

KINERJA STRUKTUR BALOK KANTILEVER TENDON CFRP TERHADAP BALOK PRATEGANG

Maria Fransisca Nobella¹ dan FX. Junaedi Utomo²

^{1,2}Pascasarjana Universitas Atma Jaya Yogyakarta
Email: jun.utomo@gmail.com

ABSTRACT

Along with the development of the architectural world, civil engineering as the primary support in structural technology is also required to reach higher and larger boundaries. Many buildings are designed with architectural studies giving the effect of extreme structural considerations. This study provides a study on the performance of conventional cantilevers using prestressed tendons against CFRP tendons. The use of CFRP is already evidence involving future material updates. In this study, an analysis of cantilever beams with a length of 6 meters was carried out. The first variation is a beam with prestressed tendons, and the second variation is a prestressed beam with CFRP tendons. Cantilever beam modeling is conducted using ABAQUS software. The modeling will be carried out in three stages: the tendon stressing stage, the self-weight application stage, and the concentrated load application stage at the free end. Material modeling is carried out using constitutive modeling under the rules and designation of the structure. The cantilever beam receives a concentrated load and is analyzed statically. Based on the results of the analysis, it is found that the maximum deflection that occurs in the tendon and CFRP is -0.193236788 m and -0.103454 m, respectively. The most dominant deflection direction is shown in the U2 direction, namely the vertical direction to the long span of the cantilever beam. This indicates that the structure's response to the CFRP tendon is better than the prestressed concrete with a smaller deflection value.

Keywords: deflection, abaqus, cantilever, prestress beam.

ABSTRAK

Seiring berkembangnya dunia arsitektural, teknik sipil sebagai penopang utama dalam teknologi struktur juga dituntut untuk mencapai batas-batas yang makin tinggi dan makin besar. Banyak bangunan didesain dengan kajian arsitektural memberikan efek pertimbangan struktur yang ekstrim. Pada penelitian ini memberikan sebuah kajian mengenai kinerja kantilever konvensional menggunakan tendon prategang terhadap tendon CFRP. Penggunaan CFRP sudah merupakan bukti melibatkan kemutakhiran material masa depan. Pada studi ini dilakukan analisis pada balok kantilever dengan panjang 6 meter. Variasi pertama adalah balok dengan tendon prategang dan variasi kedua adalah balok prategang dengan tendon CFRP. Pemodelan balok kantilever dilakukan dengan software ABAQUS. Pemodelan akan dilakukan dalam tiga tahap yakni tahap *stressing tendon*, tahap aplikasi berat sendiri dan tahap aplikasi beban terpusat pada ujung bebasnya. Pemodelan material dilakukan dengan menggunakan pemodelan konstitutif yang sesuai dengan kaidah dan peruntukan strukturnya. Balok kantilever menerima beban terpusat dan dianalisis secara statik. Berdasarkan hasil analisa tersebut didapatkan bahwa defleksi maksimum yang terjadi pada tendon dan CFRP berturut-turut adalah sebesar -0.193236788 m dan -0.103454 m. Arah defleksi yang paling dominan ditunjukkan pada arah U2 yakni arah vertikal terhadap bentang panjang balok kantilever. Hal ini menunjukkan bahwa respon struktur pada tendon CFRP lebih baik daripada beton prategang dengan nilai defleksi yang lebih kecil.

Kata kunci: defleksi, abaqus, kantilever, beton prategang.

1. PENDAHULUAN

Desain bangunan dalam perkembangannya akan terus berusaha melampaui batas-batas konservatif keteknikan. Bentang yang semakin panjang, penampang yang semakin ramping, mutu material yang semakin tinggi dan arsitektural yang semakin kompleks. Perspektif arsitektural seringkali menjadi tantangan besar bagi para ahli teknik, apalagi dengan sistem kantilever yang banyak diadaptasi dalam

bangunan-bangunan yang ingin meminimalkan rangka-rangka struktur dan membuat bangunan terlihat lebih *frameless*. Balok prategang dalam praktiknya seringkali digunakan untuk bentang struktur yang tidak standar, tentu dengan varian mutu material beton dan jumlah kabel yang disesuaikan dengan kapasitas yang ingin dituju. Dalam studi ini akan menerapkan sistem struktur kantilever dengan beton menggunakan kabel prategang dan beton menggunakan tendon CFRP. Penggunaan CFRP

