



JEMBATAN CABLE STAY

LANNEKE TRISTANTO

RINGKASAN

Perencanaan jembatan bentang panjang dengan sistem cable-stay merupakan solusi ekonomis karena bagian-bagian jembatan mempunyai dimensi relatif langsing. Bentang-bentang pendek yang digantung pada 'kabel stay' sebagai 'pengganti pilar-pilar' akan membentuk bentang panjang yang menerus dan estetik.

Pada sistem statik jembatan cable-stay, 'gelagar pengaku' merupakan konstruksi lantai yang langsung memikul beban lalu lintas, yang digantung pada 'stay' yang menyalurkan beban dari gelagar pengaku pada 'pilon', yang menyalurkan gaya dari stay termasuk berat sendiri pilon ke pondasi dengan perantaraan 'pilar'.

Cara perhitungan untuk berbagai tipe jembatan cable-stay dengan konstruksi lantai beton dibahas mulai dari formulasi dasar sampai perhitungan cermat. Untuk kelengkapan juga dibahas mengenai cara-cara pelaksanaan yang lazim digunakan. Alternatif tipe jembatan struktur kabel kemudian dipilih berdasarkan keamanan pondasi dan kondisi geoteknik setempat - rencana ekonomis bangunan atas, bawah dan pondasi - serta kemudahan dan biaya pelaksanaan.

Laporan ini disusun dalam dua bagian : Bagian I mencakup "Teori & Pelaksanaan" dan Bagian II mencakup "Perhitungan & Perencanaan". Bahan pustaka utama dalam penyusunan laporan ini telah diambil dari himpunan thesis master - T.H. Delft - yang disusun dalam laporan penelitian "TUIBRUGGEN" oleh ir. J. Brakel.

SUMMARY

The design of long span bridging by cable-stay system is an economical solution as dimensions of bridge parts could be relatively slender. The concept of small spans which are supported on stays instead of piers will perform a continuous esthetical long span bridge.

In the static system of cable-stay bridging, the 'stiffening girder' acts as deck structure which carries directly the traffic loads, the stiffening girder is hanged on 'stays' which transfer loads to the 'pilon', which transfer the stay forces including the pilon's self weight through the pier to the foundation.

The calculating methods for cable-stay bridge types using a concrete deck construction are discussed up to an advanced calculation. General construction procedures for practical use are also included for completeness. The alternative bridge type is then chosen based on foundation safety and geotechnical conditions at site - economical design for super and substructures and foundation - and ease and costs of construction.

This report is divided in two parts : Part I covers "Theory & Construction" and Part II covers "Calculations & Design". The main reference in preparing this report is adopted from the master thesis studies - T.H. Delft - compiled in the research report "TUIBRUGEN" by ir. J. Brakel

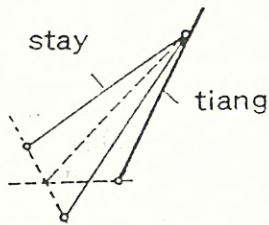
BAGIAN I. TEORI & PELAKSANAAN

1. PERBEDAAN STAY DAN SKOR

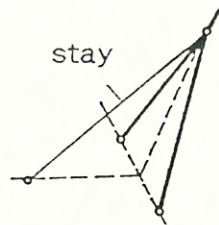
"Stay" ialah elemen 'tarik' yang menahan beban tarik. Stay lemah dalam lentur karena EI sangat kecil. Lawannya stay ialah 'skor' sebagai elemen 'tekan' yang harus mempunyai kekakuan lentur EI dalam semua arah.

Stabilitas tiang miring yang ber-sendi di bawah dapat ditahan oleh dua stay - Gambar 1.1.1. dan stabilitas tiang miring berbentuk λ dapat ditahan oleh hanya satu stay - Gambar 1.1.2.

Stabilitas tiang miring dalam Gambar 1.1.1. dan 1.1.2. dapat ditahan juga oleh skor - Gambar 1.1.3.

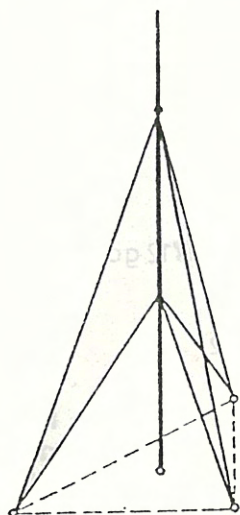


Gb. 1.1.1.

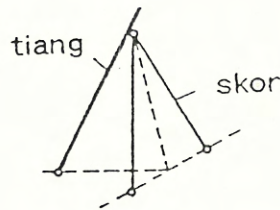


Gb. 1.1.2.

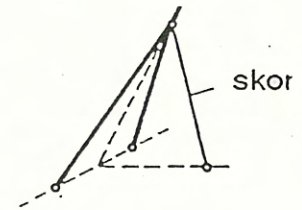
Pada 'tiang vertikal' yang ditahan oleh stay ganda dalam bentuk segi banyak beraturan (dalam hal ini segitiga, dapat dibuat dalam segi empat -- segi lima - segi enam) - Gambar 1.1.4. - tidak terjadi gaya dalam stay selama tiang berdiri vertikal sempurna. Bila tiang berdiri miring karena angin - suhu maka terjadi gaya tarik yang membesar dalam satu atau lebih stay sampai keseimbangan pulih kembali. Stay pada sisi dimana simpangan terjadi akan menjadi kendur dan tanpa tegangan. Kondisi tersebut ialah anggapan teoritik untuk 'stay tanpa berat'. Stay tanpa berat dan tanpa tegangan tidak dapat memikul tekan. Dengan memberikan prategangan pada stay maka stay dapat memikul tekan yang sama dengan prategangan tersebut dan tidak menjadi tanpa tegangan. Untuk menjaga agar perubahan bentuk kecil, maka stay di-prategang sedemikian rupa sehingga variasi gaya akibat angin - suhu akan berada jauh dibawah gaya prategang stay. Sebenarnya stay mempunyai berat sendiri dan lendutan berat sendiri selalu menyebabkan prategangan kecil sehingga stay yang dibebani tekan tidak menjadi tanpa tegangan, tetapi lendutan stay menjadi sedemikian besar sehingga tidak menyumbang kekuatan lagi.



Gb. 1.1.4. Tiang dengan stay ganda



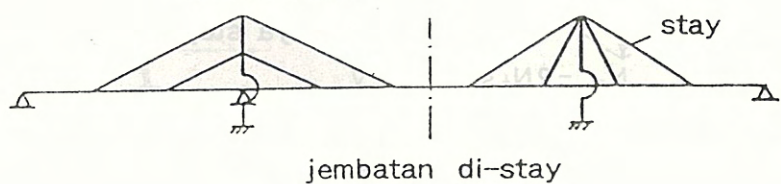
Gb. 1.1.3.



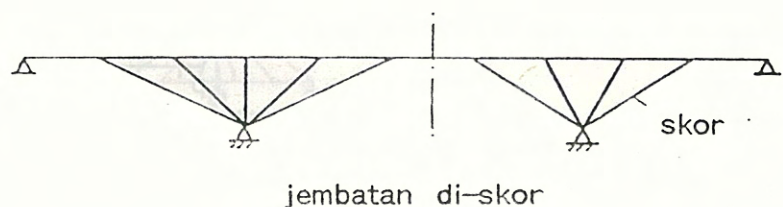
Persamaan tiang yang di-stay dengan 'jembatan stay' ialah bahwa juga pada jembatan terjadi prategangan kabel (karena berat sendiri gelagar) dan gaya pylon akibat berat sendiri masih sangat diperbesar oleh komponen vertikal dari gaya stay, yang secara bersama hampir sama dengan berat total jembatan. Dalam hal ini variasi tegangan dalam stay juga harus berada jauh dibawah prategangan stay agar tetap berada dalam keadaan tegang.

Stay dalam bentuk batang tarik atau kabel dipasang agar mempengaruhi bidang momen dalam struktur sehingga ukuran dan berat dapat berkurang. Demikian juga perubahan bentuk sangat berkurang. Stay berfungsi sebagai perletakan antara untuk gelagar jembatan, selain berfungsi untuk menahan stabilitas pylon - Gambar 1.1.5.

Lawannya jembatan stay ialah 'jembatan skor' walaupun jembatan skor tidak perlu pylon karena skor menyalurkan gaya - gaya 'langsung' ke pondasi - Gambar 1.1.5. Jembatan skor tidak sesuai untuk lebar dan tinggi lalu lintas air tetapi dapat dipertimbangkan untuk pelintasan jurang dimana pelayaran tidak berperan. Dengan bertambah panjangnya skor, cara penyaluran gaya menjadi kurang aman karena perlemahan akibat tekuk.



jembatan di-stay



jembatan di-skor

Gb. 1.1.5. Jembatan stay dan skor

2. DESKRIPSI JEMBATAN CABLE-STAY

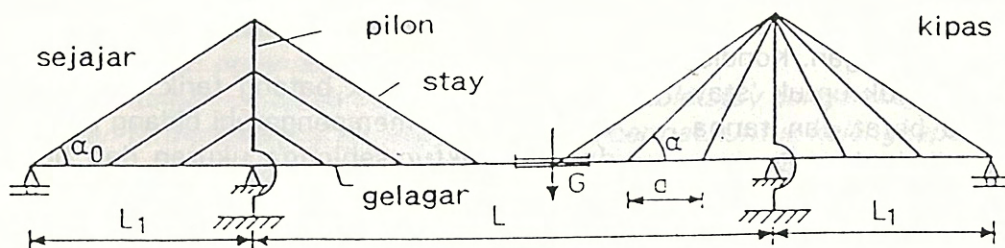
Jembatan cable-stay merupakan jembatan dimana konstruksi lantai kendaraan pada satu atau beberapa titik digantung secara 'per' pada 'stay'. Stay membuat 'sudut' tetap atau tidak tetap dengan sumbu jembatan dan stay ditunjang oleh 'pilon' - Gambar 1.2.1. Konstruksi lantai kendaraan dapat dianggap sebagai gelagar pada perletakan 'per' dan 'tetap' yaitu masing-masing stay dan pilar serta pangkal jembatan - Gambar 1.2.2.

Stay dibebani 'tarik' oleh berat sendiri konstruksi lantai kendaraan - Gambar 1.2.3.

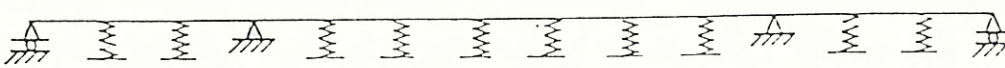
Gaya tarik tersebut diperbesar atau diperkecil oleh beban lalu lintas.

Konstruksi lantai kendaraan dibebani 'tekan' oleh komponen 'horisontal' dari gaya stay - Gambar 1.2.3. Pilon dibebani tekan oleh komponen 'vertikal' dari gaya stay - Gambar 1.2.4. Keduanya dibebani 'lentur' oleh beban lalu lintas, suhu, susut, rangkai dan penurunan - Gambar 1.2.6. Sedangkan konstruksi lantai kendaraan masih dibebani oleh berat sendiri - Gambar 1.2.5.

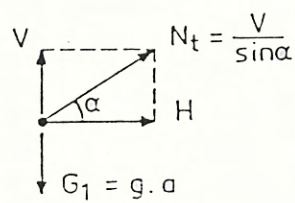
'Konfigurasi stay' dibedakan dalam stay 'sejajar' (harp) dan 'kipas' (fan) - Gambar 1.2.1. serta bentuk kombinasi - Gambar 1.2.7.



