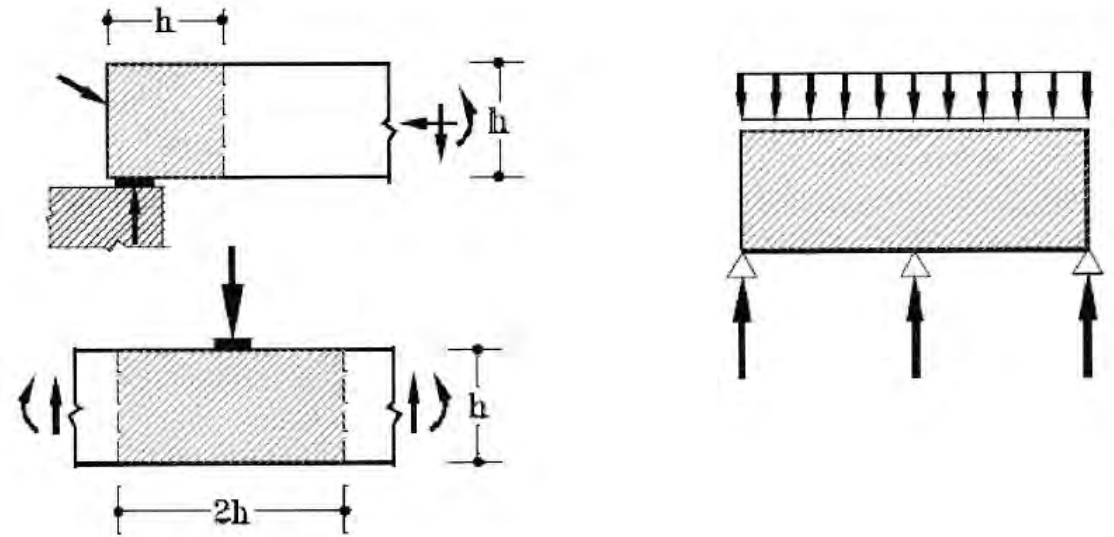
Daerah D terbentuk akibat diskontinuitas geometri (perubahan bentuk) penampang

Gambar 3-13: Gambar menunjukkan prosedur penentuan daerah B dan D dari balok T pada daerah tumpuan. Batas daerah D adalah sama dengan lebar sayap balok T yaitu sejarak $d \approx b$.



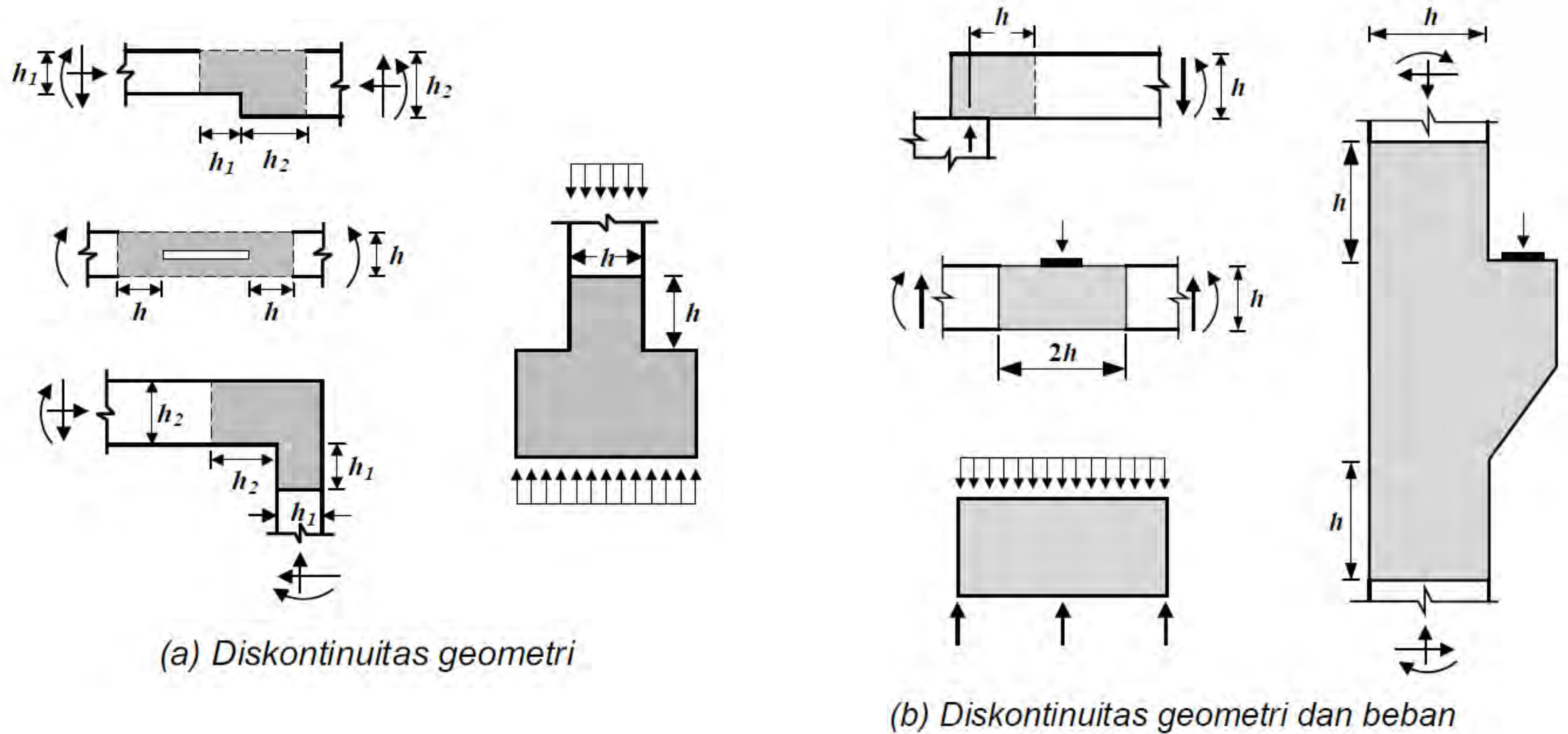
Gambar 3-14: Daerah D (daerah yang diarsir) di mana distribusi regangan nonlinear disebabkan oleh diskontinuitas geometri.

Daerah D terbentuk akibat diskontinuitas geometri (perubahan bentuk) penampang



Gambar 3-15: Daerah D (daerah yang diarsir) di mana distribusi regangan nonlinear disebabkan oleh diskontinuitas statika, seperti bekerjanya beban terpusat.

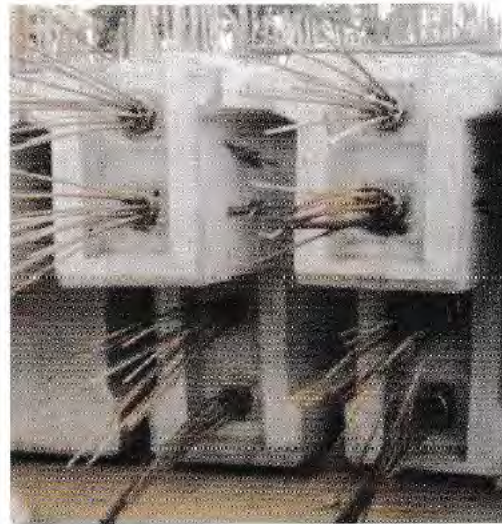
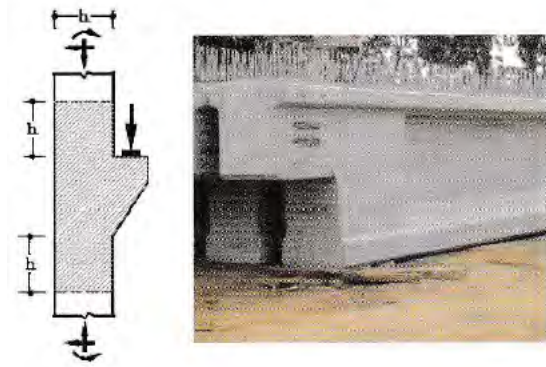
Daerah D terbentuk akibat diskontinuitas beban



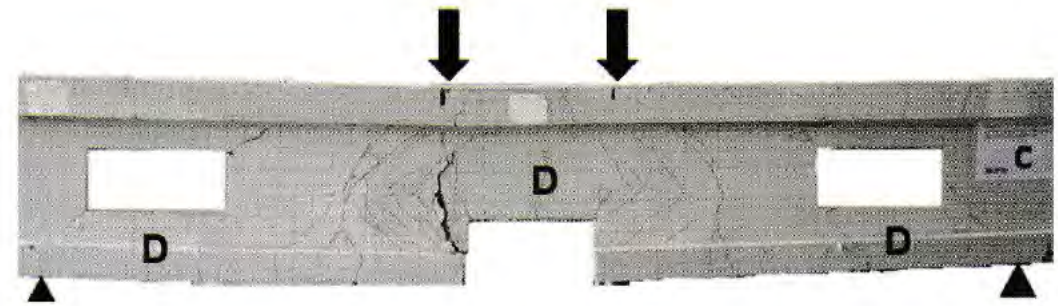
Gambar R23.1 – Daerah-D dan diskontinuitas

Sumber: SNI 2847: 2019 pasal R23.1

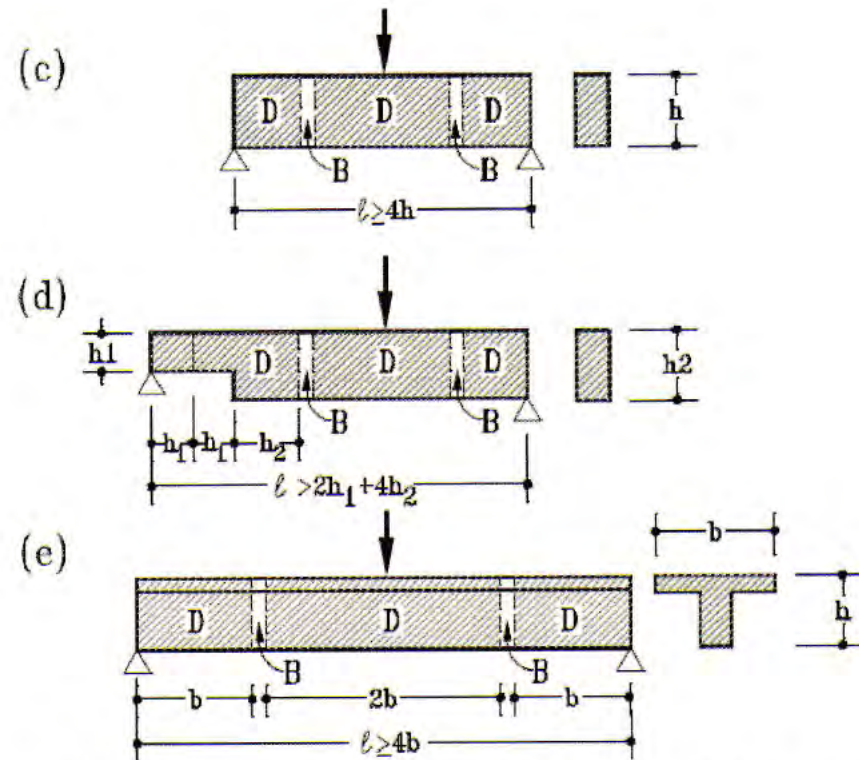
terpautan



Gambar 3-16: Contoh daerah D di mana distribusi regangan nonlinear disebabkan oleh kombinasi diskontinuitas geometri dan statika, pada konsol dan balok beton prategang.