karena keistimewaannya yang memiliki kuat tarik sangat tinggi. Penelitian ini menggunakan ABAQUS 2021 untuk memodelkan strukturnya dan simulasi beban secara gradual.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian Magdalena (2011) mengenai bangunan gedung oval bertingkat tinggi menunjukkan banyak penggunaan struktur kantilever untuk mencapai desain arsitekturalnya. Geometri oval pada gedung menghasilkan variasi bentang kantilever. Beragam kantilever tersebut diberikan perkuatan menggunakan sistem prategang. Sistem prategang dimaksudkan untuk memikul kekurangan momen pada kantilever. Penelitian tersebut melakukan analisis balok kantilever dengan panjang bentang 4 m dan dengan dimensi 450 mm x 800 mm serta menggunakan kabel prategang 3D9,3. Deformasi yang terjadi menjadi perhatian khusus pada penelitian tersebut.

Mohammed et al (2017) dalam penelitiannya yang berjudul “*Modelling of Bonded Post-Tensioned Concrete Cantilever Beams under Flexural Loading*” melakukan kajian mengenai pengaruh variasi jalur kabel prategang pada balok kantilever. Terdapat 6 pemodelan dengan variasi jalur kabel yang mendapat 3 variasi sistem pembebanan statik. Seluruh pemodelan prategang menggunakan sistem *bonded post-tensioned*. Selanjutnya didapat bahwa dengan sistem jalur one-draped points memberikan performa yang paling baik.

Penelitian balok bertulang yang kemudian diberi perkuatan telah dilakukan Burke dan Dolan (2001), dalam penelitiannya yang berjudul “*Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons*”, menyajikan pendekatan terpadu untuk desain lentur balok dengan tendon FRP. Burke dan Dolan (2001) menyampaikan dasar dari metodologi desain kekuatan adalah rasio keseimbangan. FRP yang bersifat getas, perencana harus memastikan bahwa kekuatan desain dari tendon tidak melebihi batas layan. Untuk mencegah kegagalan rangkai, dan agar umur desain tendon melebihi 100 tahun, *initial prestress* dibatasi hingga 50% - 60% dari kapasitas ultimit untuk tendon karbon dan 40% - 50% persen kapasitas ultimit untuk tendon aramid. Tendon kaca tidak disarankan karena karakteristik rangkai yang buruk di lingkungan basa yang lembab.

Isu utama dalam penggunaan FRP adalah minimnya area daktilitas dalam perilaku lentur yang terjadi. Du et al (2011) mendapatkan sebuah kesimpulan bahwa dengan sistem *internal bonded* pada beton prategang dengan tendon FRP memberikan daktilitas yang paling tinggi. *Internal bonded* memberikan performa 20% lebih baik terhadap *internal unbonded* dan 40% terhadap *external unbonded*

3. LANDASAN TEORI

Beton prategang

Beton prategang adalah suatu jenis beton dimana tulangan bajanya ditarik terhadap betonnya. Penarikan menghasilkan keseimbangan pada tegangan dalam (tarik pada baja dan tekan pada beton), yang akan meningkatkan kekuatan balok dalam mendukung beban. Karena beton kuat terhadap tekan dan lemah terhadap tarik maka kekuatan dapat ditingkatkan dengan memberikan prategang (Collins & Mitchell, 1991).