Gb. 1.2.1. Konfigurasi stay, bentuk utama

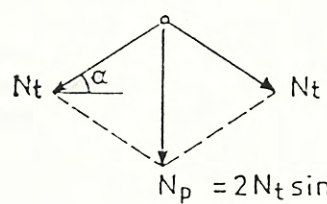


Gb. 1.2.2. Gelagar, perletakan per dan tetap



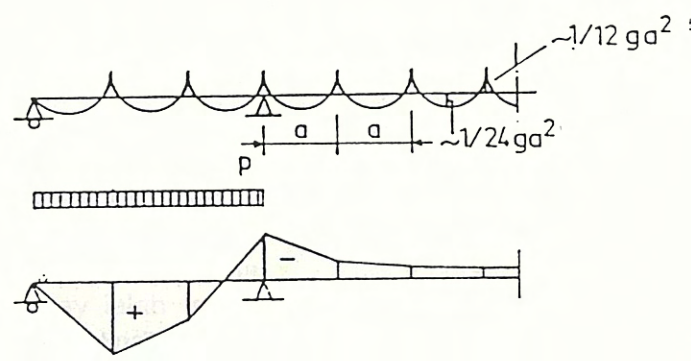
Gaya normal N_t dalam stay (tarik) dan gaya normal H dalam gelagar (tekan) akibat berat sendiri $G_1 = g.a$ (g =berat sendiri per m)

Gb. 1.2.3.



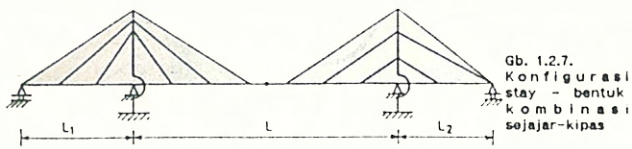
Gaya normal N_p dalam pilon (tekan) akibat gaya stay N_t
 $N_p = 2N_t \sin \alpha = 2V$

Gb. 1.2.4.



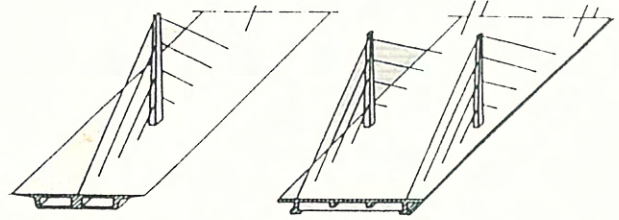
Gb.1.2.5. Momen lentur dalam gelagar akibat berat sendiri g .

Gb. 1.2.6. Momen lentur dalam gelagar akibat beban lalu lintas p pada bagian kiri dari pilon.



Gb. 1.2.7. Konfigurasi stay - bentuk kombinasi sejajar-kipas

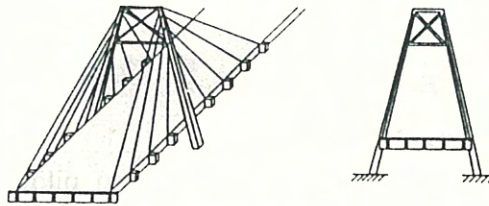
'Bidang stay' dapat dibuat 'tunggal' dalam bidang vertikal melalui sumbu jembatan - Gambar 1.2.8. - atau 'ganda' dengan dua bidang stay yang berada pada jarak antara yang sama dengan lebar jembatan - Gambar 1.2.9.



Gb. 1.2.8. Bidang stay tunggal, pylon tunggal

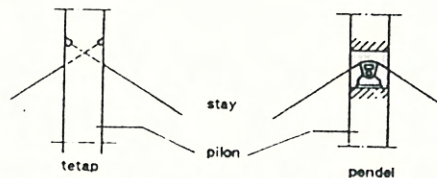
Gb. 1.2.9. Bidang stay ganda, pylon ganda

Bidang stay ganda dapat dibuat 'sejajar' - Gambar 1.2.9. - atau miring dan saling memotong pada garis yang sejajar sumbu jembatan - Gambar 1.2.10.



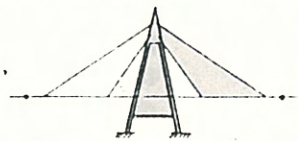
Gb. 1.2.10. Bidang stay miring dengan pylon yang dikopel

Stay dapat dihubungkan secara 'tetap' atau secara 'pendel' pada pylon - Gambar 1.2.11.



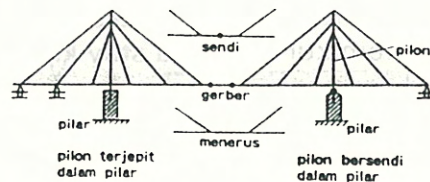
Gb. 1.2.11. Hubungan stay - pylon

Pylon dapat dibuat dalam bentuk V terbalik dalam arah memanjang Gambar 1.2.12. atau melintang - Gambar 1.2.10.



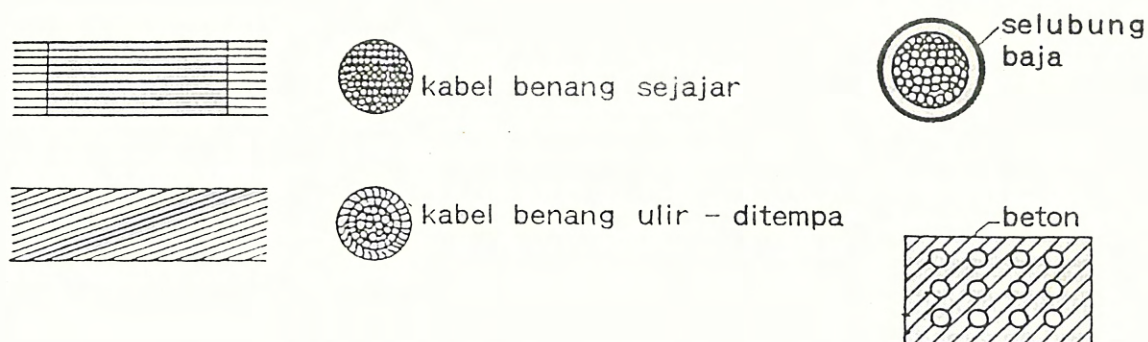
Gb. 1.2.12. Pylon V terbalik (A) : stabil

Pylon dihubungkan setinggi konstruksi lantai kendaraan secara 'terjepit' atau 'bersendi' kedalam pilar yang berada dibawah pylon. 'Konstruksi lantai kendaraan' dari jembatan stay simetrik dapat dibuat 'menerus' pada bentang utama antara pylon, atau ber-'sendi' atau dengan 'gelagar gerber'. Bentang pinggir dapat diberi 'perletakan antara' (pilar) atau dibuat menerus - Gambar 1.2.13.



Gb. 1.2.13. Hubungan pylon - pilar dan susunan gelagar lantai

Stay dibuat dari kabel 'benang ulir' atau kabel 'benang sejajar'. Kabel masih dapat diperkaku oleh 'solubung' (bahan sintetik, baja, beton) yang juga berfungsi sebagai pelindung terhadap kebakaran atau tumbukan - Gambar 1.2.14.



Gb. 1.2.14. Jenis kabel dan perkakuan kabel

3. LANTAI BETON VS LANTAI BAJA

Berat konstruksi lantai kendaraan dari pelat ortotrop baja ialah sekitar 4.5 KN/m^2 dibanding berat konstruksi lantai beton yang berada antara $12-18 \text{ KN/m}^2$ (empat kali lantai baja). Bila konstruksi lantai kendaraan dibuat 'komposit' baja-beton, maka berat lantai menjadi $8 - 10 \text{ KN/m}^2$.

Berat konstruksi lantai 'baja' kurang lebih duapertiga dari beban lalu lintas. Pada konstruksi lantai 'beton' perbandingan antara berat sendiri dan beban lalu lintas sekitar 2 - 3 kali. Demikian beban lantai baja menjadi maksimum 10 KN/m^2 dan beban lantai beton menjadi maksimum 25 KN/m^2 . Dengan anggapan bahwa gaya dan penampang stay sebanding dengan beban lantai, maka penampang kabel dari jembatan cable-stay lantai beton adalah kurang lebih '2 - 2.5' kali dibanding jembatan cable-stay lantai baja dengan bentang sama.

Pemasangan jembatan cable-stay dimulai dari pylon secara kantilever bebas ke masing-masing sisi. Pada pelaksanaan kantilever bebas, maka stay akhir, tepat sebelum pemasangan stay berikut, akan memikul 'beban ganda' akibat berat sendiri dibanding keadaan jembatan berfungsi. Demikian untuk jembatan cable-stay lantai baja, dimensi stay dihitung berdasarkan keadaan fungsinya jembatan. Untuk jembatan cable-stay lantai beton, dimensi stay dihitung berdasarkan keadaan pelaksanaan jembatan.

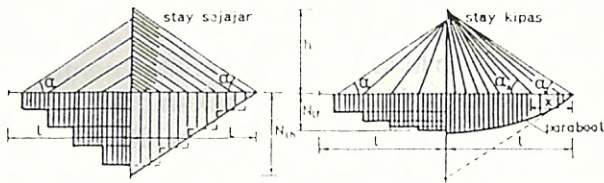
Pertemuan pylon dengan lantai kendaraan dibuat 'bersendi' pada jembatan cable-stay lantai baja. Pertemuan pylon - lantai beton tidak mungkin dibuat bersendi karena gaya normal yang disalurkan kurang lebih empat kali dibanding lantai baja sehingga diperlukan penampang beton yang besar ($15-20 \text{ m}^2$) dan dalam hal ini dianjurkan agar dibuat pertemuan 'jepit parsial' kedalam pilar.

4. STAY SEJAJAR VS STAY KIPAS

Pada stay 'sejajar', gaya normal akibat berat sendiri lantai akan meningkat secara bertangga dalam gelagar dan pylon - Gambar 1.4.1-a dan -b - kiri. Pada stay 'kipas', gaya normal akibat berat sendiri lantai akan kurang meningkat dalam gelagar semakin dekat jaraknya ke pylon, sedangkan gaya normal dalam pylon tetap pada seluruh tinggi (kecuali berat sendiri pylon) - Gambar 1.4.-a dan -b - kanan.

Bila jumlah stay tak terhingga atau jarak stay sangat kecil maka gaya normal maksimum dalam gelagar dengan stay kipas adalah 'setengahnya' dibanding stay sejajar - gambar 1.4.1 -a pada stay sejajar meningkat linier dan pada stay kipas meningkat parabolik.

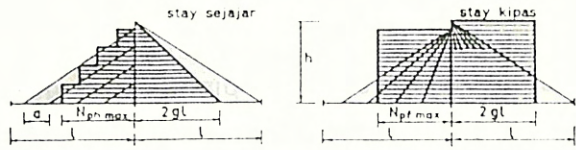
Keuntungan stay sejajar adalah bahwa stay sama (dengan jarak stay sama dan berat gelagar tetap) sehingga semua stay dapat berpenampang sama. Demikian semua jangkar sama dan dihubungkan pada sudut sama kedalam konstruksi.



