

Pengaruh Modifikasi Penampang pada I-Girder dan Box Girder Beton Prategang terhadap Kekakuan dan Lendutan

***Hakas Prayuda, Taufiq Ilham Maulana, Arief Hidayat, Kory Anggraini**
Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
*hakasprayuda@umy.ac.id

Received: 3 Oktober 2019 Revised: 27 November 2020 Accepted: 4 Desember 2020

Abstract

Prestressed concrete has been widely used in structural buildings, especially for big span length purposes. The prestressed concrete dimension cross sections normally are fixed, provided by the factory based on their experience for every span length. However, this size aspect can be developed to make better improvement. In this study, I and box girder shapes were modified with the same total cross-sectional area. Three types of modification have been made for each girder shape by giving the space on the middle for I girder and changing form from trapezoidal to rectangular section for box girder. The number of steel tendons for this research was made typically and same so that the stress and displacement can be compared fairly. Manual calculation was performed for all samples and was completed under three circumstances namely initial condition, loading condition, and final condition. Also, the manual calculation is according to Indonesian provisions, which are SNI 2833-2016 for the earthquake load and SNI 1725-2016 for normal loading on bridges. From the result, it is known that one shape for each girder shape has met the criteria for the smallest stress and displacement.

Keywords: *Shape modification, prestressed concrete, displacement, I-girder, box girder*

Abstrak

Beton prategang telah banyak digunakan pada struktur bangunan, khususnya untuk konstruksi bentang panjang. Dimensi beton prategang pada umumnya telah ditentukan, menyesuaikan dengan pabrik yang memproduksi berdasarkan pengalaman dan analisis. Namun demikian, dimensi dari beton ini merupakan aspek yang masih dapat terus dikembangkan untuk meningkatkan hasil yang lebih baik. Pada penelitian ini dilakukan modifikasi penampang I dan box girder, namun memiliki luar area yang sama. Masing-masing jenis beton memiliki tiga variasi. Jumlah tendon yang digunakan merupakan jenis tipikal sehingga dengan mudah dapat membandingkan tegangan dan lendutan yang dihasilkan. Penelitian ini menggunakan kalkulasi manual untuk seluruh specimen dengan menggunakan tiga kondisi yaitu kondisi awal, kondisi pembebanan dan kondisi final. Standar yang digunakan merupakan standar yang berlaku di Indonesia yaitu SNI 2833 2016 untuk pembebanan gempa dan SNI 1725-2016 untuk pembebanan pada jembatan. Penelitian menunjukkan bahwa salah satu dari masing-masing girder memenuhi kriteria yang menghasilkan nilai tegangan dan lendutan terkecil.

Kata kunci: *Modifikasi penampang, beton prategang, lendutan, I-girder, box girder*

Pendahuluan

Beton prategang telah digunakan secara luas dalam struktur bangunan khususnya untuk bentang panjang. Salah satu penggunaan beton prategang yaitu girder beton. Bentuk dan dimensi girder precast biasanya telah disediakan dari pabrik berdasarkan pengalaman pada setiap bentang panjangnya. Namun aspek ukuran ini bisa

dikembangkan untuk meningkatkan hasil yang lebih baik. Girder pada jembatan memiliki beberapa jenis, seperti box girder, I girder, U-girder dan T-girder. Dalam perancangan pembuatan girder jembatan, perlu adanya analisis yang berguna untuk menentukan bahwa girder yang akan digunakan sudah mampu menahan gaya-gaya atau beban yang akan terjadi pada jembatan tersebut. Tinjauan perencanaan beton

prategang pada jembatan diantaranya adalah spesifikasi yang digunakan untuk perencanaan dengan studi kasus jembatan Suru (Santosa *et al.*, 2015), perencanaan struktur jembatan *slab on pile* Sungai Brantas (Wicaksono *et al.*, 2016) dan jembatan Gajah Wong dengan *box girder* (Hardwiyono *et al.*, 2014). Nurrianto *et al.*, (2013) merancang jalan layang akses terminal A Mangkang Semarang, struktur atas jembatan menggunakan PCI *girder* bentang 52 m dengan panjang persegmen 6 m. Tinjauan perencanaan struktur atas jembatan Cinangneng menggunakan beton prategang juga dilakukan oleh (Hidayat & Chayati, 2014)

Meidiansyah *et al.*, (2016) menganalisis *box girder flyover* Rawabuaya dan menunjukkan bahwa jembatan dapat menahan 90% beban gempa ultimit dan tidak perlu adanya tambahan tulangan pada *box girder* untuk menambah kekuatan tekan dan tarik beton. Analisis perbandingan penggunaan PCU *girder* dan PCI *girder* untuk struktur jembatan dilakukan oleh Putra *et al.*, (2017) pada struktur jembatan Jurang Gempal. Penggunaan PCU *girder* lebih mahal dibandingkan PCI *girder* karena penggunaan tendon, luasan penampang, dan banyaknya *girder* yang digunakan lebih besar. Analisis tegangan dan lendutan yang terjadi pada struktur jembatan prategang dengan perkuatan struktur atas jembatan komposit dengan metode prategang eksternal juga ditemukan dari hasil penelitian (Wakid *et al.*, 2014).

Dilihat dari efisiensi penggunaan *Bulb-tee shape and Half slab girder (BH girder)* dengan *blister* tunggal terhadap PCI *girder*, maka sistem BH *girder* dengan blister tunggal lebih efisien dari segi tegangan dan volume strands (Leo & Agung, 2017). Hady *et al.*, (2017) meninjau ulang *two cell box girder* beton prategang pada perencanaan pembangunan *flyover* di kota Banda Aceh dengan hasil nilai lendutan akibat kombinasi pembebanan masih memenuhi persyaratan $V_u/\phi V_n < 1$ disepanjang bentang balok. Analisis struktur jembatan beton prategang juga dapat menggunakan metode *balanced cantilever* dengan bantuan program SAP2000 yang dibandingkan dengan program ATENA, dengan hasil lendutan pada 1/3 bentang di program SAP2000 mengalami deformasi ke bawah sedangkan pada program ATENA mengalami deformasi ke atas (Setyawan & Sulisty, 2012).