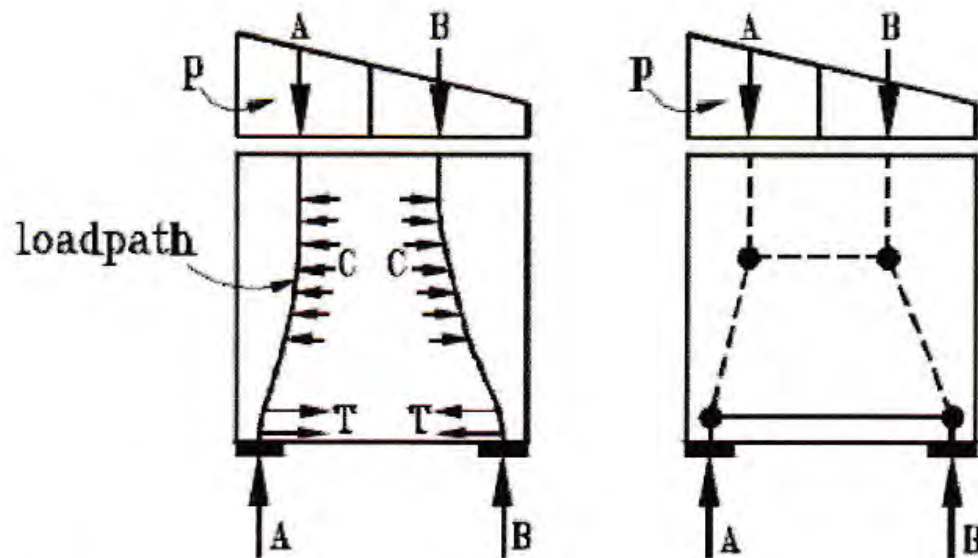
Gambar 3-17: Contoh balok yang keseluruhan struktur merupakan daerah D yang disebabkan oleh diskontinuitas statik dan geometri [25].



Gambar 3-18: Gambar dari B dan D-region dari suatu balok untuk berbagai dimensi dan berbagai beban kerja.

Dua metoda untuk mendapatkan *strut-and-tie model*

- Metoda alur gaya (*load-path-method*) yang diperkenalkan oleh **Schlaich, dkk. (1987)**
- Metoda optimisasi topologi struktur secara evolusi

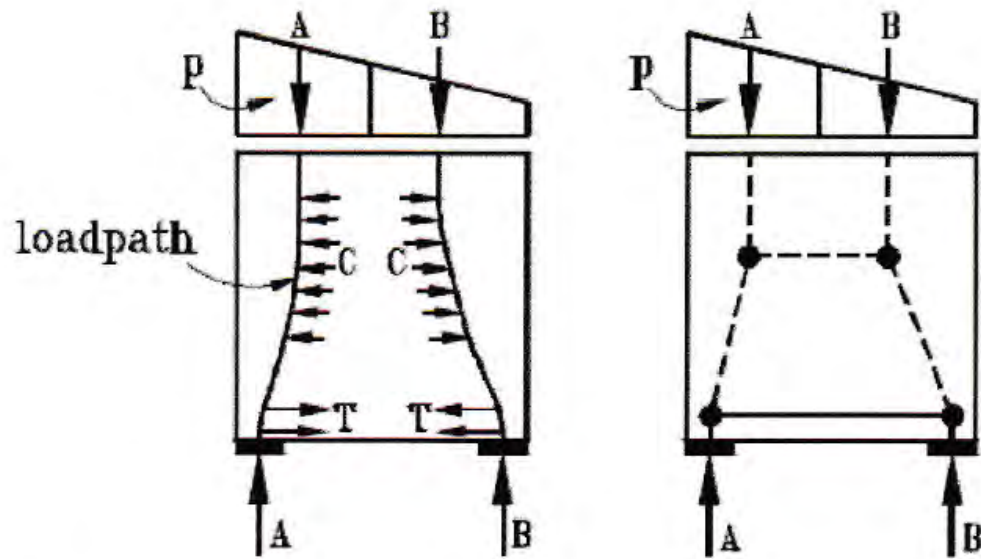


Metoda alur gaya:

Tentukan besarnya reaksi A dan B pada tumpuan dinding agar terjadi keseimbangan luar, sehingga beban kerja dan reaksi-reaksi pada daerah D berada dalam keseimbangan.

Diagram pembebanan p dibagi dalam dua bagian sedemikian rupa, sehingga masing-masing bagian mempunyai *resultant* sebesar reaksi tumpuan A dan B , dan bekerja pada titik berat masing-masing.

Gambar 3-19: Gambar dari alur gaya (*load path*) dan strut-and-tie Model [4,5].



Gambar 3-19: Gambar dari alur gaya (*load path*) dan strut-and-tie Model [4,5].

Metoda alur gaya:

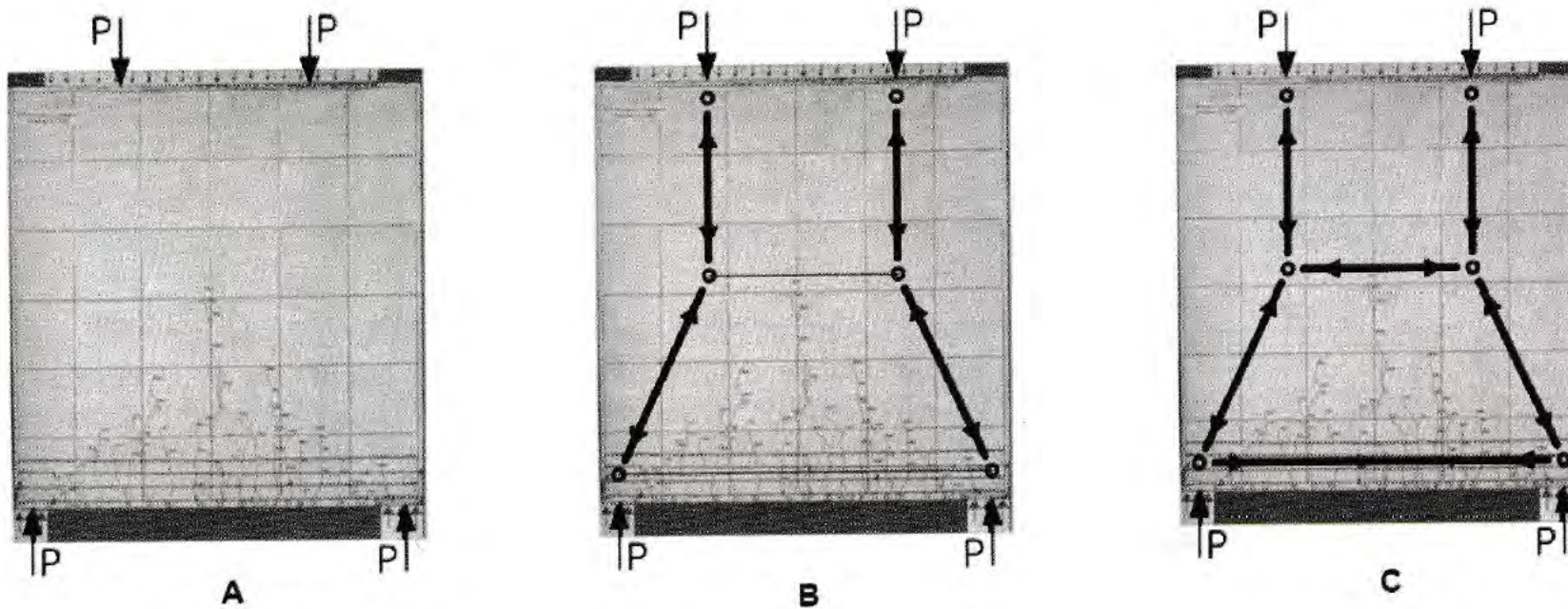
Tentukan besarnya reaksi A dan B pada tumpuan dinding agar terjadi keseimbangan luar, sehingga beban kerja dan reaksi-reaksi pada daerah D berada dalam keseimbangan.

Diagram pembebanan p dibagi dalam dua bagian sedemikian rupa, sehingga masing-masing bagian mempunyai *resultant* sebesar reaksi tumpuan A dan B, dan bekerja pada titik berat masing-masing.

Lintasan A-A tidak berpotongan dengan alur gaya B-B kanan, yaitu lintasan B-B. Alur gaya dari masing-masing pasangan bermuara dari titik berat masing-masing diagram beban dan berakhir pada titik berat tumpuan masing-masing.

Masing-masing pasangan melengkung dan selanjutnya alur gaya A-A harus berkorelasi dengan alur gaya B-B. Ini dimungkinkan dengan menambah gaya gaya horisontal berupa strat (tekan) dan pengikat (tarik) sehingga tercapai keseimbangan horisontal pada setiap titik lintasan yang melengkung. Dengan mengidealisasikan lintasan gaya A-A dan B-B yang berupa lengkung menjadi poligon yang digabungkan dengan strat (batang tekan) dan pengikat (batang tarik), maka terbentuklah *strut-and tie-model*.

Untuk lebih jelasnya, gambar 3-20 memperlihatkan tahapan penelusuran alur gaya secara lebih sederhana, di mana alur gaya diasumsikan sebagai garis lurus.



Gambar 3-20: Tahapan penelusuran alur gaya dan strut-tie-mode1.
 A. Struktur dinding dengan beban merata (Leonhard dan Monnig, 1975).