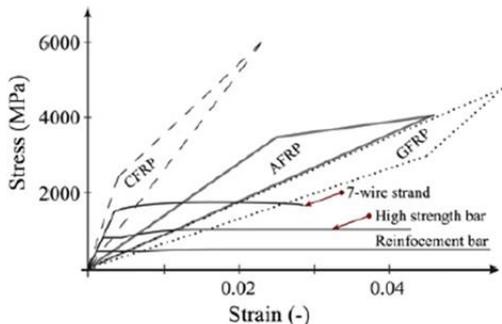
Balok dengan FRP

Bahan komposit polimer dengan perkuatan fiber atau Fiber Reinforced Polymer (FRP) adalah gabungan serat ber-modulus dan berkekuatan tinggi dalam polimer matriks bermodulus rendah yang menjamin transfer beban yang baik di antara serat-serat tersebut. Kekuatan dan kekakuan komposit FRP ditentukan dari jenis dan susunan seratnya. Serat karbon (Carbon Fibre Reinforced Polymer / CFRP) dan serat kaca (Glass Fibre Reinforced Polymer / GFRP) merupakan jenis FRP yang umum dipakai untuk retrofit elemen struktur. CFRP bisa terdiri dari bahan high strength (hsCFRP), high modulus (hmCFRP), dan yang baru-baru ini adalah ultra-high modulus (uhmCFRP). Umumnya jika ada peningkatan kekakuan CFRP akan disertai dengan pengurangan kekuatan dan regangan putus serat yang lebih pendek. GFRP (umumnya terbuat dari serat E-glass) mempunyai modulus yang lebih rendah dari CFRP, tetapi lebih murah. Agar efektif sebagai perkuatan elemen struktur baja, modulus FRP perlu dipilih yang sesuai dengan material dasar yang diretrofit.

Tendon CFRP

Dalam sistem prategang komposit, ada tiga material itu terutama digunakan untuk membangun tendon: AFRP (Aramid FRP), GFRP (Glass FRP) dan CFRP (Carbon FRP). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, sifat tarik bahan FRP dapat sangat bervariasi tergantung pada bahan seratnya, fraksi serat dan jenis resin. Akibatnya, modulus elastisitas dalam setiap kelompok bahan dapat divariasikan, dimana hal ini

tidak memungkinkan bila dilakukan dengan baja. Namun, kemampuan leleh pada baja akan menguntungkan, karena akan memberikan keuletan pada struktur sampai batas akhir.



Gambar 1. Grafik tegangan regangan FRP dan Baja

CFRP memiliki nilai rangkai yang baik, relaksasi rendah, kekuatan tinggi dan dapat menahan *jacking stress* yang tinggi, hanya saja CFRP merupakan bahan yang tidak ekonomis. Bahan FRP sangat lemah pada arah melintang, dibandingkan dengan kuat tariknya, maka sulit untuk mengembangkan sistem pengangkutan yang tidak menghasilkan gaya lateral yang menyebabkan kerusakan pada tendon FRP. (Schmidt et al, 2012)

Model konstitutif material beton

Terdapat tiga tipe pemodelan material konstitutif beton pada Abaqus yaitu *Concrete Smeared Cracking*, *Concrete Damaged Plasticity*, dan *Concrete Brittle Cracking*. Model *Concrete Smeared Cracking* diaplikasikan untuk kondisi struktur yang mengalami regangan yang monotonik pada kondisi kekangan yang rendah (*low confining*) dengan konstitutif material yang dapat mengalami retak tarik dan kerusakan tekan. Model *Concrete Damaged Plasticity* diaplikasikan untuk pemodelan beton yang mengalami pembebanan secara monotonik dan arbitrary loading meliputi beban siklik, dimana ditentukan parameter skalar damaged berupa pengurangan kekakuan elastis akibat regangan plastis oleh tarik dan tekan. (Dassault Systemes, 2011)

Model konstitutif material baja

Dalam pemodelan elemen hingga struktur beton bertulang dengan Abaqus, baja tulangan dimodelkan nonlinear dengan menggunakan model konstitutif material *classical metal plasticity*. Idealisasi dari model material ini adalah moda kelelahan dan *inelastic flow* dari metal relatif pada suhu rendah, beban relatif pada monotonik dan pengaruh rangkai tidak diperhitungkan. Model material konstitutif ini menggunakan standar dari Mises dan Hill dimana yield surface berasosiasi dengan *plastic flow*. Plastik sempurna dan *isotropic hardening* dapat diterapkan pada model *classical metal plasticity*. Aplikasi dari

model material ini adalah untuk pemodelan *crash analysis*, *metal forming*, dan untuk studi *general collaps*.

4. METODE PENELITIAN

Materi yang digunakan pada penelitian ini yaitu perilaku balok kantilever dengan perkuatan kabel prategang dan fiber reinforced polymer. Pemodelan 1 merupakan balok kantilever beton bertulang dengan sistem perkuatan kabel prategang yang didesain secara fully prestress, dan pemodelan 2 merupakan balok kantilever beton bertulang dengan sistem perkuatan CFRP tendon. Kedua pemodelan adalah balok kantilever dengan bentang 6 m yang kemudian diberi beban statik hingga menunjukkan perilaku strukturnya. Dengan pendekatan ini, sistem perkuatan elemen struktur ini diharapkan dapat menghasilkan perilaku plastifikasi yang baik serta urutan keruntuhan elemen struktur yang sesuai dengan yang direncanakan.