Studi parametrik pengaruh kuat tekan beton dan gaya prategang awal terhadap dimensi penampang T balok beton prategang (studi kasus Hotel Alila, Surakarta) yang diteliti oleh Syaifullah *et al.*, (2016) menghasilkan perbandingan optimasi antara parameter gaya prategang (P) dengan luas

penampang (A) dengan $f_c' 47$ MPa. Sementara itu pengaruh panjang sambungan pada beton prategang segmental bertulang limbah ban, menunjukkan kuat lentur maksimal tanpa tulangan sebesar 15 kN sedangkan pada balok prategang 4.5-7 kN (Martoyo, 2017)

Beton adalah material yang kuat dalam menahan tekan, dan lemah dalam menahan tarikan. Menurut Nawy *et al.*, (2001) balok prategang diasumsikan memiliki sifat homogen dan elastis. Beton yang tidak mampu menahan gaya tarik digantikan oleh tegangan tekan akibat tendon prategang. Balok persegi panjang yang ditumpu sederhana yang mengalami gaya prategang P kosentris mempunyai tegangan tekan yang seragam dan mempunyai intensitas. Rumus tegangan dapat menggunakan Persamaan 1.

$$f = -\frac{P}{A_c} \quad (1)$$

dengan A_c merupakan $b \times h$ dan P merupakan gaya tekan

Jika beban transversal bekerja pada balok yang menimbulkan momen di tengah bentang maka tegangan pada serat atas dapat dihitung sesuai Persamaan 2 dan tegangan pada serat bawah dapat dicari dengan Persamaan 3.

$$f_t = -\frac{P}{A} - \frac{MC}{I_g} \quad (2)$$

$$f_b = -\frac{P}{A} + \frac{MC}{I_g} \quad (3)$$

dengan f_t merupakan tegangan serat atas dan f_b adalah tegangan serat bawah, C merupakan $h/2$, untuk penampang persegi panjang, dan I_g merupakan $bh^3/12$, momen inersia bruto.

Gaya prategang P kosentris $-P/A$ akan mengurangi tegangan lentur tariknya Mc/l di serat bagian bawah sebesar yang dikehendaki, bahkan hingga tegangan tarik hilang atau masih ada hingga tegangan tarik yang diijinkan peraturan. Sebaliknya tegangan tekan P kosentris menambah tegangan lentur tekan yang terjadi pada tegangan serat atas. Perlu ditambahkan tegangan tarik di serat atas untuk menghindari pembatasan ini dengan cara meletakkan tendon-tendon prategang secara eksentris di bawah garis netral. Jika tendon diletakkan eksentris maka timbul momen P_e dan tegangan di tengah bentang. Persamaan 4 menunjukkan adanya tegangan tekan prategang $-P/A$ mengurangi tegangan lentur tarik Mc/l . Sedangkan Persamaan 5 tegangan tekan di serat atas balok digabungkan terhadap tegangan akibat pembebanan Mc/l . Dengan demikian dengan memberikan tegangan kosentris, kemampuan tegangan tekan balok menahan beban luar akan menjadi jauh berkurang.

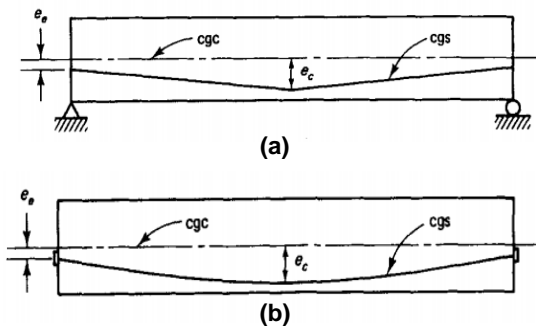
$$f_t = -\frac{P}{A} + \frac{Pec}{I_g} - \frac{MC}{I_g} \quad (4)$$

$$f_b = -\frac{P}{A} - \frac{Pec}{I_g} + \frac{MC}{I_g} \quad (5)$$

dengan e_c adalah eksentrisitas tendon, f_t adalah tegangan di serat atas, f_b adalah tegangan di serat bawah, C adalah $h/2$, untuk penampang persegi panjang, dan I_g adalah $bh^3/12$, untuk momen inersia bruto.

Penampang balok sederhana ini tidak memikul momen akibat beban luar transversal, maka tegangan serat tarik yang terbesar di serat atas akibat gaya prategang eksentris. Garis cgc dibuat lebih kecil di penampang tumpuan dibanding dengan penampang lapangan, atau tidak sama sekali, atau di atas garis cgc .

Perubahan garis cgc di penampang lapangan ke penampang tumpuan di peroleh dari menaikkan tendon pategang secara mendadak yang disebut dengan proses harping seperti pada Gambar 1 (a) yang biasanya digunakan untuk balok *pre-tension* (pra-tarik). Maupun secara perlahan-lahan yang disebut proses draped seperti pada Gambar 1 (b) yang biasanya digunakan pada balok *post-tension* (pasca tarik).



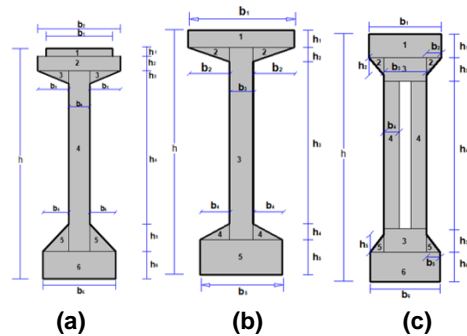
Gambar 1. Profil tendon prategang (a) tendon harped (b) tendon draped (Nawy, 2001).

Dari beberapa tinjauan perancangan dan penelitian di atas belum terdapat analisis kalkulasi mengenai optimasi penampang dalam menahan beban pada beton prategang. Penelitian ini adalah untuk menganalisis kekuatan dua jenis balok beton prategang berdasarkan penampangnya yaitu balok *I girder* dan *box girder*. Dengan penelitian ini diharapkan dapat mengevaluasi kedua jenis balok ini berdasarkan variasi bentuk penampang dengan luas yang sama untuk masing masing jenis balok.

