

**Analisis Non Linier Tegangan
Dan Deformasi Struktur Jembatan Beton Prategang Pada Tahap Konstruksi
Dengan Metode *Balanced Cantilever*
*Non-linear Analysis Of Stress And Prestressed Concrete Bridge Structure
Deformation Within The Construction Phase Using The Balanced Cantilever method***

Agus Setyawan

Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil & Perencanaan Universitas
Surakarta

Abstract

Prestressed concrete bridge structure under construction phase using the balanced cantilever method is widely used in the construction of bridge structure. The method is suitable method for the erection of long span segmental bridges. Balanced cantilever method is developed to minimize the need of scaffolding as the implementation of in-situ casting. However, it is required to consider the stress and deformation which may occur. This might happen because of the difference of the concrete strength at each concrete segment connected to the last segment of the bridge. Realistic approach can be performed numerically by non-linear finite element analysis by using ATENA software. The objective of this study is to determine and compare the stress and deformation which occur in prestressed concrete bridge structures by using the balanced cantilever method based on the non-linear and linear analysis.

This study reviewed the bridge of Tol Semarang - Solo (Span A1 - P1 - A2, Banyumanik I). This bridge was half-spans numerically modelled by using assumption of fixed pier placement (boundary condition). The numerical models bridge box girder were analyzed using the ATENA software. The results of the this study were then compared to the results of linear analysis of SAP 2000 software by Primajaya (2010). Further research on the maximum load and deflection of the cantilever box girder bridge structure was done until the collapse.

The results showed the comparison non-linear and linear of analysis by the ATENA software and SAP 2000 software. The result showed the same maximum stresses occurred on the segment I of the bridge structure for both analyses. The differences of the results on both analyzes stresses of the top sides for condition 1/3 span, 2/3 span and full span were 0,736 MPa, 2,353 MPa, 0,009 MPa, respectively. On the bottom side the differences were 0,284 MPa, 0,878 MPa, 2,518 MPa. Maximum load that can be held bridge structures during the balance cantilever was 360 KN at the free end of the balance cantilever with deflection of 180 mm by the time of the collapse.

Keyword— *stress, deformation, balanced cantilever.*

PENDAHULUAN

Pengetahuan mengenai perilaku komponen struktur untuk setiap tahap pembebanan, mulai dari kondisi linier sampai dengan keruntuhannya merupakan hal yang penting untuk pengembangan

desain struktur jembatan bentang panjang yang aman dan efisien, sebelum dibangun. Primajaya (2010) melakukan penelitian jembatan segmental beton prategang pada tahap konstruksi dengan metode *balanced cantilever* dengan analisis *elastis linier*

menggunakan program SAP 2000, hasil analisis menggunakan program SAP 2000 diperoleh gaya-gaya dalam yang kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan untuk menentukan tegangan yang terjadi, namun tidak bisa diketahui perilaku struktur pada tahap pembebanan itu. Untuk mengetahui perilaku struktur jembatan segmental beton prategang pada pembebanan tahap pelaksanaan dengan simulasi pembebanan terlampaunya kondisi *elastis linier* sehingga terjadi retak sampai mendekati keruntuhan, pendekatan analisis secara numerik dapat menggunakan analisis non linier elemen hingga menggunakan program ATENA.

TINJUAN PUSTAKA

A. Analisis Non Linier Beton Prategang

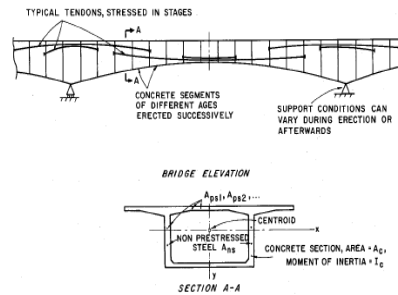
Analisis non-linier elemen hingga untuk struktur beton telah mengalami perkembangan yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Penelitian-penelitian yang dilakukan telah berhasil mengembangkan model konstitutif dan metode numerik untuk diimplementasikan dalam bentuk program komputer. Program komputer tersebut mampu melakukan analisis non-linier untuk keseluruhan struktur atau komponen struktur dengan perilaku material yang cukup realistis, dan simulasi perilaku struktur akibat pembebanan yang sebenarnya (Cervenka dan Cervenka, 1996).

