

## ANALISIS JEMBATAN BETON PRATEGANG *BOX GIRDER* DENGAN METODE *BALANCED CANTILEVER*

Willy Kosim<sup>1</sup> dan F.X. Supartono<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
willy.325160025@stu.untar.ac.id

<sup>2</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta  
fxsupartono@gmail.com

Masuk: 17-01-2020, revisi: 04-03-2020, diterima untuk diterbitkan: 05-03-2020

### ABSTRACT

*Indonesia is a country that has a large population, causing severe traffic jam. Therefore, the bridge is an important part in Indonesia to overcome the traffic jam. The choice of method is very important in bridge construction, so it does not interfere with the routines of the people. Bridges using the balanced cantilever method become the choice that is often used in bridge construction, because this construction method does not require direct contact with the ground. However, prestressed concrete bridge with this construction method requires more sophisticated technology and adequate work. The girder used is a box girder because the torque resistance is quite high and its self weight relatively lighter. Box girders in the balanced cantilever method can also be made to vary in height and become smaller at the end of the cantilever, therefore reducing the weight due to self weight. At this writing, stress analysis during the construction period and after construction is complete, the box girder prestressed concrete bridges using the balanced cantilever method will be carried out with the Midas Civil program in accordance with the loading standards in SNI 1725: 2016, ASTM in the use of materials, and CEB-FIP in determining creep and shrinkage.*

*Keywords: Balanced Cantilever; Box girder; Prestressed Concrete; Midas Civil.*

### ABSTRAK

Indonesia merupakan negara yang memiliki jumlah penduduk yang banyak, sehingga menimbulkan kemacetan lalu lintas yang sangat parah. Oleh karena itu, jembatan merupakan bagian penting di Indonesia untuk mengatasi kemacetan tersebut. Pemilihan metode menjadi sangat penting dalam konstruksi jembatan agar tidak mengganggu rutinitas dari masyarakat. Jembatan dengan metode *balanced cantilever* menjadi pilihan yang sering digunakan dalam pembangunan jembatan, karena metode konstruksi ini tidak memerlukan kontak langsung dengan tanah. Namun, jembatan beton prategang dengan metode konstruksi ini memerlukan teknologi yang lebih canggih dan kemampuan kerja yang memadai. Gelagar yang digunakan adalah *box girder* karena ketahanan torsi yang cukup tinggi dan berat sendiri yang relatif lebih ringan. *Box girder* pada metode *balanced cantilever* juga dapat dibuat bervariasi tingginya dan mengecil pada ujung kantilever, sehingga mengurangi berat akibat diri sendiri. Pada penulisan ini, analisis tegangan selama masa konstruksi dan setelah konstruksi selesai, jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever* akan dilakukan dengan program Midas Civil sesuai dengan standar pembebanan pada SNI 1725 : 2016, ASTM dalam penggunaan material, dan CEB-FIP dalam menentukan *creep* dan *shrinkage*.

Kata kunci: Metode *Balanced Cantilever*; *Box girder*; Beton Prategang; Midas Civil.

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara kepulauan yang terdiri dari banyak pulau-pulau yang terpisah oleh sungai, danau, dan laut. Maka dari itu, perkembangan teknologi pembangunan jembatan sangat diperlukan mengingat pembangunan jembatan bentang panjang yang akan menyeberangi sungai-sungai lebar dan yang akan menghubungkan pulau-pulau di nusantara sangat dibutuhkan. Oleh karena itu, diperlukan penguasaan teknologi jembatan baik dari aspek peralatan, material maupun perencanaannya mutlak dibutuhkan. Dalam melakukan suatu perencanaan jembatan seorang perencana disarankan untuk menggunakan dan menguasai teknologi material yang mempunyai nilai efisiensi tinggi, kedap air, dan kuat menahan gaya-gaya yang bekerja di jembatan.

Jembatan adalah suatu struktur konstruksi yang berfungsi untuk menghubungkan dua bagian jalan yang terputus oleh adanya rintangan-rintangan seperti jurang yang dalam, alur sungai saluran irigasi, kereta api dan dapat juga

digunakan untuk daerah yang selalu mengalami permasalahan kemacetan lalu lintas. Permasalahan kemacetan lalu lintas di Indonesia cukup parah karena Indonesia menduduki urutan keempat negara dengan jumlah penduduk terbesar di dunia, dan setiap tahunnya penduduk Indonesia semakin bertambah disertai dengan meningkatnya daya beli masyarakat terhadap kendaraan bermotor.

Akibat dari kenaikan jumlah kendaraan ini, maka timbul masalah kemacetan di daerah-daerah tertentu karena infrastruktur jalanan yang belum memadai. Pada pemerintahan dibawah kepemimpinan Presiden Joko Widodo, pembangunan infrastruktur menjadi prioritas pembangunan nasional. Salah satu bentuk infrastruktur jembatan yang sering ditemukan adalah jembatan layang (*fly over*).

Jenis jembatan yang paling sering ditemukan adalah jembatan beton prategang karena mempunyai efisiensi yang tinggi dan mampu menahan gaya yang bekerja pada jembatan dengan baik. Jembatan beton prategang atau yang dikenal dengan *prestressed concrete bridge* merupakan salah satu jenis jembatan dengan material konstruksi beton prategang atau beton yang berisi kabel baja dengan tujuan untuk memberikan tegangan berupa tegangan tekan tambahan terhadap beton agar dapat mengurangi lendutan akibat beban kerja. Dalam hal ini, beton prategang sebagai solusi untuk mengatasi besarnya tegangan tarik yang timbul pada struktur beton khususnya pada struktur dengan bentang yang besar.