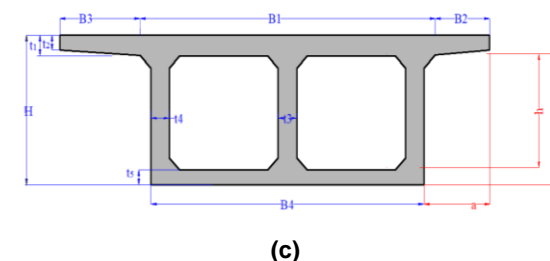
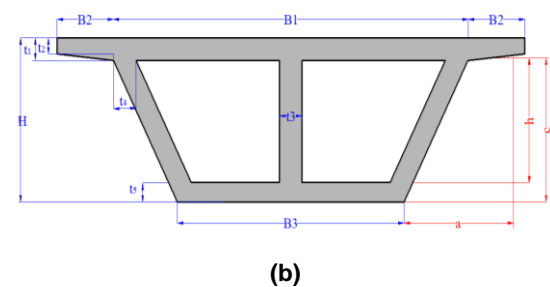
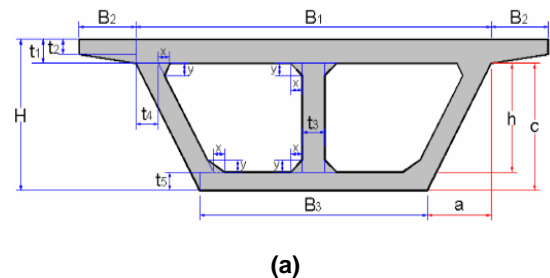
Metode

Bentuk penampang *I girder* dan *box girder* dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3, dengan ukuran penampang pada Tabel 1 dan 2. Standar yang

digunakan adalah SNI 2833-2016 (BSN, 2016a) untuk pembebanan gempa dan SNI 1725-2016 (BSN, 2016b) untuk pembebanan pada jembatan. Salah satu dari masing-masing *girder* memenuhi kriteria yang menghasilkan nilai tegangan dan lendutan terkecil.



Gambar 2. Bentuk penampang *I girder* (a) penampang tipe 1, (b) penampang tipe 2, (c) penampang tipe 3



Gambar 3. Bentuk penampang *box girder* (a) penampang tipe 1, (b) penampang tipe 2, (c) penampang tipe 3

Jembatan yang digunakan diasumsikan dari data jembatan prategang pada umumnya. Kondisi struktur *I girder* dan *box girder* dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4, dengan *specific gravity* yang digunakan untuk perhitungan pembebanan pada

Tabel 5. Material properties beton dan baja prategang yang digunakan disajikan pada Tabel 6 dan 7, dengan profil baja prategang sesuai dengan standar ASTM tahun 2017 (ASTM, 2017).

Tabel 1. Data spesifikasi I girder

| Simbol | Tipe 1 (m) | Tipe 2 (m) | Tipe 3 (m) |
|----------------|------------|------------|------------|
| b ₁ | 0,64 | 0,90 | 0,60 |
| b ₂ | 0,80 | 0,35 | 0,15 |
| b ₃ | 0,30 | 0,20 | 0,35 |
| b ₄ | 0,20 | 0,25 | 0,125 |
| b ₅ | 0,25 | 0,70 | 0,115 |
| b ₆ | 0,70 | - | 0,58 |
| h ₁ | 0,07 | 0,15 | 0,20 |
| h ₂ | 0,13 | 0,12 | 0,14 |
| h ₃ | 0,12 | 1,65 | 0,20 |
| h ₄ | 1,65 | 0,14 | 1,25 |
| h ₅ | 0,25 | 0,30 | 0,15 |
| h ₆ | 0,25 | - | 0,25 |

Tabel 2. Data spesifikasi box girder

| Simbol | Tipe 1 (m) | Tipe 2 (m) | Tipe 3 (m) |
|----------------|------------|------------|------------|
| B1 | 6,25 | 6,25 | 5,67 |
| B2 | 1,00 | 1,00 | 1,04 |
| B3 | 4,00 | 4,00 | 1,54 |
| B4 | - | - | 5,24 |
| t ₁ | 0,35 | 0,35 | 0,35 |
| t ₂ | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| t ₃ | 0,40 | 0,42 | 0,36 |
| t ₄ | 0,40 | 0,40 | 0,35 |
| t ₅ | 0,25 | 0,30 | 0,25 |

Tabel 3. Data Jembatan I girder

| Uraian | Notasi | Dimensi (m) |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| Panjang bentang | L | 40,00 |
| Jarak antara balok prategang | S | 1,80 |
| Tebal plat lantai jembatan | h _o | 0,20 |
| Tebal lapisan aspal + overlay | h _a | 0,10 |
| Tinggi genangan air hujan | t _h | 0,05 |

Tabel 7. Data strands (ASTM, 2017)

| Jenis strands | Uncoated 7 wire super strands ASTM A - 416 grade 270 | |
|--------------------------------------|--|--------------------------|
| Tegangan leleh strands | f _{py} | 1.580 MPa |
| Kuat tarik strands | f _{pu} | 1.860 MPa |
| Diameter nominal strands | | 12,70 mm (1/2") |
| Luas tampang nominal satu strands | A _{st} | 98.70 mm ² |
| Beban putus minimal satu strands | P _{bs} | 183,32 kN (100% UTS) |
| Jumlah kawat untaian (strands cable) | | 19 kawat untaian/tendon |
| Diameter selubung ideal | | 84,00 mm |
| Luas tampang strands | | 1.875,30 mm ² |
| Beban putus satu tendon | P _{b1} | 3.559,10 kN (100% UTS) |
| Modulus elastis strands | E _s | 193.000 MPa |
| Tipe dongkrak | | VSL19 |

Tabel 4. Data Jembatan box girder

| Uraian | Notasi | Dimensi (m) |
|-------------------------------|----------------|-------------|
| Panjang bentang | L | 50,00 |
| Lebar jalur lalu lintas | B | 7,00 |
| Lebar median | b _m | 1,00 |
| Tebal trotoar | b _t | 1,00 |
| Tebal lapisan aspal + overlay | h _a | 0,10 |
| Tinggi genangan air hujan | t _h | 0,05 |

Tabel 5. Specific gravity (BSN, 2016)

| Uraian | Notasi | Berat (kn/m ³) |
|-----------------|--------------------|----------------------------|
| Beton prategang | W _c | 25,50 |
| Beton bertulang | W _c ' | 25,00 |
| Beton | W _c " | 24,00 |
| Aspal | W _{aspal} | 22,00 |
| Air hujan | W _{air} | 9,00 |

Tabel 6. Data beton

| Uraian | Notasi | Satuan |
|-------------------------------------|-----------|--------|
| Mutu beton balok | K-500 | |
| Kuat tekan balok, f'c | 41,50 | MPa |
| Modulus elastisitas, E _c | 30.277,63 | MPa |
| Angka poisson, ν | 0,15 | |
| Modulus geser, G | 13.164,19 | MPa |
| Koefisien muai panjang, α | 0,00001 | /°C |
| Mutu plat | K-300 | |
| Kuat tekan plat, f'c | 24,90 | MPa |
| Modulus elastisitas plat | 23.452,95 | MPa |

Hasil dan Pembahasan

Analisis penampang

Analisis penampang terdiri dari luasan penampang (A), momen inersia (I_b), momen inersia terhadap titik berat balok (I_x), tahanan momen sisi atas (W_a), tahanan momen sisi bawah (W_b).