Pemodelan elemen hingga struktur beton bertulang pertama kali dilakukan oleh Ngo dan Scordelis (1967) yang memperhitungkan pengaruh retak yang didasarkan pada pola retak yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan pendekatan ini perlu dilakukan pendekatan topologi model seiring dengan penambahan beban, karena pola retak berubah dengan berubahnya beban. Dengan keterbatasan tersebut, maka dibutuhkan waktu yang lebih banyak untuk melakukan analisis. Pendekatan retak *smearred* mulai diperkenalkan oleh Rashid pada tahun 1968 untuk memodelkan retak pada beton. Pada pendekatan retak *smearred*, retak pada beton terjadi ketika tegangan prinsipal melebihi kuat tarik ultimit. Modulus elastisitas beton kemudian dianggap nol pada arah paralel terhadap arah tegangan prinsipal tersebut (Kachlakev dkk, 2001).

**B. Tegangan dan Deformasi Jembatan
Balance Cantilever**

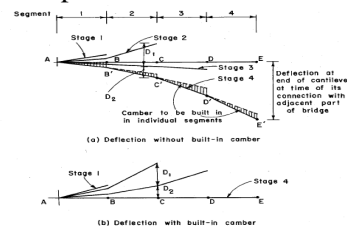
Metode *balance cantilever* merupakan salah satu metode yang cocok untuk *erection* jembatan segmental dengan bentang panjang. Metode ini, segmen-segmen ditempatkan secara terencana untuk membentuk *balance cantilever* yang dimulai dari pier jembatan, apabila *cantilever* dari dua pier yang berdekatan, bertemu dan keduanya disambungkan untuk membentuk suatu bentang yang menerus.

Tadros, Ghali, dan Dilger (1979) menyajikan suatu metode untuk evaluasi perkembangan waktu terhadap lendutan dan tegangan pada beton dan baja di beberapa potongan melintang pada rangka bidang statis tak tentu termasuk pengaruh rangkakan dan susut beton serta tegangan relaksasi bajanya. Rangka diasumsikan tersusun dari segmen-segmen yang berbeda-beda umur beton bertulangannya dengan baja non prategang dengan beberapa tahapan penegangan.



Gambar 1. Tampak memanjang dan potongan jembatan (Tadros dkk., 1979)

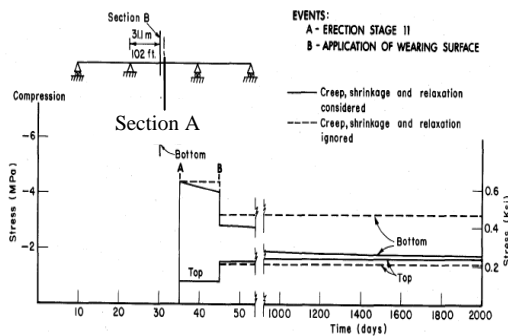
Metode kekakuan diadopsi untuk penentuan tegangan dan lendutan dengan *step by step procedure* yaitu metode analisis struktur untuk menghitung kenaikan dari lendutan dan tegangan. Deskripsi metode tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lendutan dari empat segmen *Cantilever*. (Tadros dkk., 1979)

Gambar 2a menunjukkan lendutan jangka panjang dari struktur *cantilever* dengan empat tahapan. Untuk mengurangi *discontinuity* rotasi maupun lendutan dibuat *camber* pada setiap segmen dapat dilihat pada Gambar 2b. Kemudian metode tersebut diaplikasikan pada program komputer untuk menghitung struktur jembatan *balance cantilever*