B. Load Path, transfer gaya dari beban ke tumpuan, perhatikan alur gaya dengan dua titik belok.
 C. Strut-and -tie model, keseimbangan pada titik pertemuan gaya.

Struktur dinding di atas dua tumpuan diberi beban merata pada bagian atasnya dan akan dibuat alur gaya (gambar 3-20). Tentukan keseimbangan luar akibat beban merata (p). Akibat beban merata (p), pada tumpuan struktur dinding masing-masing terjadi gaya-gaya reaksi (P) (gambar 3-20A).

Untuk menggambarkan lintasan alur gaya, beban merata (p) disederhanakan sebagai 2 gaya resultan (P).

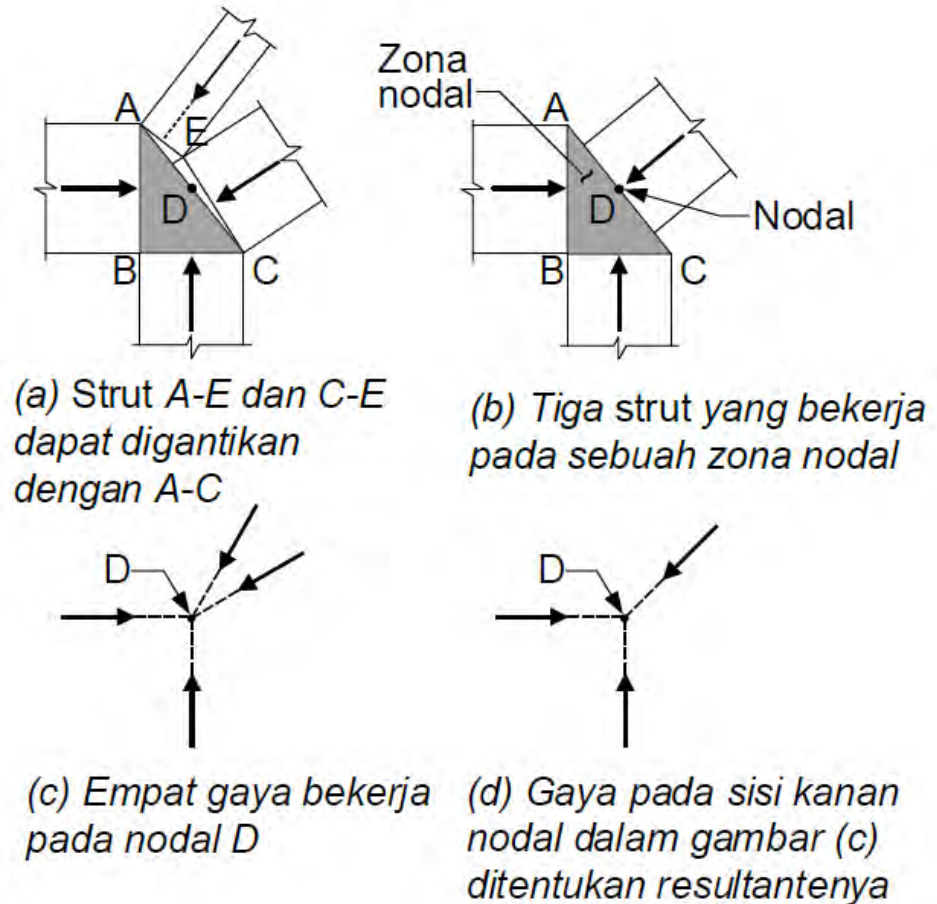
Idealisasikan lintasan alur gaya dari masing masing gaya resultan P sebagai poligon, yaitu alur yang harus ditempuh oleh masing-masing gaya P sebagai aksi untuk menuju ke tumpuannya sebagai reaksi.

Lintasan alur gaya yang terjadi (gambar 3-20B).

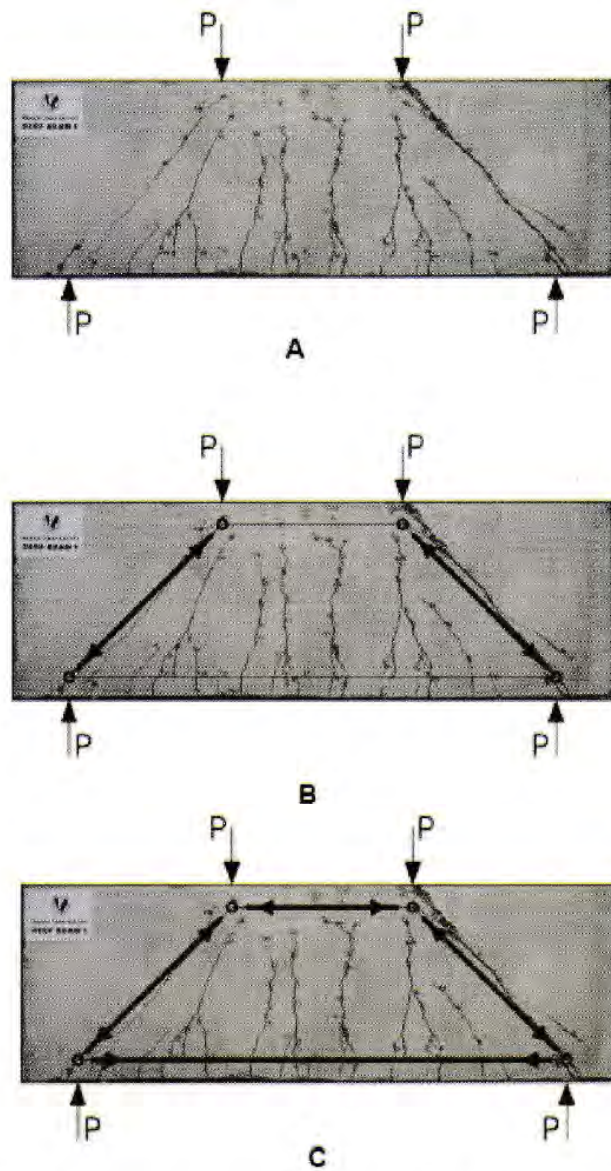
Setiap alur gaya P harus menempuh lintasan dengan 2 titik belok untuk sampai ke tumpuan. Setelah lintasan alur gaya dengan 2 titik beloknya ditentukan, cek setiap titik belok agar memenuhi syarat keseimbangan titik kumpul gaya, yaitu dengan menambahkan strut (batang tekan) ataupun pengikat (batang tarik) sesuai kebutuhan (gambar 3-20C).

Jika lebih dari tiga gaya bekerja pada zona nodal dalam model *strut-and-tie* dua dimensi, seperti ditunjukkan pada Gambar R23.2.2(a), disarankan menyelesaikan beberapa gaya untuk membentuk tiga gaya yang berpotongan. Gaya *strut* bekerja pada permukaan A-E dan C-E pada Gambar R23.2.2(a) dapat diganti dengan satu gaya yang bekerja pada permukaan A-C seperti yang ditunjukkan pada Gambar R23.2.2(b). Gaya ini melewati nodal D.

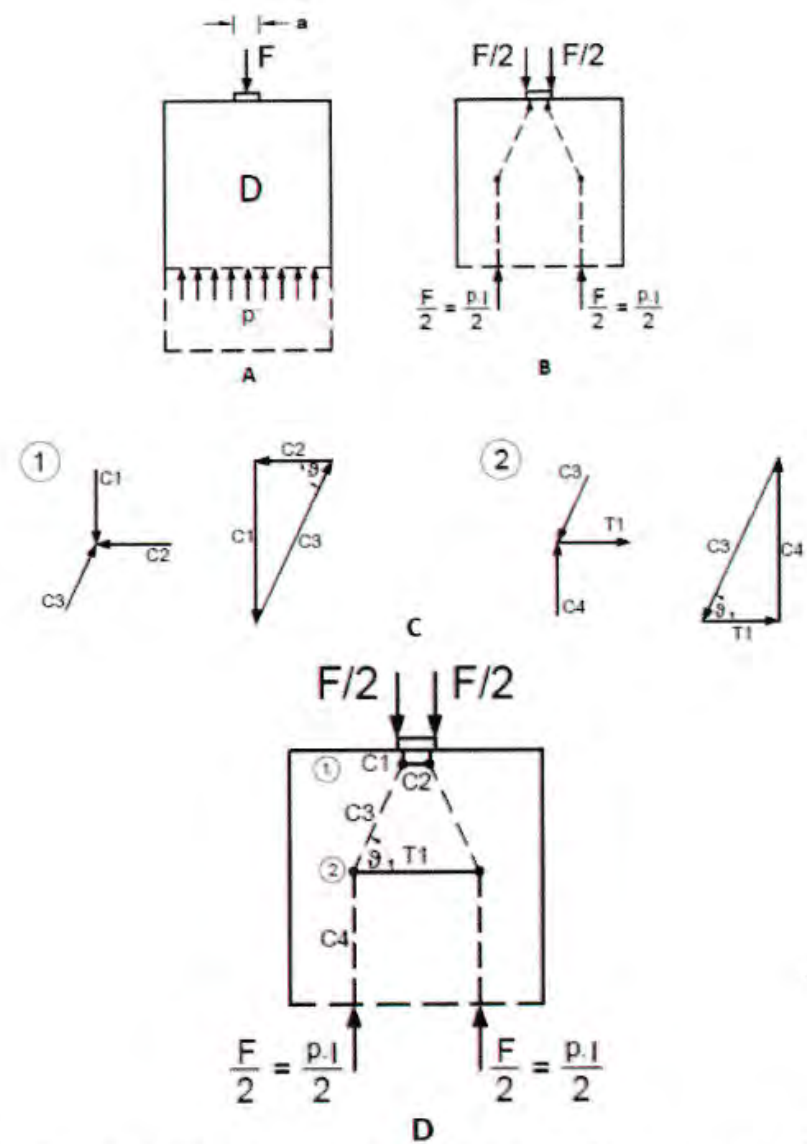
Atau, model *strut-and-tie* dapat dianalisis dengan asumsi semua gaya *strut* bekerja melalui nodal di D, seperti yang ditunjukkan Gambar R23.2.2(c). Dalam hal ini, gaya-gaya dalam dua *strut* di sisi kanan simpul D dapat dipecahkan menjadi satu gaya yang bekerja melalui Titik D, seperti ditunjukkan pada Gambar R23.2.2(d).