Penampang I *girder* dibagi menjadi dua, yaitu beton prategang itu sendiri dan beton prategang komposit (ditambah dengan plat lantai). Hasil analisis penampang dapat dilihat dalam Tabel 8 dan 9.

Tabel 8. Hasil analisis penampang I girder

| Notasi | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A | 0,7520 m ² | 0,7520 m ² | 0,7520 m ² |
| I _o | 0,0762 m ⁴ | 0,0768 m ⁴ | 0,0424 m ⁴ |
| I _x | 0,4073 m ⁴ | 0,4227 m ⁴ | 0,344 m ⁴ |
| W _a | 0,3768 m ³ | 0,3292 m ³ | 0,3736 m ³ |
| W _b | 0,3998 m ³ | 0,4128 m ³ | 0,2924 m ³ |

Tabel 9. Hasil analisis penampang I girder + plat lantai

| Notasi | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
|-------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| A _c | 0,989 m ² | 0,9890 m ² | 0,989 m ² |
| I _{oc} | 0,077 m ⁴ | 0,0776 m ⁴ | 0,043 m ⁴ |
| I _{xc} | 0,407 m ⁴ | 0,6270 m ⁴ | 0,533 m ⁴ |
| W _{ac} | 0,666 m ³ | 0,6760 m ³ | 0,608 m ³ |
| W _{ac} ' | 0,832 m ³ | 0,8470 m ³ | 0,787 m ³ |
| W _{bc} | 0,515 m ³ | 0,5150 m ³ | 0,375 m ³ |

Dapat diketahui bahwa untuk komposit, penampang balok prategang Tipe 3 memiliki nilai momen inersia yang lebih kecil, yaitu 0,0424 m⁴ dan 0,04314 m⁴, dibandingkan dengan penampang Tipe 1 yang memiliki nilai momen inersia 0,0762 m⁴ dan 0,07698 m⁴, dan penampang Tipe 2 dengan nilai 0,0768 m⁴ dan 0,7756 m⁴. Hasil analisis penampang *box girder* disajikan pada Tabel 10. Penampang balok prategang Tipe 3 memiliki nilai momen inersia yang lebih kecil dengan nilai 19,023 m⁴ dibandingkan dengan penampang Tipe 1 yang memiliki nilai momen inersia 19,518 m⁴, dan penampang Tipe 2 dengan nilai 19,372 m⁴.

Tabel 10. Hasil analisis penampang box girder

| Notasi | Type 1 | Type 2 | Type 3 |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| A | 0,626 m ² | 0,623 m ² | 0,624 m ² |
| I _o | 19,518 m ⁴ | 19,372 m ⁴ | 19,023 m ⁴ |
| I _x | 4,938 m ⁴ | 5,007 m ⁴ | 5,341 m ⁴ |
| W _a | 5,071 m ³ | 5,081 m ³ | 5,225 m ³ |
| W _b | 3,236 m ³ | 3,306 m ³ | 3,614 m ³ |

Gaya prategang awal

Gaya prategang awal (P_i) yang terjadi pada I *girder* Tipe 1 memiliki nilai sebesar 8.307,41 kN, Tipe 2 sebesar 8.404,14 kN dan Tipe 3 sebesar 7.790,37 kN. Dari hasil tersebut gaya prategang awal terbesar terjadi pada penampang Tipe 2. Sedangkan gaya prategang awal yang terjadi pada *box girder* memiliki nilai sebesar 62.517,15 kN untuk Tipe 1, Tipe 2 sebesar 63.294,96 kN dan nilai tertinggi pada Tipe 3 sebesar 66.048,15 kN. Nilai prategang awal ini digunakan sebagai acuan

untuk menentukan jumlah tendon. Nilai gaya prategang awal digunakan untuk mencari presentase tegangan leleh yang timbul pada baja (minimal 80%).

Posisi tendon

Penggunaan tendon dalam studi ini dibuat sama agar dapat dibandingkan dengan setara. Banyaknya tendon yang digunakan pada I *girder* disajikan dalam Tabel 11 dan banyaknya tendon yang digunakan dalam *box girder* dapat dilihat dalam Tabel 12.

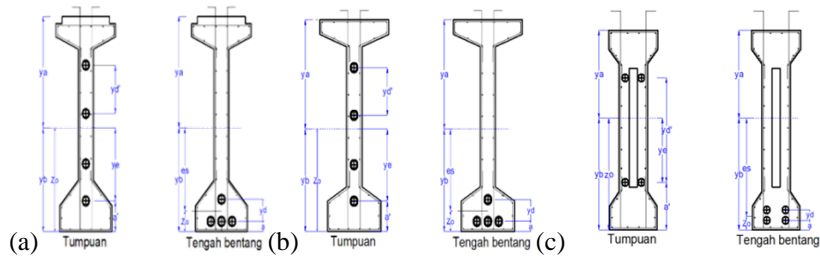
Tabel 11. Tendon I girder

| Penampang | Tendon/ baris | Strands | Selubung tendon (mm) |
|-----------|------------------|---------|-------------------------|
| Tipe 1 | 1 | 19 | 84 |
| | 1 | 19 | 84 |
| | 1 | 19 | 84 |
| Tipe 2 | 1 | 12 | 76 |
| | 1 | 19 | 84 |
| | 1 | 19 | 84 |
| | 1 | 19 | 84 |
| Tipe 3 | 1 | 12 | 76 |
| | 2 | 19 | 84 |
| | 2 | 17 | 84 |