Dari hasil perhitungan menggunakan bantuan program komputer yang didasarkan pada *step by step prosedur* dengan dua asumsi yaitu rangkak, susut beton, relaksasi baja tidak diperhitungkan dan diperhitungkan. Pengaruh jangka panjang pada tegangan beton potongan B ditengah bentang lebih besar dibanding potongan A (Gambar 2.4) diujung tumpuan. Perbandingan besarnya tegangan berbanding dengan waktu dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Tegangan yang terjadi berbanding waktu (Tadros dkk., 1979)

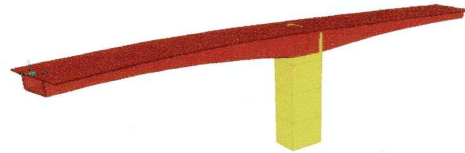
Dari Gambar 3 dapat disimpulkan bahwa pengaruh rangkak, susut beton dan relaksasi baja mempunyai pengaruh yang besar terhadap tegangan yang terjadi pada masa setelah tahap pelaksanaan konstruksi sehingga harus diperhitungkan dengan benar.

METODOLOGI

Penelitian menggunakan pendekatan model numeric dengan analisis non linier program ATENA.. Penelitian dilakukan mulai dari membuat pemodelan *box girder* struktur atas jembatan yang ditinjau, beton bertulang dengan kabel prategang sesuai dengan data-data dari lapangan dengan material properties sesuai dengan penelitian Primajaya (2010).

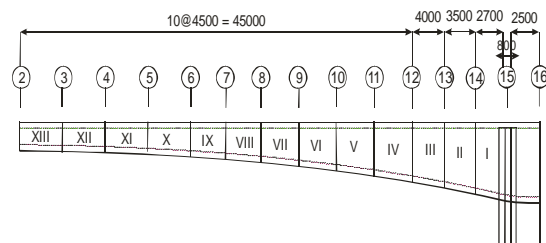
1. Material

- a. Beton ($f'c$) : 41,5 MPa
- b. *Strand* Prestress
 - Semua *Strand* harus memenuhi syarat standar ASTM A416-85 Grade 270
 - Tipe : 7 *Wire Lox Relaxation*
 - Diameter Nominal : 12,7 mm (0,5")
 - Luas Nominal : 98 mm²
 - Kuat Leleh : 1670 MPa
 - Kuat Tarik : 1860 MPa
 - Modulus Elastisitas Nominal: 195000 MPa
- c. Tendon
 - Semua tendon harus memenuhi syarat standar ASTM A416-85 Grade 270
 - Desain Tendon : 5 – 19
 - Banyaknya *Strand* di Tendon: 19 *Strand*
 - Gaya *Ultimate* Minimum : 3463 KN = 346300 Kg
 - Jacking Force* : 2597 KN = 259700 Kg
 - Draw In* pada Tendon : 7 mm



Gambar 4. Model jembatan bentang penuh 3D (Primajaya, 2010)

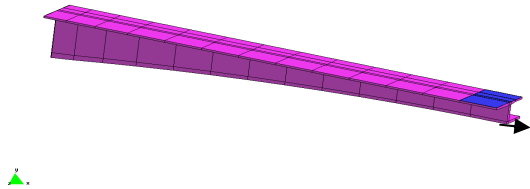
Dari struktur *box girder* diatas, dengan memanfaatkan kondisi simetris *box girder*, baik geometri maupun pembebanannya, maka pemodelan elemen hingga hanya akan dilakukan setengah dari struktur atas jembatan *cantilever* tersebut, dengan asumsi tumpuan pada pangkal jembatan yang terhubung dengan pilar berupa jepit (lihat Gambar 5)



Gambar 5. Model jembatan setengah bentang 2D (Primajaya, 2010)

Jembatan yang dimodelkan setengah bentang yang terdiri dari 13 segmen yang masing-masing segmen mempunyai dimensi

dan umur beton yang berbeda-beda sesuai dengan urutan waktu pelaksanaan. Pada pemodelan numeric dengan program ATENA dari setengah bentang tersebut *box girdernya* dimodelkan hanya setengah penampang *box girder* seperti terlihat pada Gambar 6

