

GAYA PRATARIK AWAL JEMBATAN BERUJI KABEL MENGUNAKAN PENDEKATAN BALOK BENTANG JAMAK (MULTI SPAN BEAM APPROACH)

Anton Husen Purboyo¹ dan Hinawan Teguh Santoso²

¹Direktorat Jenderal Bina Marga, Kementerian PUPR
Jln Pattimura 20, Kebayoran Baru, Jakarta Selatan
e-mail: a.huspur@gmail.com

²Program Studi Teknologi Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Pekerjaan Umum
Jln Prof. Soedharto, Tembalang, Kota Semarang
e-mail: hinawan.santoso@politeknikpu.ac.id

Abstract: This article describes the procedure for calculating the initial pretension force in a cable-stayed bridge using the multi span beam approach. This method was chosen because it allows a simple and fast calculation without requiring an iterative procedure. Furthermore, calculations performed using this method result in a reasonable distribution of cable tension forces and meet the design requirements for a cable-stayed bridge. Another advantage is that this method is independent of the software features utilized, allowing designer to optimize the cable-stayed bridge structure model more freely. To verify the calculations, a comparison of two models of cable-stayed bridges with symmetric and asymmetric geometry is made. Compared to the methods used in the literature, the multi span beam approach can lead to lower bending moment in the bridge deck and lateral displacement of the pylon. The distribution of the initial pretension force due to its own weight as a function of the angular value between the cable and the bridge deck shows a rational behavior and can represent the effectiveness of the cable carrying capacity as a function of the angular value between the cable and the bridge deck. This is indicated by the value of the cable pretension force that increases when the position of the support point is further away from the pylon.

Keywords: multi span beam approach, initial pretension, cable-stayed bridge

Abstrak: Studi ini membahas prosedur perhitungan gaya tarik awal kabel pada jembatan beruji kabel melalui pendekatan balok bentang jamak. Metode ini dipilih karena menawarkan kemudahan dan kecepatan dalam perhitungan tanpa harus melakukan proses iterasi. Selain itu, perhitungan dengan metode ini memberikan hasil distribusi gaya tarik kabel yang rasional dan memenuhi persyaratan perancangan jembatan beruji kabel. Keuntungan lain adalah metode ini tidak tergantung pada fitur perangkat lunak yang digunakan sehingga memudahkan bagi para perencana untuk dapat lebih leluasa melakukan optimasi terhadap model struktur jembatan beruji kabel. Perbandingan dua model jembatan beruji kabel dengan geometri simetris dan asimetris dilakukan untuk memverifikasi perhitungan. Berdasarkan perbandingan tersebut, metode pendekatan balok bentang jamak dapat memberikan besaran momen lentur pada dek jembatan dan deformasi lateral pada *pylon* yang lebih kecil dibandingkan dengan prosedur yang digunakan dalam literatur. Distribusi gaya penarikan awal kabel akibat beban mati yang bekerja dengan menggunakan pendekatan balok bentang jamak menunjukkan perilaku yang rasional dan dapat merepresentasikan efektifitas daya dukung ruji kabel sebagai fungsi dari nilai sudut antara ruji kabel dan dek jembatan. Hal ini ditunjukkan dengan nilai gaya tarik kabel yang semakin besar apabila posisi titik tumpu semakin menjauhi *pylon*.

Kata kunci: : pendekatan balok bentang jamak, gaya pratarik awal, jembatan beruji kabel

PENDAHULUAN

Perkembangan yang perlu dicatat dalam kemajuan konstruksi jembatan adalah penggunaan struktur jembatan beruji kabel yang diadopsi secara luas di seluruh dunia sejak tahun 1960-an karena keunggulannya dan ekonomisnya (Wittfoht, 1984; Holger Svensson, 2012). Jembatan

gantungan konvensional berevolusi menjadi jembatan beruji kabel (*cable-stayed*) dengan menghilangkan kebutuhan akan penjangkaran yang kuat dari kabel suspensi sehingga mengurangi dampak terhadap lingkungan. Kisaran bentang ekonomis untuk jembatan beruji kabel antara 100-500 m. Untuk bentang lebih dari 1000 m, maka jembatan gantung konvensional

masih merupakan pilihan utama. Namun demikian, dikarenakan tampilan jembatan beruji kabel secara visual terlihat lebih elegan dan estetis, maka sistem jembatan ini juga lazim diaplikasikan untuk jembatan dengan bentang kurang dari 100 m, seperti jembatan pejalan kaki.

Pengembangan lain dari jembatan beruji kabel ini adalah sistem *extradose* yang dikembangkan sekitar tahun 1990-an dengan penggunaan *pylon* pendek dan penggabungan keunggulan sistem pratarik dan ruji kabel (Virlogeux, 2002 dan Sakran, 2010). Pada umumnya, jembatan beruji kabel menggunakan *pylon* tinggi (umumnya panjang bentang/5) untuk menopang gelagar dengan bentang panjang sehingga menyebabkan besarnya sudut kemiringan kabel terhadap sumbu dek jembatan sekitar 30° - 80° . Besarnya sudut kemiringan kabel ini menyebabkan variasi yang signifikan dalam gaya tarik kabel akibat deformasi lantai jembatan selama menerima beban hidup (Walther, 1988; Gottemoeller, 2004). Jembatan *extradose* memiliki *pylon* pendek (umumnya panjang bentang/10) akan memiliki sudut kemiringan kabel terhadap sumbu jembatan jauh lebih kecil, yaitu kurang dari 30° . Hal ini berimplikasi pada variasi tegangan di kabel menjadi tidak terlalu besar. Keuntungan lainnya dari jembatan beruji kabel ini adalah jembatan tipe ini memiliki kinerja lebih baik dalam hal menahan beban angin dan gempa dibandingkan tipe jembatan lainnya (Sakran dan Rao, 2010).