### Metode konstruksi

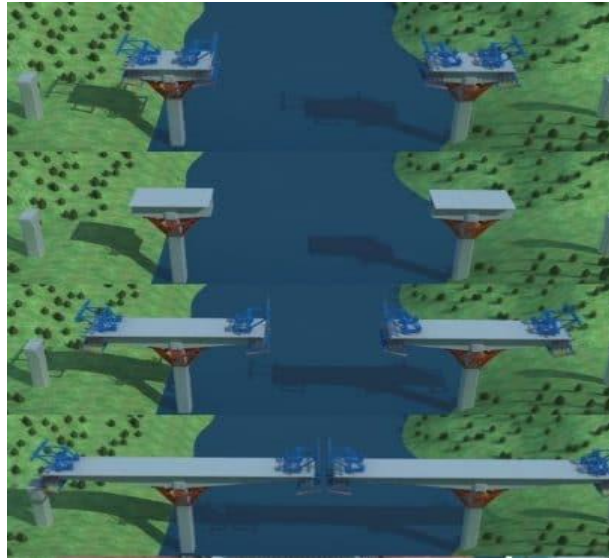
Dalam konstruksi jembatan beton prategang terdapat beberapa metode pelaksanaan konstruksi jembatan yang digunakan pada umumnya di Indonesia seperti MSS (*Movable Scaffolding System*), ILM (*Incremental Launching Method*), *Balanced Cantilever* dengan *Form Traveller*, dan *Cable Stayed*. Masing – masing dari metode pelaksanaan tersebut terdapat kelebihan dan kekurangan yang harus disesuaikan dengan kondisi lapangan. Pemilihan metode pelaksanaan sangat penting karena pemilihan metode tersebut akan berdampak kepada lamanya proses konstruksi, selain itu juga berpengaruh pada jumlah strands yang akan digunakan pada tendon jembatan yang akan berdampak pada biaya konstruksi.

### *Balanced cantilever* dan *box girder*

Untuk beberapa tahun terakhir ini, perencanaan struktur jembatan jembatan beton prategang yang paling sering ditemukan adalah jembatan dengan menggunakan *box girder* dengan prinsip beton prategang dan menggunakan metode *balanced cantilever*. Metode *balanced cantilever* adalah metode konstruksi yang memanfaatkan efek keseimbangan kantilever yang bertumpu pada pier. Pier yang akan menopang segmen demi segmen yang disusun sebagai kantilever dikedua sisinya dengan bantuan strand yang kemudian distressing agar seimbang dengan koordinat vertikal dek di sepanjang kantilever harus berada di dalam nilai toleransi yang diterima (Hernandez, Ouro, dan Romera 2014), sehingga metode *balanced cantilever* sangat cocok digunakan pada lokasi yang sulit seperti di jurang, di atas sungai dengan aliran yang deras, di atas rel kereta api karena jembatan dapat dibangun tanpa ada kontak dengan tanah, dan tanpa menggunakan bantuan sokongan lain seperti perancah/Shoring.

Dalam mendesain jembatan tipe ini perlu dilakukan analisa jembatan secara menyeluruh dan konstruksi bertahap khususnya dalam pelaksanaan konstruksi jembatan. Dimana dalam pelaksanaan konstruksi jembatan setiap tahapan konstruksi, besarnya gaya-gaya dalam, tidak boleh melampaui kapasitas penampang (Irpan, 2011).

Dalam pembangunan jembatan menggunakan metode *balanced cantilever*, gelagar yang umum digunakan adalah *box girder* karena memiliki keunggulan yang tahan terhadap torsi dan dapat mengurangi beban sendiri dari jembatan karena terdapat *void* pada bagian tengah dari gelagar itu sendiri. Metode *balanced cantilever* juga mendukung adanya pengurangan tinggi dari *box girder* yang bisa mengurangi beban sendiri dari jembatan itu sendiri. Metode *stressing* pada metode ini akan lebih baik menggunakan *stressing* dua arah karena menghasilkan kehilangan prategang yang lebih kecil dibandingkan *stressing* 1 arah (Rizkia, 2017). Ilustrasi dalam pembangunan jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever* dapat dilihat di Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi *balanced cantilever*

### Pembebanan dan tegangan izin

Pembebanan dilakukan berdasarkan SNI 1725 : 2016 dengan memperhitungkan SDL, BTR, dan BGT. Berikut detail dari pembebanan yang dilakukan :

- Beban SDL yang digunakan adalah lapisan permukaan beton aspal yaitu dengan berat isi 22 KN/m<sup>3</sup> sesuai pada tabel 4.1. Tebal aspal di asumsikan 3cm dengan lebar jalan dan trotoar sebesar 9m. Sehingga beban SDL yang dimasukkan adalah  $22 \text{ KN/m}^3 \times 0,03 \text{ m} \times 9 \text{ m} = 5,94 \text{ KN/m}$ .
- Beban BTR yang digunakan adalah panjang jembatan yang lebih dari 30m, sehingga beban BTR adalah  $9 \times (0,5 + 15/200) = 5,175 \text{ KN/m}^2 \times 9 \text{ m} = 46,575 \text{ KN/m}$ .
- Besarnya beban BGT adalah  $49 \text{ KN/m} \times 9 \text{ m} = 441 \text{ KN}$  ( beban terpusat ).