⇒ banyak stay sejajar: $N_{th} = \int_0^l g dx \cot \alpha = gl \cot \alpha = gl^2/h$

⇒ banyak stay kipas: $N_{th} = \int_0^l g dx \cot \alpha_x = \int_0^l g \cdot \frac{l-x}{h} dx = 1/2 gl^2/h = 1/2 gl \cot \alpha$

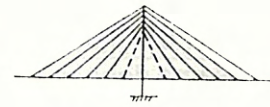
Gb. 1.4.1-a. Gaya normal dalam gelagar pada stay sejajar dan kipas (hanya berat sendiri gelagar)



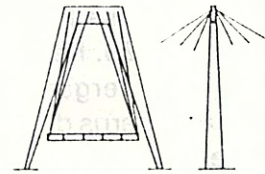
⇒ banyak stay sejajar: $N_{pt max} = 2gl$

⇒ banyak stay kipas: $N_{pt max} = 2gl$

Gb. 1.4.1-b. Gaya normal dalam pylon pada stay sejajar dan kipas

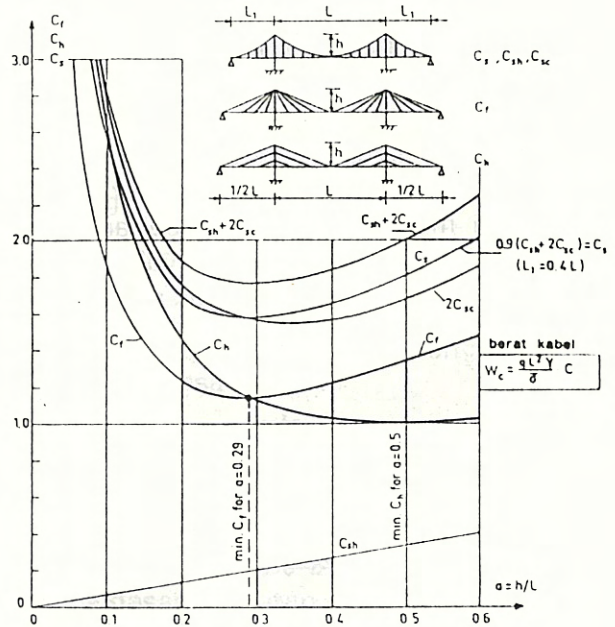


Gb. 1.4.3. Penyebaran stay kipas sepanjang puncak pylon

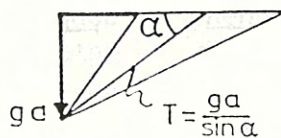


Gb.1.4.4. Penyebaran stay kipas selebar puncak pylon (dua bidang stay)

Stay kipas memperlihatkan (dengan jarak stay sama dan berat gelagar tetap) gaya stay yang berkurang semakin dekat ke pylon - Gambar 1.4.2. Penampang stay dapat dibuat lebih kecil dibanding stay sejajar (kecuali untuk stay terluar), tetapi panjang stay lebih besar - gambar 1.4.1 -a dan -b. Kesulitan stay kipas adalah bahwa semua jangkar berbeda dan dihubungkan pada sudut tidak sama kedalam konstruksi. Dengan membuat jarak stay bervariasi (membesar ke pylon), semua gaya stay dapat dibuat sama dengan stay terluar sehingga mempunyai penampang dan jangkar sama, hanya sudut stay tetap berbeda. Pemusatan jangkar dalam puncak pylon dapat diatasi dengan penyebaran jangkar sepanjang atau selebar pylon - Gambar 1.4.3. dan 1.4.4.



Gb. 1.4.5. Faktor C_r , C_h dan C_s sebagai fungsi dari rasio $a=h/L$



Gb. 1.4.2. Gaya stay variabel pada stay kipas (a=jarak stay)

Jumlah berat kabel (W_c) secara teoritik dijelaskan dalam Gambar 1.4.5. sebagai koefisien tidak berdimensi C_f (kipas) dan C_h (sejajar) bersama dengan jumlah kabel teoritik untuk jembatan gantung dan untuk jembatan cable-stay perbandingan h/L berada antara $1/5$ dan $1/3$.

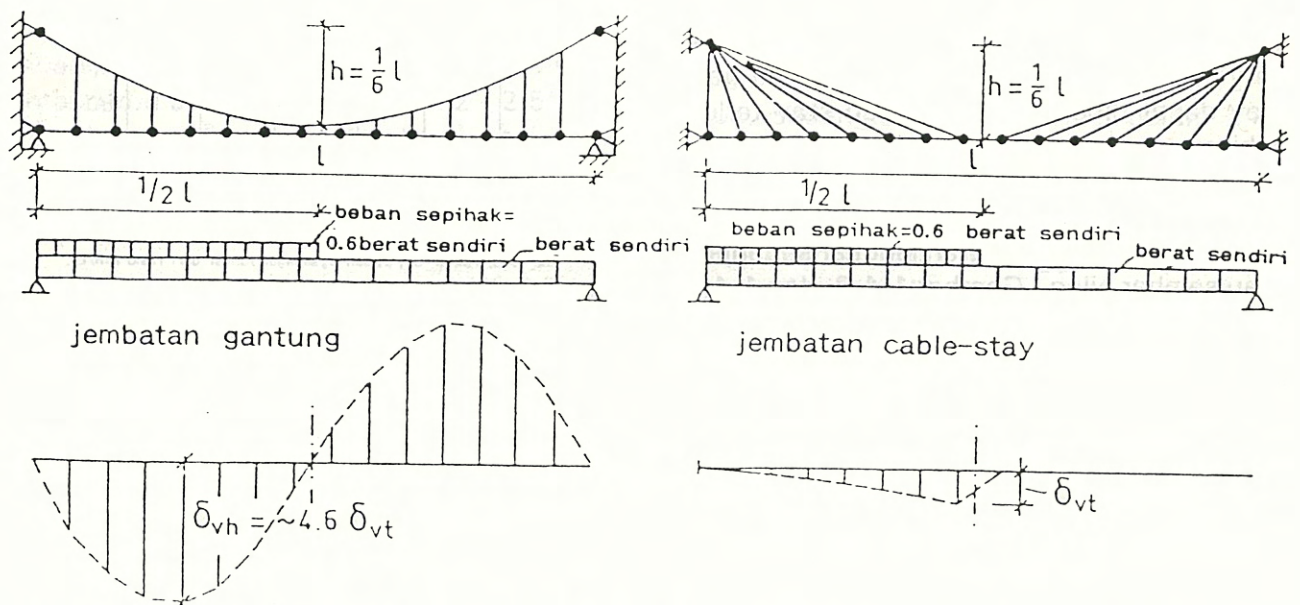
Pada jembatan stay (dimana $0.20 < h/L < 0.33$) akan lebih menguntungkan untuk memilih stay kipas bila $h/L < 0.29$ dan stay sejajar bila $h/L > 0.29$. Keuntungan - kerugian sistim kabel tidak tergantung pada jumlah kabel tetapi masih harus dipertimbangkan segi lain seperti penjangkaran sama dan estetika. Konfigurasi stay kipas - sejajar sering digunakan dan sebaiknya stay dekat pylon dihindari pada sistim kipas, karena stay pendek yang hampir vertikal menjadi masalah penjangkaran.

5. JEMBATAN GANTUNG VS CABLE-STAY VS GELAGAR BETON

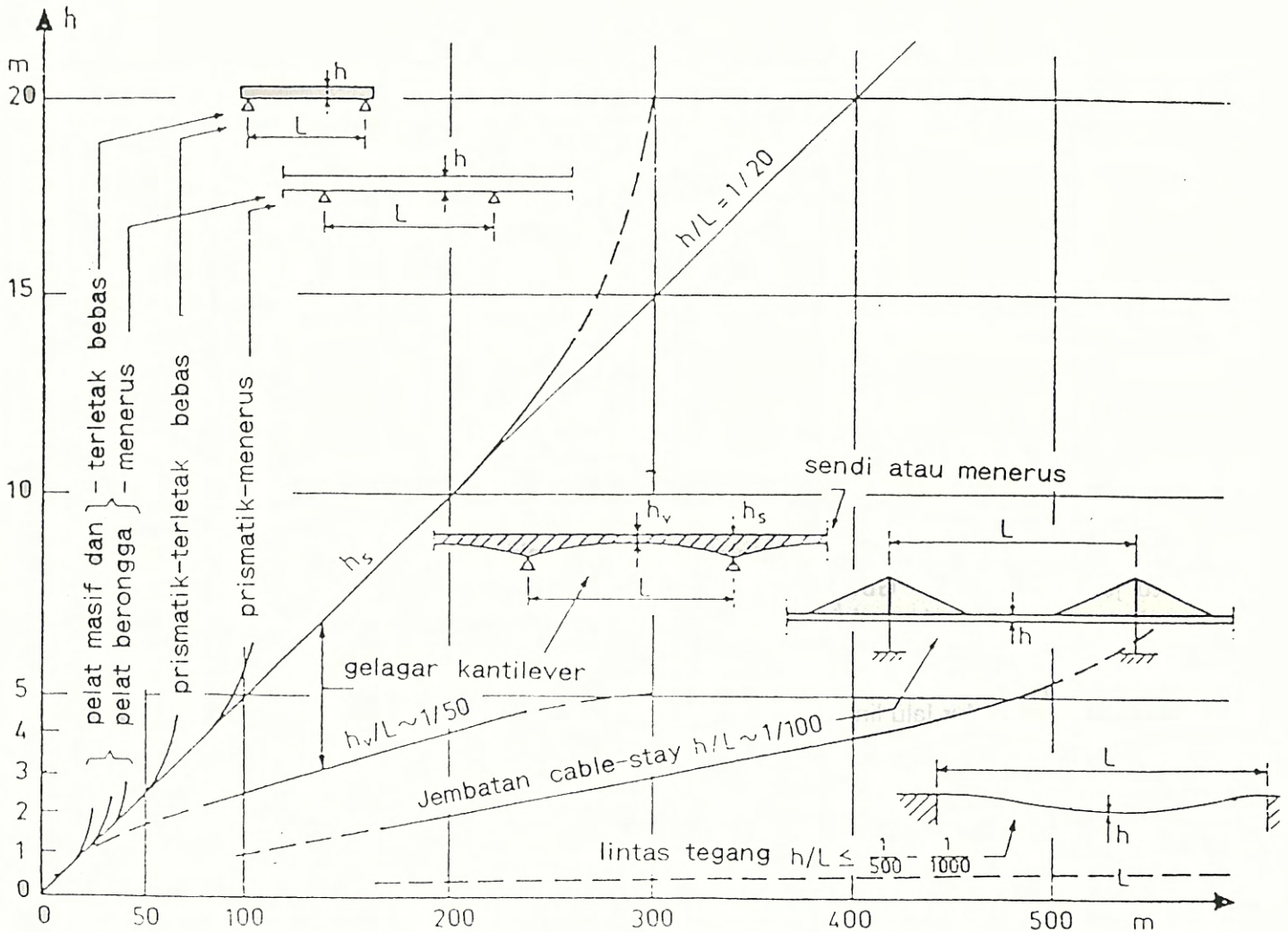
Beban pada jembatan gantung selalu disalurkan lewat hangar ke kabel utama dan tidak pernah secara langsung seperti pada jembatan cable-stay. Cara penyaluran beban demikian menyebabkan perubahan bentuk besar (lenturan) dibanding penyaluran beban secara langsung melalui bentuk segitiga pada jembatan cable-stay. Stay yang lurus

berperilaku lebih kaku dari susunan hangar dan kabel utama.

Perbedaan lendutan dari jembatan gantung dan jembatan cable-stay dijelaskan dalam Gambar 1.5.1. Walaupun lendutan akibat beban merata penuh untuk kedua tipe jembatan hampir sama, lendutan untuk pembebanan sepihak jauh berbeda (dengan faktor 4.6). Lendutan jembatan cable-stay pada pembebanan sepihak hampir sama dengan pembebanan penuh. Perbedaan lendutan sesuai Gambar 1.5.1 berlaku untuk 'puncak pylon terpegang erat'. Hal tersebut berlaku untuk jembatan gantung dengan kabel utama 'lurus' dalam bentang pinggir dan gelagar jembatan tidak menggantung pada kabel tetapi terletak pada satu atau lebih perletakan. Hal tersebut juga berlaku untuk jembatan cable-stay dimana umumnya stay terluar dalam bentang pinggir memegang erat puncak pylon karena stay terjangkar pada gelagar - dan sering stay terluar langsung terjangkar pada pangkal jembatan. Pada jembatan gantung dimana kabel utama 'melengkung' dalam bentang pinggir (karena gelagar jembatan menggantung pada kabel utama), puncak pylon lebih mudah bergerak dalam arah sumbu jembatan, dan lendutan gelagar lebih besar dari keadaan puncak pylon terpegang erat.