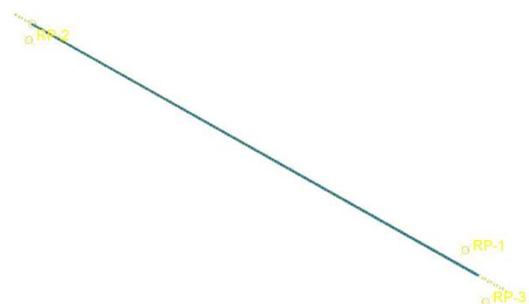
Pada penelitian ini menggunakan software ABAQUS yang akan menghasilkan output berupa perilaku histerisis akibat pembebanan siklik, daktilitas, dan pola keruntuhan. ABAQUS merupakan program komputer berbasis elemen hingga untuk menganalisis berbagai macam permasalahan non-linier termasuk beton bertulang.

5. HASIL DAN PEMBAHASAN

Defleksi kantilever beton prategang

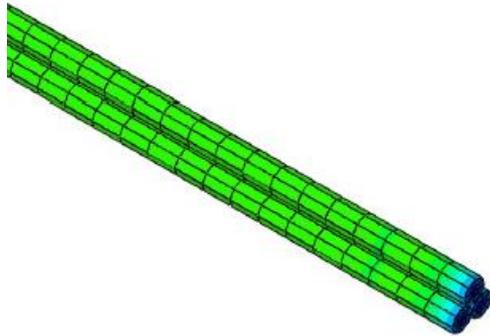
Tahap 1: Stressing tendon

Tahap pertama ini merupakan tahap kabel tendon diberikan stressing pada penampangnya. Satu ujung sisi kabel diberikan kekangan jepit sempurna pada titik A, lalu satu sisi sebaliknya diberikan stressing sebesar 70% terhadap tegangan ultimitnya pada titik B seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Tendon prategang

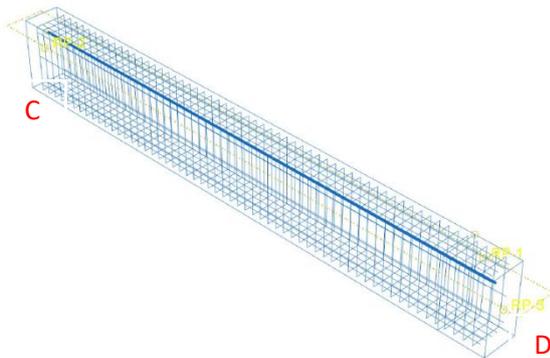
Pada stressing tendon yang terjadi dapat terlihat bahwa tegangan terdistribusi secara merata seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Distribusi tegangan pada tendon.

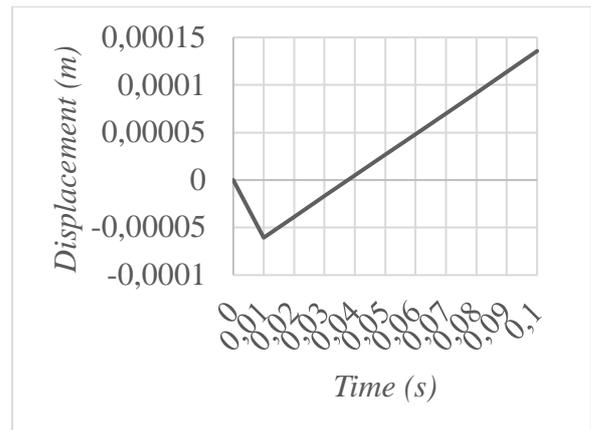
Tahap 2: Penerapan *selfweight* beton.

Tahap ini merupakan tahap lanjutan dengan menerapkan berat beton dan tulangan. Dengan melibatkan tulangan longitudinal dan tulangan transversal, maka sistem prategang yang diterapkan menjadi *partially stress*. Balok kantilever menerapkan tumpuan secara jepit pada titik C dan kondisi sebaliknya sebagai ujung bebas pada titik D seperti terlihat pada Gambar 5.3.