Hasil tegangan dari pembebanan pada jembatan akan diberi batasan berdasarkan SNI 2847:2013 dengan  $f'_c = 60$ . Berikut detail dari tegangan izin yang dijadikan acuan.

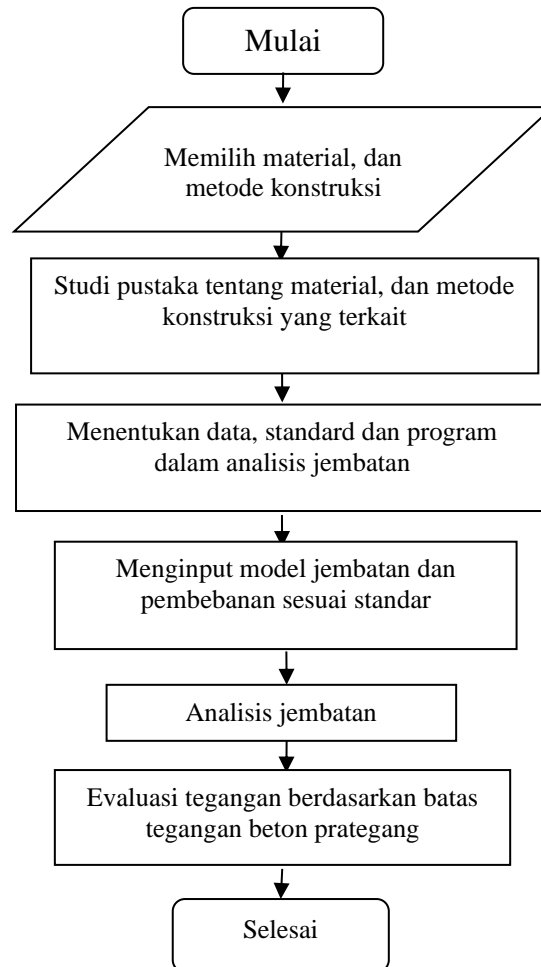
- Keadaan awal sebelum kehilangan prategang
 

Tegangan izin tekan	: $0,6 f'_ci$	= $0,6 \times 48$	= 28,8 MPa
Tegangan izin tarik	: $0,5 \cdot \sqrt{f'_ci}$	= $0,5 \times \sqrt{48}$	= 3,46 MPa
- Keadaan akhir setelah kehilangan prategang
 

Tegangan izin tekan	: $0,45 f'_c$	= $0,45 \times 60$	= 27 MPa
Tegangan izin tarik	: $0,5 \cdot \sqrt{f'_c}$	= $0,5 \times \sqrt{60}$	= 3,87 MPa

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan berdasarkan hasil analisis dengan bantuan program MIDAS CIVIL. Dalam melaksanakan analisis, langkah-langkah yang dilakukan oleh penulis digambarkan melalui diagram alir penelitian seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

### Studi pustaka

Penelitian dimulai dengan mengumpulkan teori untuk analisis jembatan *box girder* dengan metode *balanced cantilever* berupa buku, jurnal, penelitian.

### Data jembatan dan analisis dengan program MIDAS CIVIL

Analisis dengan program MIDAS CIVIL dilakukan untuk mengetahui hasil tegangan pada jembatan. Langkah pertama yang dilakukan adalah memilih wizard sesuai dengan metode yang dianalisis yaitu FCM ( *Free Cantilever Method* ). Setelah itu, masukkan seluruh data jembatan berupa metode pembuatan beton, umur beton, yang dapat dilihat pada Gambar 3 dan Gambar 4. Selain itu, data material, *pier*, dan *strand* jembatan yang dimasukkan sebagai berikut :

- Mutu Beton = 60 MPa
- Mutu Baja = A416-270
- Ukuran *Pier* = 4m x 4m
- Jumlah *Strand* = 12
- Diameter *Strand* = 15,2 mm

FCM Bridge Wizard

Bridge Model Data Type  
☒ Type1 ☐ Type2

Model | Section | Tendon

Diagram showing bridge layout with labels: FSM, K1, Zone1, P.T., B, Zone2, K2, H, C.

Material (Girder): 1: beton f'c 60  
 Material (Pier): 1: beton f'c 60  
 Number of Piers: 2  
 Method: Cast-in  
 Radius: 0 m  
 Convex ☒ Concave ☐

Pier Table  
 P.T.: 12 m  
 B: 5 m  
 Advanced...

Key Segment  
 K1: 2 m  
 K2: 4 m  
 Advanced...

Pier  
 H: 10 m  
 C: 0 m

FSM  
 FSM(L): 2@2  
 FSM(R): 2@2

Zone1: 7@6  
 Zone2: 7@6  
 Advanced...