Kelayakan kinerja jembatan beruji kabel mengacu pada kondisi yang dapat dicapai masing-masing komponennya pada saat kondisi optimalnya melalui pemenuhan terhadap persyaratan perancangan dan spesifikasi. Penyelesaian konstruksi jembatan beruji kabel juga memerlukan tinjauan terhadap banyak faktor pengaruh dan harus diperhitungkan secara tepat. Pada kondisi ideal, elemen-elemen jembatan seperti balok, *pylon*, dan kabel harus memenuhi persyaratan terkait dengan spesifikasi perancangan. Pada prinsipnya, ketiga kondisi di bawah ini hendaknya dapat dipenuhi selama melakukan perancangan struktur jembatan beruji kabel, yaitu:

1. Kondisi tegangan gelagar utama harus didasarkan pada prinsip bahwa tegangan lentur yang terjadi adalah kecil, serta distribusi be-

ban merata akibat beban mati, dengan mengakomodasi pengaruh dari beberapa beban hidup.

2. Distribusi tegangan dan geometri jembatan ditentukan langsung oleh gaya tarik kabel, dimana semakin pendek kabel maka makin kecil gaya tarik yang diberikan dan gaya tarik paling besar bekerja pada kabel paling luar atau kabel paling panjang.
3. Gaya reaksi tumpuan pada pilar-pilar tepi atau pilar tambahan harus memiliki tekanan yang memadai pada saat menahan beban mati sedemikian rupa sehingga tidak menyebabkan gaya reaksi negatif yang besar dari tumpuan saat menerima beban hidup.

Berdasarkan kajian (Wang et. al., 1993), metode untuk mendapatkan besarnya gaya tarik ruji kabel pada saat struktur jembatan hanya menerima beban mati adalah dengan menggunakan metode iterasi. Nilai awal gaya pratarik kabel didapatkan dengan asumsi yang kemudian digunakan sebagai kondisi awal dan selanjutnya dilakukan iterasi hingga dicapai kondisi keseimbangan pada model *finite element* jembatan tersebut. Hal ini mengindikasikan bahwa geometri struktur jembatan pada saat menerima beban mati akan sangat tergantung pada asumsi yang digunakan dalam penentuan nilai awal pratarik ruji kabel. Permasalahannya adalah dimungkinkan dapat terjadi pengambilan asumsi nilai awal pratarik yang berulang akibat belum dicapainya kondisi optimal pada akhir perhitungan iterasi. Selain itu, pengguna tidak diberikan kesempatan untuk melakukan redistribusi gaya awal pratarik ruji kabel, khususnya jembatan beruji kabel asimetris. Hal ini dapat mengakibatkan desain jembatan menjadi boros sebagai akibat dimensi *pylon* yang terlalu besar untuk mengkompensasi terhadap perpindahan lateral *pylon* yang melebihi perpindahan izinnnya.

Tulisan ini membahas prosedur menghitung gaya tarikan awal (*initial pretension*) elemen kabel pada saat pelaksanaan konstruksi jembatan beruji kabel, dimana beban yang baru bekerja adalah beban mati. Adapun pendekatan yang digunakan dalam melakukan perhitungan besarnya beban tarikan awal tersebut didasarkan pada sistem balok bentang jamak menerus (*continuous multi span beam*). Terdapat beberapa kemudahan yang ditawarkan dalam melakukan perhitungan besarnya gaya tarikan awal dengan menggunakan pendekatan ini, yaitu:

1. Proses perhitungan sederhana serta dapat menghasilkan distribusi gaya tarik kabel yang cukup logis dimana gaya tarik kabel akan semakin besar apabila menjauhi *pylon*.
2. Khusus untuk jembatan beruji kabel asimetris, diperlukan adanya pemeriksaan tambahan. Pemeriksaan tambahan ini bertujuan untuk mengetahui besarnya perpindahan lateral *pylon* akibat ketidakseimbangan komponen mendarat gaya tarik kabel yang bekerja pada *pylon*. Apabila berdasarkan perhitungan, baik pada kondisi layan maupun pada saat penarikan awal kabel, terjadi perpindahan lateral yang besarnya melebihi nilai batas deformasi izin ($L/400$), maka diperlukan adanya redistribusi gaya tarik kabel sedemikian rupa sehingga *pylon* hanya menderita beban aksial saja. Pendistribusian gaya penarikan kabel tersebut tetap mengikuti prinsip dimana makin panjang kabel maka gaya tarik yang bekerja semakin besar dengan faktor keamanan minimum 2,5.

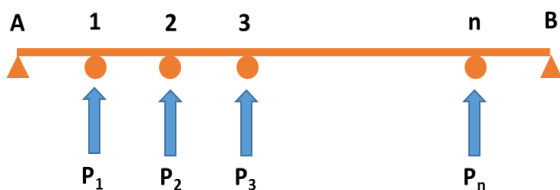
TUJUAN PENELITIAN

Maksud dari studi adalah melakukan perhitungan gaya penarikan awal kabel pada jembatan beruji kabel melalui pendekatan balok bentang jamak (*multi span beam approach*).

Tujuan dari studi ini adalah mendapatkan solusi algoritma yang dapat memberikan hasil besaran gaya penarikan awal kabel pada jembatan beruji kabel secara lebih sederhana dan cepat dengan tetap memperhatikan aspek geometri jembatan.

