

KONTROL GEOMETRI MELALUI PENYETELAN KABEL PADA JEMBATAN BERUJI KABEL

Anton Husen Purboyo
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian Pekerjaan Umum dan
Perumahan Rakyat
a.huspur@gmail.com

Iwan Zarkasi
Direktorat Jenderal Bina Marga
Kementerian Pekerjaan Umum dan
Perumahan Rakyat
Iwanzark17@yahoo.com

Abstract

Geometry control is an important activity in the implementation of the staging construction of bridges, including the construction of a cable-stayed bridge. Compliance with the minimum requirements of bridge design criteria must be considered at every stage. This is intended to ensure that construction failures do not occur during the construction period until the operational stage. In this study, an analytical method is proposed that can be used to determine the magnitude of the initial pretension on the stayed cable, which can give results that reflect the effectiveness of the cable support force, as a function of the sine of the angle between the stayed cable and the bridge deck. The method is based on the approach of multiple span beams. The multi span beam approach is then used in the backward analysis scheme at an early phase to obtain the displacement, internal forces, and stresses targets of the bridge structural elements at each stage of construction. The application of the multi span beam approach offers convenience in the calculation process, which does not require an iteration process and does not depend on the features of the software used, making it easier the designer of cable stayed bridges to optimize the model of cable stayed bridges by cable tuning in each stayed cable.

Keywords: geometry control; bridge; cable stayed bridge; multi span beam

Abstrak

Kontrol geometri merupakan suatu kegiatan yang penting pada pelaksanaan konstruksi bertahap suatu jembatan, termasuk pada pembangunan jembatan beruji kabel. Pemenuhan terhadap persyaratan minimum perancangan jembatan harus diperhatikan pada setiap tahapannya. Hal ini dimaksudkan untuk menjamin tidak terjadinya kegagalan konstruksi selama masa konstruksi hingga pada tahap operasionalnya. Pada studi ini diusulkan metode analisis yang dapat digunakan untuk menentukan besarnya pemberian gaya tarikan awal pada ruji kabel, yang dapat memberi hasil yang mencerminkan efektivitas gaya tumpu kabel, sebagai fungsi sinus sudut antara ruji kabel dan dek jembatan. Metode tersebut didasarkan pada pendekatan mengenai balok bentang jamak. Pendekatan balok bentang jamak tersebut selanjutnya digunakan pada skema analisis ke belakang pada tahap awal untuk mendapatkan target perpindahan, gaya dalam, dan tegangan elemen struktur jembatan di setiap tahap konstruksi. Aplikasi pendekatan balok bentang jamak menawarkan kemudahan dalam proses perhitungannya, yang mana tidak diperlukan adanya proses iterasi dan tidak bergantung pada fitur perangkat-perangkat lunak yang dipakai, sehingga memudahkan perancang jembatan beruji kabel untuk dapat lebih leluasa melakukan optimasi terhadap model struktur jembatan beruji kabel melalui penyetelan masing-masing ruji kabel.

Kata-kata kunci: kontrol geometri; jembatan; jembatan beruji kabel; balok bentang jamak

PENDAHULUAN

Aspek perancangan jembatan yang terkait dengan kontrol geometri perlu diperhitungkan, mulai dari tahap perancangan konseptual sampai pada tahap produksi dan pemasangan akhir jembatan segmental (Bender dan Janssen, 1982). Pelaksanaan kontrol geometri tersebut meliputi kegiatan pengendalian serta pemeriksaan geometri struktur jembatan

terbangun terhadap kriteria perancangan dan dilakukan pada setiap urutan atau tahap pelaksanaan pembangunan jembatan beruji kabel. Apabila pengendalian dan/atau pengawasan geometrik struktur jembatan yang dilakukan tidak memenuhi persyaratan minimum sesuai kriteria perancangan, geometri hasil pelaksanaan konstruksi jembatan terbangun tersebut dapat melebihi batas toleransi yang diizinkan. Sebaliknya apabila kontrol geometri pada struktur jembatan terbangun dilakukan dengan baik dan dilaksanakan mulai dari tahap awal dan tetap dijaga selama pelaksanaan konstruksi, target pelaksanaan konstruksi jembatan berupa kesesuaian geometri rencana dan pelaksanaan dapat dicapai (Virlogeux, 2002).

Kontrol atau pengendalian serta pemeriksaan geometri struktur jembatan beruji kabel diperlukan terutama untuk konstruksi jembatan yang menggunakan pemasangan secara segmental komponen balok gelagar, baik untuk beton pracetak atau beton cor di tempat (*cast in situ*) dengan menggunakan metode kantilever, seperti halnya pada struktur jembatan beruji kabel. Kontrol geometri tersebut diperlukan untuk jembatan beruji kabel dengan lengkungan mendatar (*skewed* atau *curved*) dan/atau lengkungan vertikal.

Maksud kajian ini adalah melakukan penyusunan skema tahapan perancangan konstruksi jembatan beruji kabel menggunakan metode *backward analysis* dan penerapan metode *multi span approximation*. dalam penentuan gaya tarik awal ruji kabel. Tujuannya adalah mendapatkan prosedur baku terhadap kontrol geometri berdasarkan hasil perancangan menggunakan metode *backward analysis*.

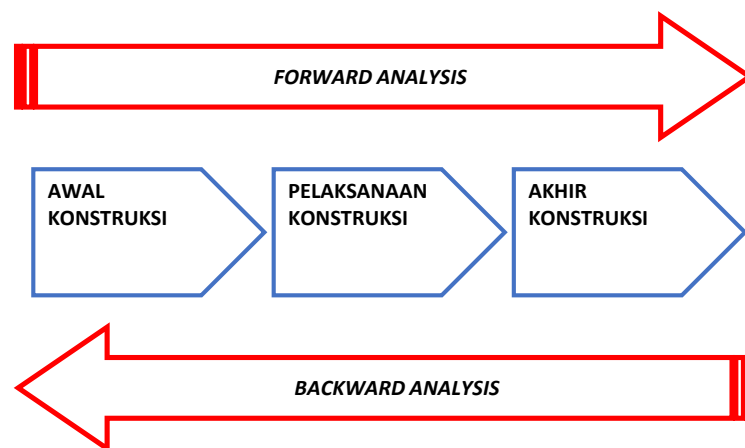
FORMULASI PERHITUNGAN

Kelayakan kinerja jembatan, seperti halnya jembatan beruji kabel, mengacu pada kondisi masing-masing komponen yang dapat mencapai pada kondisi optimalnya melalui pemenuhan terhadap persyaratan perancangan dan spesifikasi (Svensson, 2012). Penyelesaian jembatan beruji kabel memerlukan tinjauan banyak faktor yang harus dipertimbangkan. Pada kondisi jembatan yang ideal, balok jembatan, pylon, dan elemen-elemen kabel harus memenuhi persyaratan terkait dengan spesifikasi perancangan. Pada prinsipnya, ketiga kondisi berikut ini harus dipenuhi selama melakukan perancangan konstruksi jembatan beruji kabel (Sakran dan Rao, 2010), yaitu:

- 1) Kondisi tegangan gelagar utama harus didasarkan pada prinsip tegangan lentur yang terjadi adalah kecil serta distribusi beban akibat beban mati merata, dengan mengakomodasi pengaruh beberapa beban hidup.
- 2) Distribusi tegangan dan geometri jembatan ditentukan langsung oleh gaya tarik kabel, yang secara keseluruhan makin pendek kabel makin kecil gaya tarik yang diberikan, dan gaya tarik paling besar adalah gaya tarik yang bekerja pada kabel paling luar (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 pada tumpuan saat menerima beban hidup.

Pada pelaksanaannya, pembangunan jembatan beruji kabel selalu menggunakan metode konstruksi bertahap atau *stage construction* (Walther, 1988). Metode konstruksi bertahap ini didasarkan pada metode perhitungan statik, yang meliputi analisis dan desain dengan mendefinisikan urutan tahapan konstruksi, yang mana sistem-sistem struktural dan pola pembebanan ditambahkan atau dihilangkan. Perilaku struktur terhadap waktu turut dievaluasi. Misalnya pada struktur beton, karakteristik material yang merupakan fungsi waktu meliputi susut, rangkai, dan relaksasi tendon (Wittfoht, 1984.) Perilaku nonlinear, baik material atau geometri, dapat diaplikasikan pada setiap tahapan konstruksi. Apabila konfigurasi struktural berubah seiring dengan berubahnya pembebanan dan kondisi masing-masing tahap konstruksi, yang mana masing-masing tahapan tersebut memengaruhi tahap konstruksi berikutnya, bisa saja perencanaan beberapa komponen struktural ditentukan justru selama masa konstruksi. Namun demikian, pengaruh terhadap waktu untuk analisis konstruksi bertahap tetap diperlukan, untuk mengevaluasi masing-masing tahapan konstruksi tersebut. Berdasarkan urutan pelaksanaannya, terdapat 2 metode skema analisis konstruksi bertahap (lihat Gambar 1), yaitu (Gottemoeller, 2004):

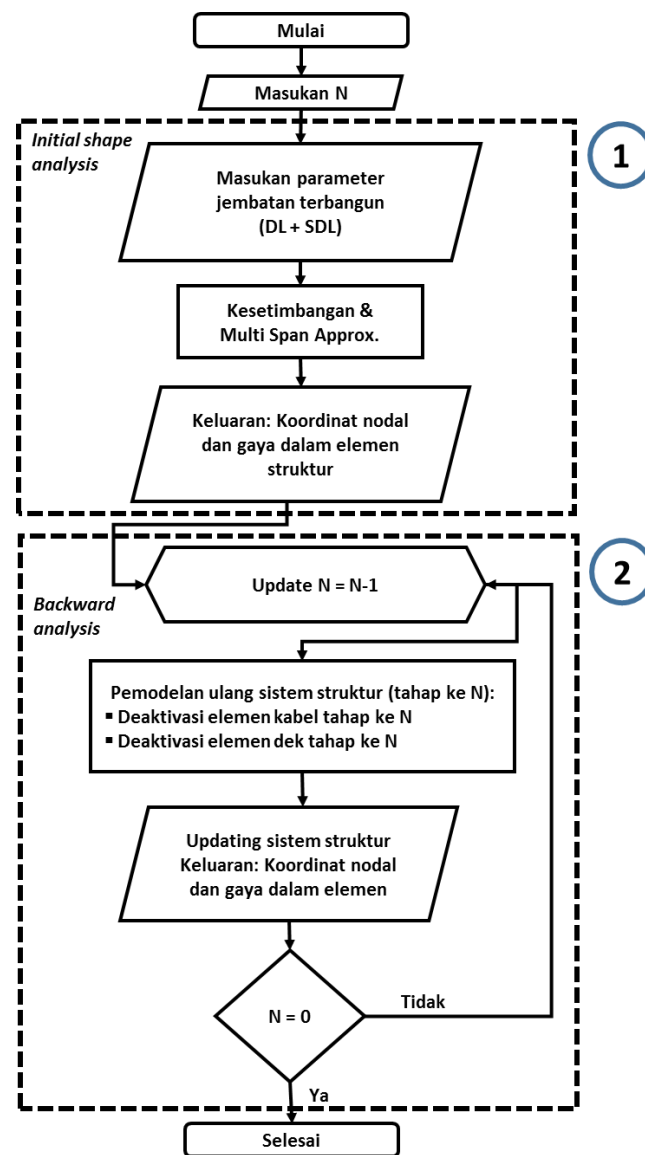
- 1) Analisis ke depan (*forward analysis*); pada skema ini dilakukan tinjauan analisis struktur jembatan mulai dari kondisi awal hingga kondisi struktur jembatan terbangun, dengan beban yang diperhitungkan adalah beban mati, beban mati tambahan, beban temperatur, serta pengaruh waktu terhadap material struktur jembatan.
- 2) Analisis ke belakang (*backward analysis*); sama halnya dengan skema analisis ke depan, hanya urutannya yang dibalik, yang pada analisis ini dilakukan tinjauan analisis struktur jembatan mulai dari kondisi struktur jembatan terbangun hingga kondisi awal.



Gambar 1 Skema Analisis ke Depan dan Analisis ke Belakang

Penerapan kedua metode analisis tersebut dilakukan berdasarkan maksud dan tujuan tertentu, yang mana penerapannya ditentukan berdasarkan urutan metode pelaksanaan pembangunan jembatan. Pada setiap pembangunan struktur jembatan yang menggunakan skema konstruksi bertahap disarankan untuk melakukan skema *backward analysis* dalam perhitungan strukturnya, termasuk pada pembangunan jembatan beruji kabel (lihat Gambar 2). Hal ini dikarenakan, pada skema *backward analysis*, struktur jembatan terbangun meru-

pakai target final yang harus dicapai melalui serangkaian pentahapan pembangunan. Target final tersebut dapat berupa kondisi batas yang harus dipenuhi, sesuai dengan kriteria perancangan (perpindahan, tegangan, dan gaya dalam).



