

PERI LAKU PYLON YANG LANGSING

Th. A. Adisoebagio

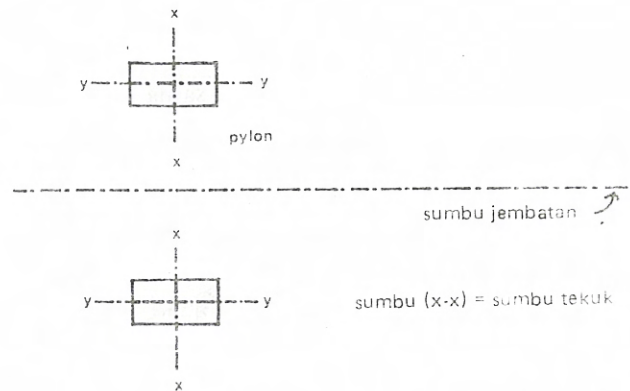
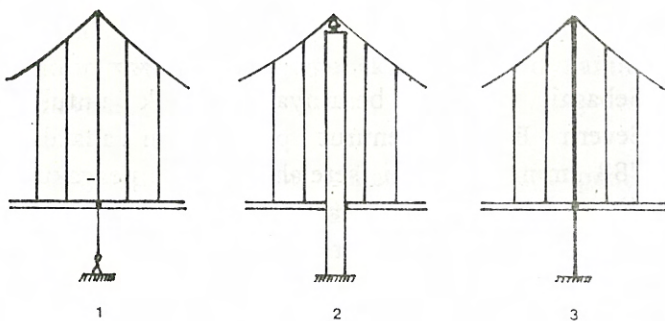


Tulisan ini dimaksudkan untuk menjabarkan peri laku pylon langsing terhadap pembebanan jembatan. Puncak pylon akan tertarik dan bergeser sehingga menyebabkan komponen vertikal kabel bekerja excentris. Dampaknya merupakan fungsi dari kekakuan lentur EI pylon yang jika diatur secara tepat akan menghasilkan suatu desain yang ekonomis.

Dalam praktek dapat dibedakan adanya tiga sistim pylon yaitu :

1. Pylon dengan tumpuan sendi dipangkalnya. Sistim ini dipakai pada jembatan dengan bentang pendek sekitar 350 meter.
2. Pylon yang pangkalnya terjepit sedangkan kabel dipasang pada pelana yang dapat bergerak dipuncak. Sistim ini adalah untuk jembatan dengan bentang yang lebih besar.
3. Pylon dengan pangkal terjepit dan kabel dipasang mati pada puncaknya. Cara demikian dipakai pada jembatan dengan long span dan merupakan pylon yang langsing dengan kelangsingan sekitar 80.

Desain pylon pada hakekatnya terikat pada masalah teori tekuk, karenanya harus sedemikian rupa sehingga perhitungan tekuk terjadi terhadap sumbunya yang tegak lurus terhadap sumbu jembatan. Untuk menjamin ini kedua pylon itu perlu dikopel menjadi suatu konstruksi portal. Kopeling - kopeling akan memperkecil panjang tekuk pylon.



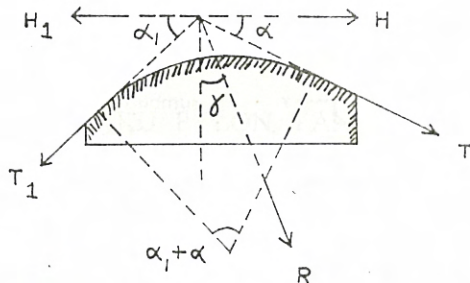
Apabila pylon dibangun dari konstruksi baja maka dapatlah diketahui kualitas bahannya mengingat kelangsingannya adalah sekitar 80. Berdasarkan perhitungan desain elastik dan dengan harga E bahan yang boleh diambil konstan maka dengan rumus tekuk Euler dapatlah ditetapkan bahwa kualitas bahannya harus mempunyai tegangan proporsional paling kecil sebesar :

$$\sigma_p = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^6}{80^2} = 3235 \text{ kg/cm}^2.$$

Yang berarti bahwa bajanya adalah setidaknya Fe 510 ataupun dari kualitas tinggi seperti baja silicon jika tegangan yang timbul adalah besar. Tetapi tidak selamanya pylon itu dibangun dari baja. Beton adalah bahan yang bagus sekali untuk dipakai memikul gaya tekan. Dengan menggunakan sistim bekisting yang tepat maka pelaksanaannya dapat menjadi sederhana dan cepat. Memang harus diakui bahwa konstruksi fondasinya akan menjadi lebih berat. Meskipun demikian penggunaan beton tetap tidak mustahil dapat menjadi lebih

ekonomis mengingat harga baja masih (tetap) tinggi. Jembatan gantung yang menggunakan pylon dari beton contohnya adalah Humber Bridge dengan bentang utama 1410 meter dan selesai dibangun tahun 1980 (?).