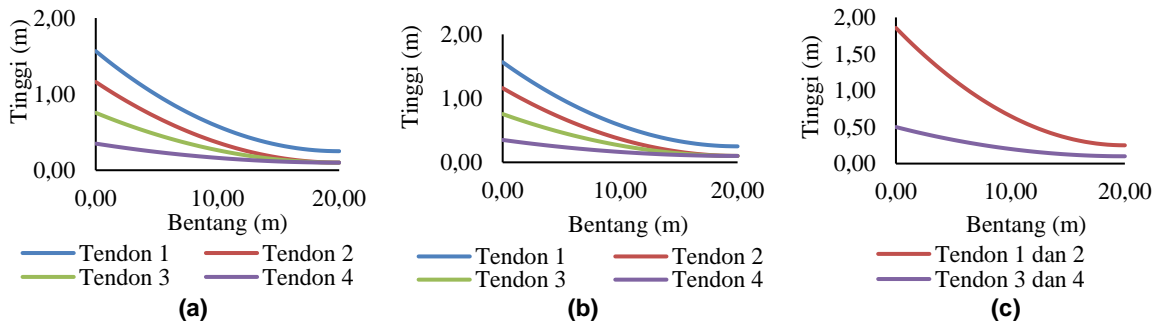
Tabel 12. Tendon box girder

| Penampang | Tendon/ baris | Strands | Selubung tendon (mm) |
|-----------|------------------|---------|-------------------------|
| Tipe 1 | 1 | 140 | 85 |
| | 2 | 140 | 85 |
| | 3 | 140 | 85 |
| Tipe 2 | 1 | 140 | 85 |
| | 2 | 140 | 85 |
| | 3 | 140 | 85 |
| Tipe 3 | 1 | 147 | 85 |
| | 2 | 147 | 85 |
| | 3 | 147 | 85 |

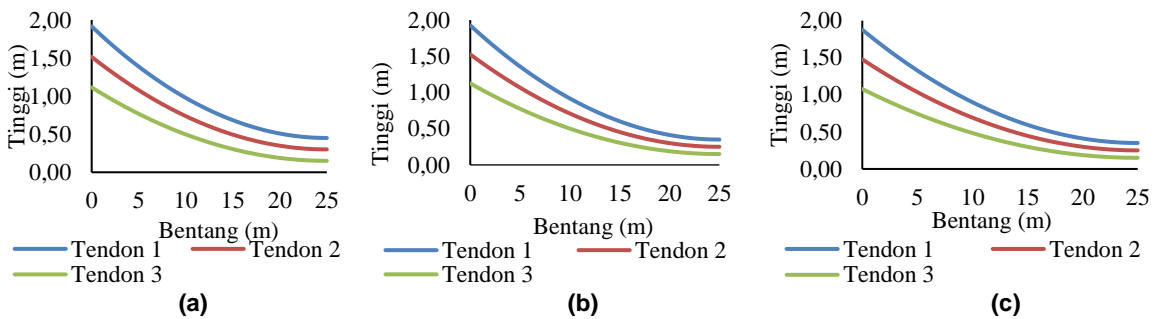
Posisi tendon dan arah lintasan tendon I *girder* dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5, sedangkan untuk posisi tendon pada tumpuan *box girder* dapat dilihat dalam Gambar 6 dan 7 sedangkan arah lintasan tendon *box girder* dapat dilihat pada Gambar 8. Pada tendon I *girder* menggunakan selubung tendon berkisar antara 76 mm sampai dengan 84 mm bergantung pada jenis penampang *girder* yang digunakan. Sedangkan pada tendon *box girder* menggunakan selubung tendon sebesar 85 mm untuk semua tipe *girder*. Hal ini menyesuaikan dengan bentuk dari *girder* yang telah di desain.



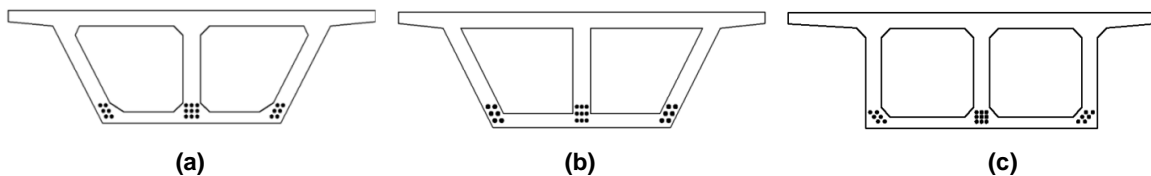
Gambar 4. Posisi tendon penampang tipe 1 (a), penampang tipe 2 (b), dan penampang tipe 3 (c).



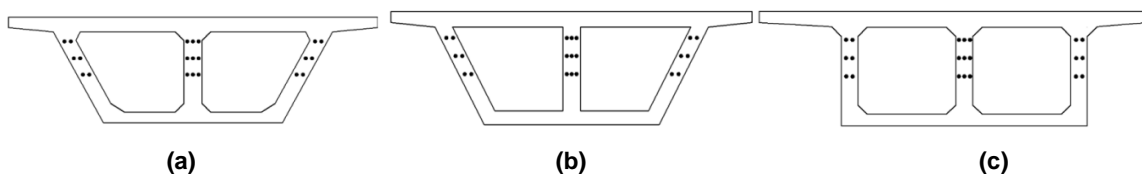
Gambar 5. Arah lintas tendon I girder tipe 1 (a), penampang tipe 2 (b), dan penampang tipe 3 (c).



Gambar 6. Arah lintas tendon box girder tipe 1 (a), penampang tipe 2 (b), dan penampang tipe 3 (c).



Gambar 7. Posisi tendon di tumpuan box girder tipe 1 (a), box girder tipe 2 (b), dan box girder tipe 3 (c).



Gambar 8. Posisi tendon di tengah bentang tipe 1 (a), tipe 2 (b), dan tipe 3 (c).

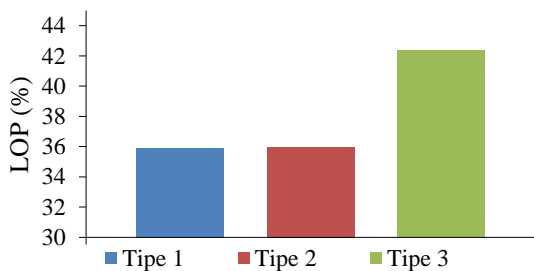
Kehilangan gaya prategang (loss of prestress)

Total kehilangan gaya prategang pada I girder dan box girder disajikan dalam Gambar 9 dan 10. Dapat dilihat total kehilangan gaya prategang pada penampang Tipe 3 I girder mempunyai nilai tertinggi sebesar 42,46% dengan tegangan yang

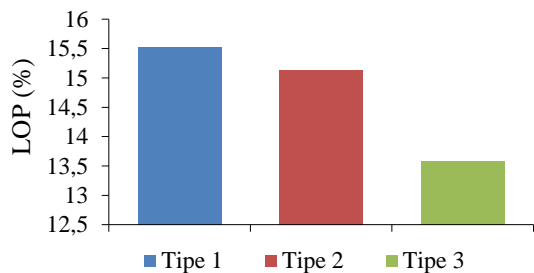
terjadi pasca tarik sebesar 1.054 MPa sedangkan untuk penampang Tipe 1 mempunyai nilai kehilangan gaya prategang sebesar 35,91% dengan tegangan sebesar 1.204 MPa dan penampang Tipe 2 mempunyai nilai kehilangan gaya prategang 35,96% dengan tegangan sebesar 1.203 MPa. Ketiga penampang masih memenuhi tegangan izin

0,7 f_{pU} sebesar 1.302 MPa yang diberikan atau masih dalam kondisi aman.