TINJAUAN PUSTAKA

Perhitungan besarnya gaya penarikan kabel dengan menggunakan pendekatan balok bentang jamak diawali dengan idealisasi elemen balok pada jembatan beruji kabel sebagai model balok bentang jamak (Wang, 1953; Hicks, 2009), seperti diperlihatkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Model balok bentang jamak

Deformasi yang terjadi pada balok ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini:

1. Deformasi akibat beban merata (beban mati):



Gambar 2. Model balok dengan beban merata

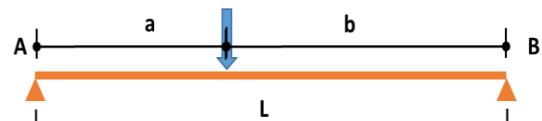
Deformasi pada balok akibat beban merata ditentukan dengan menggunakan **Pers. 1**.

$$\delta = \frac{qDL \cdot x}{24EI} (x^3 - 2Lx^2 + L^3) \tag{1}$$

dimana:

- qDL = Beban merata per satuan panjang akibat beban mati
- EI = Modulus elastisitas dikalikan dengan inersia penampang
- L = Panjang bentang
- δ = Deformasi balok
- x = Koordinat balok

2. Deformasi akibat beban terpusat (gaya tumpu kabel):



Gambar 3. Model balok dengan beban terpusat

Deformasi pada balok akibat beban terpusat ditentukan dengan menggunakan **Pers. 2**.

$$\Delta = \frac{P \cdot (L-a) \cdot x}{6EI \cdot L} (L^2 - (L-a)^2 + x^2) \tag{2a}$$

untuk $x \leq a$

$$\Delta = \frac{P \cdot (L-x) \cdot a}{6EI \cdot L} (2 \cdot L \cdot x - a^2 - x^2) \tag{2b}$$

untuk $x > a$

dimana:

- P = Beban terpusat pada balok
- EI = Modulus elastisitas dikalikan dengan inersia penampang
- L = Panjang bentang
- Δ = Deformasi balok
- x = Koordinat balok
- a, b = Koordinat titik beban pada balok

Untuk mendapatkan besarnya nilai P, yaitu komponen vertikal gaya tarik kabel yang merupakan representasi dari gaya tumpu kabel pada balok

jembatan beruji kabel, maka dilakukan dengan menggunakan kaidah superposisi dengan menerapkan kondisi batas dimana lendutan pada setiap titik di mana P berada adalah sama dengan nol. Dengan melakukan prosedur perhitungan tersebut maka akan didapatkan n persamaan dengan n variabel (P_1, P_2, \dots, P_n). Metode matriks digunakan untuk penyelesaian persamaan-persamaan di atas, untuk setiap n jumlah kabel, maka akan didapatkan matriks n x n, sehingga akan didapatkan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \Delta_{11} & + & \Delta_{12} & \dots & \Delta_{1j} \\ \Delta_{21} & + & \Delta_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta_{i1} & + & \Delta_{i2} & \dots & \Delta_{ij} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_j \end{bmatrix} = [0] \quad (3)$$

dimana:

- Δ_{ij} = Lendutan pada balok di i akibat beban terpusat di j
- δ_i = Lendutan pada balok di i akibat beban mati merata

Dengan memisahkan variabel P pada suku pertama persamaan di atas, maka akan didapatkan bentuk persamaan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_j \end{bmatrix} = [0] \quad (4)$$

Apabila dinyatakan dalam notasi matriks, maka akan didapatkan bentuk **Pers. 5** sebagai berikut:

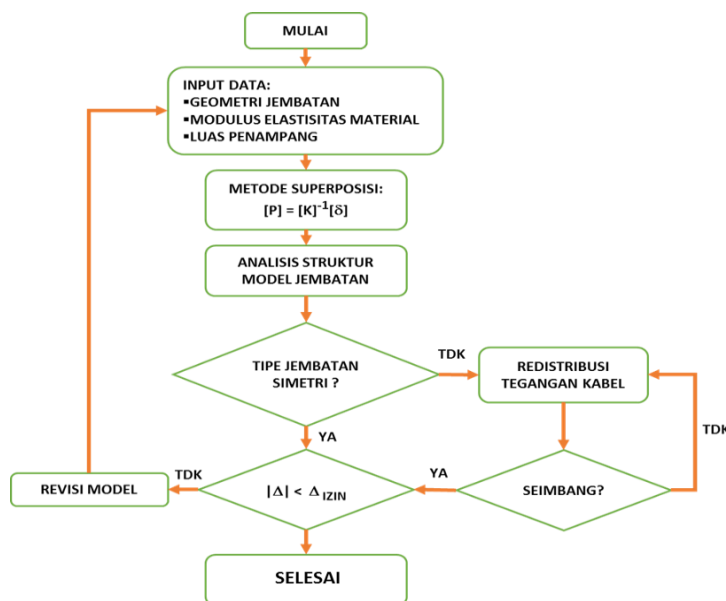
$$0 = [k][P] + [\delta] \quad (5)$$

Solusi untuk mendapatkan nilai P dari **Pers. 5** di atas adalah:

$$[P] = [k]^{-1}[\delta] \quad (6)$$

Setelah mendapatkan nilai masing-masing P dari **Pers. 6**, maka tahapan berikutnya adalah melakukan analisis struktur menggunakan model numerik. Analisis struktur tersebut dilakukan dengan mengaplikasikan gaya tarikan awal (*initial pretension*) pada setiap kabel dengan menggunakan besarnya nilai P dari perhitungan sebelumnya. Pada tahapan ini, pemeriksaan ditinjau hanya dengan mengaplikasikan beban mati struktur. Perilaku dari struktur jembatan beruji kabel yang diamati adalah deformasi pada balok, *pylon* dan kabel, dimana akibat beban mati tersebut kondisi tegangan dan defleksi struktur jembatan harus dipastikan masih berada dalam batas ambang keamanan sesuai dengan standar yang digunakan.

Sebagai verifikasi terhadap hasil perhitungan menggunakan model pendekatan yang diusulkan, maka dilakukanlah perbandingan terhadap 2 (dua) model jembatan beruji kabel dari hasil studi literatur. Bagan alir perhitungan dengan metode pendekatan balok bentang jamak diperlihatkan pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Bagan alir perhitungan dengan metode pendekatan balok bentang jamak

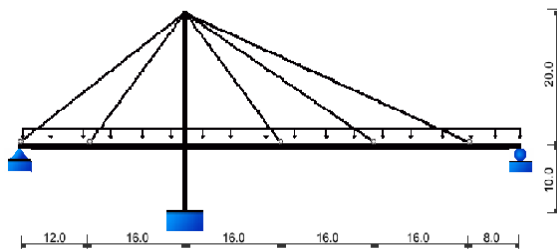
ANALISIS DAN VERIFIKASI MODEL

Berikut diberikan contoh perhitungan penarikan awal kabel pada jembatan beruji kabel dengan menggunakan pendekatan balok bentang jamak (*multi span beam approach*). Hasil perhitungan tersebut selanjutnya diverifikasi dengan beberapa contoh perhitungan yang didapatkan dari hasil studi literatur. Alat bantu yang digunakan dalam melakukan analisis struktur jembatan beruji kabel ini menggunakan perangkat lunak (*software*) *Midas Civil*.