Gambar 1 Bagan Alir Skema *Backward Analysis* (Liu dan Wang, 2015)

Selanjutnya, target-target pada masing-masing tahapan konstruksi, yang dinyatakan dalam variabel-variabel perpindahan, tegangan, dan gaya tersebut diterapkan pada model perhitungan struktur jembatan (Sakran, 2010). Berdasarkan target final tersebut serta dengan menerapkan skema *backward analysis* melalui aktivasi atau deaktivasi komponen-komponen struktur pada setiap tahap pelaksanaan konstruksi struktur jembatan, akan didapat besarnya target perpindahan, tegangan, dan/atau gaya dalam elemen-elemen struktur pada masing-masing tahap konstruksi. Hal yang perlu diperhatikan pada masing-masing tahapan konstruksi struktur jembatan adalah pemenuhan variabel-variabel perpindahan, tegangan, dan/atau gaya dalam elemen-elemen struktur terhadap batas ketentuan persyaratan minimum sesuai

dengan kriteria perancangan. Mekanisme tersebut akan memastikan bahwa keruntuhan atau kegagalan yang disebabkan oleh adanya kapasitas penampang yang tidak memadai dapat dihindari.

Terdapat beberapa hal yang perlu disiapkan agar skema *backward analysis* dapat dilakukan, yang meliputi:

- 1) Model numerik struktur jembatan beruji kabel terbangun. Model ini dibuat berdasarkan dokumen atau gambar perancangan jembatan. Dalam melakukan pemodelan struktur jembatan beruji kabel, perlu diperhatikan kekonsistenan detail serta asumsi-asumsi yang digunakan, karena hal-hal tersebut akan memengaruhi kemiripan perilaku antara model struktur jembatan dengan struktur jembatan sesungguhnya. Tinjauan terhadap perilaku model sederhana 2 dimensi dapat dilakukan sebelum melakukan pemodelan jembatan seutuhnya, untuk memastikan bahwa asumsi-asumsi tersebut sudah sesuai.
- 2) Skema pentahapan pembangunan struktur jembatan beruji kabel. Penyusunan tahapan konstruksi ini hendaknya dilakukan dengan memperhatikan urutan logis serta ketersediaan peralatan konstruksi dan material yang digunakan selama masa konstruksi.

Bagan alir skema perhitungan menggunakan *backward analysis* tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.

ANALISIS BENTUK AWAL (*INITIAL SHAPE ANALYSIS*)

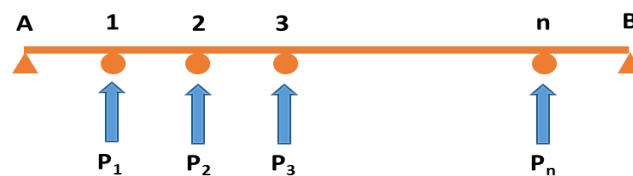
Bentuk geometri struktur jembatan beruji kabel terbangun ditentukan berdasarkan kontribusi kekakuan 3 komponen struktur utama pembangun jembatan beruji kabel, yang meliputi: 1) elemen kabel; 2) elemen gelagar atau dek jembatan; dan 3) pylon. Pada studi ini, pembahasan lebih ditekankan pada elemen kabel sebagai suatu elemen struktur yang memiliki tingkat variabilitas yang cukup tinggi pada saat pemasangannya. Hal ini dikarenakan pada saat pemasangan kabel tersebut, diperlukan gaya tarikan awal (*initial pretension*) yang diberikan pada setiap ruji kabel terpasang. Besarnya gaya tarikan awal tersebut akan memberikan kontribusi terhadap besarnya gaya tarikan total yang bekerja pada kabel, dan gaya tarikan total inilah yang dapat diukur selama pemasangan ruji kabel di jembatan. Distribusi gaya tarikan total pada seluruh kabel akan memengaruhi geometri jembatan secara keseluruhan. Distribusi gaya tarikan pada ruji kabel akan makin besar bila menjauhi pylon, sebagai akibat dari efisiensi gaya tumpu kabel, yang merupakan fungsi *sinus* besarnya sudut antara kabel dan dek jembatan.

Pendekatan yang digunakan dalam menentukan besarnya gaya tarikan awal adalah dengan menggunakan pendekatan balok bentang jamak (*multi span approximation*), Pendekatan ini didasarkan pada sistem balok bentang jamak menerus. Terdapat beberapa kemudahan yang ditawarkan selama melakukan perhitungan besarnya gaya tarikan awal dengan menggunakan pendekatan ini, yaitu:

- 1) Proses perhitungan yang sederhana serta dapat menghasilkan distribusi gaya tarik kabel yang cukup logis, yang mana gaya tarik kabel akan semakin besar bila menjauhi pylon.

2) Khusus untuk jembatan beruji kabel tidak simetris, diperlukan adanya pemeriksaan tambahan. Pemeriksaan tambahan ini bertujuan untuk mengetahui besarnya perpindahan lateral pada pylon akibat ketidakseimbangan komponen mendatar 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 (yaitu $L/400$), diperlukan adanya redistribusi gaya tarik kabel sedemikian rupa sehingga pylon hanya menderita beban aksial. Pendistribusian gaya penarikan kabel tersebut tetap mengikuti prinsip makin panjang kabel, gaya tarik yang bekerja semakin besar, dengan faktor keamanan minimum sebesar 2,5.

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, seperti diperlihatkan pada Gambar 3 (Liu dan Wang, 2015).



Gambar 3 Model Balok Bentang Jamak

Deformasi yang terjadi pada balok ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut (Burden dan Faires, 2001):

1) Deformasi akibat beban merata (beban mati):



Gambar 4 Model Balok dengan Beban Merata

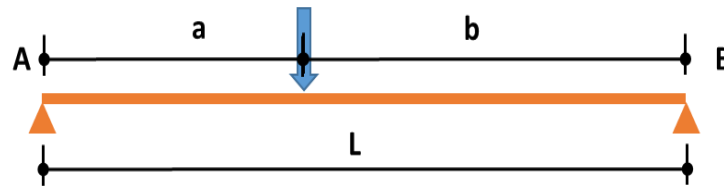
Deformasi pada balok akibat beban merata ditentukan dengan menggunakan Persamaan 1.