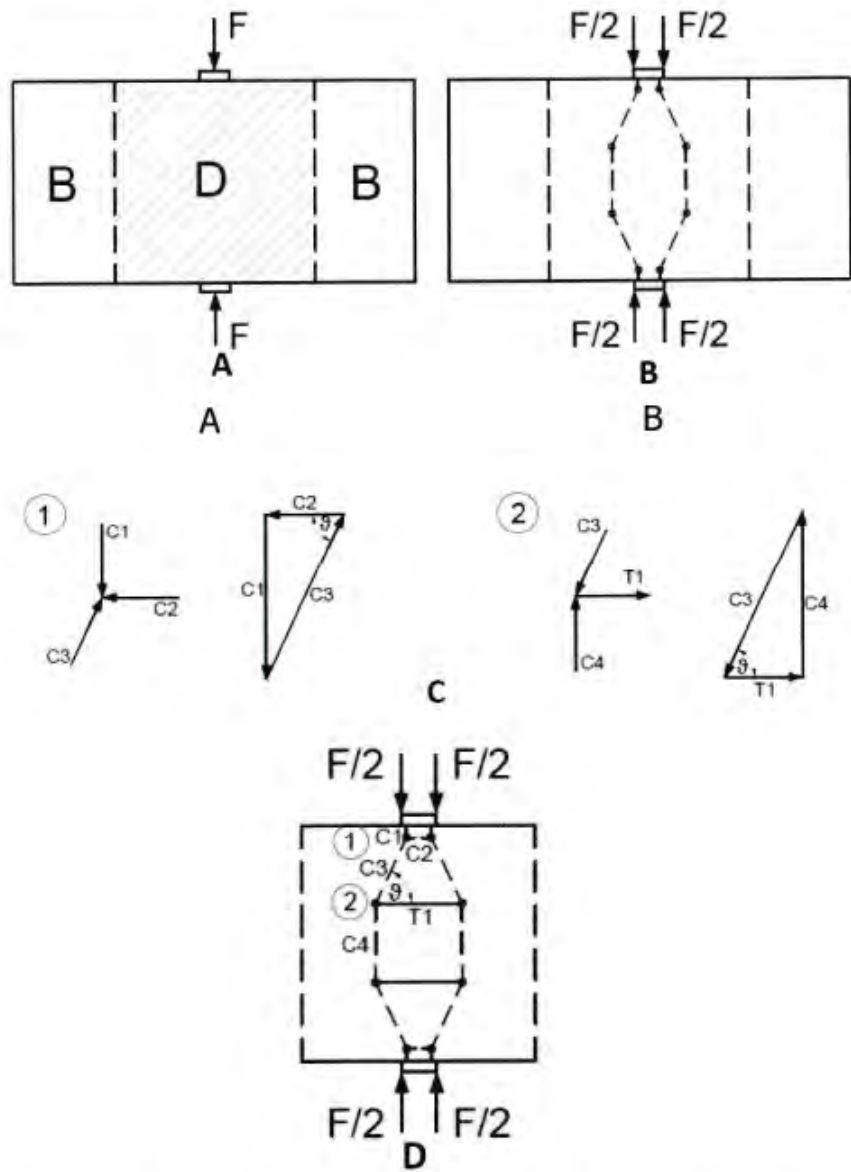
Gambar R23.2.2 – Resolusi gaya pada zona nodal



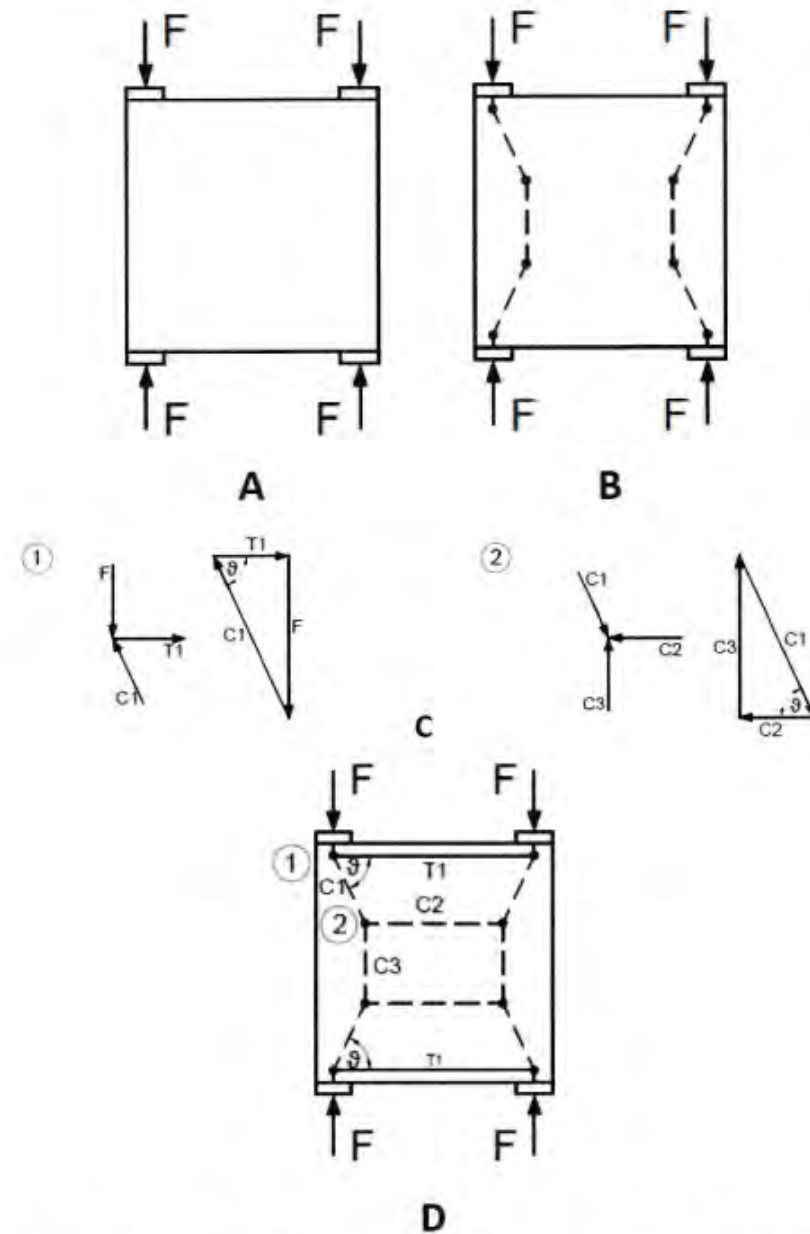
Gambar 3-23: Tahapan penelusuran alur gaya dan strut-tie-model. A. Struktur balok tinggi dengan beban P pada kedua sisinya. B. Load Path, transfer gaya dari beban ke tumpuan, secara langsung. C. Strut-and-tie model, dengan melengkapi keseimbangan pada titik pertemuan gaya.



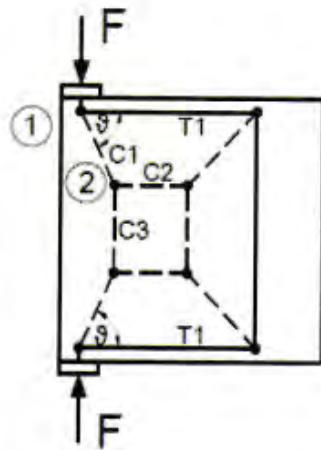
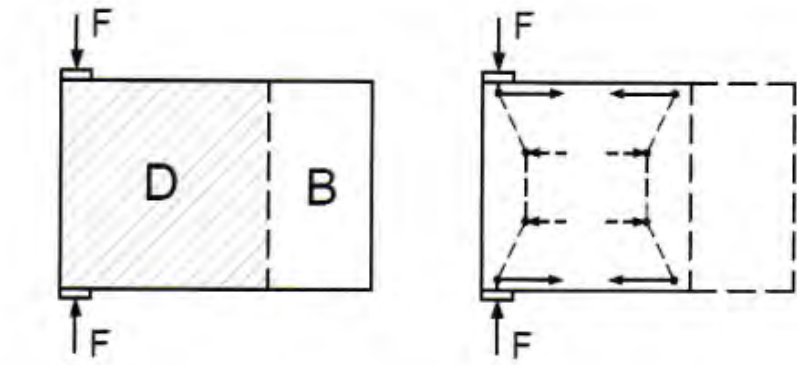
Gambar 3-24: A. Struktur dengan daerah D yang berbatasan dengan daerah B. B. Rancangan alur gaya. C. Keseimbangan gaya batang pada titik belok. D. Strut-and-tie model.



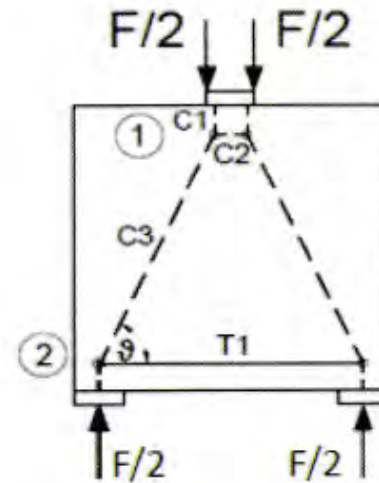
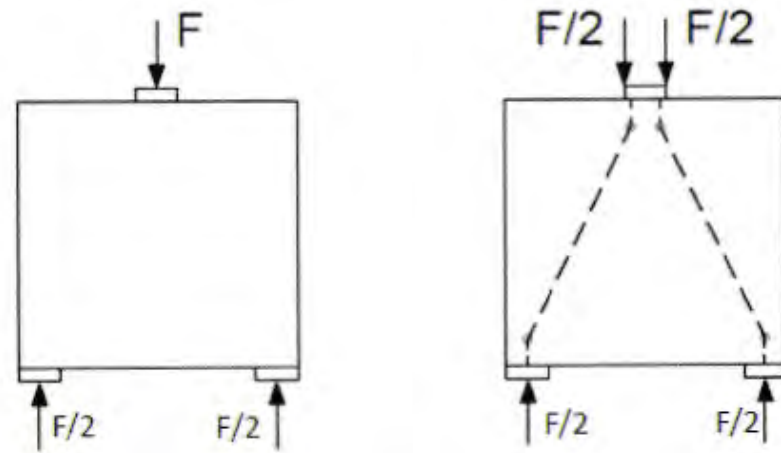
Gambar 3-25: A. Struktur dengan daerah D yang berbatasan dengan daerah B. B. Rancangan alur gaya. C. Keseimbangan gaya batang pada titik belok. D. Strut-and-tie model.