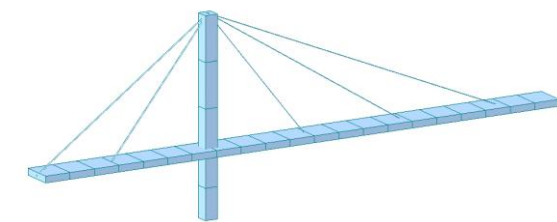
Model I (Jembatan Beruji Kabel Asimetris):

Referensi:	Midas Civil Tutorial (2011) <i>Example of Unknown Load Factors using Forward Construction Stage Analysis</i>
------------	---

Model jembatan pertama yang digunakan untuk verifikasi perhitungan merupakan model struktur jembatan beruji kabel asimetri. Bentuk dan geometri jembatan tersebut diperlihatkan pada **Gambar 5** dan **Gambar 6**.



Gambar 5. Model struktur jembatan beruji kabel asimetris (satuan panjang: meter)



Gambar 6. Model FEM struktur jembatan asimetris

Data propertis elemen yang digunakan dalam perhitungan model struktur jembatan disajikan pada **Tabel 1** sebagai berikut:

Tabel 1. Data propertis elemen jembatan

Komponen Jembatan	Nilai
Dek	
Modulus elastisitas (ton/m ²)	3,00 x 10 ⁶
Luas penampang (m ²)	4,38
Momen inersia (m ⁴)	0,92
<i>Poisson ' ratio</i>	0,3
Pylon	
Modulus elastisitas (ton/m ²)	3,00 x 10 ⁶
Luas penampang (m ²)	1,00
Momen inersia (m ⁴)	2,76
<i>Poisson ' ratio</i>	0,3
Kabel	
Modulus elastisitas (ton/m ²)	1,575 x 10 ⁷
Luas penampang (m ²)	0,0062; 0,0208
<i>Poisson ' ratio</i>	0,3

Nilai-nilai pada **Tabel 1** digunakan sebagai input data dalam melakukan perhitungan besarnya gaya tumpu kabel dengan menggunakan metode superposisi. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Mathcad* seperti tersaji berikut ini.

Modulus Elastisitas, E	$E_c := 29420\text{MPa}$
Cross section, Ac	$A_c := 4.38\text{m}^2$
Inersia, Ic	$I_c := 0.92\text{m}^4$
Berat jenis beton, Gc	$G_c := 24 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$

Beban Mati Dek Jembatan, qDL

$$qDL := G_c \cdot A_c = 105.12 \cdot \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Panjang Jembatan, m

$$L := 84\text{m}$$

Deformasi dek akibat beban merata, m

$$def_qDL(x) := \frac{qDL \cdot x}{24 \cdot E_c \cdot I_c} \cdot (x^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + L^3)$$

Deformasi dek akibat beban terpusat, m

$$def_P(x, a) := \begin{cases} \frac{(L - a) \cdot x}{6 \cdot E_c \cdot I_c \cdot L} \cdot [L^2 - (L - a)^2 - x^2] & \text{if } x \leq a \\ \frac{a \cdot (L - x)}{6 \cdot E_c \cdot I_c \cdot L} \cdot (2 \cdot L \cdot x - x^2 - a^2) & \text{if } x > a \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{def_P}(12\text{m}, 12\text{m}) & \text{def_P}(28\text{m}, 12\text{m}) & \text{def_P}(44\text{m}, 12\text{m}) & \text{def_P}(60\text{m}, 12\text{m}) & \text{def_P}(76\text{m}, 12\text{m}) \\ \text{def_P}(12\text{m}, 28\text{m}) & \text{def_P}(28\text{m}, 28\text{m}) & \text{def_P}(44\text{m}, 28\text{m}) & \text{def_P}(60\text{m}, 28\text{m}) & \text{def_P}(76\text{m}, 28\text{m}) \\ \text{def_P}(12\text{m}, 44\text{m}) & \text{def_P}(28\text{m}, 44\text{m}) & \text{def_P}(44\text{m}, 44\text{m}) & \text{def_P}(60\text{m}, 44\text{m}) & \text{def_P}(76\text{m}, 44\text{m}) \\ \text{def_P}(12\text{m}, 60\text{m}) & \text{def_P}(28\text{m}, 60\text{m}) & \text{def_P}(44\text{m}, 60\text{m}) & \text{def_P}(60\text{m}, 60\text{m}) & \text{def_P}(76\text{m}, 60\text{m}) \\ \text{def_P}(12\text{m}, 76\text{m}) & \text{def_P}(28\text{m}, 76\text{m}) & \text{def_P}(44\text{m}, 76\text{m}) & \text{def_P}(60\text{m}, 76\text{m}) & \text{def_P}(76\text{m}, 76\text{m}) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \text{def_qDL}(12\text{m}) \\ \text{def_qDL}(28\text{m}) \\ \text{def_qDL}(44\text{m}) \\ \text{def_qDL}(60\text{m}) \\ \text{def_qDL}(76\text{m}) \end{pmatrix}$$

Sehingga didapatkan besarnya gaya tumpu vertikal kabel sebesar:

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 183.341 \\ 191.31 \\ 187.009 \\ 194.984 \\ 161.478 \end{pmatrix} \text{ tonf}$$

Untuk mendapatkan besarnya gaya tarik kabel, maka besaran gaya tumpu vertikal tersebut dibagi dengan nilai *sinus* sudut antara kabel dan dek jembatan menurut **Pers. 7**.