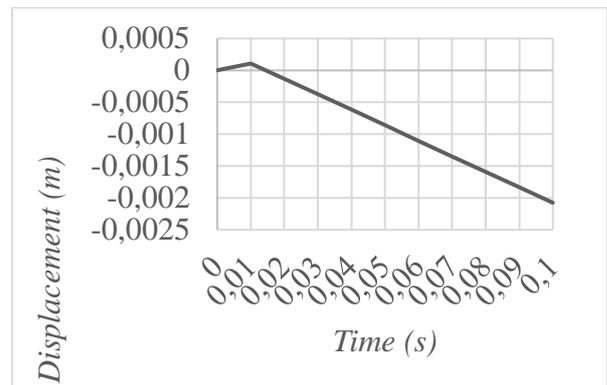
Gambar 4. Balok beton dan konfigurasi tulangan.

Pada tahap ini material beton didefinisikan dengan mass density sebesar 2400kg/m^3 dan material baja dengan mass density 7850 kg/m^3 . Pada Gambar 5 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U1 sebesar 0.000135679 m .



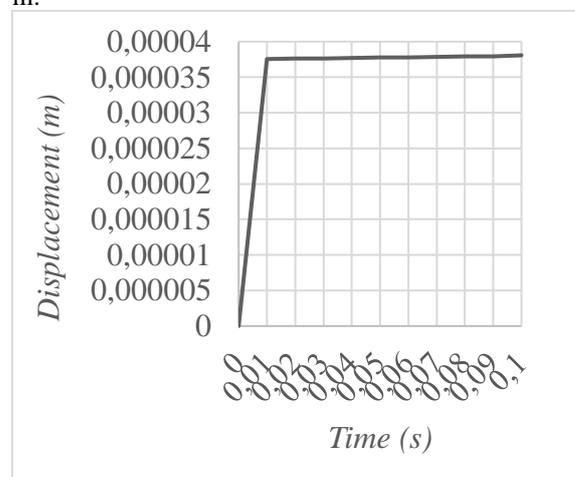
Gambar 5 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U1.

Pada Gambar 6 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U2 sebesar -0.0020762 m .



Gambar 6 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U2.

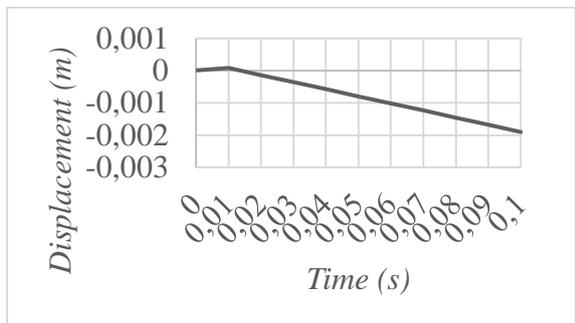
Pada Gambar 7 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U3 sebesar 0.0000380809 m .



Gambar 7 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U3.

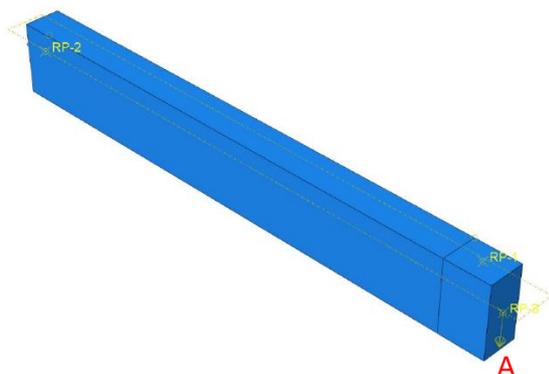
Displacement U2 sebagai arah dominan dengan nilai terbesar, menunjukkan bahwa *displacement* dominan adalah arah vertikal, berbanding lurus dengan gravitasi.

Dengan menerapkan gabungan seluruh *displacement* dari arah 1, 2 dan 3 pada beton dan tulangan baja, maka didapat *displacement* maksimum berdasarkan resultan *displacement* pada bentang 6 m sebesar -0.00190244 m seperti pada Gambar 8.