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

dengan:

- 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 5 Model Balok Dengan Beban Terpusat

Deformasi pada balok akibat beban terpusat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2:

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

$$\Delta = \frac{P \cdot (L-x) \cdot a}{6EI \cdot L} (2 \cdot L \cdot x - a^2 - x^2) \text{ untuk } x > a$$

dengan:

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 gaya tumpu kabel pada balok jembatan beruji kabel, digunakan kaidah superposisi dengan menerapkan kondisi batas, yang mana lendutan pada setiap titik tempat P berada adalah sama dengan nol. Dengan melakukan prosedur perhitungan tersebut didapat n persamaan dengan n variabel (P_1, P_2, \dots, P_n). Metode matriks digunakan untuk penyelesaian persamaan-persamaan tersebut. Untuk setiap n jumlah kabel, akan didapat matriks n x n, sehingga diperoleh bentuk persamaan sebagai berikut (PTC, 2007):

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

dengan:

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 3, didapat bentuk persamaan sebagai berikut:

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

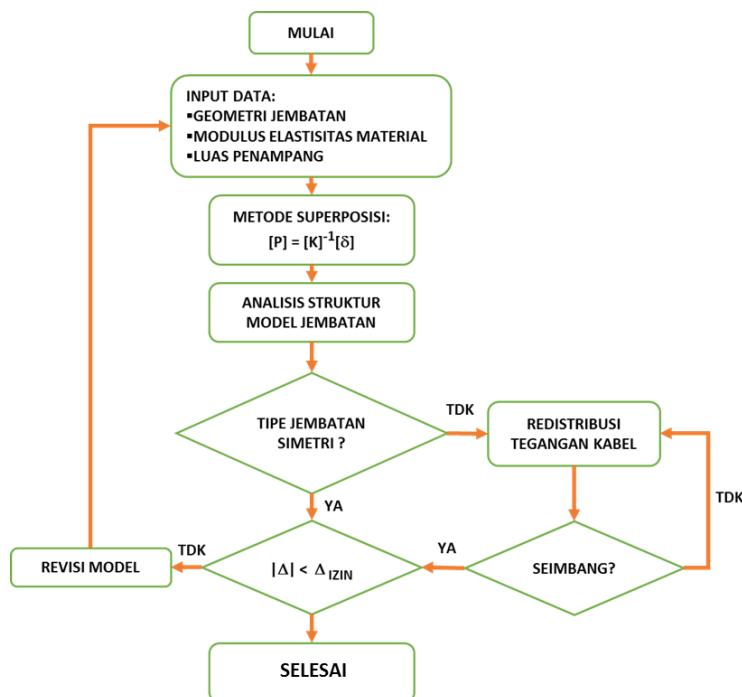
Apabila dinyatakan dalam notasi matriks, akan didapat Persamaan 5:

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

Solusi untuk mendapatkan nilai P pada Persamaan 5 adalah:

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

Setelah mendapatkan nilai masing-masing P pada Persamaan 6, dilakukan analisis struktur menggunakan model numerik. Analisis struktur tersebut dilakukan dengan menerapkan gaya tarikan awal (*initial pretension*) pada setiap kabel dengan menggunakan nilai P dari perhitungan sebelumnya. Pada tahapan ini, pemeriksaan ditinjau hanya dengan menerapkan beban mati struktur. Perilaku struktur jembatan beruji kabel yang diamati adalah deformasi pada balok, pylon, dan kabel, yang mana akibat beban mati tersebut kondisi tegangan dan defleksi struktur jembatan harus dipastikan masih berada dalam batas ambang keamanan sesuai dengan standar yang digunakan. Bagan alir perhitungan dengan metode pendekatan balok bentang jamak diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Bagan Alir Perhitungan dengan Metode Pendekatan Balok Bentang Jamak

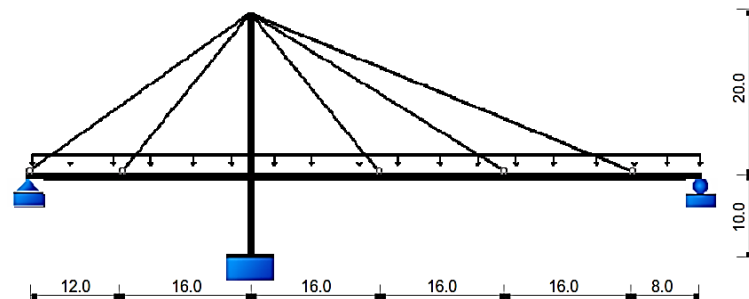
Sebagai verifikasi terhadap hasil perhitungan menggunakan model pendekatan yang diusulkan, telah dilakukan perbandingan terhadap 2 model jembatan beruji kabel berdasarkan studi literatur. Rangkuman hasil perbandingan tersebut diuraikan berikut.

PENERAPAN *MULTI SPAN APPROXIMATION*

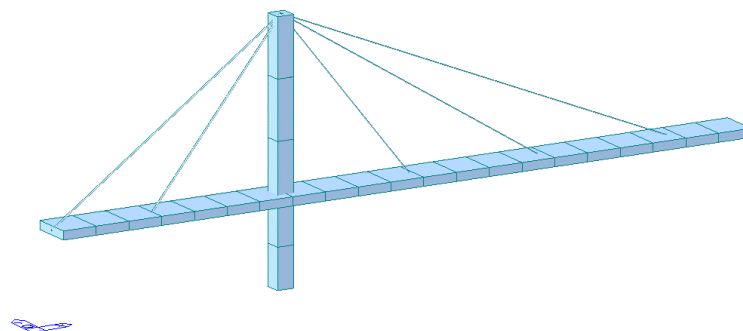
Berikut diberikan contoh perhitungan penarikan awal kabel pada jembatan beruji kabel dengan menggunakan pendekatan balok bentang jamak (*multi span beam approach*). Hasil perhitungan selanjutnya diverifikasi dengan beberapa contoh perhitungan yang didapat dari hasil studi literatur. Alat bantu yang digunakan dalam melakukan analisis struktur jembatan beruji kabel ini adalah perangkat lunak Midas Civil (Midas Information Technology Co, 2011).

