

ANALISIS STRUKTUR JEMBATAN GANTUNG *SELF-ANCHORED*

Ivan Sebastian¹ dan F.X. Supartono²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: ivan.sebastian19.k@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
Email: fxsupartono@gmail.com

ABSTRAK

Jembatan merupakan struktur yang dibuat untuk menyeberangi jurang atau rintangan seperti sungai, rel kereta api, ataupun jalan raya. Jembatan sering menjadi komponen kritis dari suatu ruas jalan, karena sebagai penentu beban maksimum kendaraan yang melewati ruas jalan tersebut. Jembatan memiliki banyak jenis berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi, dan tipe struktur. Salah satu jenis jembatan adalah *suspension bridge*, dimana gelagar jembatan digantung menggunakan *hanger* yang akan menyalurkan gaya melalui kabel utama yang kemudian disalurkan ke tanah lewat pondasi. *Suspension bridge* memiliki variasi dimana angkur jembatan tersebut diletakkan pada gelagar jembatan, jenis jembatan ini dinamakan *self-anchored suspension bridge*. *Self-anchored suspension bridge* adalah jembatan gantung yang pengankurannya pada jembatannya sendiri. Tipe pengankuran ini tidak bergantung pada kondisi tanah yang ada. Kabel utama akan diangkur di *deck* jembatan sehingga *deck* jembatan menerima gaya tekanan horizontal dari kabel utama. Gaya tekan horizontal ini menyebabkan resiko terjadinya tekuk global pada *deck* jembatan. Selain itu *deck* jembatan tetap harus menahan gaya vertikal dari kendaraan-kendaraan di atas. Program MIDAS CIVIL 2019 memiliki fitur untuk memodelkan serta menghitung gaya-gaya jembatan gantung secara detil. Maka dalam jurnal ini peneliti dengan program MIDAS CIVIL 2019 menganalisis gaya-gaya yang terjadi akibat kombinasi pembebanan ASD beban mati dan beban lalu lintas pada *self-anchored suspension bridge* dan membandingkan gaya-gaya tersebut pada *suspension bridge* dengan angkur luar.

Kata kunci: jembatan gantung, *self-anchored*, kabel, *hanger*.

1. PENDAHULUAN

Jembatan merupakan struktur yang dibuat untuk menyeberangi jurang atau rintangan seperti sungai, rel kereta api ataupun jalan raya. Jembatan dibangun untuk penyeberangan pejalan kaki, kendaraan atau kereta api di atas halangan. Jembatan juga merupakan bagian dari infrastruktur transportasi darat yang sangat vital dalam aliran perjalanan (*traffic flows*). Jembatan sering menjadi komponen kritis dari suatu ruas jalan, karena sebagai penentu beban maksimum kendaraan yang melewati ruas jalan tersebut.

Jembatan memiliki banyak jenis berdasarkan fungsi, lokasi, bahan konstruksi, dan tipe struktur. Salah satu jenis jembatan adalah *suspension bridge*, dimana gelagar jembatan digantung menggunakan *hanger* yang akan menyalurkan gaya melalui kabel utama yang kemudian disalurkan ke tanah lewat pondasi.

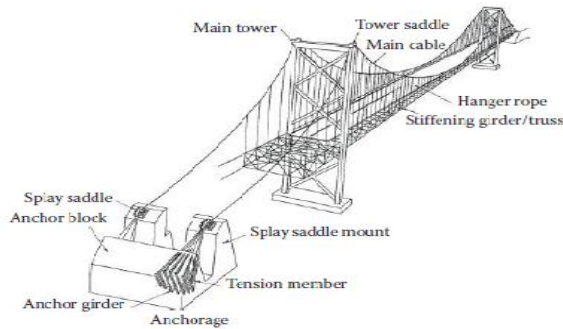
Angkur digunakan untuk menahan kabel utama di kedua ujung jembatan sehingga angkur menjadi komponen vital dalam perencanaan jembatan gantung. Pada jembatan gantung, dipakai *gravity anchorage*, dimana angkur beban sendiri angkur untuk menahan gaya dari kabel dan *tunnel anchorage*, dimana angkur menyalurkan gaya dari kabel langsung ke dalam tanah.