Total kehilangan gaya prategang tertinggi pada *box girder* dihasilkan pada penampang Tipe 1 dengan nilai 15,53% dengan nilai tegangan pasca Tarik sebesar 1.271 MPa, sedangkan penampang *box girder* Tipe 2 mempunyai nilai kehilangan gaya prategang sebesar 15,14% dengan nilai tegangan pasca tarik sebesar 1.275 MPa dan total kehilangan gaya prategang Tipe 3 sebesar 13,59% dengan nilai tegangan pasca tarik sebesar 1.289 MPa. Ketiga penampang masih memenuhi tegangan izin 0,7 f_{pU} sebesar 1.302 MPa yang diberikan atau masih dalam kondisi aman.



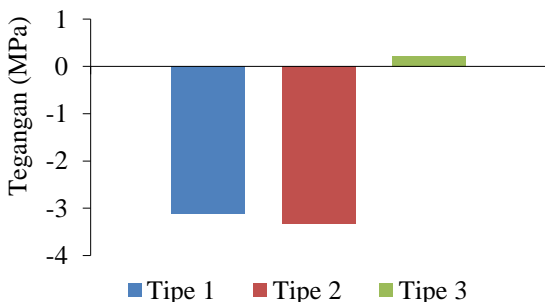
Gambar 9. Total loss of prestress *I girder*.



Gambar 10. Total loss of prestress *box girder*

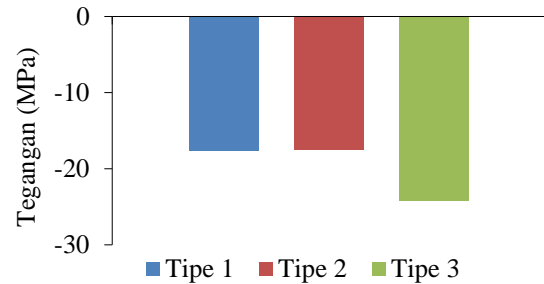
Tegangan yang terjadi pada penampang

Nilai tegangan yang terjadi setelah kehilangan prategang pada penampang *I girder* dapat dilihat pada Gambar 11 dan 12 serta nilai tegangan yang terjadi setelah kehilangan prategang pada *box girder* dapat dilihat pada Gambar 13 dan 14.

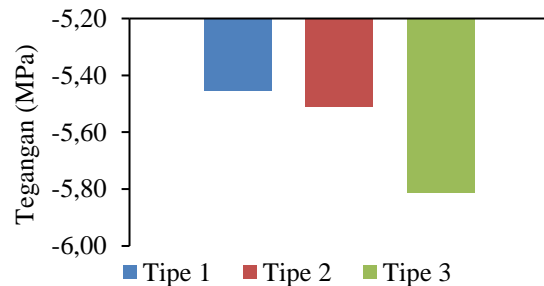


Gambar 11. Tegangan serat atas *I girder* setelah kehilangan prategang.

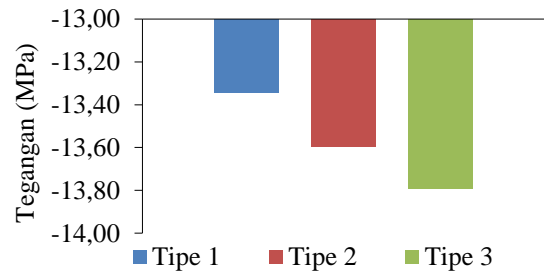
Nilai tegangan serat atas terkecil setelah kehilangan prategang penampang *I girder* ada pada Tipe 3 sebesar 0,22 MPa dan nilai tegangan serat bawah terkecil setelah kehilangan prategang ada pada penampang 2 sebesar -17,57 MPa. Sedangkan nilai tegangan serat atas terkecil setelah kehilangan prategang untuk *box girder* terjadi pada Tipe 1 sebesar -5,46 MPa dan nilai tegangan serat bawah terkecil setelah terjadi pada Tipe 1 sebesar -13,34 MPa.



Gambar 12. Tegangan serat bawah *I girder* setelah kehilangan prategang.



Gambar 13. Tegangan serat atas *box girder* setelah kehilangan prategang.



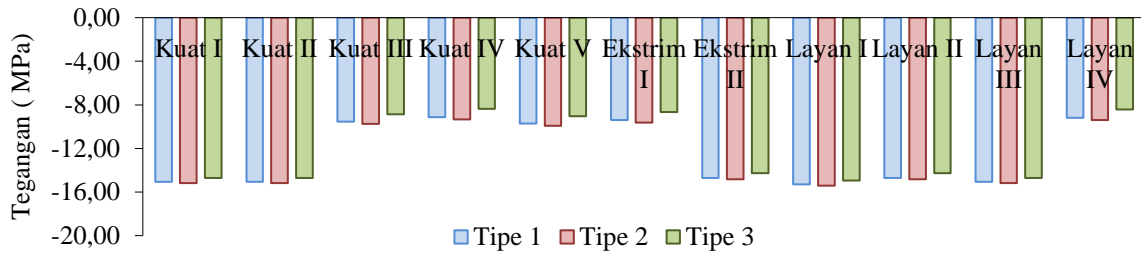
Gambar 14. Tegangan serat bawah *box girder* setelah kehilangan prategang.