Gb. 1.5.1. Lenturan jembatan gantung dan cable-stay pada pembebanan sepihak (gelagar pengaku bersendi, $EI = 0$)



Gb. 1.5.2. Beberapa tipe jembatan beton sebagai fungsi bentang L dengan tinggi gelagar h yang bersangkutan

Untuk meratakan perubahan bentuk maka gelagar pengaku dari jembatan gantung harus dibuat lebih kaku terhadap lentur dibanding pada jembatan cable-stay. Jumlah kabel yang lebih sedikit dan kekakuan lebih besar dari jembatan cable-stay merupakan faktor penting untuk pemilihan tipe jembatan cable-stay untuk bentang yang selama ini hanya tersedia untuk jembatan gantung.

Bentang utama sebesar 300 m dapat dianggap sebagai bentang rata-rata untuk jembatan cable-stay lantai beton yang melebihi bentang beton pratekan sistim kantilever bebas dengan bentang utama maksimum 250 -lihat Gambar 1.5.2. untuk perbandingan bentang - tinggi gelagar pada berbagai tipe jembatan beton.

6. JEMBATAN CABLE-STAY DALAM SISTEM-TUNGGAL-GANDA DAN MAJEMUK

6.1. Jembatan Cable-Stay Tunggal

Bentuk dasar jembatan cable-stay merupakan sistim 'tunggal' yaitu gelagar bentang panjang dan langsing yang terletak bebas pada ujung-ujung, yang di beberapa titik antara digantung pada stay yang menyalurkan beban ke pylon di tengah - Gambar 1.6.1. Stay bekerja sebagai perletakan per dari gelagar yang mengalami variasi beban sedang perletakan di ujung (di pangkal jembatan) adalah kaku. Selain pada ujung-ujung, gelagar dapat diletakkan kaku pada titik lain misalnya di lokasi pylon (diatas pilar atau balok melintang) atau pada perletakan antara dalam salah satu lapangan - Gambar 1.6.2.

Perletakan antara akan bermanfaat untuk kemampuan perubahan bentuk jembatan sebagai kesatuan, tetapi meningkatkan biaya. Demikian pula tidak akan memberikan pengurangan beban yang berarti untuk pylon. Stay yang menghubungkan pangkal jembatan dan puncak pylon - Gb. 1.6.3 - memberi kekakuan dan stabilitas, karena stay yang dihubungkan pada titik tetap akan lebih kaku dari stay yang dihubungkan ke dalam bentang. Stay tersebut harus diberi prategangan karena tidak memikul beban (kecuali pada konstruksi asimetrik - Gb. 1.6.4)

Konfigurasi stay dapat berupa tipe sejajar - kipas - atau kombinasi - Gb. 1.6.5. Stay dapat dipasang dalam satu bidang vertikal, atau dalam dua bidang vertikal atau miring pada suatu jarak tertentu - Gb. 1.6.6. Jarak tersebut harus ditentukan oleh persyaratan lalu lintas, sering stay terletak diluar penampang jembatan dan kadang-kadang memisahkan dua jalur lalu lintas.

Pada satu bidang stay terpusat terjadi puntir akibat beban eksentris dalam arah melintang jembatan, yang harus dipikul dan disalurkan oleh gelagar pengaku yang kaku terhadap puntir (ke pangkal atau/dan pilar).

Pada dua bidang stay, sebagian besar dari puntir dipikul oleh stay, dan gelagar pengaku dapat dibuat lemah terhadap puntir. Penampang total stay akan lebih besar untuk dua bidang stay dibanding satu bidang stay terpusat.

Stay dapat dijangkar kedalam gelagar dan kedalam pylon, atau melalui pylon dengan perletakan tetap/pelana - bergerak/geser - atau sendi/pendel - Gb. 1.6.7. dan 1.6.8. Perletakan tetap bekerja seperti stay yang terjangkar, biaya dua jangkar harus dipertimbangkan terhadap satu pelana. Cara kerja dari perletakan stay yang bergerak dan sendi adalah berlainan, terutama pada perletakan bergerak harus diperhitungkan 'tahanan gesek'.

Bentuk 'pylon' sangat tergantung pada konfigurasi dan bidang stay - Gb. 1.6.9. Untuk stay sejajar dengan satu bidang stay terpusat harus digunakan pylon tunggal terpusat yang

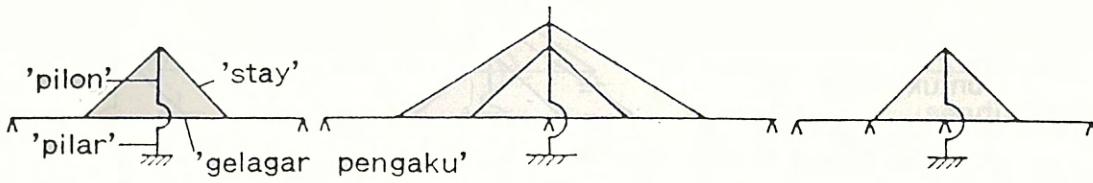
juga dapat digunakan untuk stay kipas dengan bidang stay terpusat. Untuk ini dapat digunakan pylon bentuk A. Pada pylon bentuk A dapat juga digunakan stay sejajar dalam dua bidang miring. Pada dua stay sejajar dan vertikal harus digunakan dua pylon vertikal ganda yang dalam arah melintang terkopel pada satu atau lebih elevasi ketinggian - Gb. 1.6.9. a -f.

Hubungan pylon dengan gelagar dapat dibuat sendi atau jepit, keseluruhan gelagar dan pylon kemudian dapat dihubungkan dengan sendi atau jepit pada pilar. Pylon dapat juga dibebaskan dari gelagar dan dihubungkan dengan sendi atau jepit pada pilar - Gambar 1.6.10. Semakin kaku hubungan tersebut semakin baik kekakuan keseluruhan struktur, tetapi gaya-gaya yang diakibatkan harus dibatasi.

Gelagar pengaku dari jembatan cable-stay tunggal umumnya dibuat sebagai gelagar menerus. Kadang-kadang gelagar pengaku diteruskan pada satu atau kedua sisi, tanpa atau dengan sendi yang mengatur bidang momen - Gb. 1.6.11. Penerusan gelagar juga bermanfaat untuk mengecilkan putaran sudut pada perletakan pertama A atau untuk membatasi lendutan. Penampang gelagar pengaku dapat disesuaikan untuk lokasi momen besar, tetapi penampang lebih berat akan menambah momen sehingga perhitungan diulang dengan menggunakan besaran kekakuan baru. Untuk mempermudah pembesaran penampang di dekat pylon, jarak stay yang berdekatan pylon dibuat lebih besar (sampai beberapa kali) dari jarak biasa.

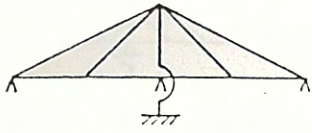
Jembatan cable-stay tunggal simetrik akan seimbang terhadap pylon dan reaksi pada pangkal jembatan kecil bila jarak stay kecil. Reaksi tersebut menjadi negatif pada pembebanan sepihak. Hal tersebut diatasi dengan perletakan sistem tarik atau pemberat atau penerusan dimensi gelagar - Gb. 1.6.12.

Perletakan tetap dari jembatan cable-stay tunggal sebaiknya dipilih di lokasi pylon bilamana terdapat pilar atau balok perletakan. Bila jembatan hanya digantung pada stay ke pylon, gaya horisontal harus disalurkan ke pylon

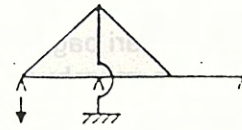


Gb. 1.6.1.

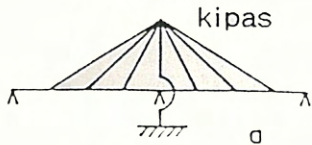
Gb. 1.6.2.



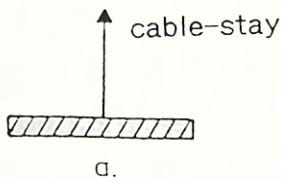
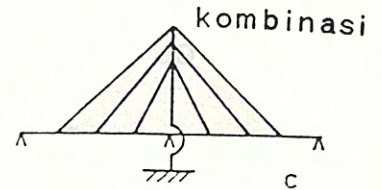
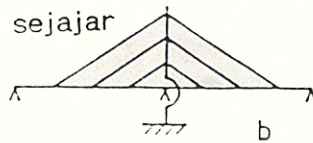
Gb.1.6.3.



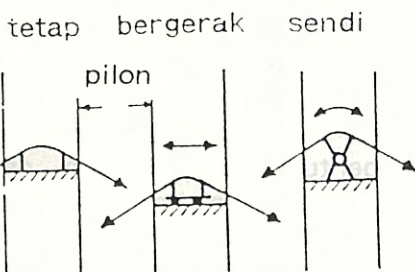
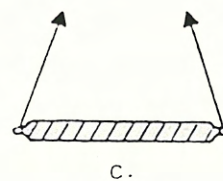
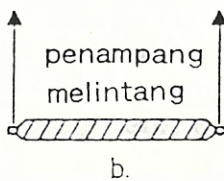
Gb.1.6.4.



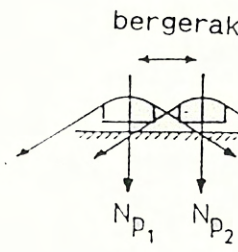
Gb.1.6.5.



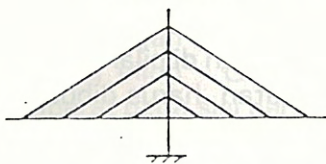
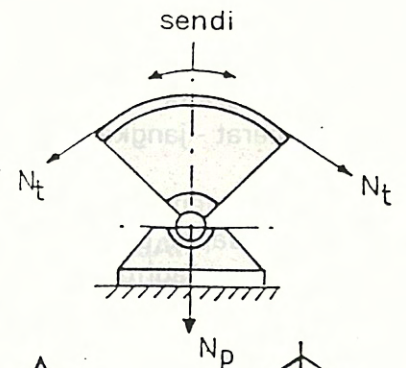
Gb.1.6.6.



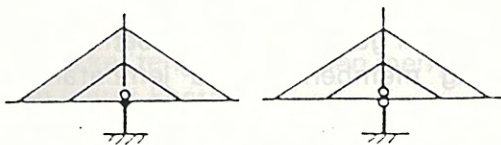
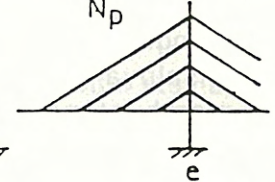
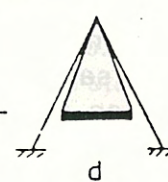
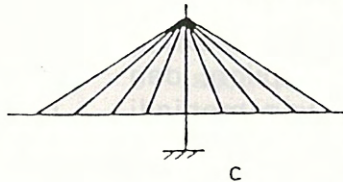
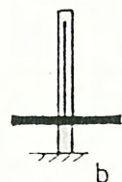
Gb. 1.6.7.