Pier Table Placing... Member Age... Open... Save As... OK Cancel

Gambar 3. Model jembatan

Member Age

FSM : 60 day(s)  
 Key Seg : 10 day(s)  
 Pier Table : 15 day(s)

Segment : 5 day(s)  
 Pier : 100 day(s)

OK Cancel

Gambar 4. Member age

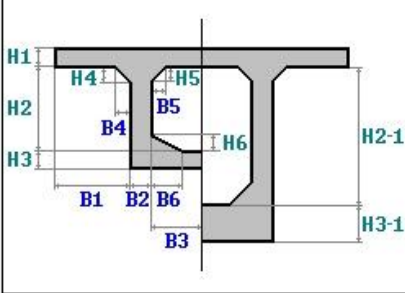
Selain data jembatan dan umur beton, hal penting yang harus diinput pada aplikasi MIDAS CIVIL yaitu ukuran *box girder* di atas pier table dan ukuran *box girder* saat berada di *closure section*, dan letak tendon yang dapat dilihat pada Gambar 5 sampai Gambar 7. Hal tersebut yang akan sangat menentukan tegangan pada analisis.

FCM Bridge Wizard

Bridge Model Data Type  
☒ Type1 ☐ Type2

Model Section Tendon

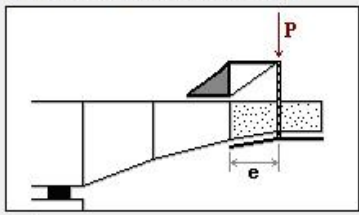
Section Type  
☒ 1 Cell ☐ 2 Cell



View Option  
☒ Bitmap ☐ Drawing

H1	0.25	m	H2	2.2	m
H3	0.25	m	H4	0.25	m
H5	0.25	m	H6	0.25	m
H2-1	5.5	m	H3-1	0.25	m
B1	2	m	B2	0.3	m
B3	2.2	m	B4	1	m
B5	0.25	m	B6	1	m
T	0.48768	m			

Form Traveler Load ( include form load )