Tegangan akibat pembebanan

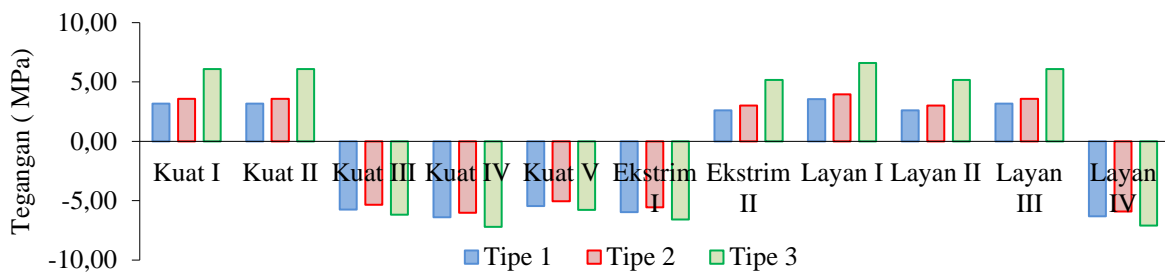
Tegangan akibat pembebanan *I girder* disajikan dalam Gambar 15 dan 16 sedangkan hasil tegangan akibat pembebanan untuk *box girder* dapat dilihat pada Gambar 17 dan 18. Kombinasi tegangan pada serat atas penampang *I girder* Tipe 2 memiliki tegangan maksimum dengan nilai -15,14 MPa dan hasil kombinasi akibat pembebanan pada serat bawah penampang *I girder* Tipe 3 memiliki tegangan maksimum dengan nilai -7,21 MPa yang

lebih besar dari penampang Tipe 1 dan penampang Tipe 2. Kombinasi tegangan pada serat bawah penampang *box girder* Tipe 3 memiliki nilai tegangan maksimum sebesar -11,49 MPa dan nilai maksimum dari hasil kombinasi akibat

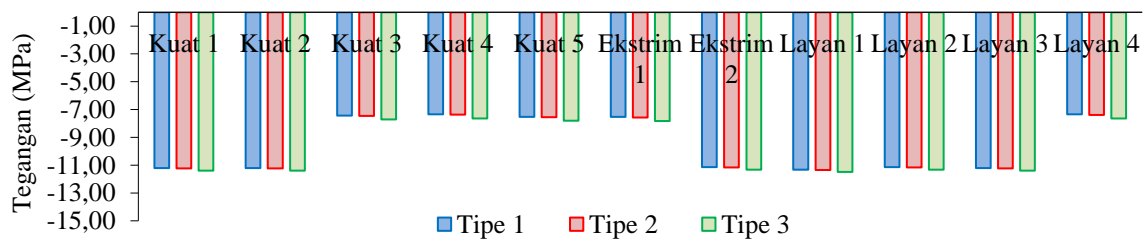
pembebanan pada serat bawah ada pada Tipe 3 dengan nilai sebesar -10,91 MPa. Untuk setiap penampang *I girder* dan *box girder* masih pada kondisi aman karena belum melewati batas tegangan ijin tekan sebesar -18,68 MPa.



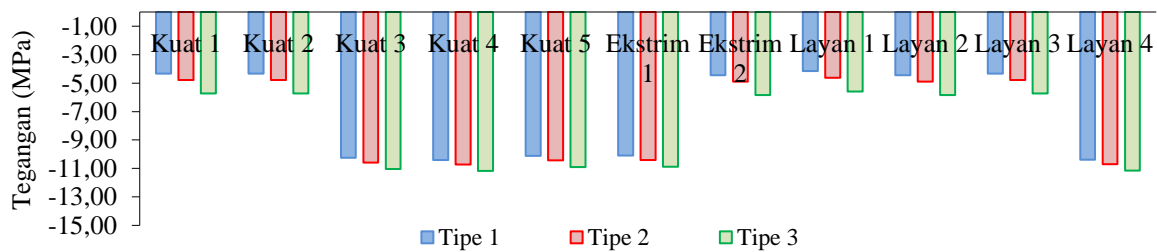
Gambar 15. Tegangan kombinasi serat atas I girder.



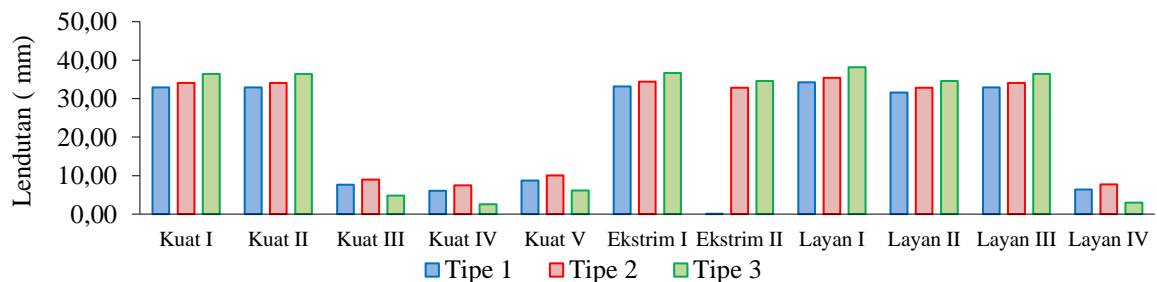
Gambar 16. Tegangan kombinasi serat bawah I girder.



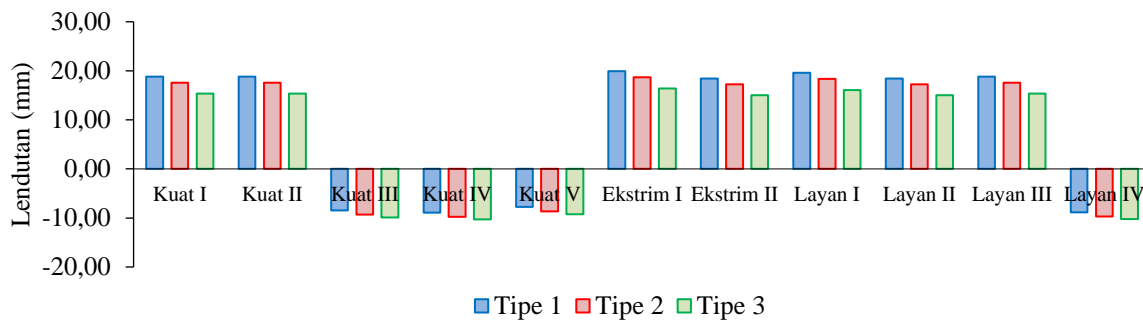
Gambar 17. Tegangan kombinasi serat atas box girder.



Gambar 18. Tegangan kombinasi serat bawah box girder.