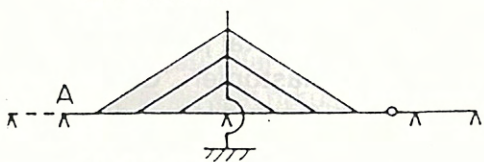
Gb. 1.6.8.



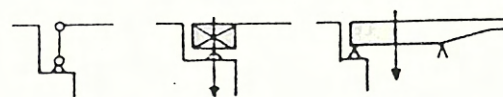
Gb. 1.6.9. a - f



Gb. 1.6.10.



Gb.1.6.11.

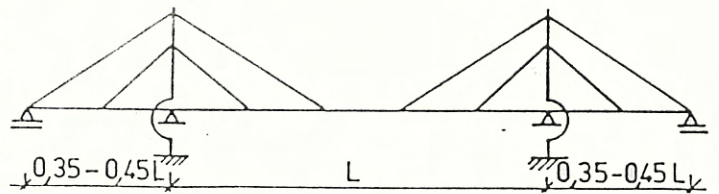


Gb. 1.6.12.

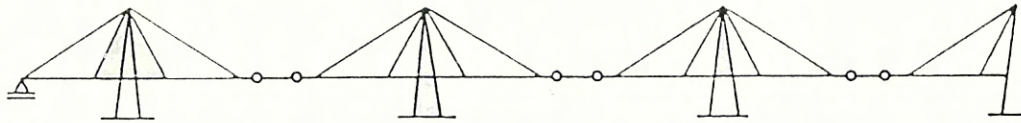
dengan perantaraan perletakan vertikal - tipe elastomer untuk gaya horisontal relatif kecil atau tipe karet teflon untuk gaya lebih besar.

6.2. Jembatan Cable-Stay Ganda & Majemuk

Jembatan cable-stay ganda diperoleh dengan menggandakan jembatan cable-stay tunggal dan menghilangkan titik perletakan tengah sehingga diperoleh bentang ganda dari bagian antara pylon - Gb. 1.6.13. Dengan membuat beberapa jembatan cable-stay tunggal secara berurutan akan diperoleh jembatan cable-stay majemuk - Gb. 1.6.14.



Gb. 1.6.13. Jembatan cable-stay ganda



Gb. 1.6.14. Jembatan cable-stay majemuk

Perbandingan bentang pinggir dan utama berada umumnya antara 0.35 - 0.45 dan kadang-kadang lebih kecil sehingga perlu diusahakan agar bagian gelagar disamping pylon berada dalam keseimbangan (diberi pemberat - jangkar)

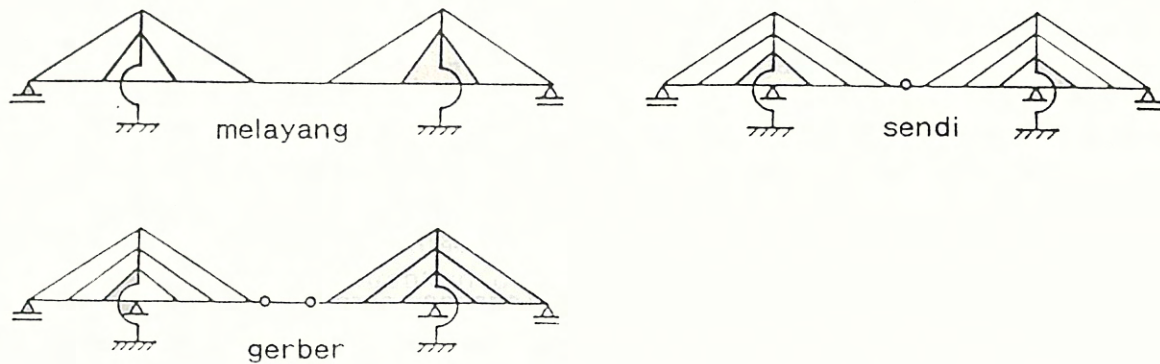
Gelagar pengaku dari jembatan cable-stay ganda dapat dibuat menerus pada seluruh panjang tetapi dalam hal ini harus diadakan kemungkinan untuk deformasi akibat suhu - susut - rangkai dan prategang. Hal tersebut mungkin dengan memilih satu titik tetap, misalnya di lokasi salah satu pylon, dan membuat perletakan tetap lain menjadi perletakan bergerak (geser atau rol). Cara ini menyebabkan deformasi besar seperti momen lentur dalam pylon lain dan demikian gaya normal dan lentur dalam gelagar dan lentur dalam pylon pertama. Dengan demikian struktur harus mampu memikul deformasi dan momen tersebut.

Gaya-gaya akibat deformasi yang tidak menguntungkan tersebut dapat dihindari dengan berbagai cara - Gb. 1.6.15. :

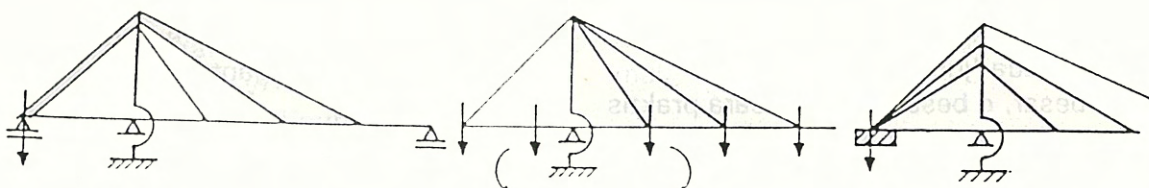
- 'Gelagar melayang' tanpa perletakan di lokasi pylon, dimana titik tetap terletak di tengah gelagar jembatan dan perubahan

panjang terjadi simetris terhadap titik tersebut. Gaya yang diakibatkan relatif kecil. Lantai jembatan 'menerus' tanpa sambungan dilatasi dan struktur menjadi kaku.

- 'Sendi' di tengah bentang utama yang membentuk dua jembatan cable-stay tunggal yang tidak saling tergantung dalam segi perubahan panjang horisontal, tetapi masih terjadi pengaruh gaya dan perpindahan vertikal antara kedua bagian jembatan. Pylon-nyon berfungsi sebagai titik tetap dan perletakan di pilar samping dan pangkal jembatan harus dibuat rol atau elastomer. 'Sendi' berarti dua sambungan dilatasi dan satu konstruksi sendi, biaya menjadi mahal dan kekakuan struktur berkurang.
- 'Gelagar gerber' di tengah bentang utama yang membentuk dua jembatan cable-stay tunggal yang terpisah dan tidak saling mempengaruhi. Pylon-nyon berfungsi sebagai titik tetap dan perletakan di pilar samping dan pangkal jembatan harus dibuat rol atau elastomer. 'Gerber' berarti empat sambungan dilatasi dan dua perletakan gigi, biaya menjadi mahal dan kekakuan struktur berkurang.



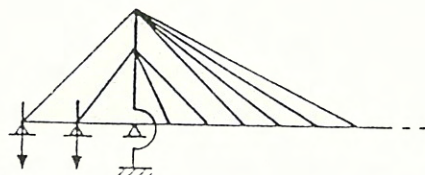
Gb. 1.6.15. Sistem gelagar untuk penanggulangan deformasi



Gb.1.6.16.Asimetrik

Gb.1.6.17. $\Sigma M=0$

Gb.1.6.18.Pemberat



Gb.1.6.19.Penjangkalan bagian sisi pendek

Jembatan cable-stay asimetrik - Gb. 1.6.16. sering dipilih bila pada satu sisi, kekurangan tempat. Karena pylon hanya dapat memikul momen relatif kecil, harus diadakan keseimbangan momen pada bagian-bagian di samping pylon - Gb. 1.6.17., yaitu dengan pemberat pada sisi pendek atau membuat sisi pendek dari beton dan sisi panjang dari baja. Pemberat sebaiknya dibuat sekitar perletakan - Gb. 1.6.18. - dan juga dapat diadakan pemusatan stay ke pangkal jembatan karena stay yang ke 'tengah' lapangan menyebabkan momen lentur keatas.

Keseimbangan momen terhadap pylon juga tercapai dengan penjangkalan sisi pendek pada pangkal atau pilar antara - Gb. 1.6.19. Berat bangunan bawah harus cukup agar tidak terangkat dan penjangkalan harus mengijinkan gerakan horisontal yang terjadi.

7. TEORI CABLE-STAY SEJAJAR

Gaya normal dalam stay, gelagar dan pylon untuk jembatan cable-stay sejajar serta simetrik terhadap pylon, dinyatakan dalam parameter berikut - Gb. 1.7.1. :

- sudut kelandaian stay, jarak antar stay a , jumlah stay n , $\text{tg } \alpha = h/L$
- penampang stay A_t , penampang gelagar A_l , penampang pylon A_p
- panjang kantilever $L = na$ (sebenarnya $(n+0.5)a$, tetapi bagian gelagar $0.5 a$ disamping pylon tidak dipikul oleh stay dan juga tidak menyebabkan gaya normal dalam gelagar dan pylon)
- tegangan ijin stay $\bar{\sigma}_t$, tegangan tekan ijin beton $\bar{\sigma}_c$, $\beta \bar{\sigma}_c < \bar{\sigma}_c$, sama dengan bagian tegangan tekan beton akibat gaya normal yaitu sisa dari tegangan lentur ($\beta \approx 0.5$ untuk pra-rencana)
- berat volume beton ρ KN/m³.

Dengan anggapan bahwa gelagar dan pylon 'prismatik' sepanjang bentang - tinggi dan berat stay diabaikan :

a. STAY

Beban vertikal pada tiap stay = berat lapangan = $G_1 = A_L \cdot \rho \cdot a$

Gaya normal dalam stay $N_t = G_1 / \sin a = A_L \cdot \rho \cdot a / \sin a$

Gaya stay N_t menjadi minimum bila :

- berat gelagar / meter kecil yaitu A_L (penampang gelagar) kecil dan/atau ρ kecil (misalnya beton ringan)
- jarak stay a kecil tetapi ini tidak berpengaruh pada 'jumlah' gaya stay
- $\sin a$ besar, a besar tetapi secara praktis $a < 45$ derajat karena pylon akan menjadi terlalu tinggi.