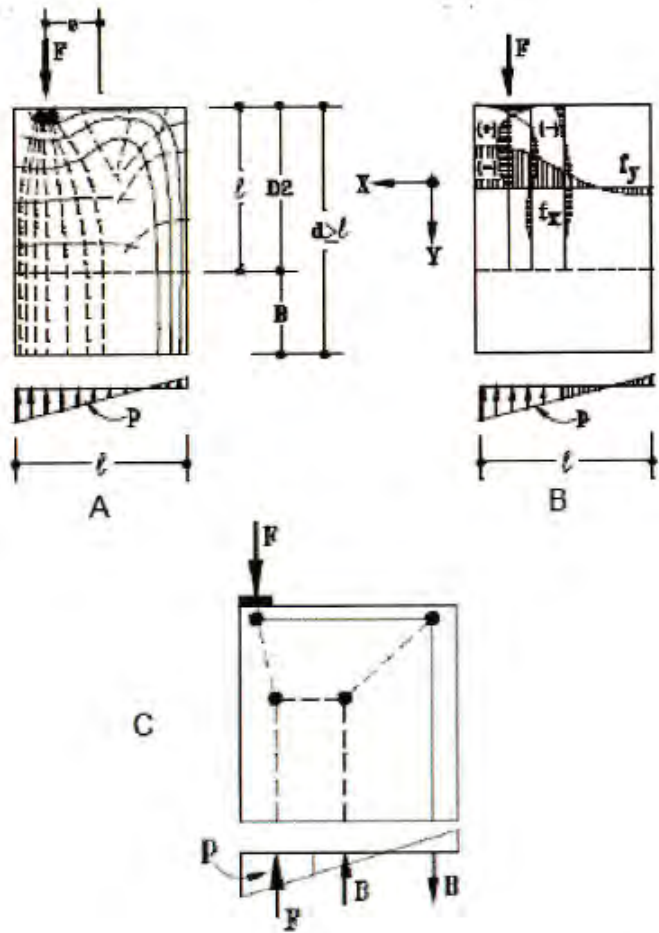
Gambar 3-26: A. Dinding dengan beban F yang saling berhadapan. B. Rancangan alur gaya. C. Keseimbangan gaya batang pada titik belok. D. Strut-and-tie model.



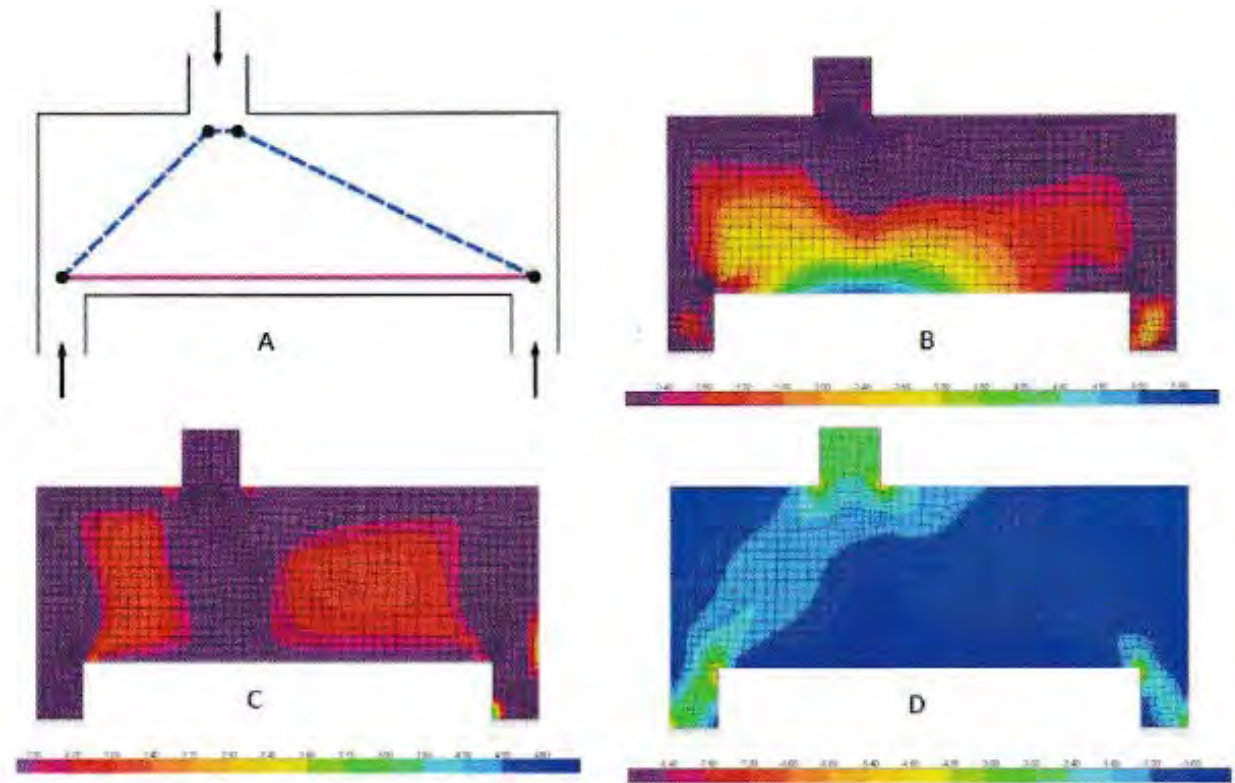
Gambar 3-27: A. Struktur dengan daerah D yang berbatasan dengan daerah B dan beban F yang saling berhadapan. B. Rancangan alur gaya. C. Keseimbangan gaya batang pada titik belok. D. Strut-and-tie model.



Gambar 3-28: A. Dinding di atas dua tumpuan. B. Rancangan alur gaya. C. Keseimbangan gaya batang pada titik belok. D. Strut-and-tie model.



Gambar 3-29: A. Struktur dinding dengan daerah D yang berbatasan dengan daerah B dan pola trajektori tegangan utama elastis di daerah D.
 B. Distribusi tegangan elastis arah x dan y yang non linear.
 C. Strut-and-tie-model.

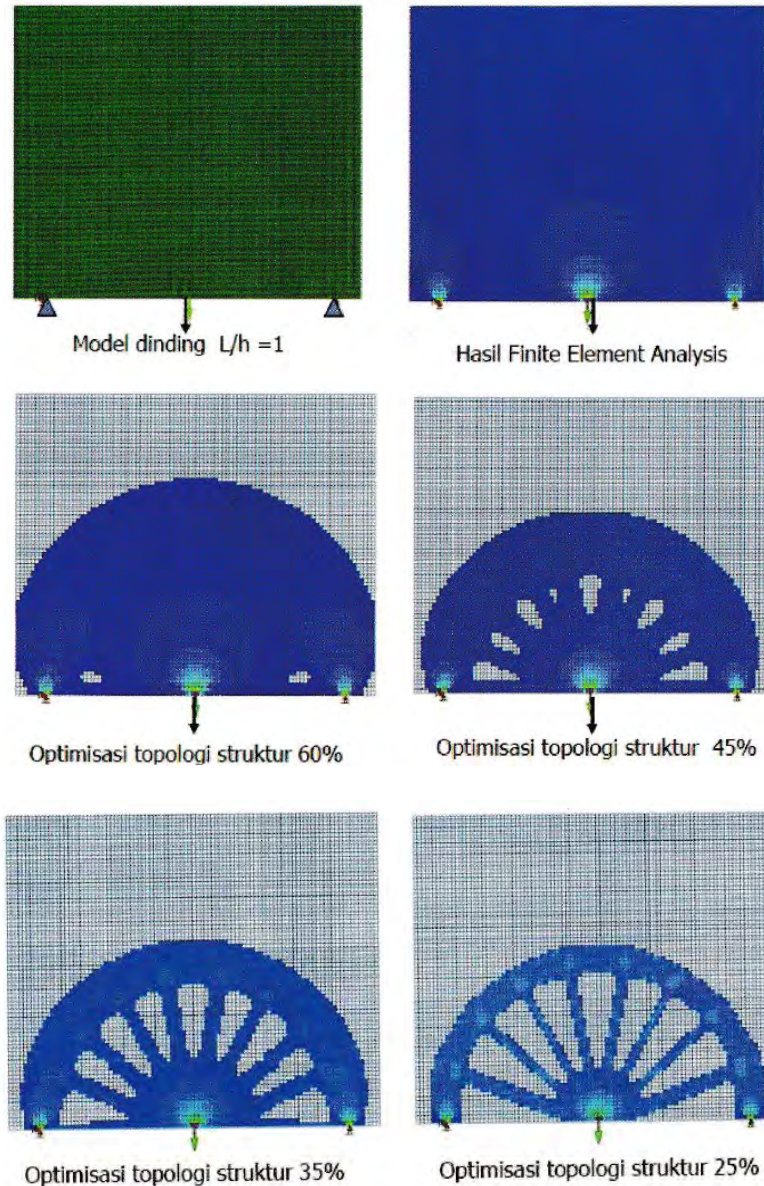


Gambar 3-30: A. Strut-and-tie model untuk balok tinggi. B. Kondisi tegangan arah x (horizontal). C. Kondisi tegangan arah y (vertikal). D. Kondisi tegangan utama pada beton (tekan).