Dalam mendesain pylon kadang - kadang terlihat adanya kesan bahwa jika pylon merupakan garis bisectris dari sudut yang diapit oleh kabel tengah dan tepi maka gaya resultante kabel di puncak pylon akan vertikal arahnya. Anggapan demikian pasti tidak benar jika kabel dipasang melalui pelana yang mati kedudukannya. Pelana demikian disebut Gleitlager. Dengan timbulnya gesekan antara kabel pelana jelaslah bahwa gaya kabel tengah T tidaklah akan sama besarnya dengan gaya kabel tepi T_1 meskipun sudutnya sama. Perhitungannya adalah demikian :



Hubungan antara gaya T_1 dan T menjadi :

$$T_1 = T \cdot e^{-\mu(\alpha + \alpha_1)}$$

Dimana μ adalah koefisien gesekan antara pelana dan kabel.

Selanjutnya besar perbedaan horizontal gaya kabel T_1 dan T menjadi :

$$H - H_1 = H \left| 1 - \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha \cdot e^{\mu(\alpha + \alpha_1)}} \right|$$

sedangkan resultante R dari gaya - gaya kabel membuat sudut dengan garis vertikal sebesar :

$$\text{tg } \gamma = \frac{\cos \alpha \cdot e^{\mu(\alpha + \alpha_1)} - \cos \alpha_1}{\sin \alpha \cdot e^{\mu(\alpha + \alpha_1)} + \sin \alpha_1}$$

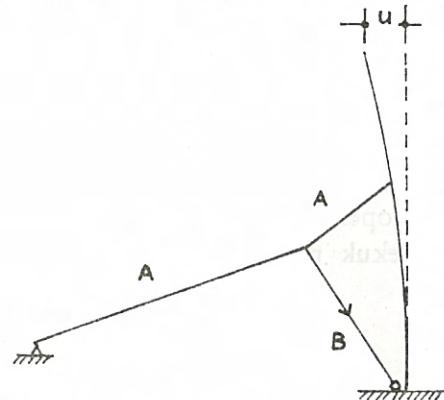
Dari rumus - rumus diatas terlihat dengan jelas bahwa jika tidak ada gesekan, jadi untuk harga $\mu = 0$, gaya kabel T_1 akan sama besarnya dengan T . Meskipun demikian tetap tidak akan menjadi kan arah gaya resultante R menjadi vertikal.

Besarnya koefisien gesekan μ diambil 1/7 tetapi diduga harganya lebih dekat pada 0,3. Misalkan di-desain dengan sudut $\alpha = \alpha_1 = 30^\circ$ maka dengan $\mu = 0,18$ (koefisien gesekan antara besi tuang dan besi tumbuk) didapat harga -harga :

$$\begin{aligned} H - H_1 &= 0,172 H \\ \text{tg } \gamma &= 0,1628 \end{aligned}$$

Dalam hal kedua sudut itu tidak sama besarnya seperti $\alpha = 20^\circ$ dan $\alpha_1 = 30^\circ$ harga - harga nya menjadi : $H - H_1 = 0,212 H$ dan $\text{tg } \gamma = 0,2594$. Dari contoh itu dapat diketahui bahwa dengan ataupun tanpa gesekan, desain dengan sudut $\alpha = \alpha_1$ tetap akan memberikan hasil yang lebih baik.

Apabila dikehendaki bahwa jembatan dalam keadaan siap pakai pylon - pylonnya berdiri vertikal maka pada waktu montase, puncak pylon harus diberi pullback sebesar u . Dengan demikian jika nanti gelegar pengkaku jembatan dipasang maka puncak pylon akan bergeser kedalam sejauh pullback u sehingga pylon menjadi vertikal. Bandingkan hal ini dengan masalah zeeg pada montase jembatan konstruksi rangka batang. Pemberian pullback dapat dilaksanakan dengan menggunakan dua kabel spnner A dan B. Pengaturannya dilakukan melalui kabel B dengan cara trial & error.