'Penampang stay' $A_t = N_t / \sigma_t$ dengan nilai σ_t yang tergantung pada bahan dan kekuatan leleh stay. Untuk pra-rencana $\sigma_t = 0.45 f_s$ dengan $f_s =$ kuat tarik bahan stay.

b. GELAGAR

Gaya normal $N_{L1} = G_1 \cotg a = A_L \cdot \rho \cdot a \cdot \cotg a$ (satu lapangan)

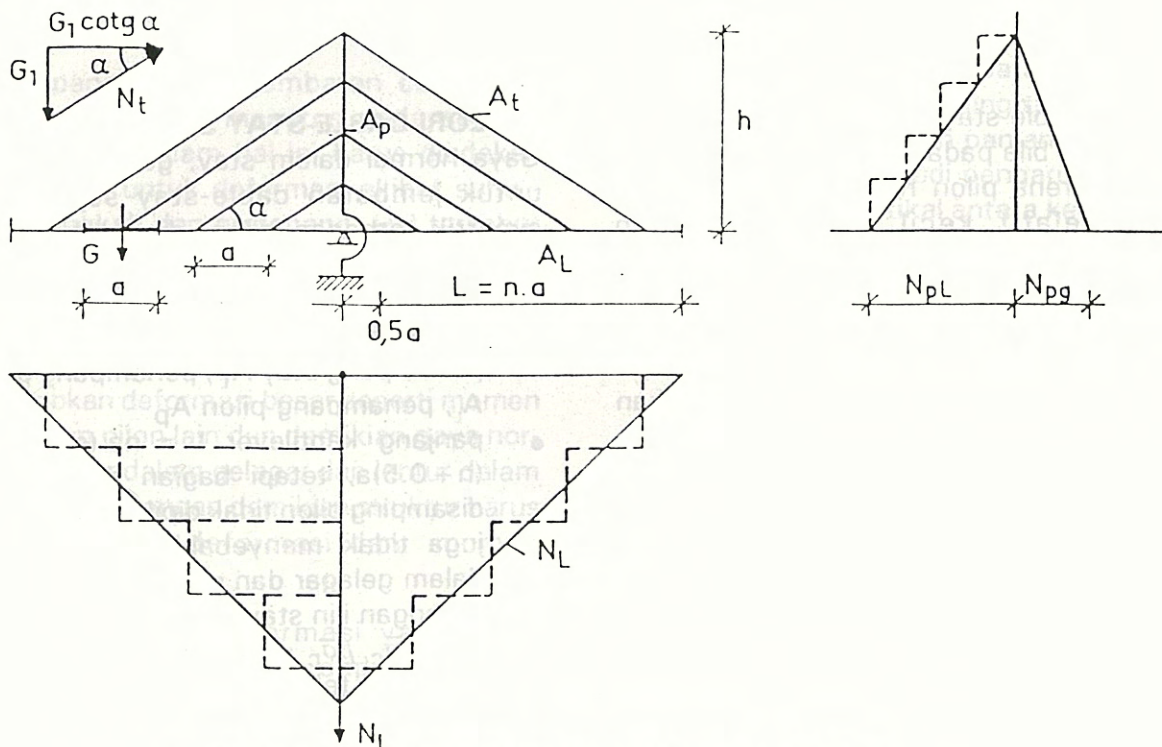
Gaya normal maksimum (dekat pylon) : $N_{Lmaks} = n G_1 \cotg a = n A_L \cdot \rho \cdot a \cdot \cotg a$

Tegangan normal maksimum :

$\sigma_{Lmaks} = N_{Lmaks} / A_L = n \cdot \rho \cdot a \cdot \cotg a = \rho \cdot L \cdot \cotg a < \beta \sigma_c$, yaitu bagian dari σ_c , yang disebabkan oleh tegangan normal.

Tegangan σ_{Lmaks} hanya tergantung dari ρ , L dan a dan tidak tergantung dari penampang gelagar A_L .

Dalam gambar 1.7.2. terdapat hubungan antara tegangan normal maksimum σ_{Lmaks} dalam gelagar dekat pylon, sebagai fungsi panjang kantilever L , untuk tiga nilai perkalian $\rho \cdot \cotg a$. Untuk $p = 25 \text{ KN/m}^3$ (beton biasa)



Gb. 1.7.1. Skema jembatan cable-stay sejajar. N_L dan N_p untuk jumlah stay tak terhingga (tanpa skala)

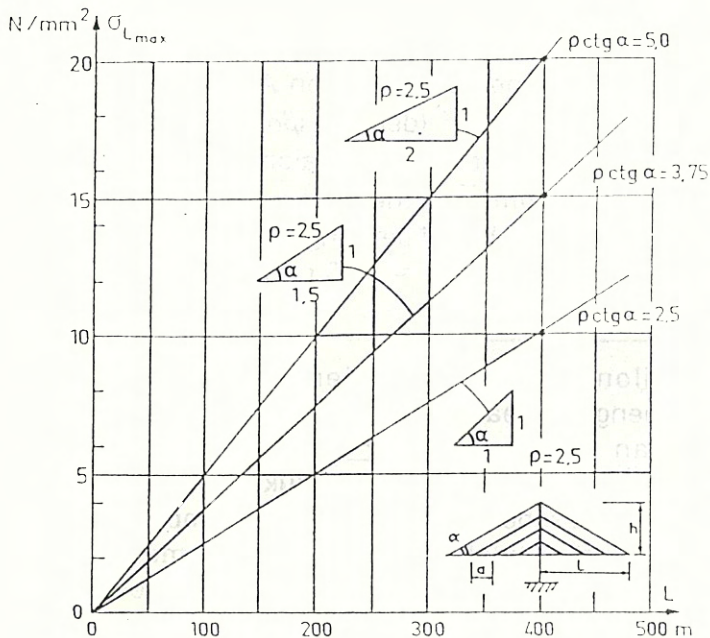
diberikan sudut kelandaian stay yang sesuai.

'Panjang gelagar maksimum' dengan penampang tetap ialah sebagai berikut :

$$L_{maks} = (\beta \cdot \sigma_c' \cdot \text{tg } \alpha) / \rho$$

Panjang tersebut terutama tergantung dari bagian β dari σ_c' yang disebabkan oleh tegangan normal. Untuk mencapai bentang besar lebih menguntungkan bila momen lentur dekat pylon ditahan kecil misalnya dengan tidak memberikan perletakan tetap di pylon - Gb. 1.6.15.

Bila tegangan tekan ijin gelagar $\sigma_c' = 15 \text{ N/mm}^2$ dan setengahnya diijinkan sebagai tegangan tekan sentris ($\beta=0.5$) maka tegangan tersebut $\beta \cdot \sigma_c' = 7.5 \text{ N/mm}^2$ dicapai pada kantilever $L = 150 \text{ m}$ dengan kelandaian stay 1 : 2, pada kantilever $L = 200 \text{ m}$ dengan kelandaian stay 2 : 3, pada kantilever $L = 300 \text{ m}$ dengan kelandaian stay 1 : 1 ($\alpha = 45^\circ$), yang hanya berlaku untuk $\rho = 25 \text{ KN/m}^3$ (beton biasa).



Gb. 1.7.2. Tegangan normal maksimum dalam gelagar di lokasi pylon, sebagai fungsi bentang L untuk tiga nilai dari $\rho \cdot \text{ctg } \alpha$

Bila digunakan 'beton ringan' dengan $\rho \approx 3/4$ dari beton biasa, L maksimum 4/3 kali lebih besar dengan gaya stay 3/4 kali lebih kecil dan gaya pylon 3/4 kali lebih kecil. Untuk kelandaian stay rata-rata 2 : 3 maka bentang utama maksimum (2L) dari jembatan cable-stay simetrik ganda (2 pylon) dengan beton pratekan (biasa) menjadi $\approx 400 \text{ m}$, dengan beton pratekan (ringan) melebihi 500 m. Bentang maksimum masih dapat diperbesar misal dengan memperbesar penampang dekat pylon pada jarak pendek (misal dengan mempertebal badan yang hampir tidak berpengaruh pada perbandingan kekakuan) atau menyesuaikan konstruksi sedemikian rupa sehingga tegangan lentur tetap rendah dan lebih banyak tersisa untuk tegangan normal.

c. PILON

Gaya normal akibat satu pasang lapangan : $N_{p1} = 2G_1 = 2 A_L \cdot \rho \cdot a$

Gaya normal maksimum di tepi bawah : $N_{pL} = n \cdot N_{p1} = 2 \cdot n \cdot A_L \cdot \rho \cdot a$ (gelagar)

Berat sendiri pylon : $N_{gp} = A_p \cdot \rho \cdot h = n \cdot A_p \cdot \rho \cdot a \cdot \text{tg } \alpha$ (penampang prismatic)

Tegangan normal maksimum : $\sigma_p = \sigma_{pL} + \sigma_{gp} \leq \beta \sigma_c'$

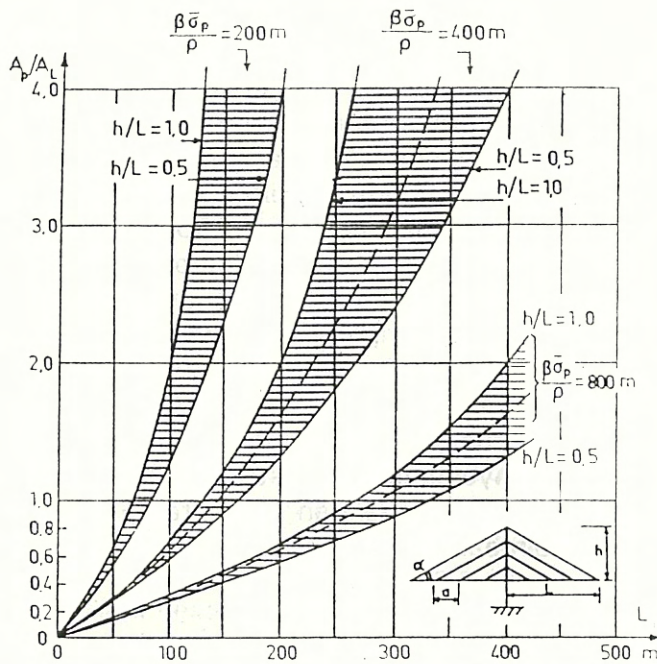
$$2 \cdot n \cdot \rho \cdot a \cdot (A_L / A_p) + n \cdot \rho \cdot a \cdot \text{tg } \alpha = n \cdot \rho \cdot n \cdot \{2(A_L / A_p) + \text{tg } \alpha\} \leq \beta \sigma_c'$$

$$(A_p / A_L) \geq (2L) / \{(\beta \sigma_c') / \rho\} \cdot h$$

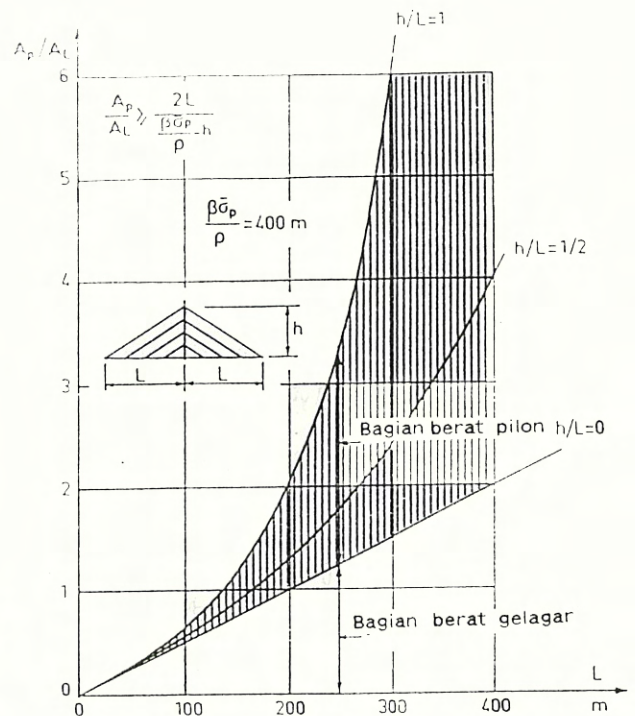
Dalam gambar 1.7.3. perbandingan A_p / A_L dihitung sebagai fungsi kantilever L untuk tiga nilai $\beta \sigma_c' / \rho$ yang berbeda dan dua nilai h/L , diantara mana nilai dalam praktek berada. Dalam hal ini faktor β menyatakan bagian tegangan tekan ijin σ_c' yang tersedia untuk tegangan normal sentris. Nilai $\beta = 1/2 - 2/3$ untuk pylon merupakan nilai wajar karena lentur pylon selalu lebih kecil dari gelagar.

Bila $\sigma_c' = 15 \text{ N/mm}^2$, $\beta = 2/3$ dan $\rho = 25 \text{ KN/m}^3$ terdapat $\beta \sigma_c' / \rho = 400 \text{ m}$.

Untuk beton ringan perbandingan tersebut lebih besar karena berbanding terbalik dengan nilai ρ , berarti penampang pylon lebih kecil.