Model I: Jembatan Beruji Kabel Asimetris

Model jembatan pertama yang digunakan untuk verifikasi perhitungan merupakan model struktur jembatan beruji kabel asimetri. Bentuk dan geometri jembatan tersebut diperlihatkan pada Gambar 7 dan Gambar 8. Data properti elemen yang digunakan dalam perhitungan model struktur jembatan disajikan pada Tabel 1.



Gambar 7 Model Struktur Jembatan Beruji Kabel Asimetris (Satuan Panjang: m)



Gambar 8 Model FEM Struktur Jembatan Asimetris

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 perangkat lunak Mathcad (PTC, 2007).

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

Panjang Jembatan, m $L := 84\text{m}$

Deformasi dek akibat beban merata, m $def_{qDL}(x) := \frac{q_{DL} \cdot x}{24 \cdot E_c \cdot I_c} \cdot (x^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + L^3)$

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

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

Besarnya gaya tumpu vertikal kabel didapat 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, besaran gaya tumpu vertikal tersebut dibagi dengan nilai *sinus* sudut antara kabel dan dek jembatan menurut Persamaan 7.

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

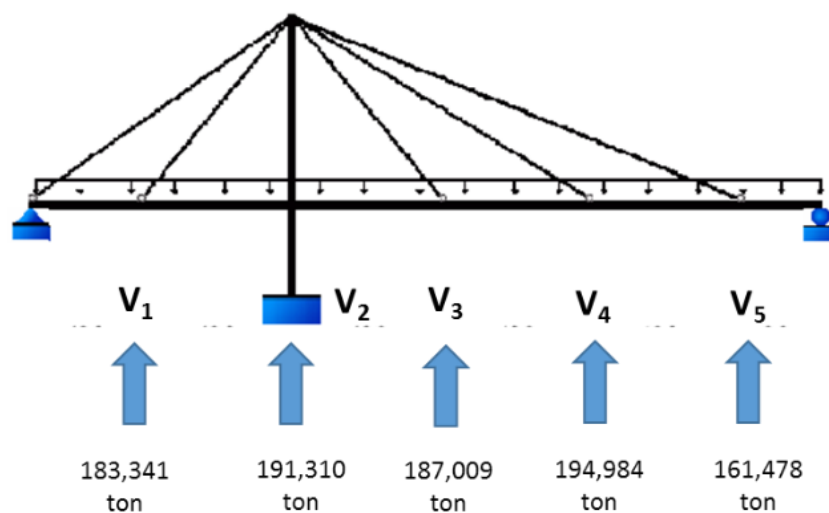
Didapat besarnya gaya tarikan kabel adalah:

$$TC(1) = 234.792 \cdot \text{tonf} \quad TC(4) = 367.895 \cdot \text{tonf}$$

$$TC(3) = 239.489 \cdot \text{tonf} \quad TC(5) = 419.842 \cdot \text{tonf}$$

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

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



Gambar 2 Gaya Tumpu Vertikal Kabel Model 1

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, perlu dilakukan redistribusi gaya

mendatar sedemikian rupa sehingga gaya mendatar antara sisi kiri dan sisi kanan pylon menjadi seimbang. Redistribusi tegangan tersebut dilakukan dengan langkah perhitungan berikut.

Menghitung gaya mendatar kabel:

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

Besarnya gaya mendatar pada sisi kanan pylon:

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

Dari perhitungan gaya mendatar di sisi kanan pylon didapat besarnya gaya tarik mendatar kabel 3, kabel 4, dan kabel 5 adalah 849,129 ton. Nilai tersebut merupakan nilai yang harus dipenuhi oleh komponen gaya tarik mendatar di 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 Persamaan 9.

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

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

$$H_{\text{edge}} := \frac{\frac{1}{\cos(\theta_{\text{edge}})}}{\frac{1}{\cos(\theta_{\text{edge}})} + \frac{1}{\cos(\theta_1)}} \cdot H_{\text{balance}} = 368.768 \cdot \text{tonf} \quad H_1 := \frac{\frac{1}{\cos(\theta_1)}}{\frac{1}{\cos(\theta_{\text{edge}})} + \frac{1}{\cos(\theta_1)}} \cdot H_{\text{balance}} = 480.361 \cdot \text{tonf}$$

Besarnya gaya penarikan kabel pada kabel ujung dan kabel 1 menjadi:

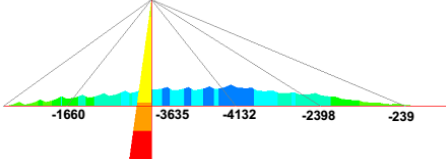
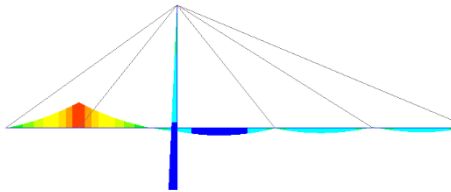
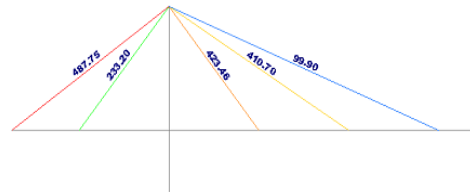
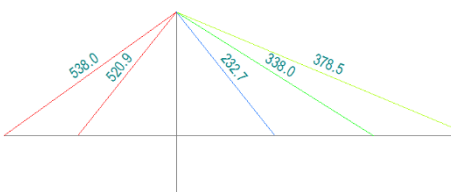
$$TC_0 := \frac{H_{\text{edge}}}{\cos(\theta_{\text{edge}})} = 453.181 \cdot \text{tonf} \quad TC_1 := \frac{H_1}{\cos(\theta_1)} = 768.952 \cdot \text{tonf}$$

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 didapat gaya tarikan awal (*Initial Pretension*) pada masing-masing kabel, seperti yang disajikan pada Tabel 2.