Kedua jenis angkur diatas sangat bergantung pada kondisi tanah, untuk menghindari hal tersebut, angkur dapat diletakkan pada gelagar jembatan itu sendiri. Jenis jembatan ini dinamakan *self-anchored suspension bridge*. Jembatan ini akan menyalurkan gaya horizontal dari kabel menuju gelagar jembatan sehingga gelagar jembatan akan menahan gaya tekan horizontal dari kabel serta menahan beban vertikal kendaraan yang disebarkan ke kabel.

Dikarenakan adanya gaya tekan horizontal yang diterima gelagar jembatan maka analisa perhitungan *self-anchored suspension bridge* akan berbeda dibanding *suspension bridge* yang diangkur di luar. Oleh karena itu, tugas akhir ini akan dibahas mengenai analisis struktur *self-anchored suspension bridge*.

Jembatan gantung

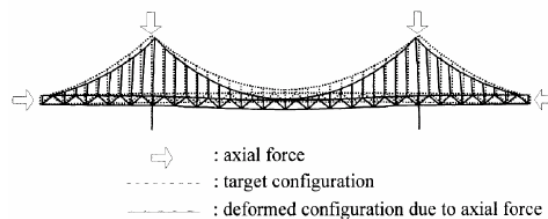
Jembatan gantung adalah sistem struktur jembatan yang menggunakan kabel sebagai pemikul utama beban lalu lintas di atasnya, pada sistem ini kabel utama (*main cable*) memikul beberapa kabel penggantung (*suspension cables/hanger*) yang menghubungkan antara kabel utama dengan gelagar jembatan. Kabel utama dihubungkan pada kedua tower jembatan dan memanjang disepanjang jembatan yang berakhir pada pengangkuran pada kedua ujung jembatan untuk menahan pergerakan vertikal dan horizontal akibat beban-beban yang bekerja.



Gambar 1. Komponen struktur jembatan gantung
 Sumber: (*Bridge Engineering Handbook: Superstructure Design*)

Self-anchored suspension bridge

Self-anchored suspension bridge adalah jembatan gantung yang pengangkurannya pada jembatannya sendiri. Tipe pengangkuran ini tidak bergantung pada kondisi tanah yang ada. Kabel utama akan diangkur di *deck* jembatan sehingga *deck* jembatan menerima gaya tekanan horizontal dari kabel utama. Gaya tekan horizontal ini menyebabkan resiko terjadinya tekuk global pada *deck* jembatan. Selain itu *deck* jembatan tetap harus menahan gaya vertikal dari kendaraan-kendaraan di atas.



Gambar 2. Gaya-gaya pada *self-anchored suspension bridge*
 Sumber; (*Self-Anchored Suspension Bridges, 2007*)

Pembebanan

1. Berat sendiri
2. Beban mati tambahan / utilitas
3. Beban lalu lintas

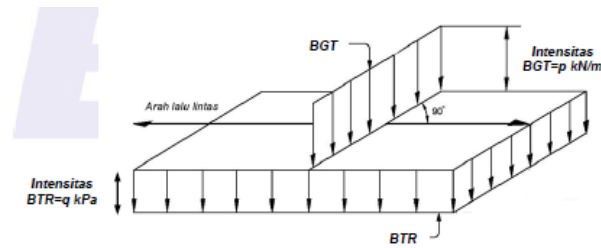
- Beban lajur “D”

Beban terbagi rata (BTR) mempunyai intensitas q kPa dengan besaran q tergantung pada panjang total yang dibebani L yaitu seperti berikut :

$$\begin{aligned} \text{Jika } L \leq 30 \text{ m} : q &= 9,0 \text{ kPa} \\ \text{Jika } L > 30 \text{ m} : q &= 9,0 \left(0,5 + \frac{15}{L} \right) \text{ kPa} \end{aligned} \tag{1}$$

dengan q = intensitas beban terbagi rata (BTR) dalam arah memanjang jembatan (kPa), dan L = panjang total jembatan yang dibebani (meter)

Beban garis terpusat (BGT) dengan intensitas p kN/m harus ditempatkan tegak lurus terhadap arah lalu lintas pada jembatan. Besarnya intensitas p adalah 49,0 kN/m. Untuk mendapatkan momen lentur negatif maksimum pada jembatan menerus, BGT kedua yang identik harus ditempatkan pada posisi dalam arah melintang jembatan pada bentang lainnya.