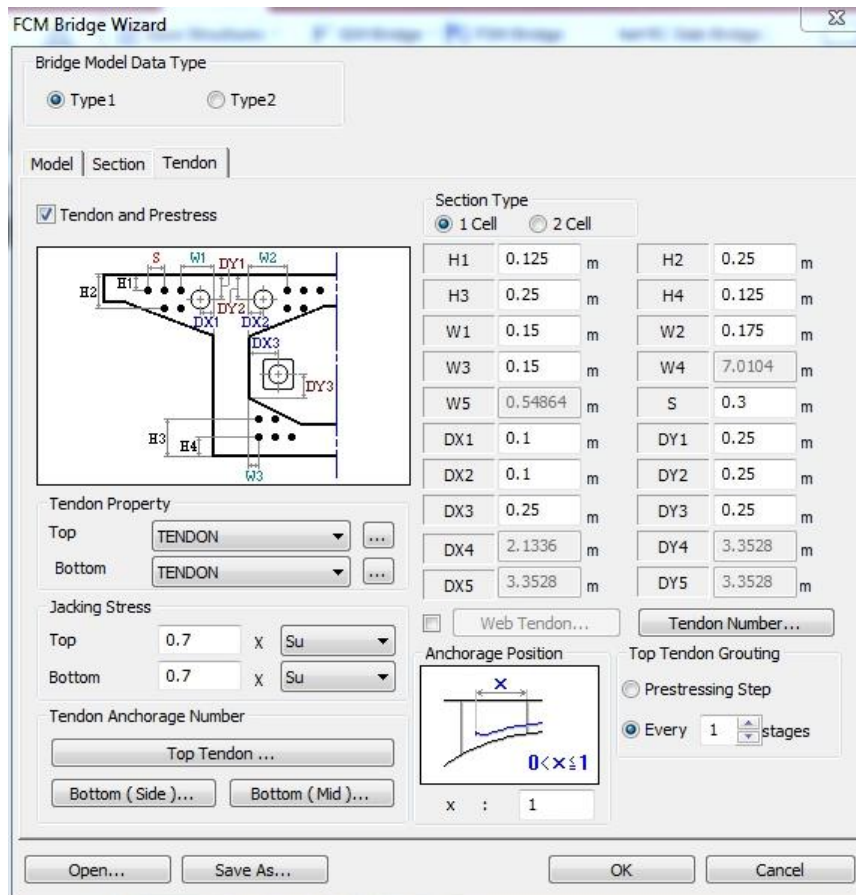


☒ include Wet Conc. Load

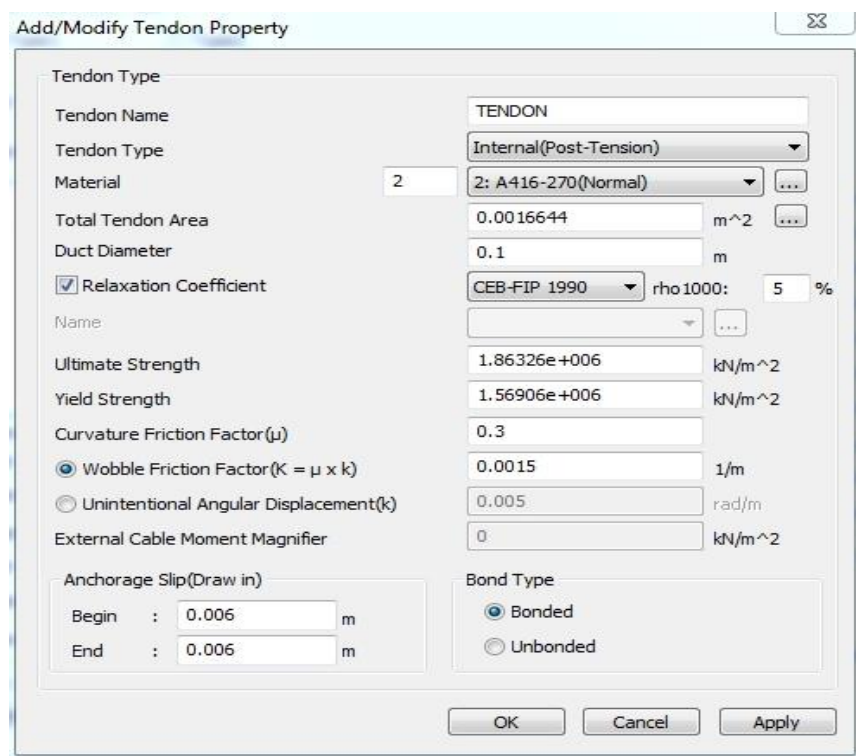
P	9.78609	kN	e	2.49936	m
---	---------	----	---	---------	---

Open... Save As... OK Cancel

Gambar 5. Section box girder



Gambar 6. Letak tendon

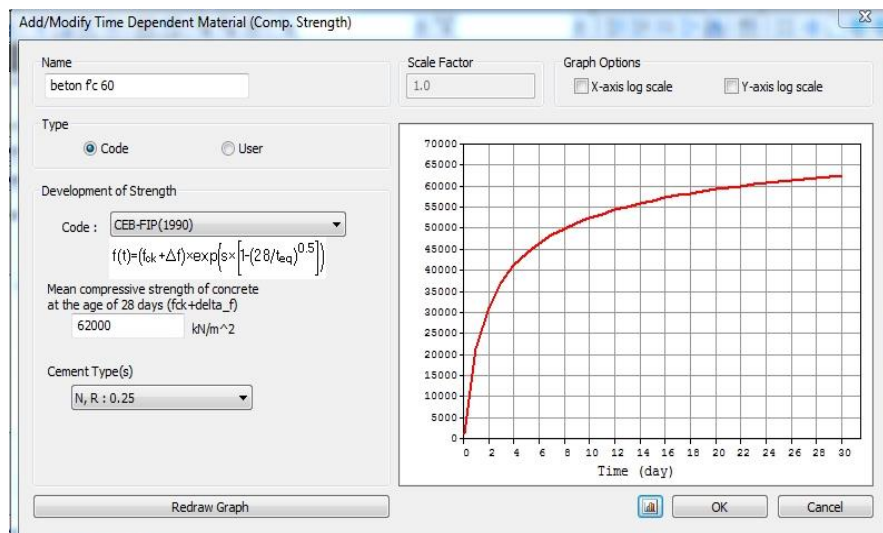


Gambar 7. Properti tendon

### Creep dan shrinkage

Dalam analisis jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever* ini memperhitungkan efek dari *creep dan shrinkage* dalam 1000 hari setelah konstruksi selesai dibangun. Langkah pertama dalam mengatur *creep dan shrinkage* adalah melakukan *Add Time Dependent Material* yang disajikan pada Gambar 8 dan Gambar 10. Untuk mengatur *creep dan shrinkage* juga perlu diatur *Change Material* dan *Material Link* ( hanya pada beton ).

Gambar 8. *Creep / shrinkage*



Gambar 9. *Comp. Strength*

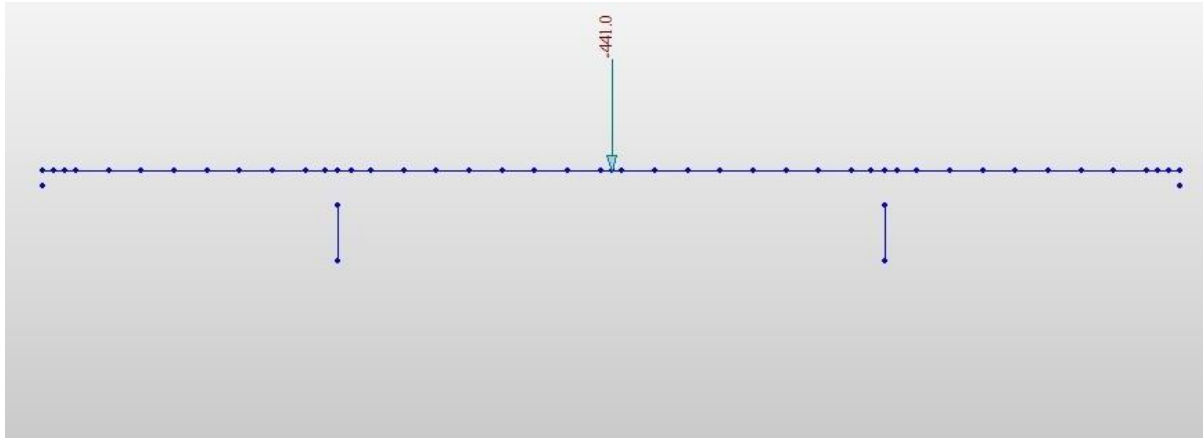


Gambar 10. *Construction stage analysis*

Pembebanan yang diperhitungkan dalam analisis ini adalah berat sendiri, SDL ( *element load* ), BTR ( *element load* ), dan BGT ( *Nodal Load* ). Pembebanan mengacu pada SNI 1725 : 2016. Sesuai dengan data yang ditentukan yaitu ketebalan SDL sebesar 30 mm, jenis SDL yang digunakan adalah beton aspal, lebar jembatan 9m, panjang total jembatan 200 m, maka dihasilkan SDL sebesar 5.94 KN/m, beban BTR sebesar 46.575 KN/m, beban BGT sebesar 441 KN. Berdasarkan SNI 1725:2016, pembebanan BTR dan BGT dilakukan dalam 3 kombinasi.