$$T = V / \sin(\theta) \tag{7}$$

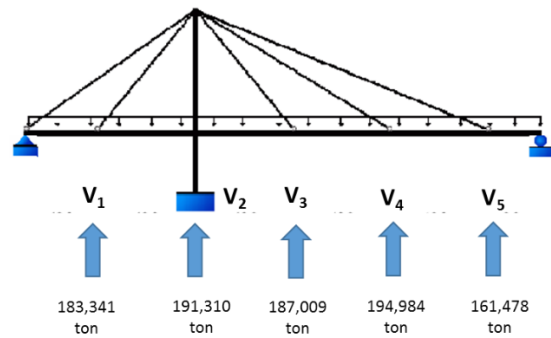
Sehingga didapatkan besarnya gaya tarikan kabel adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} TC(1) &= 234.792\text{-tonf} & TC(4) &= 367.895\text{-tonf} \\ TC(3) &= 239.489\text{-tonf} & TC(5) &= 419.842\text{-tonf} \end{aligned}$$

Untuk mendapatkan besarnya komponen mendatar gaya tarik kabel, maka besaran gaya tarik kabel pada **Pers. 7** dikalikan dengan nilai *cosinus* sudut antara kabel dan dek jembatan seperti pada **Pers. 8**.

$$H = T \times \cos(\theta) \tag{8}$$

Komponen gaya tarik mendatar ini digunakan untuk mengetahui besarnya perbedaan gaya mendatar antara kabel sisi kanan *pylon* dan sisi kiri *pylon* yang bekerja pada *pylon*. Selisih gaya yang terlalu besar dapat menyebabkan *pylon* cenderung bergerak ke salah satu sisi, sehingga menyebabkan timbulnya gaya lateral pada *pylon*. Untuk meminimalkan atau menghindari adanya perpindahan lateral yang berlebihan, maka perlu dilakukan redistribusi gaya mendatar sedemikian rupa sehingga gaya mendatar antara sisi kiri dan sisi kanan *pylon* menjadi seimbang.



Gambar 7. Gaya tumpu vertikal kabel Model 1

Redistribusi tegangan tersebut dilakukan dengan langkah perhitungan sebagai berikut:

Menghitung gaya mendatar kabel:

$$\begin{aligned} H(i) &= TC(i) \cdot \cos(\theta_i) \\ H(1) &= 146.673\text{-tonf} & H(4) &= 311.975\text{-tonf} \\ H(3) &= 149.607\text{-tonf} & H(5) &= 387.547\text{-tonf} \end{aligned}$$

Besarnya gaya mendatar pada sisi kanan *pylon*:

$$H_{balance} = H(3) + H(4) + H(5) = 849.129\text{-tonf}$$

Dari perhitungan gaya mendatar sisi kanan *pylon* didapatkan besarnya gaya tarik mendatar kabel 3, 4, dan 5 adalah 849,129 ton. Nilai tersebut merupakan nilai yang harus dipenuhi oleh komponen gaya tarik mendatar sisi kiri *pylon* agar kondisi keseimbangan dapat tercapai. Pendistribusian gaya mendatar pada sisi kiri (kabel ujung dan kabel 1) dilakukan dengan menggunakan proporsi sudut kemiringan antara kabel dan dek jembatan seperti pada **Pers. 9**.

$$H_i = \frac{\frac{1}{\cos(\theta_i)}}{\frac{1}{\cos(\theta_1)} + \frac{1}{\cos(\theta_2)} + \dots + \frac{1}{\cos(\theta_n)}} H_{balance} \tag{9}$$

Dengan demikian, besarnya masing-masing gaya mendatar untuk kabel ujung dan kabel 1:

$$H_{edge} := \frac{\frac{1}{\cos(\theta_{edge})}}{\frac{1}{\cos(\theta_{edge})} + \frac{1}{\cos(\theta_1)}} \cdot H_{balance} = 368.768\text{-tonf}$$

$$H_1 := \frac{\frac{1}{\cos(\theta_1)}}{\frac{1}{\cos(\theta_{edge})} + \frac{1}{\cos(\theta_1)}} \cdot H_{balance} = 480.361\text{-tonf}$$

Dan besarnya gaya penarikan kabel pada kabel ujung dan kabel 1 menjadi:

$$TC_0 := \frac{H_{edge}}{\cos(\theta_{edge})} = 453.181\text{-tonf}$$

$$TC_1 := \frac{H_1}{\cos(\theta_1)} = 768.952\text{-tonf}$$

Pada kabel 1 terjadi perubahan gaya tarik yang semula 234,792 ton menjadi 768,952 ton. Hal ini diakibatkan adanya pendistribusian ulang gaya-gaya tarik kabel untuk mencapai kondisi

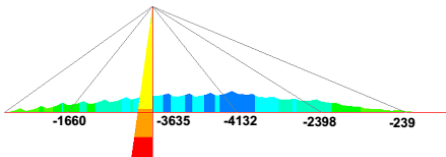
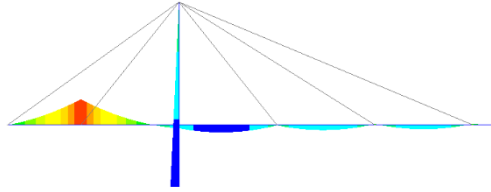
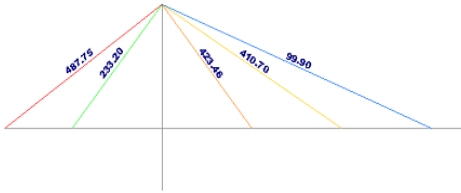
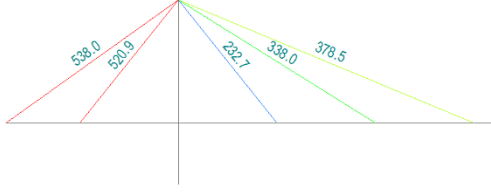
keseimbangan pada *pylon*. Dengan demikian, didapatkan gaya tarikan awal pada masing-masing gaya tarikan awal pada masing-masing kabel seperti yang disajikan pada **Tabel 2**.