Sebagai ilustrasi, besarnya pullback untuk Severn Bridge menurut perhitungan adalah 788 mm. Tetapi setelah gelagar pengkaku dipasang ternyata puncak pylon tidak kembali sepenuhnya masih tersisa pullback sebesar 22 mm. Ini berarti bahwa pylon Severn Bridge pada keadaan kosong tidaklah vertikal benar.

Mengingat tingginya pylon maka hal itu secara visual tidak mengganggu. Kecuali untuk mengatur besarnya pullback, kabel spanner A dan B sekaligus bermanfaat untuk meredam getaran yang terjadi pada pylon akibat angin selama montase.

Tugas utama dari pylon adalah memikul gaya vertikal yang ditimbulkan oleh kabel dipuncak. Disamping itu pylon harus juga diperhitungkan terhadap gaya - gaya yang bekerja dalam arah longitudinal dan transversal jembatan. Jadi gaya - gaya yang dipakai untuk mendesain pylon dapat disimpulkan sebagai berikut :

Beban vertikal.

1. Berat sendiri.
2. Gaya kabel akibat : beban tetap, muatan bergerak dan perubahan suhu.

Beban longitudinal.

1. Melenturnya pylon.
2. Angin.
3. Tidak sentrisnya letak pelana kabel.

Beban transversal.

1. Angin.
2. Tidak sentrisnya letak pelana kabel.
3. Perubahan suhu.
4. Tegangan sekunder akibat bergoyangnya portal pylon oleh angin.

Beban gempa.

Biasanya dimulai dengan suatu desain pendahuluan. Untuk perhitungan beban gempa dianggap dulu sebagai suatu gaya statis lateral. Dalam arah longitudinal besarnya diambil 5 % dari berat tetap sedangkan untuk arah transversal sebesar 10 %. Tentu saja perhitungan pendahuluan demikian harus diperhalus lagi pada desain akhir dengan menggunakan cara dynamic analysis.

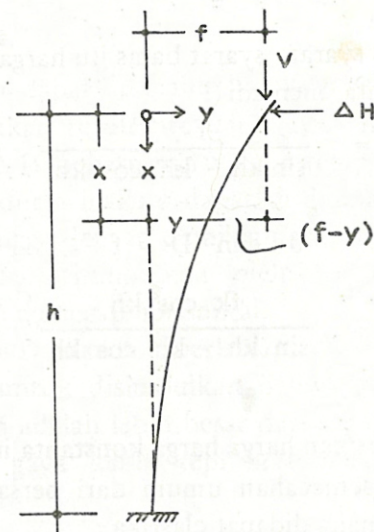
Secara umum dapat dikatakan bahwa pembebanan pada pylon pada pokoknya terdiri dari gaya kabel, angin dan berat sendirinya.

Pengaruh angin menjadi tidak seberapa dibandingkan dengan yang ditimbulkan oleh gaya - gaya vertikal yang besar - besar itu. Seperti telah diutarakan dimuka desain pylon diatur

sedemikian rupa sehingga kelangsingannya terhadap sumbu yang tegak lurus terhadap sumbu jembatan adalah yang menentukan. Apabila jembatan dimuati maka pylon yang semula berdiri lurus akan melentur dan karenanya gaya - gaya vertikal yang besar itu sekarang bekerja excentris. Dengan demikian dalam membuat analisa pylon terdapat dua keadaan pokok yang perlu dipertimbangkan yaitu masing - masing adalah :

1. Seluruh bentang jembatan dimuati penuh. Akibatnya komponen vertikal dari gaya kabel menjadi maksimum V_{max} sedangkan puncak pylon bergeser sejauh f .
2. Hanya bentang utama jembatan saja yang dimuati penuh. Dengan demikian puncak pylon akan bergeser secara maksimal kedalam sejauh f_{max} dan komponen vertikal gaya kabel menjadi V yang koresponden.

Keadaan pembebanan pada butir (2) merupakan kasus yang kritis dan menjadi dasar untuk mendesain pylon.



Pada waktu puncak pylon bergeser ke arah bentang utama maka kabel tepi akan menghalangi dan bentuknya menjadi sedikit berubah. Hal ini disebabkan karena kabel dipasang mati pada puncak pylon.