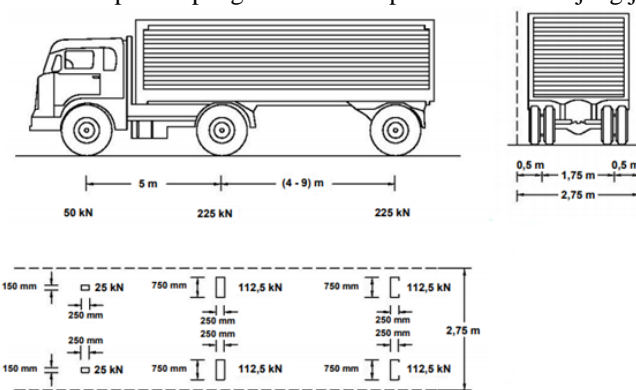


Gambar 3. Beban lajur “D”

Sumber: (SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan)

- Beban truk “T”

Pembebanan truk “T” terdiri atas kendaraan truk *semi-trailer* yang mempunyai susunan dan berat gandar seperti terlihat pada gambar 4. Berat tiap-tiap gandar disebarakan menjadi 2 beban merata sama besar yang merupakan bidang kontak antara roda dengan permukaan lantai. Jarak antara 2 gandar tersebut bisa diubah-ubah dari 4,0 m sampai dengan 9,0 m untuk mendapatkan pengaruh terbesar pada arah memanjang jembatan.



Gambar 4. Beban truk “T”

Sumber: (SNI 1725:2016 Pembebanan untuk Jembatan)

2. METODOLOGI PENELITIAN

Konsep penelitian

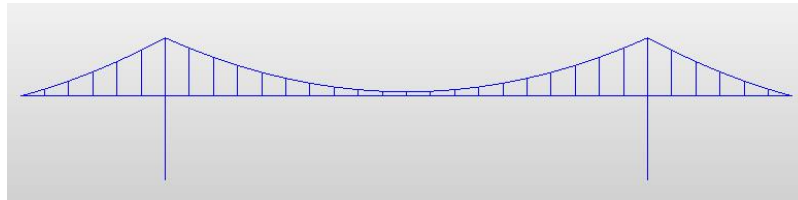
Penelitian menggunakan program MIDAS CIVIL 2019 dan mengacu pada peraturan – peraturan yang berkaitan dengan perancangan jembatan gantung, yaitu: RSNI T-02-2005 mengenai standar pembebanan untuk jembatan, SNI 2847-2013 mengenai persyaratan beton struktural untuk bangunan gedung, peraturan PU dan Bina Marga.

Data jembatan

- | | |
|---|------------------------------|
| 1. Panjang jembatan | : 160 meter |
| 2. Panjang bentang utama | : 100 meter |
| 3. Panjang bentang samping | : 30 meter |
| 4. Lebar jembatan | : 10.5 meter |
| 5. Lebar jalur lalu lintas | : 8 meter |
| 6. Lebar trotoar | : 1.25 meter |
| 7. Tinggi bebas jembatan | : 15 meter |
| 8. Tinggi <i>pylon</i> dari lantai jembatan | : 12 meter |
| 9. Tipe pengkabelan | : <i>side span suspended</i> |
| 10. Jenis gelagar | : <i>box girder</i> |
| 11. Mutu beton gelagar | : 50 MPa |
| 12. Mutu kabel baja | : 1570 N/mm ² |
| 13. Tebal aspal | : 50 mm |
| 14. Tinggi trotoar dari lantai jembatan | : 30 cm |

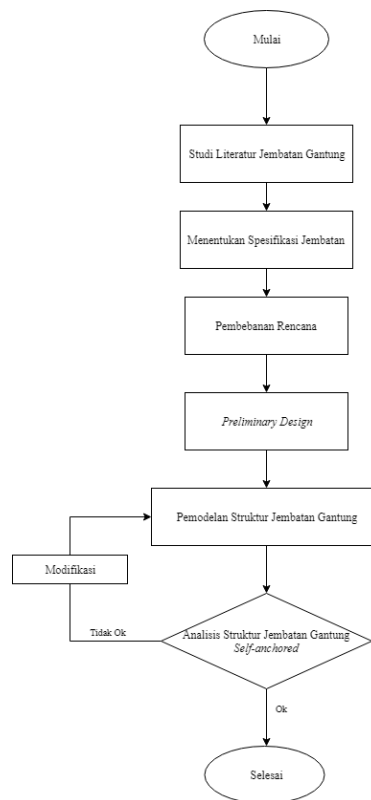
Model jembatan

Data penelitian menjelaskan mengenai model jembatan yang diteliti. Analisis ini yaitu gaya-gaya dalam pada jembatan gantung *self-anchored* yang terdiri dari dek jembatan, kabel penggantung, dan kabel utama seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Model jembatan gantung