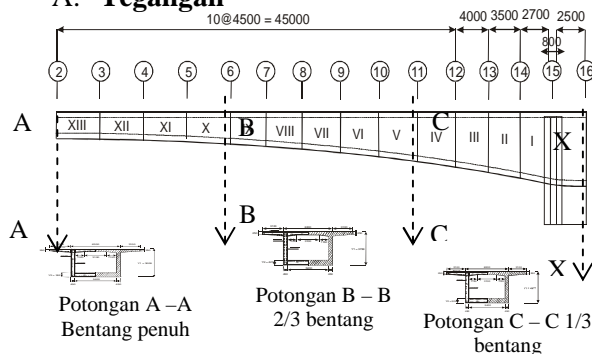


Gambar 6. Model jembatan dalam ATENA

Adapun langkah-langkah penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

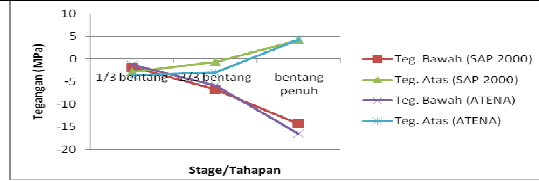
A. Tegangan



Gambar 7. Letak segmen jembatan yang ditinjau

Tabel. 1. Perbandingan Tegangan hasil penelitian (pangkal segmen I)

Stage (Tahapan)	SAP 2000		ATENA	
	Teg. Atas (MPa)	Teg. Bawah (MPa)	Teg. Atas (MPa)	Teg. Bawah (MPa)
1/3 bentang	-2,804	-1,574	-3,54	-1,29
2/3 bentang	-0,627	-6,777	-2,98	-5,899
Bentang penuh	4,227	-14,412	4,321	-16,57



Gambar 8. Perbandingan tegangan yang terjadi pada segmen I Pot X-X

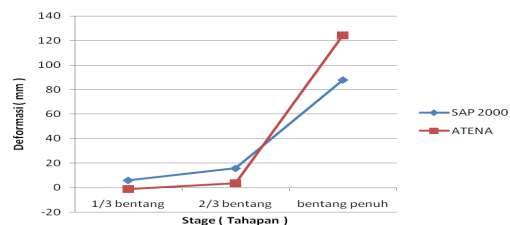
Perbedaan kecil nilai tegangan yang terjadi dari kedua program sangat wajar dikarenakan perbedaan pendekatan model analisis. SAP 2000 menggunakan pendekatan model analisis *linier elastis* untuk mendapatkan nilai tegangan diperoleh dari hasil analisis program yang berupa momen kemudian dihitung secara manual untuk memperoleh nilai tegangan, sedangkan program ATENA yang menggunakan pendekatan model analisis non linier dapat menghasilkan output nilai tegangan yang terjadi pada setiap nodal elemen.

B. Deformasi (Lendutan)

Setelah dilakukan analisis dengan menggunakan program ATENA, maka diperoleh hubungan panjang bentang dengan deformasi (lendutan) untuk asumsi pembebanan yang sama ketiga kondisi tinjauan panjang bentang jembatan pada tahap konstruksi dengan metode *Balance Cantilever* dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 9.

Tabel 2. Perbandingan Deformasi Hasil Penelitian.

Stage (Tahapan)	SAP 2000 (mm)	ATENA (mm)
1/3 bentang	6,03	-1,2
2/3 bentang	15,75	3,53
bentang penuh	87,64	124,3



Gambar 9. Perbandingan Deformasi.

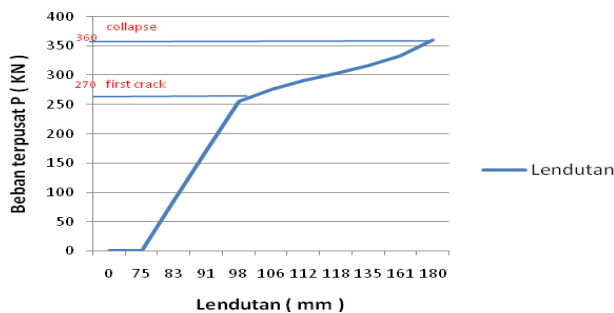
Berdasarkan gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa perilaku *box girder* pada saat menerima beban transfer dari tendon prategang tampak perbedaan dari hasil