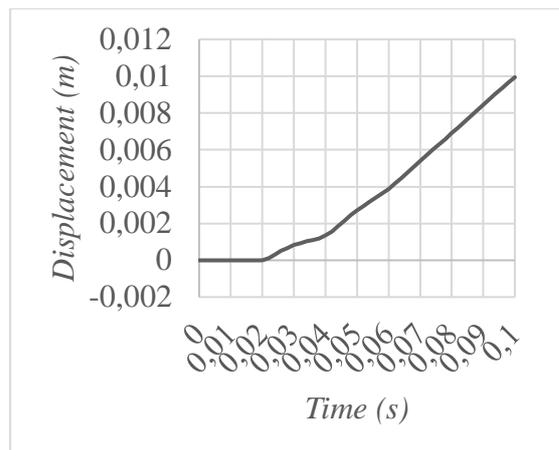
Gambar 8. *Displacement* Resultan Tahap 2 terhadap waktu.

Selanjutnya pada Tahap 3, balok telah sepenuhnya siap untuk diberikan beban eksternal. Beban eksternal tersebut diberikan pada ujung bebas seperti pada Gambar 9. Skema gaya yang bekerja pada tahap ini merupakan gaya eksternal dan berat sendiri yang ditahan oleh tulangan longitudinal dan sengkang serta kabel prategang yang secara parsial mengambil bagian dalam menahan beban dan berat struktur.



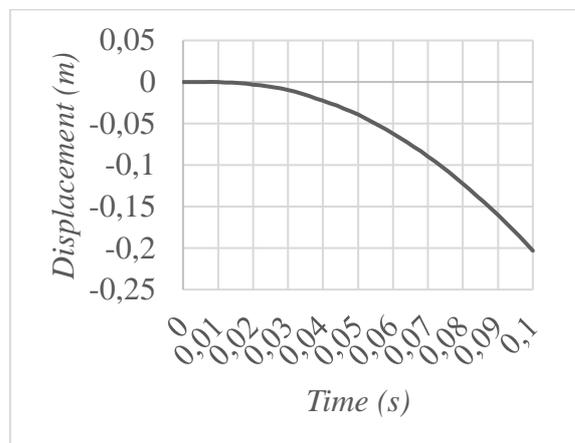
Gambar 9 Point Load pada titik A.

Pada Gambar 10 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U1 sebesar 0.00994647 m.



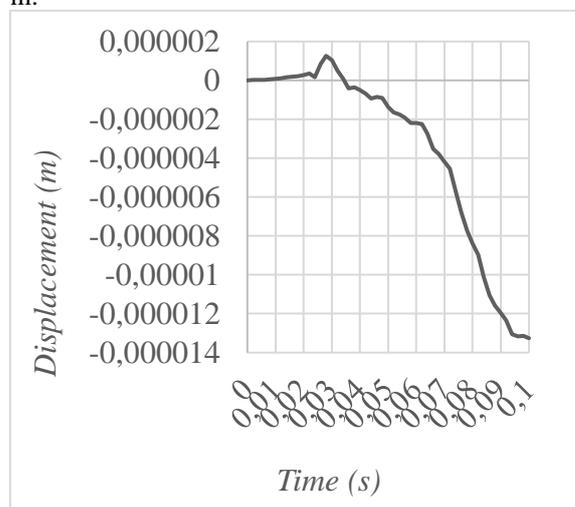
Gambar 10 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U1.

Pada Gambar 11 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U2 sebesar -0.20317 m.



Gambar 11 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U2.

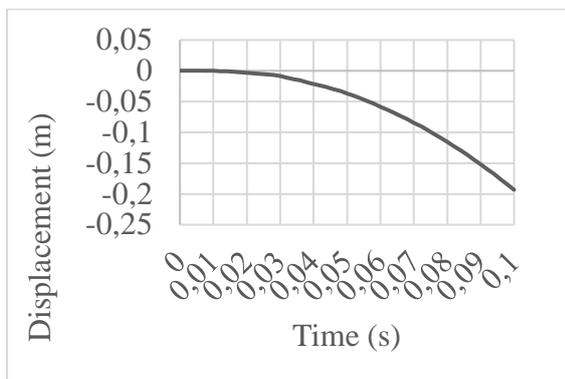
Pada Gambar 12 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U3 sebesar -0.0000132575 m.



Gambar 12 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U3.

Displacement U2 sebagai arah dominan dengan nilai terbesar, menunjukkan bahwa *displacement* dominan adalah arah vertikal, berbanding lurus dengan gravitasi.