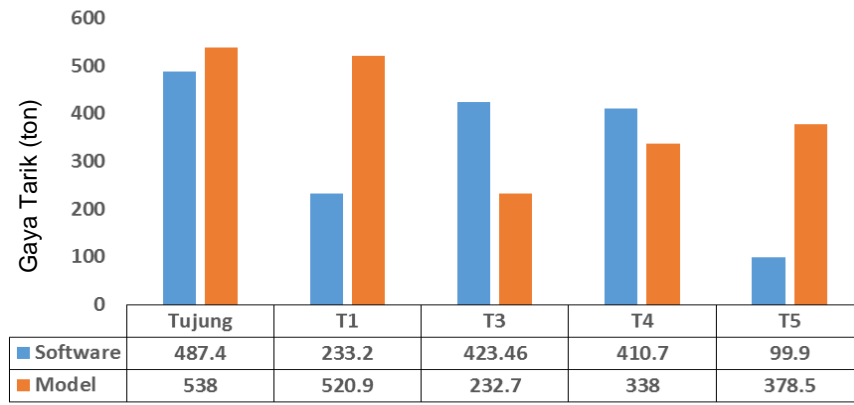
Gaya-gaya tarikan awal kabel tersebut kemudian diaplikasikan pada model struktur sehingga dapat dilakukan perhitungan analisis struktur. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara hasil perhitungan pemodelan dengan *software* Midas Civil dan algoritma yang diusulkan dalam kajian ini seperti dapat dilihat **Tabel 3**. **Gambar 8** memperlihatkan perbandingan distribusi gaya tarik kabel sepanjang dek jembatan akibat beban mati struktur menggunakan pemodelan *software* dan pendekatan yang diusulkan pada Model I.

Tabel 2. Gaya tarikan awal (*initial pretension*) kabel

No. Kabel	Gaya tarik awal (ton)
Ujung	453,181
1	768,952
3	239,489
4	367,895
5	419,842

Tabel 3. Perbandingan hasil pemodelan antara *software* Midas Civil dan *Multi Span Beam Approach*

Parameter	Pemodelan Midas Civil	Multi Span Beam Approach
Bidang momen pada dek jembatan	 <p>M-max = -239 ton.m M-min = -4132 ton.m</p>	 <p>M-max = 546,75 ton.m M-min = -1650,96 ton.m</p>
Gaya tarik kabel	 <p>T-ujung = 487,74 ton T1 = 233,20 ton T3 = 423,46 ton T4 = 410,70 ton T5 = 99,90 ton</p>	 <p>T-ujung = 538,0 ton T1 = 520,9 ton T3 = 232,7 ton T4 = 338,0 ton T5 = 378,5 ton</p>
Perpindahan lateral <i>pylon</i>	17,70 cm	2,34 cm (< δ-ijin = L/400 = 5,0 cm)

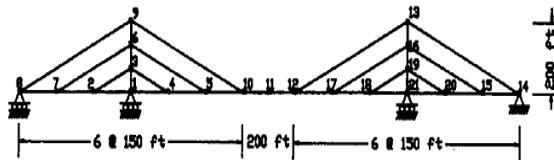


Gambar 8. Distribusi gaya tarik kabel pada Model I

Model II (Jembatan Beruji Kabel Simetris):

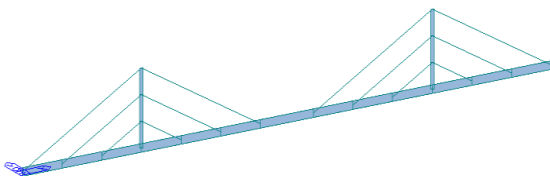
Referensi:	Journal of Computers & Structures, vol. 46 no. 6 (1993) <i>Initial Shape of Cable Stayed Bridges, author: P. H. Wang; T. C. Tseng & C. G. Yang</i>
------------	---

Model jembatan kedua yang digunakan untuk verifikasi perhitungan merupakan bentuk jembatan beruji kabel simetris dengan tipe pengaturan kabel berbentuk *harp*, seperti diperlihatkan pada Gambar 9.



- girder, tower - E=4,320,000 ksf
- cable - E=4,320,000 ksf
- girder - I=131.0 ft⁴ : A=3.44 ft²
- tower - I=24.4, 40.0, 50.0 ft⁴ (from top to bottom)
- A=2.18, 2.45, 2.90 ft²
- cable - exterior : A=0.452 ft²
- interior : A=0.174 ft²
- dead load - girder W=6.0 kips/ft
- cable : exterior W=0.221 kips/ft
- interior W=0.085 kips/ft

Gambar 9. Model struktur dan data teknis jembatan beruji kabel simetris tipe *harp* (Wang et.al., 1993)



Gambar 10. Model FEM struktur jembatan simetri

Data geometri dan propertis elemen jembatan pada Gambar 9 selanjutnya digunakan sebagai input data dalam melakukan perhitungan gaya

tumpu vertikal kabel pada struktur Model II. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan *software Mathcad* sebagai berikut.

Modulus Elastisitas Baja $E_s := 4320000 \text{ksf}$

Dimensi Gelagar $I_g := 131.0 \text{ft}^4$

$A_g := 3.44 \text{ft}^2$

$h_g := \sqrt{\frac{12 \cdot I_g}{A_g}} = 21.377 \text{-ft}$

$b_g := \frac{A_g}{h_g} = 0.161 \text{-ft}$

Beban Mati Gelagar $w_g := 6.0 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$

Tower

$IT1 := 24.4 \text{ft}^4$ $IT2 := 40 \text{ft}^4$ $IT3 := 50 \text{ft}^4$

$AT1 := 2.18 \text{ft}^2$ $AT2 := 2.45 \text{ft}^2$ $AT3 := 2.90 \text{ft}^2$

$hT1 := \sqrt{\frac{12 \cdot IT1}{AT1}} = 11.589 \text{-ft}$ $hT2 := \sqrt{\frac{12 \cdot IT2}{AT2}} = 13.997 \text{-ft}$

$bT1 := \frac{AT1}{hT1} = 0.188 \text{-ft}$ $bT2 := \frac{AT2}{hT2} = 0.175 \text{-ft}$