Gb. 1.7.3. Perbandingan penampang pylon A_p dan penampang gelagar A_L sebagai fungsi bentang kantilever L untuk tiga nilai h/L



Gb. 1.7.4. Perbandingan penampang pylon A_p dan penampang gelagar A_L sebagai fungsi dari bentang L untuk tiga nilai h/L yang berbeda dan dengan $\beta \bar{\sigma}_p / \rho = 400 \text{ m}$ ($\beta = 2/3$, $\bar{\sigma}_p = 15000 \text{ KN/m}^2$, $\rho = 25 \text{ KN/m}^3$). Bagian berat gelagar dan berat pylon dinyatakan secara terpisah untuk penampang total pylon.

Bagian penampang pylon yang diperlukan untuk 'berat gelagar' dinyatakan oleh garis lurus $A_p/A_L = (2L)/\{\beta \bar{\sigma}_p\}/\rho$ dengan $h = 0$ dalam gambar 1.7.4. Bagian antara garis lurus dan garis lengkung (yang diarsir) merupakan penampang pylon yang diperlukan untuk 'berat pylon' di kaki, yang bertambah besar dengan kenaikan L dan nilai h/L (pilon lebih tinggi). Untuk $L = 100 \text{ m}$ dan $h/L = 1$, bagian penampang pylon untuk gelagar ialah 50 % dari A_L dan untuk pylon sendiri 17 %. Untuk $L = 200 \text{ m}$ dan $h/L = 1$, bagian tersebut masing-masing 100 % dan 100 % dari A_L . Sehingga penampang pylon menjadi total 67% dan 200% dari A_L untuk keadaan tersebut. Dengan bentang kantilever diatas 200 m, penampang pylon A_p yang dinyatakan dalam penampang gelagar A_L dengan pesat bertambah besar. Demikian juga untuk $h/L = 0.5$ yang merupakan perbandingan terkecil yang dapat dicapai pada jembatan cable-stay lantai beton. Ternyata bahwa 'kelandaian stay yang besar' membantu untuk mencapai bentang kantilever gelagar (L) yang besar, sedangkan 'kelandaian stay yang kecil' membantu untuk mencapai penampang pylon minimum pada nilai L maksimum.

Untuk kantilever gelagar sebesar $L = 300 \text{ m}$, yang pada kelandaian stay 450 mungkin untuk $\beta \bar{\sigma}_c' = 7.5 \text{ N/mm}^2$ sesuai gambar 1.7.2., diperlukan penampang pylon $A_p = 6 A_L$ untuk $\beta \bar{\sigma}_p' = 10 \text{ N/mm}^2$ (dengan $(\beta \bar{\sigma}_p')/\rho = 400 \text{ m}$ sesuai gambar 1.7.4.). Dalam hal ini hanya tersisa 5 N/mm^2 untuk memikul momen lentur pylon. Dalam hal ini bentang utama maksimum untuk beton biasa $\approx 500 \text{ m}$ dan untuk beton ringan $\approx 600 \text{ m}$.

Pylon dapat dibuat dengan penampang mengecil keatas sesuai bidang gaya normal dan momen lentur sepanjang tinggi. Penjangkaran stay memerlukan penampang puncak sebesar $1/3 - 1/2$ dari penampang kaki sehingga tidak dianjurkan untuk membuat reduksi penampang terlalu besar. Reduksi berat sendiri pylon tidak akan melebihi $\approx 30\%$ dan untuk pra-rencana dapat dianggap sebesar demikian.

Gaya normal, gaya lintang dan momen lentur mempunyai peranan lebih penting untuk gelagar dibanding untuk pylon. Pada gaya nor-

mal sedang terjadi momen lentur dengan tingkat besaran sama seperti pada gaya normal besar, sehingga pengurangan penampang pada gaya normal sedang tidak akan mungkin. Demikian untuk pra-rencana dianggap penampang gelagar prismatic.

Pendekatan teoritik untuk jumlah stay tak terhingga pada jarak kecil tak terhingga : Berat lapangan sepanjang dx : $dG = \rho \cdot A_L \cdot dx$

Gaya normal dalam gelagar :

$$N_{Lx} = \int_0^x \rho \cdot A_L \cdot dx \cdot \cotg \alpha$$

Gaya normal dalam pylon akibat gelagar :

$$N_{pLx} = 2 \int_0^x \rho \cdot A_L \cdot dx$$

Gaya normal maksimum dalam gelagar :

$$N_{Lmaks} = \int_0^L \rho \cdot A_L \cdot dx \cdot \cotg \alpha = \rho \cdot L \cdot A_L \cdot \cotg \alpha$$

Gaya normal maksimum dalam pylon akibat gelagar :

$$N_{pLmaks} = 2 \int_0^L \rho \cdot A_L \cdot dx = 2 \cdot \rho \cdot L \cdot A_L$$

Berat sendiri pylon $N_{pgy} = \int_0^y \rho \cdot A_p \cdot dy$ (penampang prismatic A_p)

Berat sendiri maksimum pylon :

$$N_{pgmaks} = \int_0^h A_p \cdot dy = \rho \cdot A_p \cdot h$$

Gambar 1.7.1. menunjukkan nilai N_L dan N_p tersebut diatas yang berlaku untuk penampang prismatic dari gelagar dan pylon.

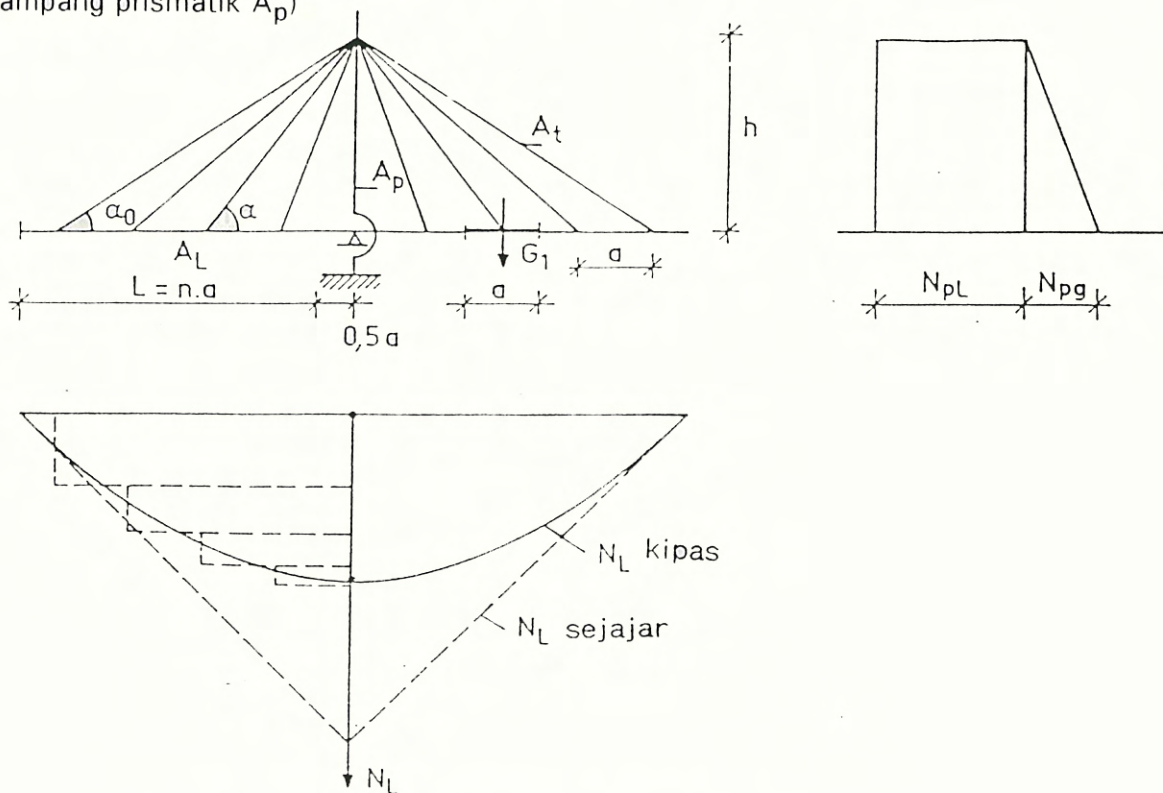
8. TEORI CABLE-STAY KIPAS

Untuk bentang L yang sama dan sudut stay terkecil α_0 , tegangan normal maksimum dalam gelagar menjadi lebih kecil dari stay sejajar dimana sudut stay tetap sebesar α_0 . Tegangan batas $\beta \bar{\sigma}_c'$ dengan demikian dicapai pada bentang lebih besar dibanding stay sejajar.

Jembatan cable-stay kipas simetrik dengan jarak stay sama dan sudut stay α bervariasi antara α_0 dan 90° - Gb. 1.8.1. - diperhitungkan untuk jumlah stay tak terhingga pada jarak kecil tak terhingga :

Gaya normal dalam gelagar :

$$N_{Lx} = \int_0^x \rho \cdot A_L \cdot \cotg \alpha \cdot dx = \int_0^x \rho \cdot A_L \cdot (x/h) \cdot dx = (1/2) \rho \cdot A_L \cdot (x^2/h) \text{ (parabolik)}$$



Gb. 1.8.1. Skema jembatan cable-stay kipas N_L dan N_p untuk jumlah stay tak terhingga (tanpa skala)

Gaya normal maksimum dalam gelagar :

$$N_{L\text{maks}} = (1/2)\rho \cdot A_L(L^2/h) = (1/2)\rho \cdot L \cdot A_L \cdot \cotg \alpha_0$$

Tegangan normal maksimum dalam gelagar :

$$\sigma_{L\text{maks}} = (1/2) \rho \cdot L \cdot \cotg \alpha_0$$

Nilai tersebut setengahnya dari gaya dan tegangan normal pada stay sejajar dengan sudut stay tetap α_0 dan nilai L dan ρ yang sama.

Untuk $\sigma_{L\text{maks}} \leq \beta \bar{\sigma}_C'$ panjang yang dapat dicapai :

$$L_{\text{maks}} = (2\beta \cdot \bar{\sigma}_C' \cdot \cotg \alpha_0) / \rho$$

Secara teoritik dengan stay kipas dapat diperoleh 'dua kali' panjang bentang dibanding stay sejajar, dengan mengambil bagian $\beta \bar{\sigma}_C'$ yang sama terhadap $\bar{\sigma}_C'$. Panjang bentang yang dapat dicapai juga tidak tergantung dari penampang gelagar A_L .

Gaya normal dalam pylon akibat berat gelagar:

$$N_{pL} = 2 A_L \cdot \rho \cdot L$$

dan akibat berat sendiri pylon prismatic :

$$N_{pg} = A_p \cdot \rho \cdot h = \rho \cdot A_p \cdot L \cdot \cotg \alpha_0$$

Gaya normal maksimum di kaki pylon :

$$N_{pmaks} = 2 \rho \cdot A_L \cdot L + \rho \cdot A_p \cdot L \cdot \cotg \alpha_0$$

Tegangan normal maksimum dikaki pylon :

$$\sigma_{pmaks} = N_{pmaks} / A_p = \rho L \{ (2 A_L / A_p) + \cotg \alpha_0 \} \leq \beta \bar{\sigma}_C'$$

$$(A_p / A_L) \geq (2L) / \{ (\beta \bar{\sigma}_C') / \rho - h \}$$

Perbandingan tersebut sama seperti stay sejajar karena pylon selalu memikul seluruh jembatan, hanya berat gelagar lebih kecil untuk stay kipas.