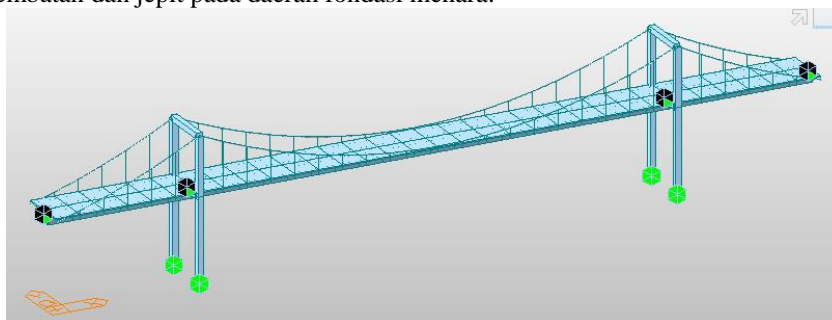
Kerangka kerja



Gambar 6. Kerangka kerja

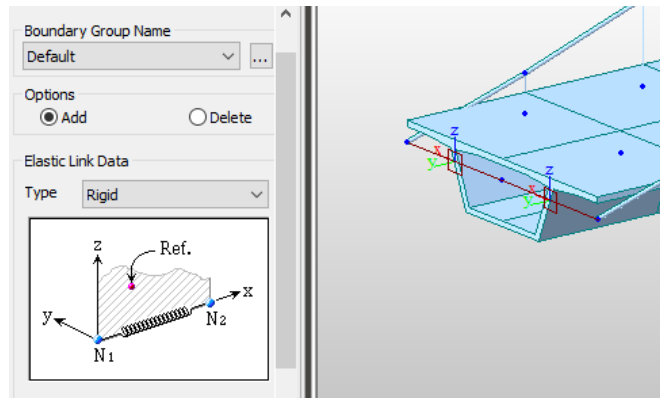
3. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Analisis dimulai dengan pemodelan jembatan di MIDAS *CIVIL* 2019. Perletakan pada model jembatan digunakan rol pada *beam/deck* jembatan dan jepit pada daerah fondasi menara.



Gambar 7. Perletakan model jembatan gantung

Jembatan gantung ini dengan tipe pengankuran *self-anchored* sehingga pada ujung kabel diberi *elastic link* tipe *rigid* seperti pada Gambar 8.



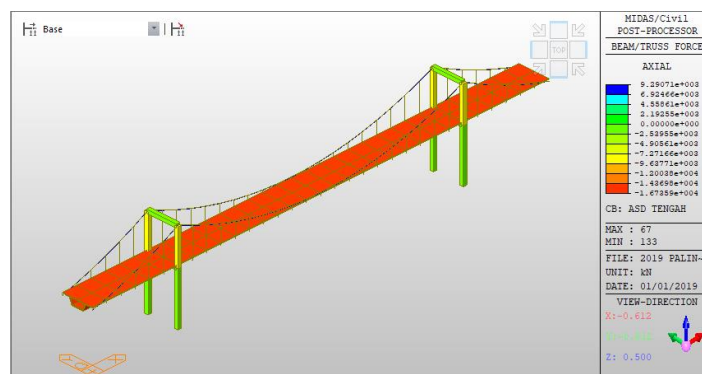
Gambar 8. *Elastic link* pada ujung kabel

Kombinasi pembebanan

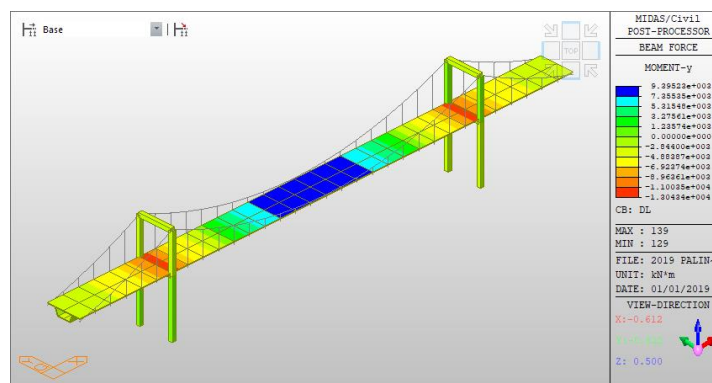
Kombinasi pembebanan yang digunakan pada perhitungan adalah kombinasi ASD yaitu beban mati + beban mati tambahan + beban lalu lintas.