Gambar 19. Kombinasi lendutan akibat beban (I girder)



Gambar 20. Kombinasi lendutan akibat beban (*box girder*)

Lendutan

Nilai lendutan minimum pada kondisi awal (transfer) dan setelah kehilangan prategang pada penampang *I girder* nilai terjadi pada penampang Tipe 1 dan Tipe 2 dengan nilai -36 mm (lendutan ke atas) dan -32 mm (lendutan ke atas), dan nilai akibat kombinasi pembebanan dapat dilihat pada Gambar 19. Sementara itu nilai lendutan minimum pada kondisi awal (transfer) dan setelah kehilangan prategang pada penampang *box girder* nilai terjadi pada penampang Tipe 3 dan Tipe 1 dengan nilai -38,1 mm dan -23 mm untuk nilai lendutan dari kombinasi akibat pembebanan dapat dilihat pada Gambar 20.

Dari kombinasi lendutan akibat beban dapat diketahui bahwa penampang *I girder* Tipe 1 memiliki lendutan paling kecil dari pada Tipe 2 dan Tipe 3, sedangkan untuk *box girder* dapat dilihat pada Tipe 1 memiliki nilai lendutan terkecil dari Tipe 2 dan Tipe 3. Nilai lendutan pada setiap kombinasi masih memenuhi nilai lendutan ijin prategang sebesar $L < 240$.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, dapat diambil kesimpulan bahwa nilai kehilangan prategang (*loss of prestress*) dari penampang *I girder* yang paling minimum terjadi pada penampang Tipe 1 dengan nilai sebesar 35,91% sedangkan pada penampang *box girder* nilai kehilangan prategang minimum yang terjadi pada penampang Tipe 3 dengan nilai 13,59%.

Nilai tegangan minimum penampang *I girder* setelah kehilangan prategang pada serat atas ada pada Tipe 3 sebesar 0,22 MPa dan pada serat bawah ada pada Tipe 2 sebesar 17,57 MPa. Sedangkan nilai tegangan minimum penampang *box girder* pada serat atas ada pada Tipe 1 sebesar -5,46 MPa dan nilai tegangan pada serat bawah sebesar -13,34 MPa. Nilai lendutan minimum pada kondisi awal (transfer) dan setelah kehilangan prategang pada penampang *I girder* nilai terjadi

pada penampang Tipe 1 dan Tipe 2 dengan nilai -36 mm (lendutan ke atas) dan -32 mm (lendutan ke atas). Sedangkan nilai lendutan minimum pada kondisi awal (transfer) dan setelah kehilangan prategang pada penampang *box girder* nilai terjadi pada penampang Tipe 3 dan Tipe 1 dengan nilai -38,1 mm dan -23 mm. Dari hasil analisis tegangan dan lendutan dapat disimpulkan bahwa penampang *I girder* dan *box girder* efektif adalah penampang Tipe 1 dan Tipe 3.

Daftar Pustaka

- ASTM A416 (2017). *Standard Specification for Low-Relaxation, Seven-Wire Steel Strand for Prestressed Concrete*. Pennsylvania: West Conshohocken.
- Badan Standardisasi Nasional (2016a). *SNI 2833 2016 tentang pembebanan untuk jembatan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Badan Standardisasi Nasional (2016b) *SNI 1725 2016 tentang perencanaan jembatan terhadap beban gempa*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Hady, M., Saidi, T., & Hasan, M. (2018) Tinjauan ulang two-cell box girder beton prategang terhadap kapasitas dukung beban lalu lintas pada perencanaan pembangunan fly over Simpang Surabaya Kota Banda. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(3), 223-232.
- Hardwiyono, S., Soebandono, B., & Hakim, L (2015). Perancangan ulang struktur atas Jembatan Gajah Wong Yogyakarta dengan menggunakan box girder. *Jurnal Semesta Teknika*, 16(1), 10-20.
- Hidayat, A.S., & Chayati, N. (2014). Perancangan struktur atas jembatan beton prategang. *Astonjadro*, 3(2), 29-42.
- Leo, E., & Agung, M.H.N. (2017). Kajian efisiensi blub-tee shape and half slab girder dengan blister tunggal terhadap PC-I girder. *Jurnal Muara Sains*

- Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, 1(1), 309-317.
- Martoyo, A. (2017). Pengaruh panjang sambungan pada beton prategang segmental bertulang limbah ban. *Jurnal Teknik Sipil dan Perencanaan*, 19(1), 65-70.
- Meidiansyah, A.F., Purwanto, M.Y.J., & Fauzan, M. (2016). Analisis struktur box girder Jembatan Fly Over Rawa Buaya Sisi Barat terhadap gempa. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 1(1), 42-56.
- Nawy, E.G., Hardani, W., & Suryoatmono, B. (2001). *Beton prategang: suatu pendekatan mendasar*. Jakarta: Erlangga.
- Nurrianto, F., Iswanto, K.A., Yulipriyono, E.E., & Adi, R.Y. (2013). Perancangan jalan layang akses Terminal A Mangkang Semarang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 2(2), 219-227.
- Putra, B.P., Muntafi, Y., & Suharyatmo, S. (2017). Studi perbandingan penggunaan PCU girder dan PCI girder pada struktur atas Jembatan Jurang Gempal Wonogiri. *Jurnal Teknisia*, 22(1), 333-346.
- Santosa, A., Sugiyanto, S., Wicaksono, Y.I., & Atmono, I.D. (2015). Perencanaan jembatan prategang Kali Suru Pemasang. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 4(4), 1-12.
- Setyawan, A., & Sulistyono, I.I.D. (2012). Analisis non-linier tegangan dan deformasi struktur jembatan beton prategang pada tahap konstruksi dengan metode balanced cantilever. *Jurnal Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan*, 13(2), 33-39.
- Syaifulah, A.A., Kristiawan, S.A., & Purwanto, E. (2016). Studi parametrik pengaruh kuat tekan beton dan gaya prategang awal terhadap dimensi penampang T balok beton prategang (studi kasus Hotel Alila, Surakarta). *Matriks Teknik Sipil*, 4(4), 1146-1156.
- Wakid, M., Kristiawan, S.A., & Rahmadi, A.P. (2016). Perkuatan struktur atas jembatan komposit dengan metode prategang eksternal. *Jurnal Teknik Sipil*, 2(1), 60-65.
- Wicaksono, K.A., Saadati, K., Purwanto, P., & Sukamta, S. (2016). Perencanaan struktur jembatan slab on pile Sungai Brantas dengan menggunakan metode pracetak pada Proyek Tol Solo–Kertosono Sta. 176+ 050–Sta. 176+ 375. *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 5(2), 275-28.