Untuk panjang gelagar L 'sama' maka perbandingan antara penampang pylon dan gelagar 'sama' dan 'tidak tergantung pada penampang gelagar'. 'Panjang gelagar' yang dapat dicapai untuk stay kipas secara teoritik 'dua kali' panjang untuk stay sejajar. Demikian perbandingan penampang pylon terhadap penampang gelagar sangat meningkat juga sesuai gambar 1.7.3. Untuk L = 300 m,

perbandingan $A_p / A_L = 2.4$ untuk $\cotg \alpha_0 = 0.5$ ($h/L = 0.5$), Untuk L = 400 m, $A_p / A_L = 4$, Untuk L = 600 m, $A_p / A_L = 12$. Untuk $\cotg \alpha_0$ lebih besar akan diperoleh perbandingan lebih besar lagi.

Pada stay kipas, panjang gelagar tidak sedemikian dibatasi oleh bagian tegangan normal ijin $\beta \bar{\sigma}_C'$, tetapi perbandingan penampang pylon terhadap gelagar secara praktis dibatasi sampai 2 - 3 kali. Sehingga untuk stay kipas bentang utama maksimum (2L) dari jembatan cable-stay ganda 2 x 300 m (untuk beton ringan 2 x 400 m).

Gaya normal maksimum di puncak pylon untuk stay kipas :

$$N_{pL} = 2 \rho \cdot A_L \cdot L$$

Tegangan maksimum di puncak pylon :

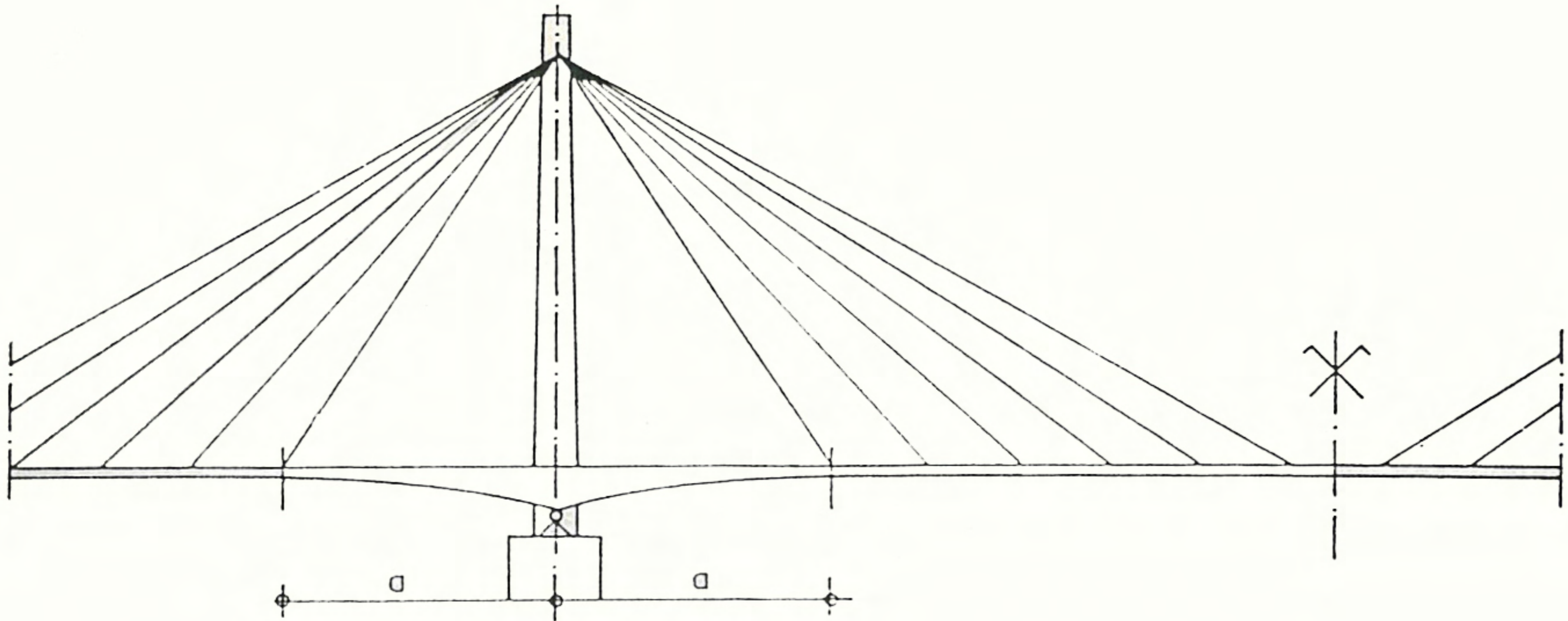
$$\sigma_{pmaks} = 2 \rho \cdot A_L / A_p$$

Pada stay kipas 'seluruh' berat jembatan bekerja pada puncak pylon, sedangkan pada stay sejajar 'terbagi rata' sepanjang pylon (bila banyak stay). Untuk stay kipas lebih sering dipilih penampang sama sepanjang pylon dibanding dengan stay sejajar. Walaupun demikian masih mungkin untuk membuat penampang puncak lebih kecil dari kaki, karena berat sendiri dan momen lentur di puncak pylon sama dengan nol sehingga berlaku syarat $\sigma_{pmaks} \leq \bar{\sigma}_C'$ dengan $\beta = 1$.

Perlu diperhatikan bahwa puncak pylon dibebani terpusat oleh semua stay yang berkumpul, sehingga agak dibawah puncak dapat diadakan peralihan ke penampang lebih kecil.

'Beban pylon' dapat 'diperkecil' dengan melimpahkan berat gelagar dekat pylon ke 'perletakan tetap' - Gambar 1.8.2. Dalam hal ini stay dekat pylon mempunyai pengaruh kecil dan dapat diabaikan.

'Penampang pylon' dapat 'diperkecil' dengan menggunakan beton mutu tinggi dengan atau tanpa kombinasi persentase tulangan yang tinggi misal dengan profil baja dan batang tulangan berat. 'Prategang' dapat digunakan juga. Dalam hal ini sebagian besar dari gaya



Gb. 1.8.2. Jembatan cable-stay kipas simetrik ganda dengan pembesaran gelagar dekat pylon

tekan dalam pylon dipikul oleh batang prategang, sehingga pembebanan beton berkurang dan masih tersisa cukup prategang untuk memikul momen.

Untuk jembatan dengan lebar 30 m dengan penampang gelagar A_L antara 20 dan 25 m², bentang kantilever 200 m dan kelandaian stay 1:1 terdapat perbandingan $A_p/A_L = 2$, sehingga penampang pylon menjadi 40 - 50 m² misal 5 x 8 @ 5 x 10 m². Untuk kelandaian stay 1 : 2 perbandingan $A_p/A_L = 1.33$, penampang pylon 27 - 33 m² yang masih besar - lihat gambar 1.7.4.

Jelas bahwa pylon yang berdimensi demikian besar tidak dibuat masif melainkan berongga, yang bermanfaat untuk menyalurkan panas hidrasi selama pengecoran selain untuk pemasangan lift - tangga, dan untuk memperoleh besaran inersia penampang yang lebih baik.

Suatu kerugian ialah bahwa lebar pylon sebesar 5 m untuk pylon di tengah yang bertambah pada lebar jembatan yang diperlukan untuk lalu lintas, dan dilebihkan 0,75 - 1 m pada sisi-sisi sebagai lajur pengaman.

9. PRA-RENCANA JEMBATAN CABLE STAY

Dengan pra-rencana diperoleh perkiraan 'penampang' kabel, gelagar dan pylon, tetapi

belum diperoleh pembagian gaya secara teliti berdasarkan besaran kekakuan lentur dan puntir.

Perhitungan pendekatan dimulai dari 'berat sendiri gelagar'. Untuk lebar jembatan cable-stay lantai beton antara 20 - 40 m, berat sendiri gelagar penampang boks berada antara 12 - 18 KN/m². Berat sendiri masih harus ditambah dengan berat lapis permukaan lantai, balok kerb, trotoar, median, sandaran, lampu yang diambil rata-rata 2-3 KN/m².

Pengaruh pembebanan lalu-lintas pada tegangan penampang jembatan cable-stay lantai beton dengan bentang ≥ 200 m dapat diperkirakan sebesar $\approx 10\%$ dari pengaruh berat sendiri. Dengan memilih tegangan ijin kabel $\approx 10\%$ lebih rendah dalam perhitungan penampang akibat berat sendiri, akan diperoleh perkiraan penampang kabel akibat beban mati dan hidup. Tegangan akibat momen beban mati dan hidup untuk gelagar dan pylon diperkirakan dengan pengurangan tegangan tekan ijin beton melalui $\beta = 0.5$.

Juga mungkin untuk memperhitungkan beban lalu lintas sebesar misalnya ≈ 4 KN/m², dengan demikian tegangan ijin kabel tidak perlu dikurangi dan faktor β dapat diambil lebih besar (≈ 0.55).

Pendekatan luas penampang berdasarkan 'tegangan normal yang telah dikurangi' tidak memerlukan besaran 'kekakuan lentur' gelagar dan pilon. Makin besar kekakuan lentur gelagar, makin besar beban yang terpikul oleh gelagar dan kabel memikul lebih sedikit. Sehingga gelagar dengan kekakuan tak terhingga akan memikul seluruh beban dan kabel tidak diperlukan. Demikian pembagian gaya secara rinci ditentukan oleh kekakuan lentur gelagar.

Penampang gelagar A_L dapat dianggap 'sama' walaupun momen inersia I_L berlainan. Dengan menaikkan tinggi penampang boks maka momen inersia dapat menjadi empat kali lipat sedangkan penampang sedikit bertambah besar (karena hanya badan menjadi lebih tinggi). Sebagai contoh untuk jarak antar pilon sebesar 300 m pada jembatan cable-stay ganda, dapat digunakan gelagar dengan tinggi 2 - 4 m karena momen lentur dan kekakuan gelagar saling menyesuaikan. Tinggi gelagar berada antara 0.5 - 1.5% dari jarak pilon ($2L$) untuk jembatan cable-stay ganda dan antara 1 - 3% dari bentang (L) untuk jembatan stay tunggal. Demikian tinggi gelagar dapat dipilih antara batas-batas tersebut dan berdasarkan penampang A_L dapat direncanakan penampang gelagar dan momen inersia yang diperlukan.

Hal yang sama berlaku untuk pilon. Berdasarkan penampang A_p dapat direncanakan berbagai momen inersia I_p yang tergantung pada bentuk pilon (lebar sesuai

keperluan lalu lintas, penampang boks atau I).

Bila jembatan cable-stay direncanakan dengan anggapan bahwa gelagar akibat pengaruh beban tetap akan berperilaku sebagai gelagar diatas perletakan 'tetap', maka gaya kabel dapat diturunkan dari reaksi vertikal gelagar pada perletakan tetap. Dengan banyak stay pada jarak a , reaksi vertikal ialah ga (dengan g = berat gelagar per satuan panjang) dan gaya kabel $T = ga/\sin \alpha$ (dengan α = sudut antara kabel dan gelagar). Pendekatan tersebut hanya berlaku untuk prarencana gaya kabel. Dengan menambah $\approx 10\%$ akan diperoleh gaya kabel akibat beban mati dan hidup untuk dimensi perkiraan kabel.

Penampang perkiraan dari pra-rencana masih harus disesuaikan setelah dilakukan perhitungan akhir secara rinci.

PUSTAKA :

J. BRAKEL :

' Tuibruggen ', T.H. Delft, 1983, yang akan terbit dalam edisi bahasa Indonesia melalui komisi kerja sama Indonesia - Belanda.

Penulis :

Ir. Lanneke Tristante, Peneliti Madya Bidang Keahlian Jembatan Pelengkap Jalan. Bekerja di Direktorat Bina Program Jalan Bina Marga Tahun 1970-1979 dan di Pusat Litbang Jalan tahun 1979 - Sekarang.