Hasil perhitungan

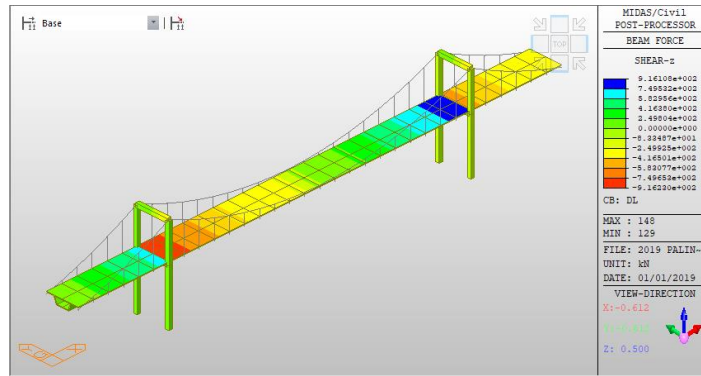
Pada hasil perhitungan MIDAS CIVIL 2019 dapat dilihat *axial forces*, *moments*, dan *shear forces* yang bekerja pada jembatan gantung.



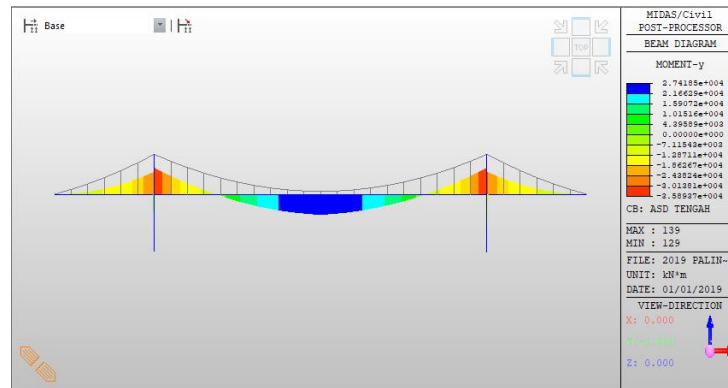
Gambar 9. *Output axial forces*



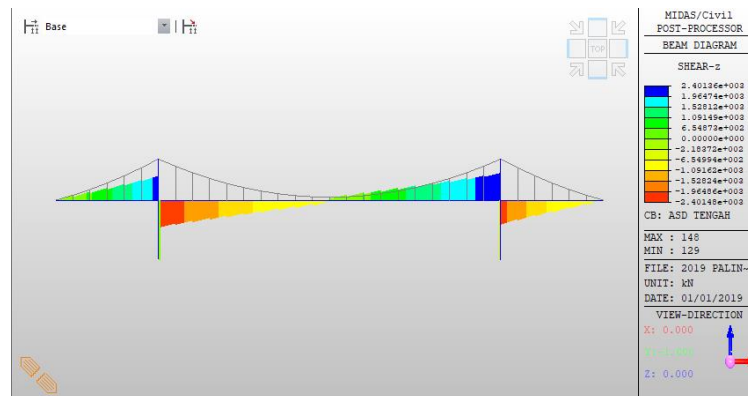
Gambar 10. *Output moments*



Gambar 11. Output shear forces



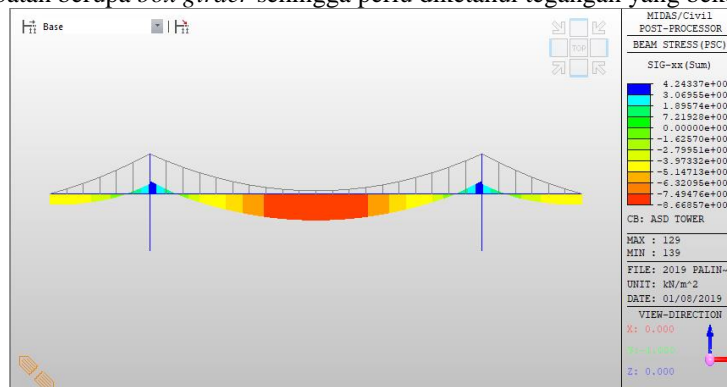
Gambar 12. Diagram momen



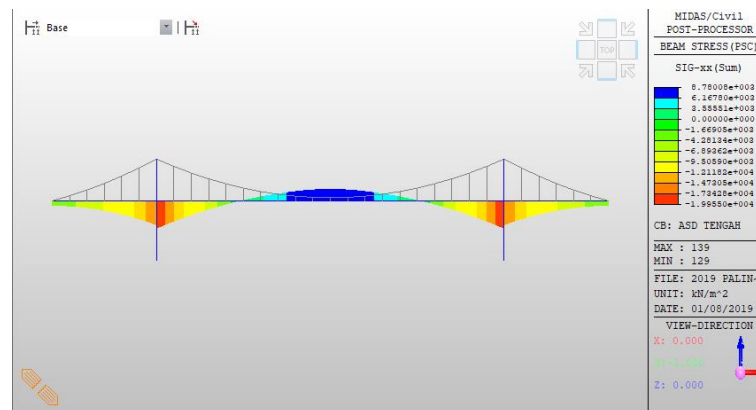
Gambar 13. Diagram lintang

Stress pada box girder

Penampang dek jembatan berupa *box girder* sehingga perlu diketahui tegangan yang bekerja pada dek.



Gambar 14. Output beam stress serat atas



Gambar 15. Output beam stress serat bawah

Pada hasil analisis terjadi tegangan tarik pada serat atas di daerah tumpuan sebesar 4.243 MPa dan pada serat bawah di daerah lapangan sebesar 8.78 MPa sehingga *box girder* perlu diberi *tendon*.

Hitung kebutuhan *strand*

Diameter nominal <i>strands</i>	: d	= 15.24 mm
Luas penampang nominal satu strand	: A_p	= 140 mm ²
Tegangan putus strand	: f_{pu}	= 1860 MPa
Eksentrisitas serat atas	: e	= 654.5 mm
Eksentrisitas serat bawah	: e	= 1520.5 mm