$hT3 := \sqrt{\frac{12 \cdot IT3}{AT3}} = 14.384 \text{-ft}$

$bT3 := \frac{AT3}{hT3} = 0.202 \text{-ft}$

Kabel

Eksterior $A_{ce} := 0.452 \text{ft}^2$

$D_{ce} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_{ce}} = 0.759 \text{-ft}$

Interior $A_{ci} := 0.174 \text{ft}^2$

$D_{ci} := \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot A_{ci}} = 0.471 \text{-ft}$

Panjang Jembatan, m $L := 2000ft$

Deformasi dek akibat beban merata, m

$$def_qDL(x) := \frac{wg \cdot x}{24 \cdot Es \cdot Ig} \cdot (x^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + L^3)$$

Deformasi dek akibat beban terpusat, m

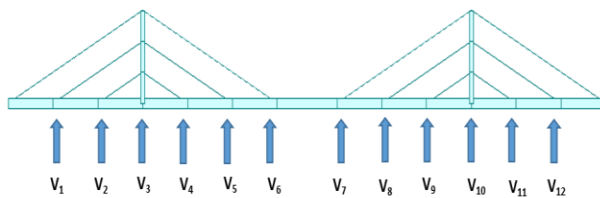
$$def_P(x, a) := \begin{cases} \frac{(L-a) \cdot x}{6 \cdot Es \cdot Ig \cdot L} \cdot [L^2 - (L-a)^2 - x^2] & \text{if } x \leq a \\ \frac{a \cdot (L-x)}{6 \cdot Es \cdot Ig \cdot L} \cdot (2 \cdot L \cdot x - x^2 - a^2) & \text{if } x > a \end{cases}$$

Berdasarkan perhitungan menggunakan metode superposisi, didapatkan besarnya gaya tumpu vertikal yang disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Gaya tumpu vertikal kabel pada Model II

V ₁ (kip)	V ₂ (kip)	V ₃ (kip)	V ₄ (kip)	V ₅ (kip)	V ₆ (kip)
510.132	434.472	451.979	457.61	417.58	550.748
V ₇ (kip)	V ₈ (kip)	V ₉ (kip)	V ₁₀ (kip)	V ₁₁ (kip)	V ₁₂ (kip)
550.748	417.58	457.61	451.979	434.472	510.132

Distribusi gaya tumpu vertikal tersebut diperlihatkan pada **Gambar 11**.



Gambar 11. Distribusi gaya tumpu vertikal kabel Model II

Besarnya gaya tarik kabel ditentukan dengan membagi masing-masing gaya tumpu vertikal dengan nilai *sinus* masing-masing sudut antara kabel dan dek jembatan, sehingga didapatkan besarnya gaya tarik kabel adalah sebagai berikut:

$$T1 := \frac{P_1}{\sin(\theta_2)} = 1839.307 \cdot \text{kip}$$

$$T2 := \frac{P_2}{\sin(\theta_1)} = 1086.18 \cdot \text{kip}$$

$$T4 := \frac{P_4}{\sin(\theta_1)} = 1144.025 \cdot \text{kip}$$

$$T5 := \frac{P_5}{\sin(\theta_2)} = 1505.606 \cdot \text{kip}$$

$$T6 := \frac{P_6}{\sin(\theta_3)} = 2712.121 \cdot \text{kip}$$

Untuk gaya tarik pada kabel-kabel terluar, perhitungannya dilakukan dengan menggunakan prinsip keseimbangan antara gaya-gaya mendatar kabel yang saling bersebelahan, seperti halnya perhitungan pada Model I.

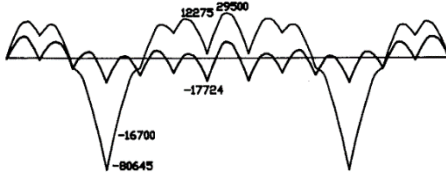
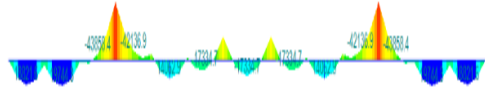
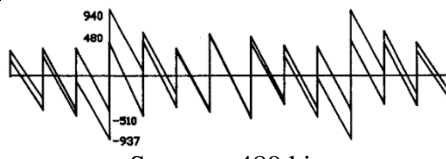
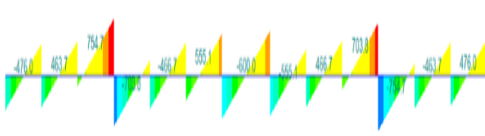
$$H_edge := (T4 \cdot \cos(\theta_1) + T5 \cdot \cos(\theta_2) + T6 \cdot \cos(\theta_3)) - (T1 \cdot \cos(\theta_2) + T2 \cdot \cos(\theta_1)) = 2235.419 \cdot \text{kip}$$

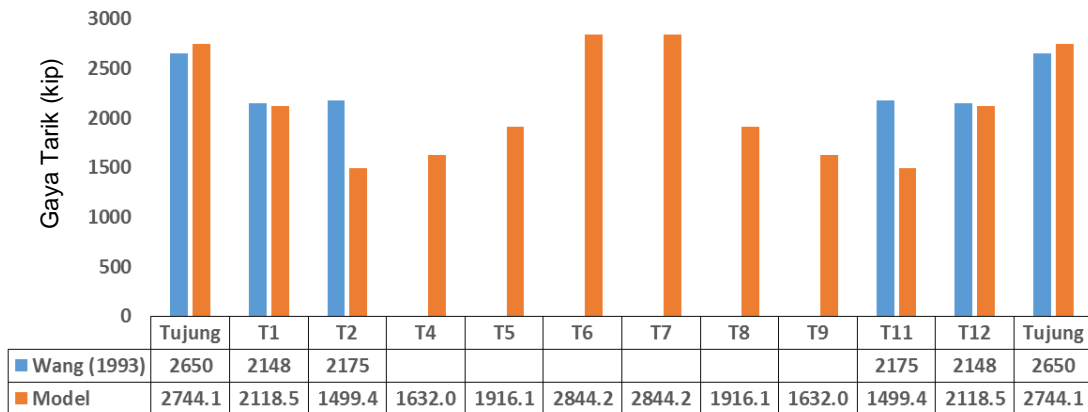
Dengan demikian didapatkan besarnya gaya tarikan awal pada kabel-kabel terluar (ujung), yaitu:

$$T_edge := \frac{(T4 \cdot \cos(\theta_1) + T5 \cdot \cos(\theta_2) + T6 \cdot \cos(\theta_3)) - (T1 \cdot \cos(\theta_2) + T2 \cdot \cos(\theta_1))}{\cos(\theta_3)} = 2446.258 \cdot \text{kip}$$