Dikabel tepi timbul reaksi berupa suatu gaya tambahan sebesar ΔT . Jika gaya tambahan itu diuraikan dalam komponen vertikal dan horisontal maka akan didapat suatu model seperti pada gambar.

Dari model itu dengan anggapan bahwa harga EI pylon adalah konstan, dapatlah dipelajari bagaimana gaya ΔH besarnya bervariasi dengan kelangsingan pylon. Untuk solusi matematikanya dipilih disini cara teori beam - columns. Bentuk persamaan deferensial dari tekuk elastis pylon adalah ;

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + V \frac{d^2 y}{dx^2} = 0$$

dengan harga $k^2 = \frac{V}{EI}$ didapat pemecahan

umum sebagai berikut

$$Y = A \sin kx + B \cos kx + Cx + D$$

Harga konstanta A, B, C dan D didapat dari syarat - syarat batas.

Untuk $x = 0$ didapat $y = f$ dan $\frac{d^2 y}{dx^2} = 0$

$x = h$ didapat $y = 0$ dan $\frac{dy}{dx} = 0$

Dengan syarat - syarat batas itu harga - harga konstanta menjadi :

$$A = \frac{-f}{\sin kh - kh \cos kh}$$

$$B = 0 \text{ dan } D = f$$

$$C = \frac{fk \cos kh}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Substitusikan harga harga konstanta itu kedalam rumus pemecahan umum dari persamaan diferensial maka didapat elastika :

$$Y = \frac{\sin kh - \sin kx + k(x-h) \cos kh}{\sin kh - kh \cos kh} \cdot f$$

Besarnya gaya ΔH dapat dihitung dengan persamaan :

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} + M_x = 0$$

Dari gambar dapat diketahui besarnya $M_x = V(f - y) - \Delta H \cdot x$. Setelah harga y disubstitusikan dan dengan sedikit perhitungan maka didapat :

$$\Delta H = -Vfk \frac{\cos kh}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Dengan telah didapatnya elastika maka dengan mudah dapat dihitung besarnya nomen dan gaya lintang pada suatu irisan pylon,

Besarnya momen :

$$\begin{aligned} M_x &= -EI \frac{d^2 y}{dx^2} \\ &= -Vf \frac{\sin kx}{\sin kh - kh \cos kh} \end{aligned}$$

Gaya lintang :

$$\begin{aligned} D_x &= \frac{dM}{dx} \\ &= -Vfk \frac{\cos kx}{\sin kh - kh \cos kh} \end{aligned}$$

Dari rumus - rumus yang dihasilkan adalah menarik untuk mempelajari kemungkinan ambruknya pylon akibat puncaknya bergeser secara tak terhitung. Teoritis hal itu akan terjadi pada kasus,

$$\sin kh - kh \cos kh = 0$$

Dengan iterasi didapat harga $kh \approx 4,49$.

Disamping petunjuk akan adanya bahaya besar jika dalam mendesain pylon diambil harga $kh = 4,49$ maka sudah barang tentu harus juga diusahakan supaya momen - momen yang timbul menjadi sekecil mungkin. Momen - momen yang dimaksudkan itu adalah momen maksimum dan momen jepitan dipangkal pylon.

Besarnya adalah :

Momen maksimum :

$$M_x = -Vf \frac{\sin kx}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Harganya menjadi maksimum jika $\sin kx = 1$

$$M_{\max} = -Vf \frac{1}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Momen pangkal :

$$M_x = Vf \frac{\sin kx}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Momen pangkal didapat dengan harga $x = h$

$$M_i = -Vf \frac{\sin kh}{\sin kh - kh \cos kh}$$

Ambil kasus partikular : $kh = \frac{\pi}{2}$

maka didapat,

$$M_{\max} = M_i = -Vf$$

Ini tidak usah mengherankan sebab untuk $kh = \frac{\pi}{2}$ harga $\cos kh$ menjadi nol, jadi besarnya $\Delta H = 0$. Lihat rumusnya dihal 4.

Dengan adanya kemungkinan bahwa gaya ΔH dapat menjadi nol maka timbul pertanyaan pada keadaan yang bagaimana gaya kabel tepi akan bertambah sedangkan gaya kabel tengah menjadi berkurang yang berarti bahwa pylon melentur kearah bentang tengah ? Dari studi mengenai besar dan arah gaya lintang dipuncak pylon menunjukkan bahwa hal itu akan terjadi apabila harga kh berada dalam kurun antara $(4,49 - \pi/2)$.