- Serat Atas

$$\sigma_{tarik} \leq n \times (A_p \times f_{pu} \times e \times y) / I \quad (2)$$

dengan σ_{tarik} = tegangan tarik pada *box girder*, n = jumlah strand, A_p = Luas strand, f_{pu} = tegangan putus strand, e = eksentrisitas, y = jarak dari titik berat, dan I = inersia penampang.

$$4.243 \leq n \times \frac{140 \times 0.6 \times 1860 \times 654.5 \times 767}{3.594 \times 10^{12}}$$

$$n_{strand} = 194.4257 \approx 195 \text{ strand}$$

- Serat Bawah

$$\sigma_{tarik} \leq n \times (A_p \times f_{pu} \times e \times y) / I \quad (3)$$

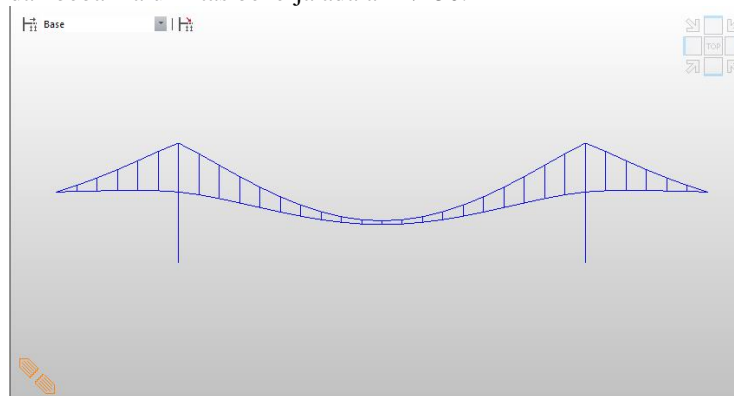
dengan σ_{tarik} = tegangan tarik pada *box girder*, n = jumlah strand, A_p = Luas strand, f_{pu} = tegangan putus strand, e = eksentrisitas, y = jarak dari titik berat, dan I = inersia penampang.

$$8.78 \leq n \times \frac{140 \times 0.6 \times 1860 \times 1520.5 \times 1633}{3.594 \times 10^{12}}$$

$$n_{strand} = 39.3084 \approx 40 \text{ strand}$$

Lendutan pada dek jembatan

Berdasarkan RSNI-T-12-2004 Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan, lendutan ijin maksimum yang boleh terjadi saat beban mati dan beban lalu lintas bekerja adalah $L/250$.