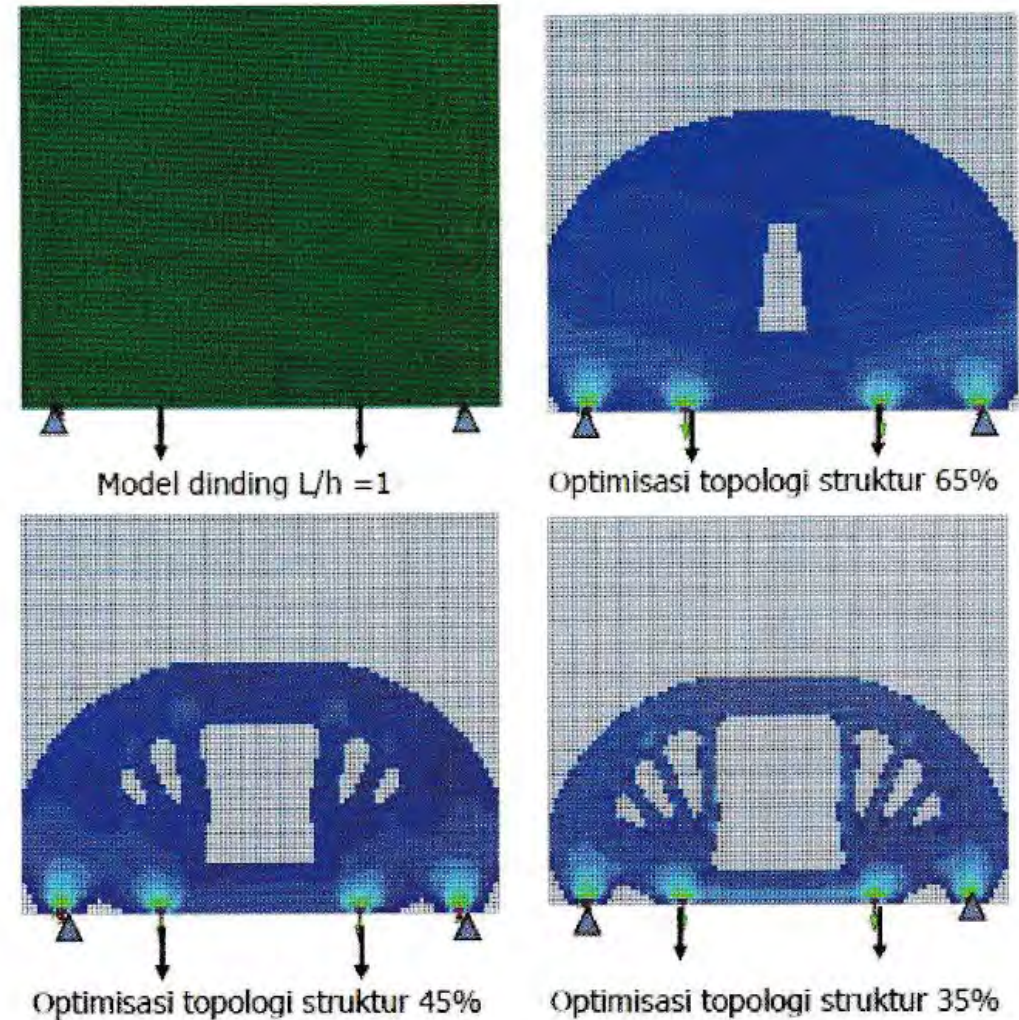
Sumber: <https://studystructural.wordpress.com/2012/12/01/stm-deep-beam>

Gabungan metoda *finite element* dan *load path*

Metode Optimasi Topologi Struktur Hasil software BESO2D

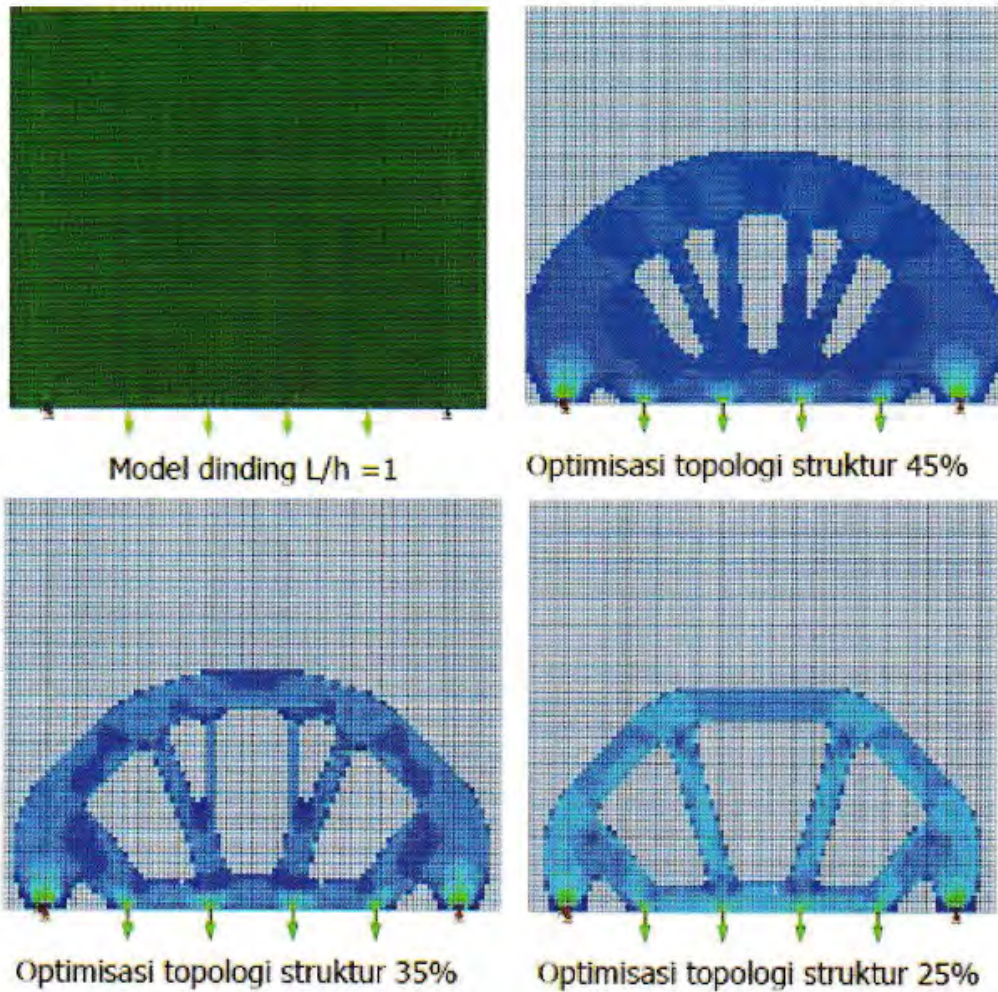


Gambar 4-4: Tahapan optimisasi topologi struktur dinding yang dibebani dengan beban terpusat P.

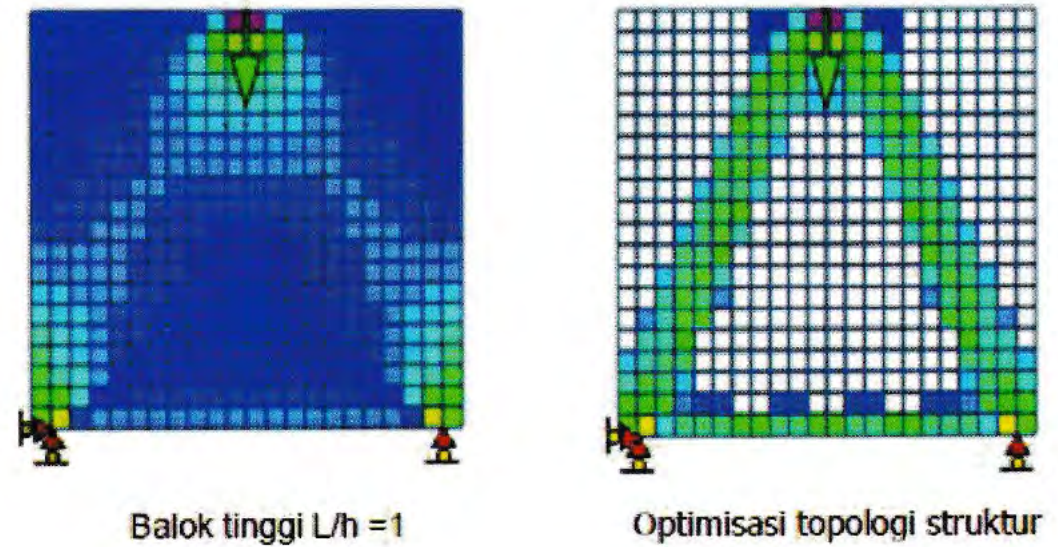


Gambar 4-5: Tahapan Optimisasi Topology Struktur Dinding yang dibebani dengan 2 beban terpusat P.

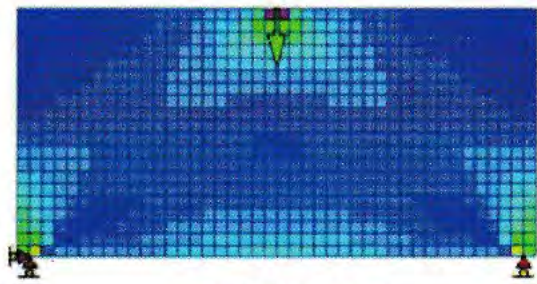
Sumber: Hardjasaputra (2016)



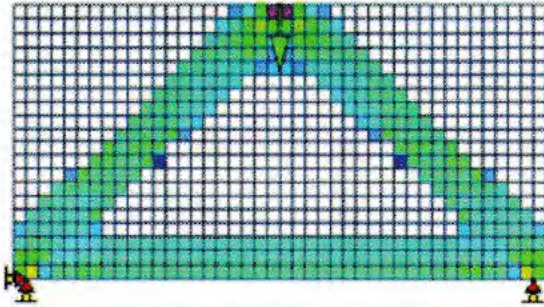
Gambar 4-6: Tahapan optimisasi topologi struktur dinding yang dibebani dengan 4 beban terpusat P.



Gambar 4-7: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=1$ dengan beban terpusat P.

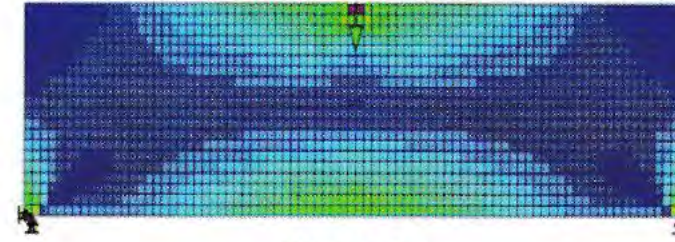


Balok tinggi $L/h=2$

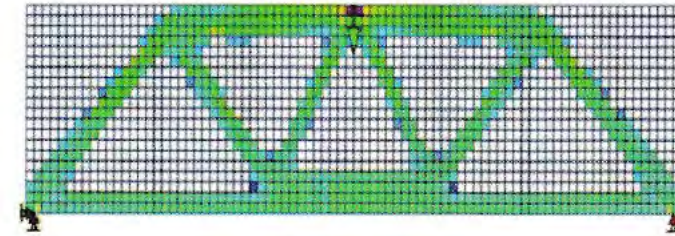


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-8: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=2$ dengan beban terpusat P.