Sebagai contoh :

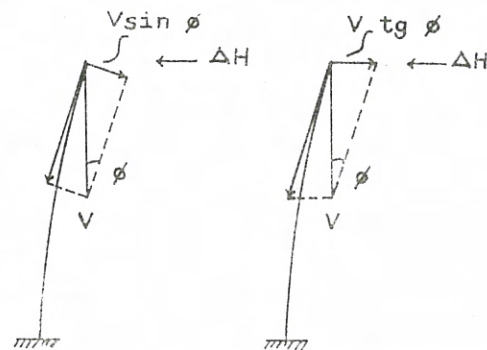
Untuk harga : $kh = \pi$

maka didapat,

$$H = + \frac{Vfk}{\pi}$$

Harga D_x dipuncak pylon, jadi $x = 0$, adalah

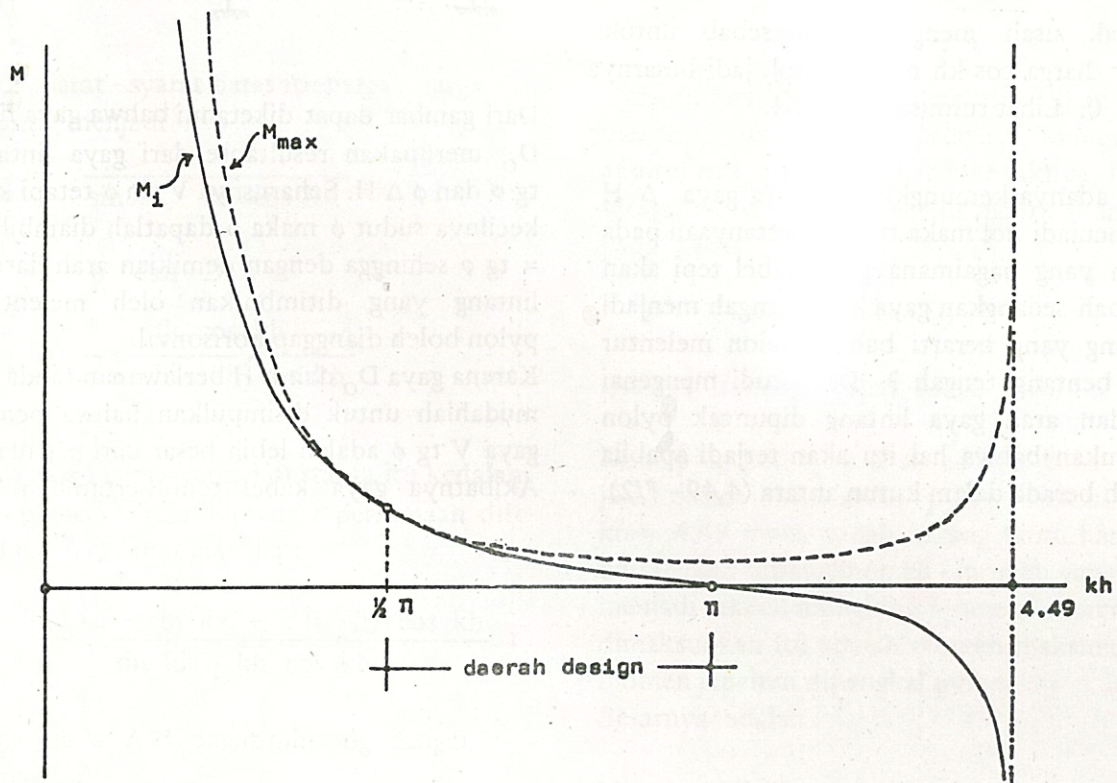
$$D_o = -\frac{Vfk}{\pi}$$



Dari gambar dapat diketahui bahwa gaya lintang D_o merupakan resultante dari gaya lintang $V \sin \phi$ dan $\phi \Delta H$. Seharusnya $V \sin \phi$ tetapi karena kecilnya sudut ϕ maka ϕ dapatlah diambil $\sin \phi = \tg \phi$ sehingga dengan demikian arah dari gaya lintang yang ditimbulkan oleh melenturnya pylon boleh dianggap horisontal.