Gambar 16. Lendutan pada dek jembatan

Dari hasil analisis didapatkan lendutan maksimum yang terjadi pada dek jembatan akibat kombinasi beban mati dan beban lalu lintas adalah sebesar 159 mm.

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &< \delta_{\text{ijin}} \\ 159 \text{ mm} &< L/250 \\ 159 \text{ mm} &< 400 \text{ mm} \end{aligned}$$

Periksa kebutuhan penampang

Penampang perlu diperiksa untuk dapat menahan gaya-gaya yang bekerja akibat beban pada jembatan.

Kebutuhan penampang dek jembatan

Cek kuat tekan penampang

Kuat tekan beton prategang ($f'c$) = 50 MPa

Kuat tekan beton saat transfer ($f'ci$) = $80\% \times f'c = 80\% \times 50 = 40$ MPa

Pada kondisi transfer tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melebihi nilai sebagai berikut:

$$\sigma_{\text{tekan (fct)}} = 0.7 \times f'ci = 0.7 \times 40 = 28 \text{ MPa} \tag{4}$$

dengan $f'ci$ = kuat tekan beton saat transfer.

Pada kondisi servis tegangan tekan dalam penampang beton tidak boleh melebihi nilai sebagai berikut:

$$\sigma_{\text{tekan (fcs)}} = 0.45 \times f'c = 0.45 \times 50 = 22.5 \text{ MPa} \tag{5}$$

dengan $f'c$ = kuat tekan beton prategang.

Dari hasil analisis gaya tekan maksimum yang terjadi pada dek jembatan adalah sebesar 16735.87 KN sehingga:

$$\sigma = -N/A \pm (M.y)/I \tag{6}$$

dengan σ = tegangan, N = gaya tekan, A = luas penampang, M = gaya momen, y = jarak dari titik berat, dan I = inersia penampang.

$$\begin{aligned} \sigma &= -(16753.1 \times 1000)/4619000 + (-36742.2 \times 10^6 \times 1633)/(3.594 \times 10^{12}) \\ &= 20.20162 \text{ MPa (tekan)} < \sigma_{\text{tekan}} \end{aligned}$$

Cek kuat geser penampang
Dari hasil analisis $V_u = 1.2 DL + 2 SDL + 1.8 LL$
 $= 4957.1 KN$

$$V_c = 0.17 (1 + Nu/14A_g) \lambda \sqrt{f_c'} \cdot A \quad (7)$$

dengan V_c = kekuatan geser nominal yang disediakan oleh beton, N_u = gaya tekan *ultimate*, A_g = luas bruto penampang, λ = faktor modifikasi yang merefleksikan properti mekanis tereduksi dari beton ringan, f_c' = kuat tekan beton, dan A = luas penampang.

$$= 0.17 (1 + (22816.7 \times 1000)/(14 \times 4619000)) \cdot 1 \times \sqrt{50} \times 4619000$$

$$= 7511524.121 N = 7511.524 KN$$

$$\begin{aligned} V_u &\leq \phi V_c \\ 4957.1 KN &\leq 0.75 \times 7511.524 KN \\ 4957.1 KN &< 5633.643 KN \end{aligned}$$

Kebutuhan penampang kabel dan *hanger*

Pada kabel perlu diperiksa kebutuhan penampangnya agar tidak melewati tegangan putus maksimum kabel.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (8)$$

dengan σ = tegangan, P = gaya yang terjadi pada kabel, dan A = luas penampang kabel.