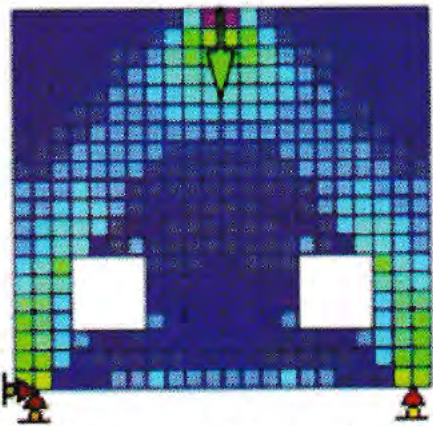


Balok tinggi $L/h=4$

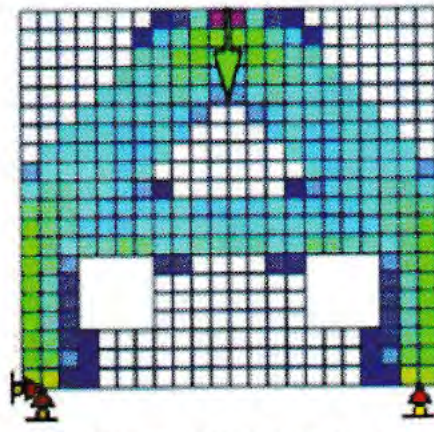


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-9: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=4$ dengan beban terpusat P.

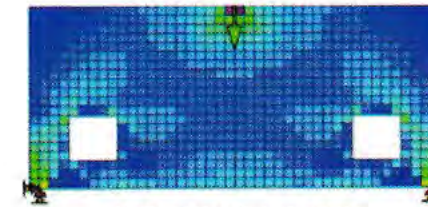


Balok tinggi $L/h =1$ dengan bukaan

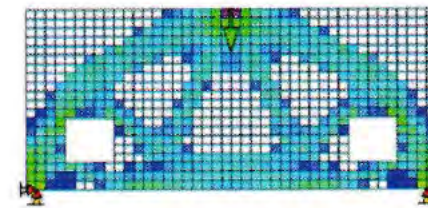


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-10: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $h/L=1$ dengan bukaan dan beban terpusat P.

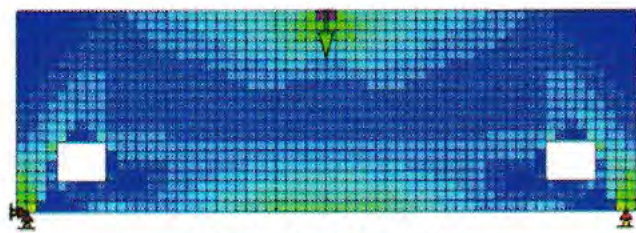


Balok tinggi $L/h=2$ dengan bukaan

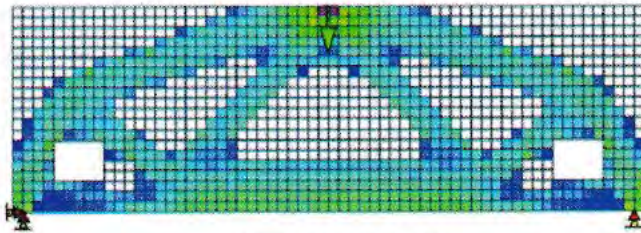


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-11: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=2$ dengan bukaan dan beban terpusat P.

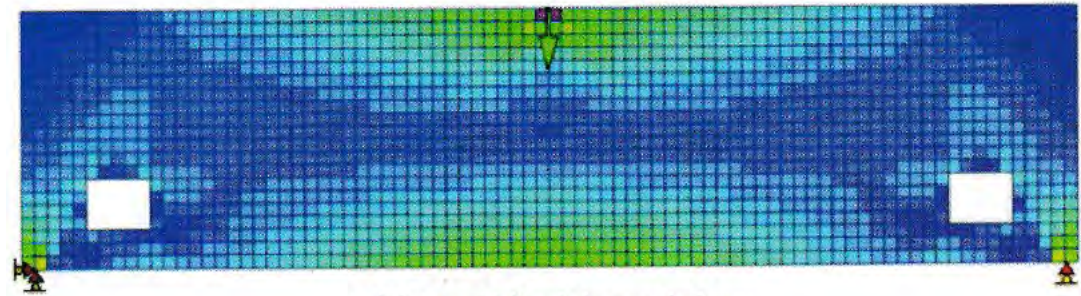


Balok tinggi $L/h = 3$ dengan bukaan

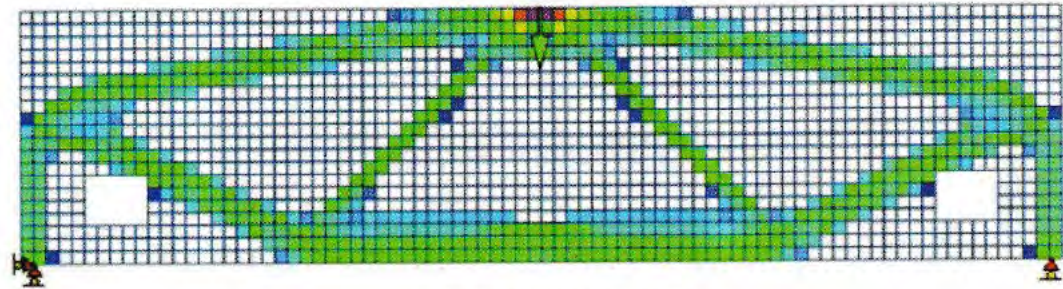


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-12: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=3$ dengan bukaan dan beban terpusat P.

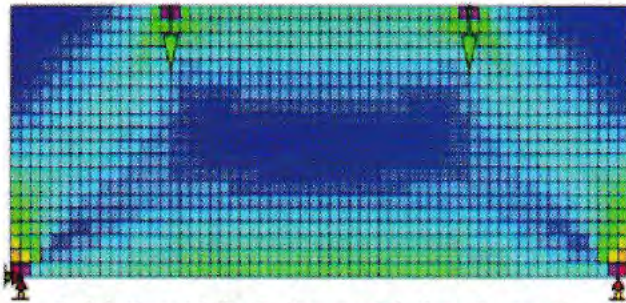


Balok tinggi $L/h=4$ dengan bukaan

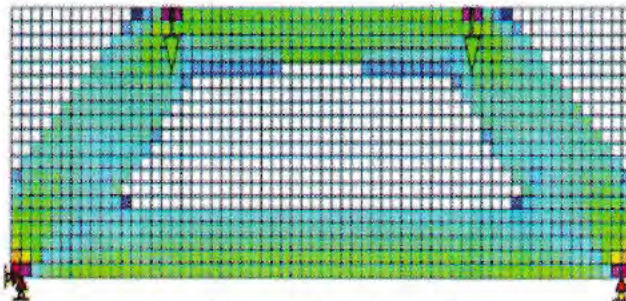


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-13: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=4$ dengan bukaan dan beban terpusat P.

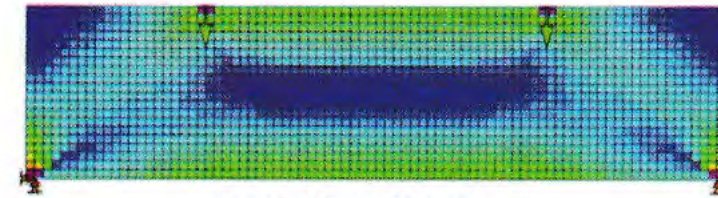


Balok tinggi $L/h=2$ dengan 2 beban terpusat

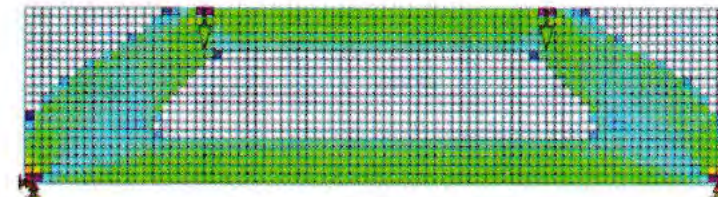


Optimisasi topologi struktur

Gambar 4-14: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=2$ dengan 2 beban terpusat P.