Karena gaya D_o dan ΔH berlawanan tanda maka mudahlah untuk disimpulkan bahwa pengaruh gaya $V \tg \phi$ adalah lebih besar dari ϕ pada ΔH . Akibatnya gaya kabel tepi bertambah besar.

kh	cos kh	sin kh	kh cos kh	sin kh - kh cos kh	$\frac{1}{\sin kh - kh \cos kh}$	$\frac{\sin kh}{\sin kh - kh \cos kh}$
0.00	1.00000	0.00000	0.00000	0.00000	∞	∞
0.25	0.96891	0.24740	0.24222	0.00518	193.05019	47.76061
0.50	0.87758	0.47943	0.43879	0.04064	24.60629	11.79699
0.75	0.73169	0.68164	0.54876	0.13288	7.52558	5.12974
1.00	0.54030	0.84147	0.54030	0.30117	3.32038	2.79400
1.25	0.31532	0.94898	0.39415	0.55483	1.80235	1.71039
1.50	0.07074	0.99749	0.10611	0.89138	1.12185	1.11904
$\frac{\pi}{2}$	0.00000	1.00000	0.00000	1.00000	1.00000	1.00000
1.75	-0.17825	0.98399	-0.31193	1.29592	0.77165	0.75929
2.00	-0.41615	0.90930	-0.83230	1.74160	0.57418	0.52210
2.25	-0.62817	0.77807	-1.41338	2.19145	0.45631	0.35504
2.50	-0.80114	0.59847	-2.00285	2.60132	0.38442	0.23006
2.75	-0.92430	0.38166	-2.54182	2.92298	0.34211	0.13057
3.00	-0.98999	0.14112	-2.96997	3.11109	0.32143	0.04536
π	-1.00000	0.00000	-3.14157	3.14157	0.31831	0.00000
3.25	-0.99413	-0.10820	-3.23092	3.12272	0.32023	-0.03464
3.50	-0.93646	-0.35078	-3.27761	2.92683	0.34166	-0.11984
3.75	-0.82056	-0.57156	-3.07710	2.50554	0.39911	-0.22811
4.00	-0.65364	-0.75680	-2.61456	1.85776	0.53828	-0.40737
4.25	-0.44609	-0.89499	-1.89588	1.00089	0.99911	-0.89419
4.49	-0.22056	-0.97537	-0.99031	0.00000	∞	∞



Dari semua rumus yang didapat yaitu untuk momen, gaya lintang dan ΔH ternyata besarnya bervariasi dengan harga kh yang seperti diketahui berkaitan dengan kekakuan lentur EI pylon. Dengan demikian dapatlah dipelajari untuk harga kh berapa suatu design pylon menjadi baik. Dari tabel pada halaman 6 yang kemudian dibuat diagramnya di halaman 6 dapatlah diketahui bahwa bila harga $kh = \frac{\pi}{2}$ maka akan didapat design pylon dengan momen minimum. Untuk harga $kh > \pi$ besarnya beda antara $M_{\max}$ dan M_i menjadi tidak terkendali. Itulah sebabnya mengapa dalam mendesign pylon diambil harga kh antara $(\frac{\pi}{2} - \pi)$.

Dimuka telah disinggung bahwa besarnya gaya ΔH adalah kecil Hal itu dapat ditunjukkan dengan suatu contoh. Data - data jembatannya adalah :

$$\begin{aligned} n &= 0,1 \\ h &= 70 \text{ m} \\ f &= 0,135 \text{ m} \\ H &= 2000 \text{ t} \\ V &= 2.H \operatorname{tg} \alpha = 1600 \text{ t} \\ kh &= 2,0 \end{aligned}$$

$$\Delta H = - Vfk \frac{\cos kh}{\sin kh - kh \cos kh}$$

$$\begin{aligned} &= - 1600.0,135. \frac{2}{70} \frac{\cos 2}{\sin 2 - 2 \cos 2} \\ &= 1475 \text{ kg.} \end{aligned}$$

Harga ini kecil untuk mempengaruhi besarnya gaya kabel T_1 .

DAFTAR PUSTAKA

Troitsky MS. Cable - Stayed Bridges. Crosby Lockwood Staples, London.

Jong de H. ir, Hangbruggen Technische Hogeschool Delft Afdeling de Civiele Tecniek November 1979.

Melan J., Konstruktion der Hängebrücken Handbuch der Ingenieurwissenschaften II Band. Leipzig. Verlag von Wilhelm Engelmann 1906.

Penulis :

Ir. Th. A. Adisoebagio adalah dosen pada jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Bandung dalam bidang Konstruksi Baja dan Konstruksi Kayu.