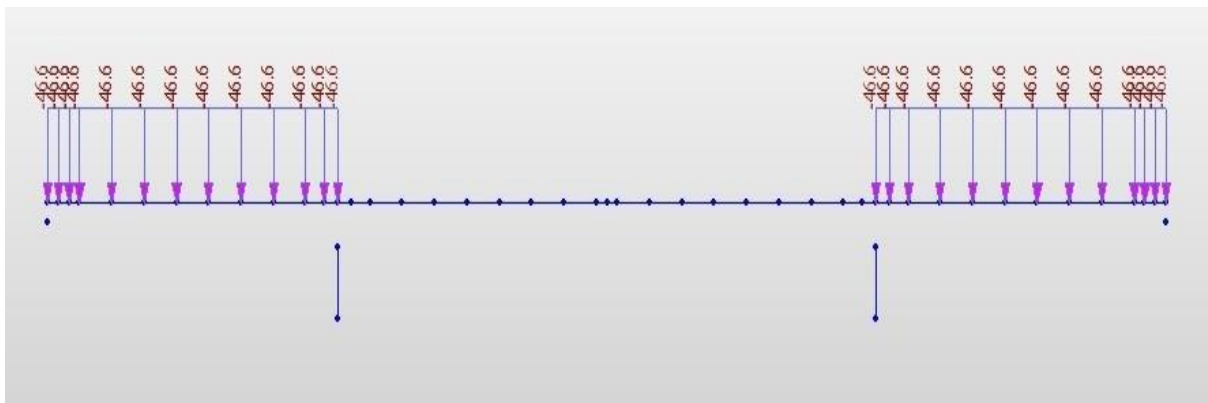
- 

383

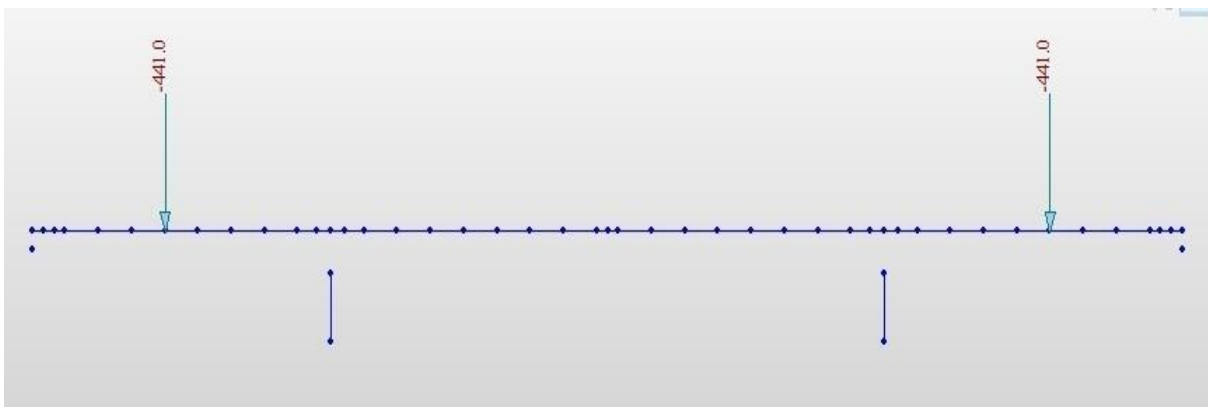


Gambar 12. Beban BGT kombinasi 1

- Kombinasi ke-2 dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14.