- Kabel
- σ ijin kabel = 1570 N/mm²
- Safety Factor = 2.2
- Gaya maksimum yang terjadi pada kabel = 9290.7139 KN
- Diameter kabel = 175 mm

$$\sigma = 2.2 \times \frac{9290.7139 \times 1000}{\frac{1}{4} \pi 175^2}$$

$$= 2.2 \times 386.2629987 MPa$$

$$= 849.7786 MPa < \sigma^- \text{ ijin}$$

- Hanger
- σ ijin hanger = 1570 N/mm²
- Safety Factor = 2.2
- Gaya maksimum yang terjadi pada kabel = 362.78831 KN
- Diameter kabel = 40 mm

$$\sigma = 2.2 \times \frac{362.78831 \times 1000}{\frac{1}{4} \pi 40^2}$$

$$= 2.2 \times 288.6977 MPa$$

$$= 635.135 MPa < \sigma^- \text{ ijin}$$

Perbandingan gaya antara jembatan gantung *self-anchored* dan jembatan gantung dengan angkur luar

Setelah dilakukan proses perhitungan gaya jembatan gantung *self-anchored*, bandingkan hasilnya dengan gaya jembatan gantung dengan angkur luar yang juga telah dimodelkan menggunakan program MIDAS CIVIL 2019.

Tabel 1. Gaya-gaya maksimum kondisi ASD

	<i>Cable</i>	<i>Hanger</i>	<i>Box Girder (Axial)</i>	<i>Box Girder (Moment)</i>	<i>Box Girder (Shear)</i>	<i>Beam Stress (Tekan)</i>	<i>Beam Stress (Tarik)</i>	Lendutan
<i>Self-anchored</i>	9290.71 KN	362.788 KN	-16753.1 KN	27420.5 KNm -36742.2 KNm	2737 KN	-20.2 MPa	8.78 MPa	159 mm
<i>External-anchored</i>	9397.4 KN	367.2 KN	0	25294.7 KNm -34772 KNm	2650.4 KN	-15.67 MPa	11.42 MPa	152 mm

4. KESIMPULAN

Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan di bab sebelumnya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai maksimum tekan yang terjadi pada dek jembatan sebesar 16735.87 KN, hal ini terjadi akibat gaya dari kabel yang diangkur pada dek jembatan.
2. Reaksi perletakan pada ujung jembatan gantung *self-anchored* menunjukkan arah ke bawah, hal ini menandakan bahwa *box girder* pada side span jembatan mengalami gaya tarik dari kabel sehingga *box girder* dapat mengalami tekuk keatas, hal ini perlu diatasi dengan memberi *counterweight* sebesar 4783.583 KN pada sisi *sidespan* jembatan.
3. Tegangan tarik pada jembatan gantung *external-anchored* lebih besar dibanding tegangan tarik pada jembatan gantung *self-anchored* hal ini disebabkan oleh gaya tekan yang diterima dek jembatan pada jembatan gantung *self-anchored*. Sehingga pada jembatan gantung *external-anchored* dibutuhkan tendon yang lebih banyak pada *box girder* jembatan.
4. Tegangan tekan pada jembatan gantung *self-anchored* lebih besar dibanding tegangan tekan pada jembatan gantung *external-anchored* hal ini disebabkan oleh gaya tekan yang diterima dek jembatan pada jembatan gantung *self-anchored*.

DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2002). *Standard Specifications for Highway Bridges*, 17th ed.
- Anonim. (2013). SNI 2847:2013 *Persyaratan Beton Struktural untuk Bangunan Gedung*. Badan Standarisasi Nasional BSN, Jakarta.
- Anonim. (2016). SNI 1725:2016 *Pembebanan untuk Jembatan*, Badan Standarisasi Nasional BSN, Jakarta.
- Anonim. (2004) RSNI-T-12-2004 *Perencanaan Struktur Beton untuk Jembatan*, Badan Standarisasi Nasional BSN, Jakarta.
- B. Supriyadi dan A.S. Muntohar. (2007). *Jembatan*, Beta Offset, Yogyakarta.
- D. van Goolen. (2007). *Self-Anchored Suspension Bridges*, Master of Science Final Thesis, Delft University of Technology, Netherlands.
- J.P.M. Chacar. (2001). *Design of Cable Systems for Cable Suspended Bridges*, Massachusetts Institute of Technology.
- N.J. Gimsing and C.T. Georgakis. (2012) *Cable Supported Bridge : Concept and Design*, 3rd ed. John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom.
- W.F. Chen and L. Duan. (2000). *Bridge Engineering Handbook : Superstructure Design*, 2nd ed. CRC Press, New York.