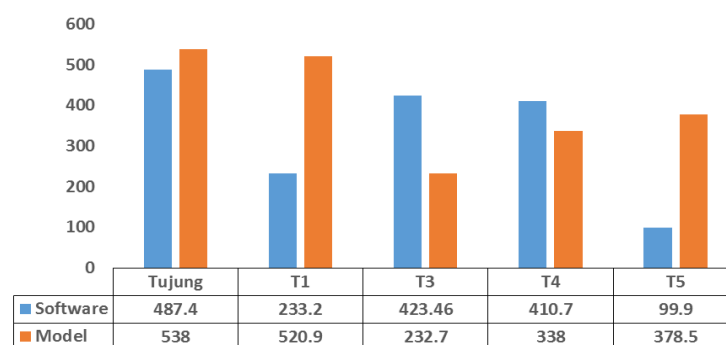
Tabel 2 Gaya Tarikan Awal Kabel

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 Hasil Perangkat Lunak Midas Civil dan Hasil Multi Span Approximation

Parameter	Pemodelan Midas Civil	Multi Span Beam Approximation
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 pylon	17,70 cm	2,34 cm ($< \delta$ -ijin = $L/400 = 5,0$ cm)

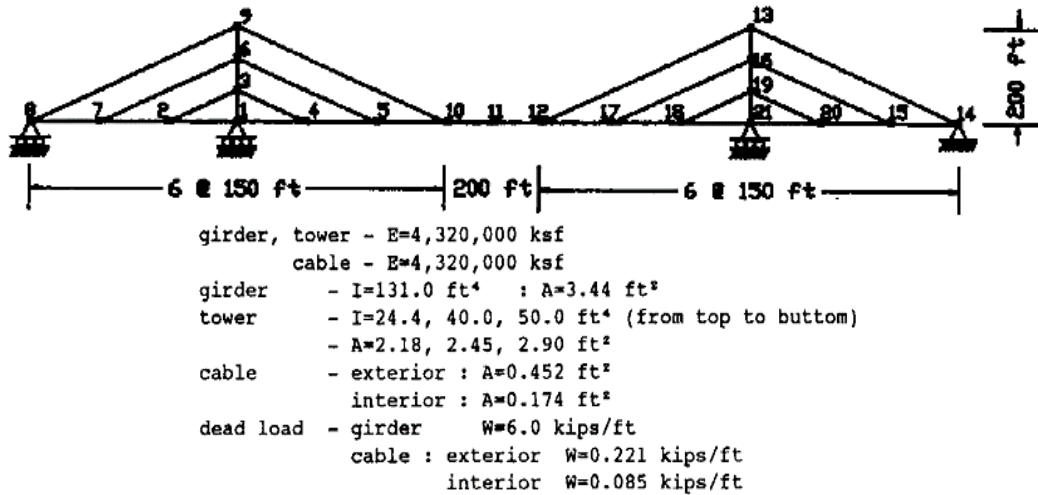
Gaya-gaya tarikan awal kabel tersebut kemudian diterapkan pada model struktur sehingga dapat dilakukan perhitungan analisis struktur. Selanjutnya dilakukan perbandingan antara hasil perhitungan pemodelan dengan perangkat lunak Midas Civil dan algoritma yang diusulkan dalam kajian ini, seperti yang dapat dilihat Tabel 3. Gambar 10 memperlihatkan perbandingan distribusi gaya tarik kabel sepanjang dek jembatan akibat beban mati struktur menggunakan pemodelan perangkat lunak dan pendekatan yang diusulkan pada Model I.



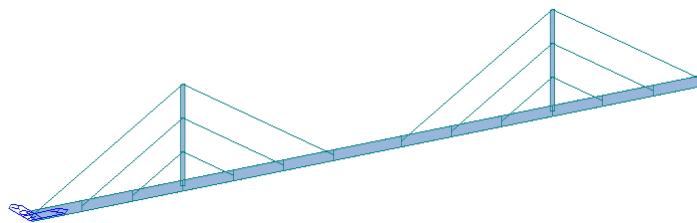
Gambar 10 Distribusi Gaya Tarik Kabel (ton) pada Model I

Model II: Jembatan Beruji Kabel Simetris

Model jembatan kedua yang digunakan untuk verifikasi perhitungan merupakan jembatan beruji kabel simetris, dengan tipe pengaturan kabel berbentuk *harp*, seperti diperlihatkan pada Gambar 11.



Gambar 11 Model Struktur dan Data Teknis Jembatan Beruji Kabel Simetris Tipe *Harp* (Wang et al., 1993)



Gambar 12 Model FEM Struktur Jembatan Simetri

Data geometri dan propertis elemen jembatan pada Gambar 11 selanjutnya digunakan sebagai input data dalam melakukan perhitungan gaya tumpu vertikal kabel model struktur Model II. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan perangkat lunak Mathcad berikut.

Modulus Elastisitas Baja $E_s := 4320000$ ksf Beban Mati Gelagar $w_g := 6.0 \frac{\text{kip}}{\text{ft}}$

Dimensi Gelagar $I_g := 131.0$ ft⁴
 $A_g := 3.44$ ft²
 $h_g := \sqrt{\frac{12 \cdot I_g}{A_g}} = 21.377$ -ft
 $b_g := \frac{A_g}{h_g} = 0.161$ -ft

Tower $I_{T1} := 24.4$ ft⁴ $I_{T2} := 40$ ft⁴ $I_{T3} := 50$ ft⁴
 $A_{T1} := 2.18$ ft² $A_{T2} := 2.45$ ft² $A_{T3} := 2.90$ ft²
 $h_{T1} := \sqrt{\frac{12 \cdot I_{T1}}{A_{T1}}} = 11.589$ -ft $h_{T2} := \sqrt{\frac{12 \cdot I_{T2}}{A_{T2}}} = 13.997$ -ft
 $b_{T1} := \frac{A_{T1}}{h_{T1}} = 0.188$ -ft $b_{T2} := \frac{A_{T2}}{h_{T2}} = 0.175$ -ft
 $h_{T3} := \sqrt{\frac{12 \cdot I_{T3}}{A_{T3}}} = 14.384$ -ft
 $b_{T3} := \frac{A_{T3}}{h_{T3}} = 0.202$ -ft

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

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

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

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

Panjang Jembatan, m $L := 2000\text{ft}$

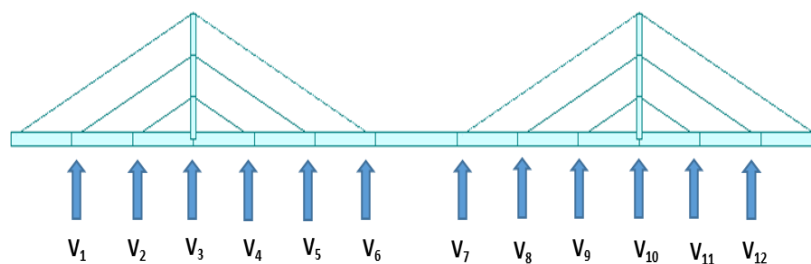
Deformasi dek akibat beban merata, m $\text{def_qDL}(x) := \frac{wg \cdot x}{24 \cdot E_s \cdot I_g} \cdot (x^3 - 2 \cdot L \cdot x^2 + L^3)$