analisis dengan program SAP 2000 dengan ATENA yaitu pada tinjauan 1/3 bentang pada program ATENA *box girder* mengalami deformasi ke atas sedangkan hasil program SAP 2000 mengalami deformasi ke bawah. Tetapi setelah ditinjau untuk 2/3 bentang dari hasil analisis kedua program tersebut hasilnya sama mengalami deformasi kebawah dengan sedikit selisih nilai deformasinya. Pada ujung bentang kantilever deformasi (lendutan) hasil analisis program ATENA lebih besar karena pada tahap pembebanan sebelum mencapai beban 300 KN yaitu pada saat tahap pembebanan mencapai beban 270 KN struktur jembatan *box girder* telah mengalami *first crack*.

C. Beban Runtuh

1. Hubungan Beban dan Lendutan

Struktur atas jembatan beton prategang *box girder* metode *Balance Cantilever* yang ditinjau pada kondisi bentang penuh dari hasil analisis non linier elemen hingga dengan program ATENA diperoleh hubungan beban – lendutan *box girder*, seperti terlihat pada Gambar 10



Gambar 10. Hubungan Peningkatan Beban Dengan Beban pada Ujung Cantilever

Gambar 10 menunjukkan bahwa lendutan yang terjadi akibat berat sendiri struktur atas *box girder* pada bentang penuh mencapai 75 mm kemudian setelah diberi beban secara bertahap sampai dengan beban 255 KN menunjukkan peningkatan lendutan secara linier sampai besarnya lendutan 98 mm, kemudian setelah mencapai beban sebesar 360 KN dan lendutan mencapai 180 mm, model struktur atas

jembatan *box girder* mengalami keruntuhan.

2. Pola Retak

Untuk mengetahui model keruntuhan dari struktur dapat dilihat dari perkembangan pola retaknya sehingga dapat ditentukan jenis kegagalan struktur *box girder* tersebut. Kegagalan lentur akan membentuk retak di sepanjang bidang momen, sedangkan kegagalan geser membentuk retak yang terkonsentrasi pada suatu tempat yang menahan gaya geser paling besar. Pola retak yang terjadi pada struktur jembatan *box girder* metode *Balance Cantilever* dapat dilihat pada Gambar 12



a. Tampak atas

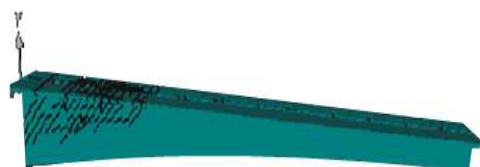


b. Tampak samping

Gambar 11. Pola retak saat retak pertama



b. Tampak atas



b. Tampak samping

Gambar 12. Pola retak saat akan runtuh

Gambar 11 menunjukkan bahwa retak pertama terjadi pada saat beban mencapai 270 KN, dengan meningkatnya tahap pembebanan sampai dengan beban 360 KN

struktur box girder mengalami keruntuhan, Kegagalan struktur tersebut merupakan kegagalan lentur sesuai dengan pola retak yang terjadi berada di sepanjang daerah lentur dan juga berdasarkan hasil analisis perhitungan tegangan terjadi pada sisi atas boxgirder sebesar $\bar{\sigma}_a = 5,24535 \text{ MPa} > \bar{\sigma} = 0,62 \sqrt{f_c'} = 4,31352 \text{ MPa}$. Tegangan sisi atasnya melebihi kuat tarik lentur beton (*modulus of rupture*) akibat momen lentur. Sedangkan tegangan geser yang terjadi $\tau_{\max} = 0,73872 \text{ MPa} < \bar{\tau} = 0,33 \sqrt{f_c'} = 2,2959 \text{ MPa}$. Tegangan geser maksimal pada beton belum melampaui kuat geser betonnya .