Besarnya gaya tarik awal (*initial pretension*) pada kabel-kabel tersebut selanjutnya diaplikasikan pada model struktur sehingga dapat dilakukan analisis struktur dan membandingkannya dengan hasil perhitungan pada literatur terkait. Hasil analisis struktur dan perbandingan model tersebut disajikan pada **Tabel 5**. Perbandingan distribusi gaya tarik kabel sepanjang dek jembatan akibat beban mati struktur menggunakan pemodelan menggunakan *software* dan metode pendekatan yang diusulkan untuk Model II dapat dilihat pada **Gambar 12**.

Tabel 5. Perbandingan hasil pemodelan antara *software* Midas Civil dan *Multi Span Beam Approach*

Parameter	Pemodelan Midas Civil	Multi Span Beam Approach
Bidang momen pada dek jembatan	 <p>M-max = 12276 kip-ft M-min = -17724 kip-ft</p>	 <p>M-max = 19744,28 kip-ft M-min = -43858,41 kip-ft</p>
Bidang geser pada dek jembatan	 <p>S-max = 480 kip S-min = -510 kip</p>	 <p>S-max = 754,69 kip S-min = -754,69 kip</p>
Gaya tarik kabel	T-ujung = 2650 kip T1 = 2148 kip T2 = 2175 kip	T-ujung = 2744,1 kip T1 = 2118,5 kip T2 = 1499,4 kip T4 = 1632,0 kip T5 = 1916,1 kip T6 = 2844,2 kip
Lendutan dek jembatan	-0,102 ft	-0,746 ft
Perpindahan lateral pylon	N/A	0,251 ft (< δ -ijin = L/400 = 0,50 ft)



Gambar 12. Perbandingan distribusi gaya tarik kabel pada Model II

KESIMPULAN

Dalam kajian ini telah diberikan penjelasan mengenai prosedur perhitungan gaya tarikan awal kabel (*initial pretension*) melalui penerapan metode pendekatan balok bentang jamak (*multi-span beam approach*). Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari penjelasan di atas adalah sebagai berikut:

1. Penerapan metode pendekatan balok bentang jamak (*multi span beam approach*) ini menawarkan kemudahan dan kecepatan dalam

proses perhitungannya, karena tidak memerlukan waktu untuk menjalankan iterasi dalam proses perhitungannya dan tidak tergantung pada kelengkapan fitur yang dimiliki oleh perangkat lunak (*software*) yang digunakan. Hasil perhitungan dari metode ini dapat langsung dijadikan input ke dalam *software* analisis struktur sebagai input data pembebanan (*load case*), dimana hal tersebut sudah merupakan kelaziman dalam menjalankan perhitungan struktur dengan menggunakan bantuan *software*.

2. Berdasarkan hasil yang didapat, metode pendekatan balok bentang jamak (*multi span beam approach*) dapat memberikan keluaran gaya tarik kabel yang rasional pada model struktur jembatan beruji kabel. Gaya-gaya tarik kabel sepanjang dek jembatan hasil perhitungan memperlihatkan pola yang dapat merepresentasikan sudut kemiringan kabel dengan dek jembatan. Hal tersebut dapat dijelaskan dengan efektifitas daya dukung vertikal kabel, dimana semakin kecil nilai sudut kabel terhadap dek jembatan maka akan dibutuhkan gaya tarik kabel yang lebih besar. Dengan demikian untuk kabel-kabel yang bergerak menjauhi *pylon* akan memiliki gaya tarik yang semakin besar. Hal ini berkesesuaian dengan prinsip perancangan konstruksi jembatan beruji kabel yang telah dijelaskan sebelumnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Gottemoeller, F. (2004). *Bridge-scape, the Art of Designing Bridges*, John Wiley and Sons, Inc., New Jersey.
- Hicks, T.G. (2009). *Civil Engineering Formulas*, Mc Graw-Hill Companies, Inc., New York.
- Holger Svensson. 2012. *Cable Stayed Bridges 40 Years of Experience Worldwide*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany.
- Midas Civil Tutorial (2011). *Example of Unknown Load Factors using Forward Construction Stage Analysis*. Midas Information Technology Co. Ltd.
- Sakran, M. (2010). *Static and Dynamic Analysis of Cable Stayed Bridges, Thesis submitted for doctorate degree to Osmania University*, Hyderabad, India.
- Sakran, M. dan Rao, D.S.P. (2010), "Cable Stayed Bridges for Elegance and Economy", The University of the West Indies, Trinidad & Tobago.
- Virlogeux, M. (2002). *New Trends in Prestressed Concrete Bridges, Structural Concrete, Journal of the FIB*, Vol. 3, No. 2, June 2002.
- Walther, R. (1988). *Cable Stayed Bridges*, Thomas Telford Ltd, London.
- Wang, P.H., Tseng, T.C. dan Yang, C.G. (1993). *Initial Shape of Cable Stayed Bridges*. Computers & Structures Vol. 46 No. 8, Pergamon Press Ltd, Great Britain.
- Wang, C. K. (1953). *Indeterminate Statically Structures*, Mc Graw Hill Book Company, Inc., Kogakusha, Tokyo.
- Wittfoht, H. (1984). *Building bridges: History, Technology and Construction*, Beton Verlag, Duesseldorf.