Deformasi dek akibat beban terpusat, m $\text{def_P}(x, a) := \begin{cases} \frac{(L-a) \cdot x}{6 \cdot E_s \cdot I_g \cdot L} \cdot [L^2 - (L-a)^2 - x^2] & \text{if } x \leq a \\ \frac{a \cdot (L-x)}{6 \cdot E_s \cdot I_g \cdot L} \cdot (2 \cdot L \cdot x - x^2 - a^2) & \text{if } x > a \end{cases}$

Dengan menggunakan metode superposisi, didapat besarnya gaya tumpu vertikal, seperti yang disajikan pada Tabel 4. Distribusi gaya tumpu vertikal tersebut diperlihatkan pada Gambar 13.

Tabel 4 Gaya Tumpu Vertikal Kabel pada Model II

V_1 (tonf)	V_2 (tonf)	V_3 (tonf)	V_4 (tonf)	V_5 (tonf)	V_6 (tonf)	V_7 (tonf)	V_8 (tonf)	V_9 (tonf)	V_{10} (tonf)	V_{11} (tonf)	V_{12} (tonf)
510.132	434.472	451.979	457.61	417.58	550.748	550.748	417.58	457.61	451.979	434.472	510.132



Gambar 13 Distribusi Gaya Tumpu Vertikal Kabel Model II

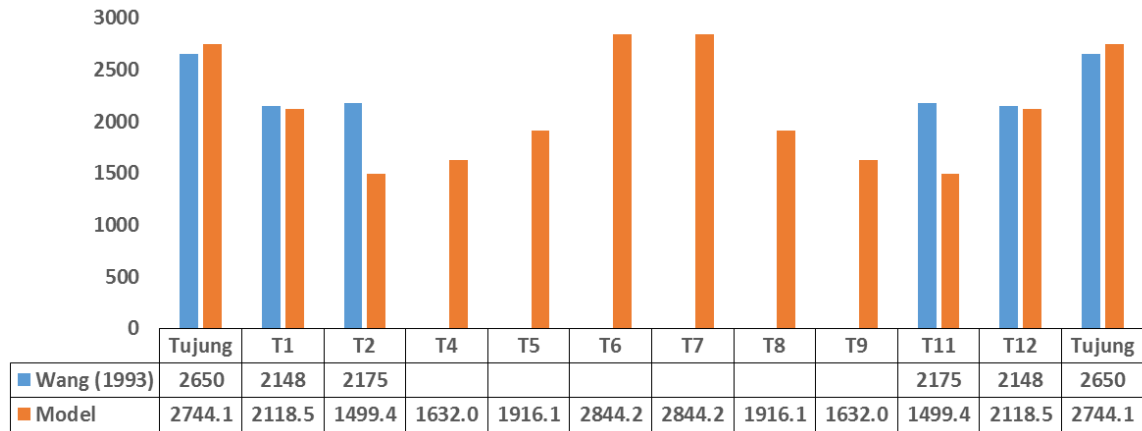
Besarnya gaya tarik kabel ditentukan dengan membagi masing-masing gaya tumpu vertikal dengan nilai *sinus* masing-masing sudut antara kabel dan dek jembatan. Besarnya gaya tarik kabel yang diperoleh adalah:

$$T_1 := \frac{P_1}{\sin(\theta_2)} = 1839.307 \cdot \text{kip} \quad T_4 := \frac{P_4}{\sin(\theta_1)} = 1144.025 \cdot \text{kip} \quad T_6 := \frac{P_6}{\sin(\theta_3)} = 2712.121 \cdot \text{kip}$$

$$T_2 := \frac{P_2}{\sin(\theta_1)} = 1086.18 \cdot \text{kip} \quad T_5 := \frac{P_5}{\sin(\theta_2)} = 1505.606 \cdot \text{kip}$$

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

diberikan adalah melalui efektivitas daya dukung vertikal kabel, yang mana semakin kecil nilai sudutnya, semakin besar gaya tarik kabel yang dibutuhkan.



Gambar 14 Perbandingan Distribusi Gaya Tarik Kabel (kips) pada Model II

PENYETELAN KABEL (*CABLE TUNING*)

Selain digunakan pada tahap perancangan, pendekatan yang digunakan pada studi ini juga dapat digunakan selama masa konstruksi sebagai kontrol lendutan (*deflection control*). Tujuannya adalah untuk memprediksi adanya variasi perubahan gaya tarik ruji kabel jembatan terhadap data perencanaan yang diindikasikan berdasarkan hasil pengukuran secara visual di lapangan, melalui terjadinya perubahan geometri struktur jembatan beruji kabel (Mahmoud, 2006).

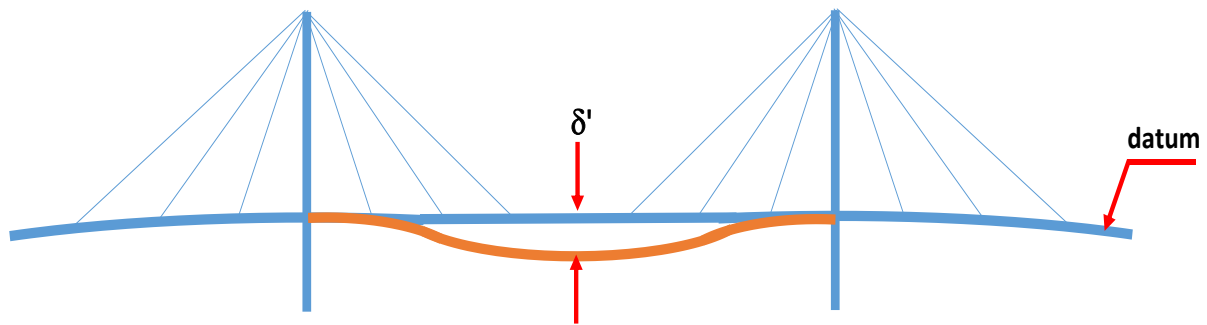
Mekanisme perhitungan dalam memprediksi adanya perubahan gaya tarikan pada ruji kabel, sebagai fungsi perubahan elevasi dek jembatan, dilakukan dengan memodifikasi Persamaan 4 menjadi Persamaan 10. Perlu diperhatikan bahwa nilai δ'_i sesungguhnya merupakan nilai perubahan lengkung vertikal geometri jembatan selama konstruksi jembatan terhadap kondisi perencanaan (*datum*) struktur jembatan (Gambar 15).