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Dari hasil perbandingan analisis linier Program SAP 2000 dengan analisa non linier program ATENA pada struktur jembatan, beton prategang *box girder* dengan metode pelaksanaan *balanced cantilever* dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Tegangan maksimal terjadi pada Segmen I (pangkal kantilever) baik dari hasil analisis Program SAP 2000 dan Program ATENA.
2. Perbandingan tegangan beton pada segmen I hasil analisis Program SAP 2000 dengan Program ATENA untuk kondisi tinjauan 1/3 bentang, 2/3 bentang, dan bentang penuh pada sisi atas berturut-turut terjadi perbedaan tegangan beton sebesar 0,736 MPa, 2,353 MPa, 0,009 MPa. Sedangkan sisi bawah berturut-turut terjadi perbedaan tegangan sebesar 0,284MPa, 0,878 MPa, 2,518 MPa.
3. Analisis non linier dengan program ATENA maupun program SAP 2000 pada tinjauan bentang penuh tegangan beton sisi atas *box girder* bernilai positif yang besarnya melebihi kuat tarik lentur beton (*modulus of rupture*) akibat momen lentur ketentuan AASHTO sebesar $= 0,62\sqrt{f_c'}$, jadi kemungkinan retak mulai terjadi pada beton.
4. Perbandingan lendutan pada ujung kantilever hasil analisis Program SAP 2000 dengan Program ATENA untuk

kondisi tinjauan 1/3 bentang, 2/3 bentang, dan bentang penuh pada sisi atas *box girder* berturut-turut terjadi selisih sebesar 7,23 mm, 12,12 mm, 36,66 mm.

5. Pola retak yang terjadi pada struktur beton prategang *box girder* metode *balanced cantilever* sebagian besar berada pada daerah tumpuan jepit dibagian sayap dan badan atas yang berarti menunjukkan kegagalan akibat momen lentur negatif.

B. Saran

Setelah dilakukan penelitian ini, maka ada beberapa yang perlu diperhatikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya yaitu :

1. Pemodelan struktur jembatan segmental metode *balanced cantilever* pada program ATENA sebaiknya setiap model segmen jembatan dilakukan dahulu proses runningnya untuk menghindari terjadinya *error* pada saat running program setelah model keseluruhan jembatan.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk struktur jembatan *Balance Cantilever* dengan program-program non linier lain yang sejenis.

DAFTAR PUSTAKA

- ACI Committee 318, 2005, *Building Code Requirement for Structural Concrete and Commentary (ACI 318M-05)*, American Concrete Institute, Formington Hills, USA.
- Cervenka, V. Jencelle, L. dan Cervenka, J., 2009, *ATENA Program Documentation Part 1,2,3 Theory*, Cervenka Consulling, Praha.
- Cervenka, V. Jencelle, L. dan Cervenka, J., 2009, *ATENA Program Documentation Part 4,5,6,7,8*, Cervenka Consulling, Praha.
- Faridi Salahuddin A., 2010, *Analisis Non Linier Elemen Hingga Struktur Balok Beton Prategang Dua Bentangan*, Thesis, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Nawy, E.G., 2001, *Beton Prategang*, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Ngo, D., dan Scordelis, A.C., 1967, *Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams*, Journal of the

- American Concrete Institute, No. 64-14, hal. 152-163
- Prasetyo, 2010, *Jembatan Nasional Suramadu, Konstruksi Approach Bridge*, Seminar dan Pameran HAKI.
- Primajaya, B.E., 2010, *Tinjauan Struktur Jembatan Beton Prategang pada Tahap Konstruksi dengan Metode "Balance Cantilever"*, Tugas Akhir, Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta
- Sulistyo, D., 2008, *Bahan Ajar Struktur Beton Prategang*. Universitas Gadjah Mada. Yogyakarta.
- Triwiyono, A., 2003, *Bahan Ajar Struktur Beton Prategang*, UGM. Yogyakarta.
- Tadros, M.K., Ghali, A., dan Dilger, W.H., 1979, *Long-Term Stresses and Deformation of segmental Bridge*, PCI journal