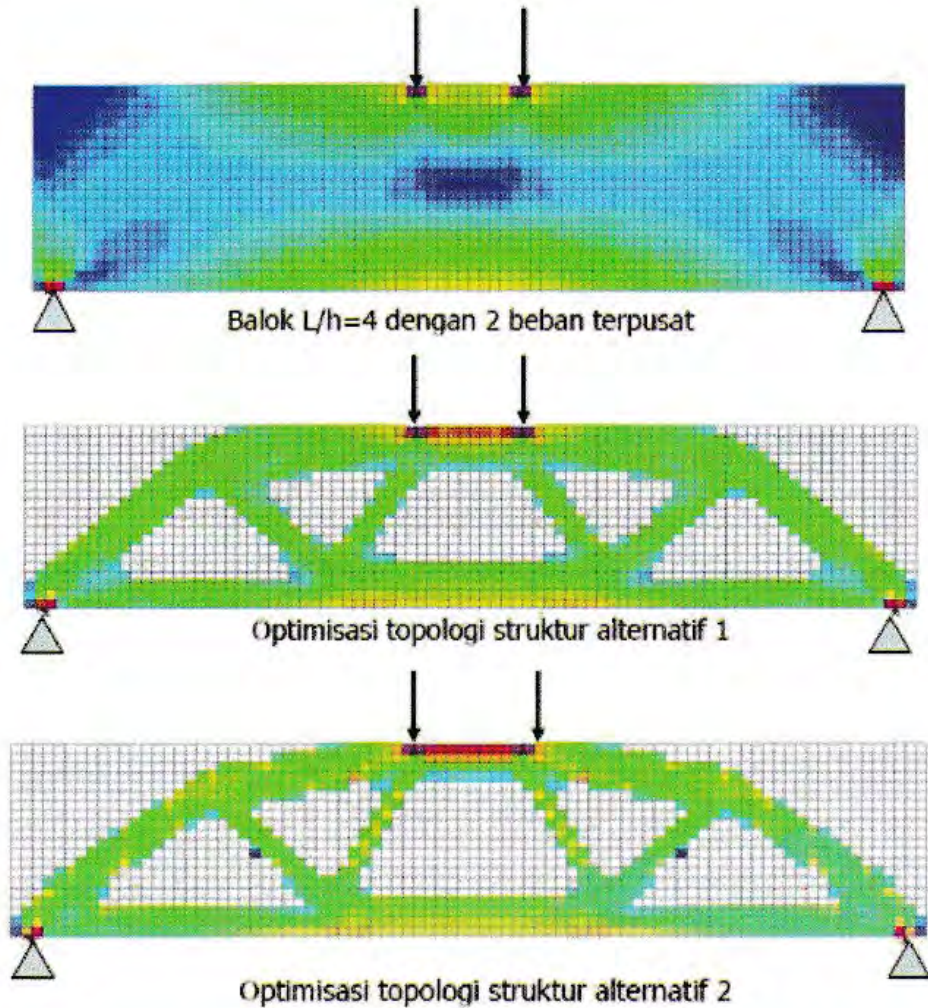


Balok $L/h=4$ dengan 2 beban terpusat

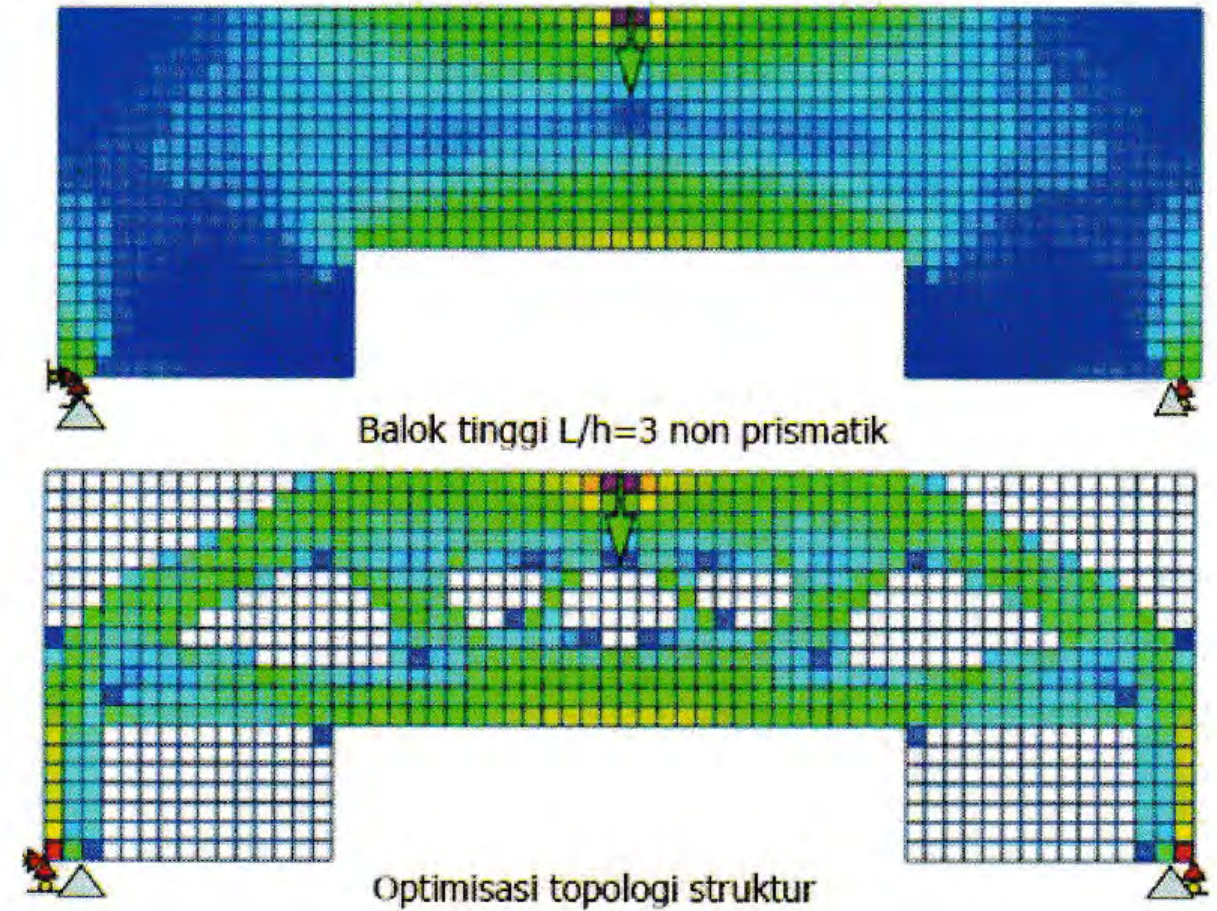


Optimisasi topologi struktur

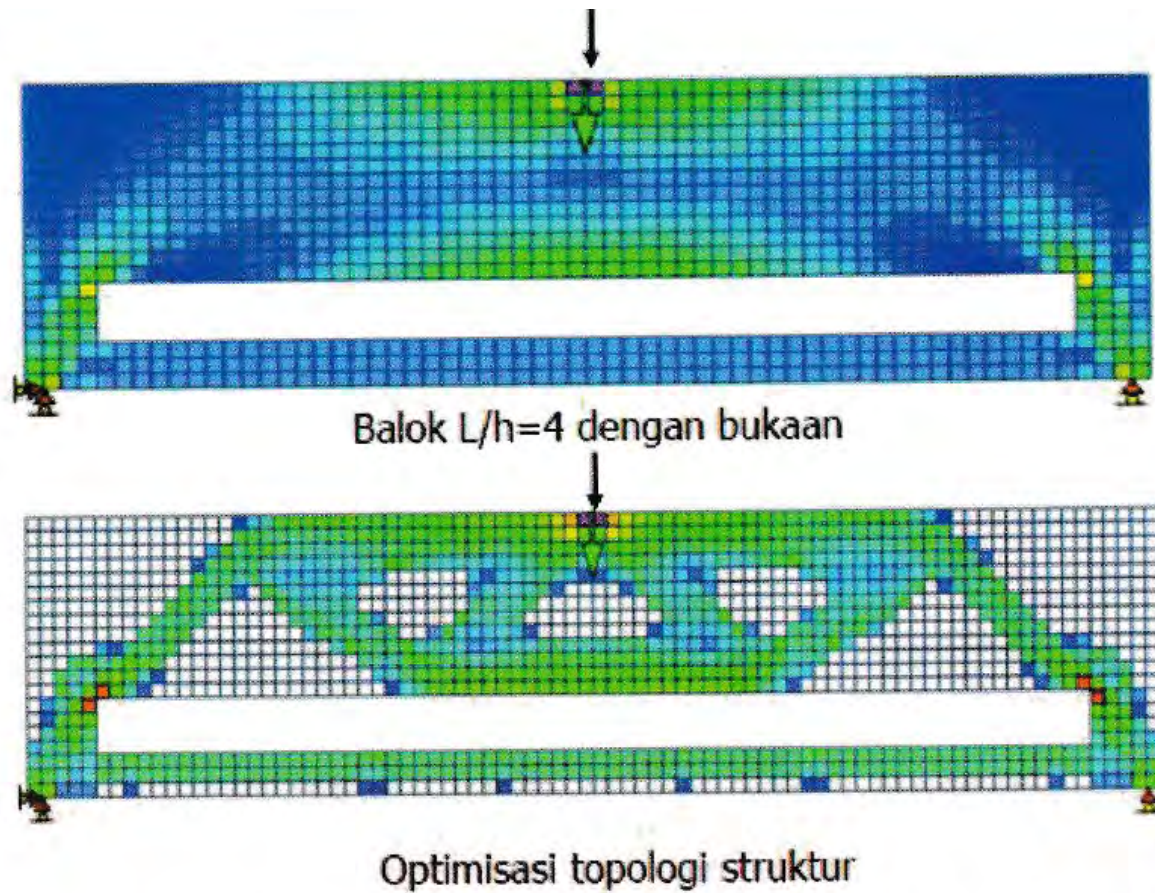
Gambar 4-15: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=4$ dengan 2 beban terpusat P. Sumber: Hardjasaputra (2016)



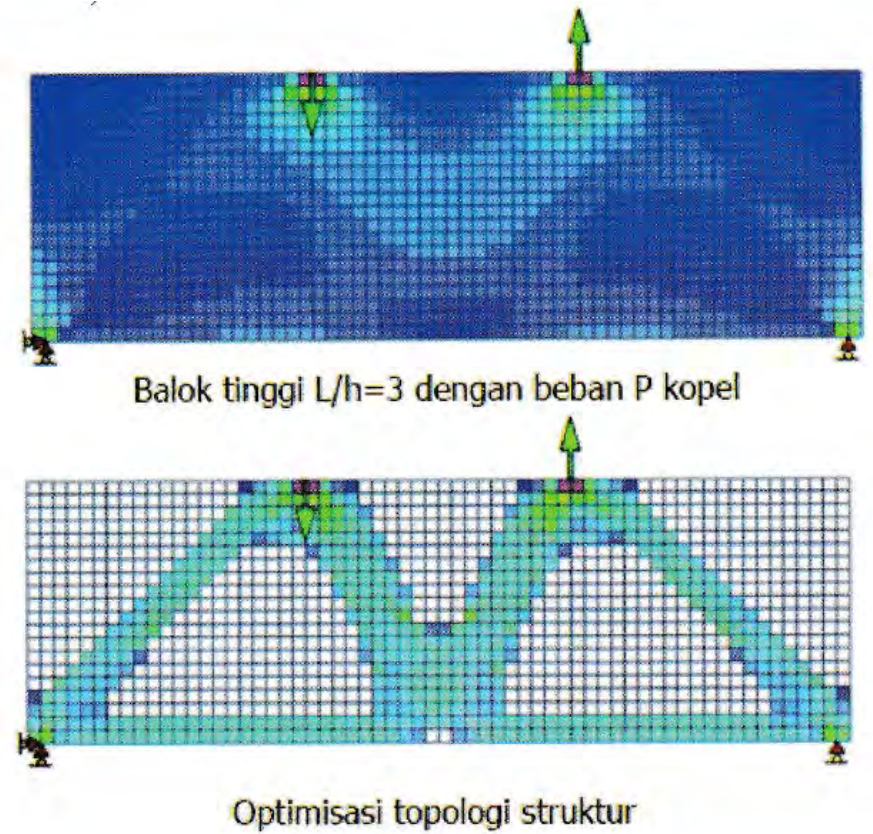
Gambar 4-16: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=4$ dengan 2 beban terpusat P pada bentang tengah.



Gambar 4-17: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi non prismatic dengan $L/h=3$ dan beban terpusat P .



Gambar 4-18: Hasil optimisasi topologi struktur balok $L/h=4$ dengan bukaan memanjang pada daerah tarik.



Gambar 4-19: Hasil optimisasi topologi struktur balok tinggi $L/h=3$ dengan beban P sebagai momen kopel.