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta'_1 \\ \delta'_2 \\ \vdots \\ \delta'_j \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1j} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{i1} & k_{i2} & \dots & k_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_1 - \delta'_1 \\ \delta_2 - \delta'_2 \\ \vdots \\ \delta_j - \delta'_j \end{bmatrix} = [0]$$

dengan:

δ'_1 = deformasi jembatan eksisting



Gambar 15 Perubahan Geometri (δ') Lengkungan Dek Jembatan Beruji Kabel

Dari perhitungan dengan menggunakan Persamaan 10 tersebut akan didapat nilai gaya *initial pretension* P_1, P_2, \dots, P_n yang baru. Selanjutnya nilai-nilai tersebut digunakan sebagai *input* data pada model numerik struktur jembatan, untuk kemudian dilakukan perhitungan struktur, sehingga didapat besarnya masing-masing gaya tarik ruji kabel yang bekerja pada kondisi struktur jembatan eksisting.

Langkah selanjutnya adalah melakukan verifikasi besarnya gaya tarik kabel hasil model perhitungan dengan hasil *sampling* pengukuran gaya tarik kabel sesungguhnya. Hal ini dimaksudkan untuk memastikan bahwa model numerik struktur memiliki kesesuaian perilaku yang sama dengan struktur jembatan terbangun. Setelah mendapatkan model numerik yang dapat mewakili perilaku struktur jembatan beruji kabel, baik kondisi perancangan maupun kondisi pelaksanaan, identifikasi terhadap penyebab perubahan geometri jembatan dapat dilakukan. Apabila direncanakan perbaikan geometri jembatan melalui skema peninjauan gaya tarik pada ruji kabel, algoritma dalam studi ini dapat digunakan dalam hal melakukan analisis mengenai skema penarikan ulang (*retension*) atau skema penguluran (*detension*) untuk setiap ruji kabel jembatan terbangun.

KESIMPULAN

Pada kajian ini diuraikan penjelasan mengenai prosedur perhitungan gaya pratarik awal melalui penerapan metode pendekatan bentang sebagai metode yang dapat digunakan dalam melakukan kontrol geometri pada jembatan beruji kabel. Beberapa hal yang dapat disimpulkan dari studi ini adalah sebagai berikut:

- 1) Penerapan metode pendekatan bentang jamak menawarkan kemudahan dan kecepatan dalam proses perhitungannya. Hal ini dikarenakan metode ini tidak memerlukan waktu untuk menjalankan iterasi dalam proses perhitungannya, serta tidak bergantung pada kelengkapan fitur yang dimiliki oleh perangkat lunak analisis struktur. Hasil perhitungan menggunakan metode ini dapat langsung diinput ke dalam perangkat lunak analisis struktur sebagai data *load case*, yang mana hal tersebut sudah merupakan kelaziman dalam melaksanakan perhitungan struktur dengan menggunakan bantuan perangkat lunak.

- 2) Berdasarkan hasil yang didapat, metode pendekatan bentang jamak 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 melalui efektivitas daya dukung vertikal kabel, yang mana semakin kecil nilai sudutnya, semakin besar gaya tarik kabel yang dibutuhkan. Dengan demikian, kabel-kabel yang bergerak menjauhi pylon akan memiliki gaya tarik yang semakin besar.
- 3) Penerapan metode pendekatan bentang jamak tidak terbatas hanya pada tahap perancangan konstruksi jembatan beruji kabel. Metode ini juga dapat digunakan selama tahap pelaksanaan pembangunan jembatan, terutama yang berkaitan dengan aspek geometri jembatan beruji kabel. Pengaruh perubahan geometri jembatan dapat diakomodasi melalui formulasi lendutan balok bentang jamak dengan memasukkan nilai perubahan geometri (elevasi) pada setiap titik tumpu kabel, sebagai nilai lendutannya.

DAFTAR PUSTAKA

- Bender, B.F. dan Janssen, H.H. 1982. *Geometry Control of Precast Segmental Concrete Bridges*. PCI Journal, 27 (4): 72–86.
- Burden, R.L. dan Faires, J.D. 2001. *Numerical Analysis*. Ninth Edition. Boston, MA: Brooks/Cole Cengage Learning.
- Gottemoeller, F. 2004. *Bridgescape, the Art of Designing Bridges*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, Inc.
- Liu, M.Y. dan Wang, P.H. 2015. *Initial Shapes of Cable-Stayed Bridges during Construction by Cantilever Methods—Numerical Simulation and Validation of the Kao Ping Hsi Bridge*. London: IntechOpen Limited.
- Mahmoud, K.M. 2006. *Advances in Cable Supported Bridges*. London: CRC Press.
- Midas Information Technology Co, Ltd. 2011. *Example of Unknown Load Factors using Forward Construction Stage Analysis*. Seongnam.
- Parametric Technology Corporation (PTC). 2007. *Mathcad 14.0 User's Manual*. Boston, MA.
- Sakran, M dan Rao, D.S.P. 2010, *Cable Stayed Bridges for Elegance and Economy*. Trinidad: University of the West Indies.
- Sakran, M. 2010. *Static and Dynamic Analysis of Cable Stayed Bridges*. Thesis (unpublished). Hyderabad: Osmania University.
- Svensson, H. 2012. *Cable Stayed Bridges 40 Years of Experience Worldwide*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Virlogeux, M. 2002. *New Trends in Prestressed Concrete Bridges*. Journal of the FIB, 3 (2): 67–97.

- Walther, R. 1988. *Cable Stayed Bridges*. London: Thomas Telford Ltd.
- Wang, P.H., Tseng, T.C., dan Yang, C.G. 1993. *Initial Shape of Cable Stayed Bridges*. *Computers dan Structures*, 47 (1): 111–123.
- Wittfoht, H. 1984. *Building Bridges: History, Technology and Construction*. Duesseldorf: Beton-Vlg.