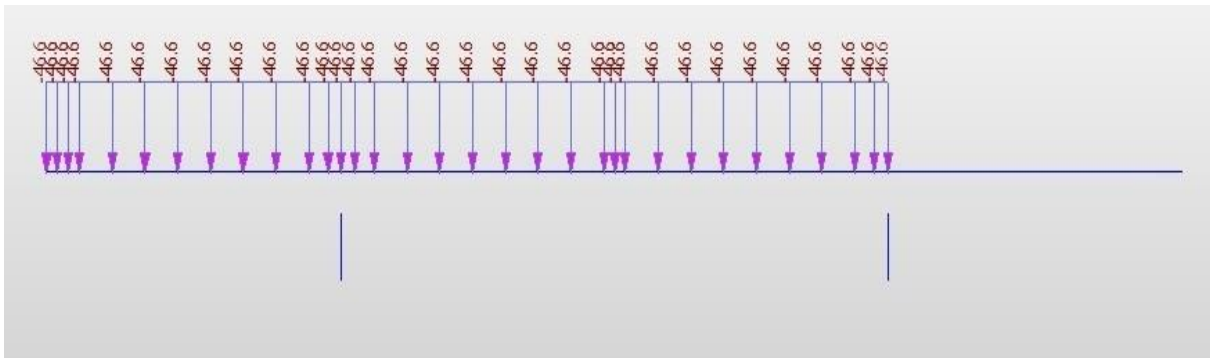


Gambar 13. Beban BTR kombinasi 2

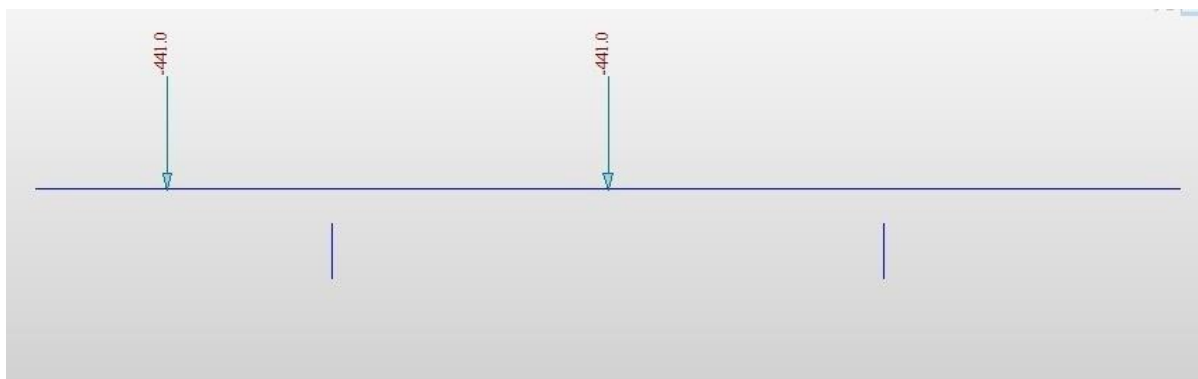


Gambar 14. Beban BGT kombinasi 2

- Kombinasi ke-3 dapat dilihat pada Gambar 15 dan Gambar 16.



Gambar 15. Beban BTR kombinasi 3



Gambar 16. Beban BGT kombinasi 3

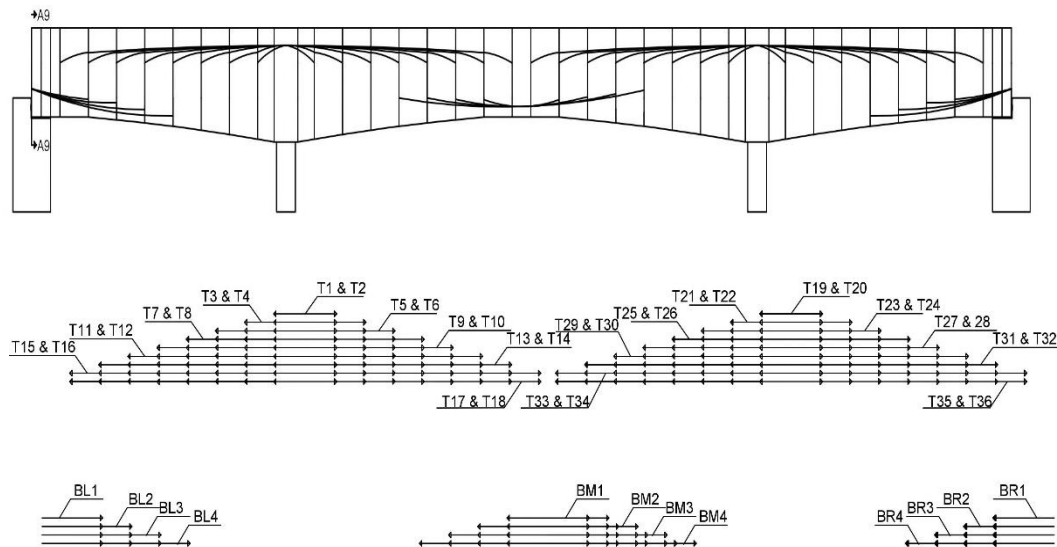
### Analisis

Langkah terakhir adalah melakukan analisis yang dapat dilakukan dengan *perform analysis*. Pada program MIDAS CIVIL, kombinasi dari pembebanan dimasukkan setelah melakukan analisis. Kombinasi dari pembebanan masih dalam kondisi *service* dengan faktor 1 kecuali BTR karena ada faktor *impact* sebesar 30%. Kombinasi yang digunakan untuk mencari tegangan dengan mempertimbangkan beban SDL, BTR, BGT, *creep* dan *shrinkage* adalah *dead load*, *tendon primary*, *tendon secondary*, *SDL*, *BTR*, *BGT*, *creep secondary*, *shrinkage secondary*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil tegangan dianalisis dari *construction stage* 1 sampai 11 dan 1000 hari setelah konstruksi selesai dengan kombinasi yang telah dicantumkan saat analisis. Pada *tendon* bagian atas, setiap tahap konstruksi dibutuhkan 2 *tendon* untuk menjaga keseimbangan struktur kecuali pada tahap terakhir yang membutuhkan 4 *tendon* pada bagian atas, sehingga total tendon bagian atas menjadi 36 *tendon*. Pada *tendon* bagian bawah digunakan di tengah kantilever dan di ujung jembatan hanya membutuhkan 1 *tendon* setiap 1 segmen dengan jumlah total masing - masing adalah 4 *tendon*. Untuk hasil pemodelan akhir beserta letak – letak tendon dapat dilihat pada Gambar 17 ( *Not To Scale* ).

Hasil analisis yang didapatkan adalah tegangan dari jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever*. Pada tahap konstruksi, tegangan tarik maksimum yang dihasilkan adalah 1,96 MPa dan tegangan tekan maksimum yang dihasilkan adalah -11,5 MPa. Pada saat konstruksi selesai, hasil tegangan tersebut juga masih memenuhi persyaratan dari beton prategang dengan tarik maksimal yang dihasilkan adalah 3,23 MPa dan tekan maksimal yang dihasilkan adalah -15,4 MPa, sedangkan batas tegangan izin tekan beton prategang pada keadaan akhir setelah kehilangan prategang adalah -27 MPa dan batas tegangan izin tarik beton prategang pada keadaan akhir setelah kehilangan prategang adalah 3,87 MPa. Rangkuman hasil tegangan selama masa konstruksi dan setelah konstruksi dengan 3 kombinasi dapat dilihat di Tabel 1.



Gambar 17. Pemodelan akhir jembatan

Tabel 1. *Summary* tegangan

	Serat Atas Kiri (N/mm <sup>2</sup> )	Serat Atas Kanan (N/mm <sup>2</sup> )	Serat Bawah Kanan (N/mm <sup>2</sup> )	Serat Bawah Kiri (N/mm <sup>2</sup> )
<i>Max / Min Construction Stage</i>	1,96	1,96	-11,5	-11,5
<i>Max / Min Kombinasi 1</i>	3,23	3,23	-15,4	-15,4
<i>Max / Min Kombinasi 2</i>	1,88	1,88	-13,6	-13,6
<i>Max / Min Kombinasi 3</i>	3,22	3,22	-15,1	-15,1

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis jembatan beton prategang *box girder* dengan metode *balanced cantilever*, maka didapatkan kesimpulan dan saran.

##### Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, maka kesimpulan yang didapatkan adalah :

1. Terdapat 2 jenis *tendon* yaitu *tendon primary* dan *secondary* dimana *primary* adalah hasil yang terjadi pada struktur tertentu yaitu dari *construction stage* 1 sampai 11, sedangkan *secondary* adalah hasil yang terjadi pada struktur tak tentu yaitu dari *construction stage* 9 sampai *construction stage* 11.
2. Pada umumnya, konstruksi jembatan dengan metode *balanced cantilever* menggunakan *box girder* sebagai gelagar karena berat sendiri yang relatif ringan karena terdapat *void* pada bagian tengah *box girder*. *Box girder* juga dapat dibuat ukuran yang bervariasi dan mengecil pada *closure segment* untuk mengurangi berat sendiri dari jembatan.
3. Tegangan tarik dan tekan yang paling besar terjadi pada kombinasi 1 yaitu sebesar 3,23 MPa dan -15,4 MPa. Berdasarkan hasil tegangan maksimal tersebut, diketahui bahwa jembatan *balanced cantilever* dengan data yang telah ditentukan memenuhi dari syarat tegangan izin dari beton prategang.

##### Saran

Berdasarkan hasil analisis dari penulisan ini, terdapat beberapa hal yang harus diperhatikan dan diketahui agar analisis dapat berjalan dengan baik, maka saran yang dapat diberikan adalah :

1. Jumlah *strand*, diameter *strand* yang digunakan, dan jumlah tendon merupakan bagian yang sangat penting dalam mengatur tegangan tarik dan tekan yang terjadi pada saat masa konstruksi jembatan maupun setelah konstruksi selesai dibangun.

2. Mengatur properti dari *creep* dan *shrinkage* tidak dapat dilakukan saat *construction stage*. Pengaturan tersebut hanya dapat dilakukan pada saat *Base*.
3. Pada saat memasukkan data ke MIDAS, ukuran menjadi hal yang sangat penting dan tidak boleh ada error dalam menginput data jembatan tersebut, terutama pada bagian *section*, karena terdapat 2 ketinggian *box girder* yang perlu diisi yaitu ketinggian *box girder* saat berada di *pier table* dan ketinggian *box girder* saat berada di bagian *closure section*.
4. Jika ingin memperhitungkan *creep* dan *shrinkage*, sebelum melakukan analisis, harus dipastikan bahwa *time dependent effect* telah diperhitungkan seperti pada gambar.

## DAFTAR PUSTAKA

- Hidayat, Irpan. Analisa Konstruksi Jembatan *Cable Stayed* Menggunakan Metode kantilever (Studi Kasus Jembatan Suramadu), 2011.
- Rizkia, R.S. Analisis Perbandingan Kehilangan Prategang Akibat Metode *Stressing* Satu Arah dan Dua Arah pada Jembatan Beton Prategang , 2017.
- Hernandez, S., Pablo Ouro, and Luis E. Romera. *Optimization of PT in Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridges*, 2014.
- Badan Standardisasi Nasional. SNI 1725 : 2016. Pembebanan Untuk Jembatan, 2016.
- Badan Standardisasi Nasional. SNI 2847 : 2013. Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung, 2013.