Dengan menerapkan gabungan seluruh displacement dari arah 1, 2 dan 3 pada beton dan tulangan baja, maka didapat *displacement* maksimum berdasarkan resultan *displacement* pada bentang 6 m sebesar -0.193236788 m seperti pada Gambar 13.

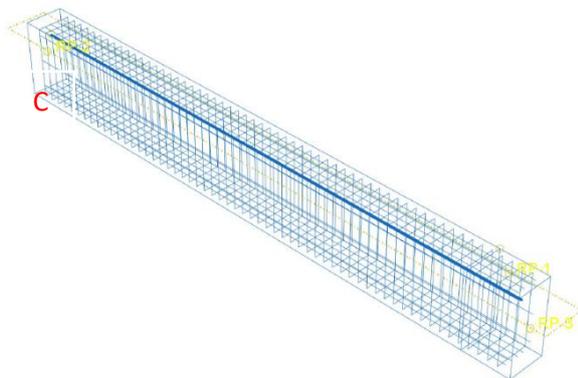


Gambar 13 *Displacement Resultan* Tahap 3 terhadap waktu.

Defleksi kantilever tendon CFRP

Tahap 2: Penerapan *selfweight* beton.

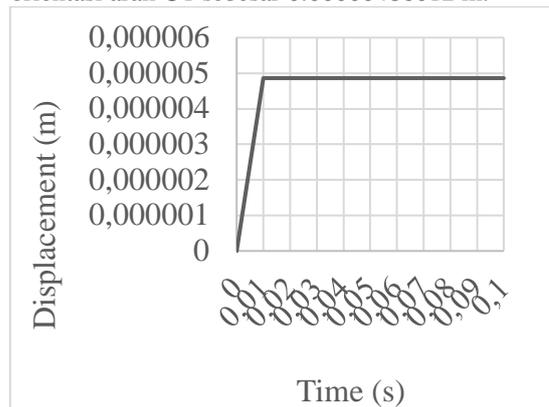
Tahap ini merupakan tahap lanjutan dengan menerapkan berat beton dan tulangan. Dengan melibatkan tulangan longitudinal dan tulangan transversal, maka sistem prategang yang diterapkan menjadi *partially stress*. Balok kantilever menerapkan tumpuan secara jepit pada titik C dan kondisi sebaliknya sebagai ujung bebas pada titik D seperti terlihat pada Gambar 14.



Gambar 14 Balok beton dan konfigurasi tulangan.

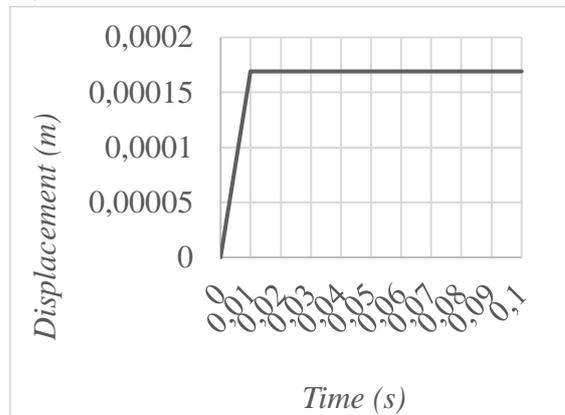
Pada tahap ini material beton didefinisikan dengan mass density sebesar 2400kg/m^3 dan material baja dengan mass density 7850 kg/m^3 . Pada Gambar 15

menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U1 sebesar 0.00000486012 m.



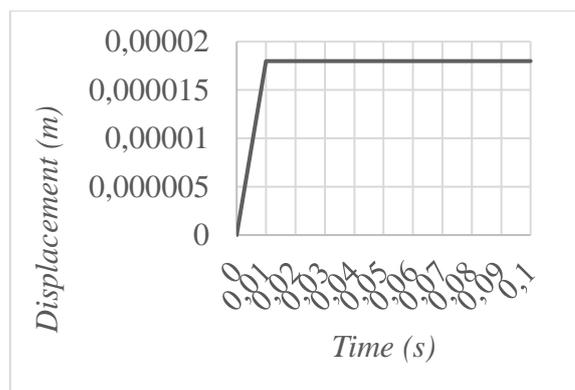
Gambar 15 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U1.

Pada Gambar 16 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U2 sebesar 0.000169056 m.



Gambar 16 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U2.

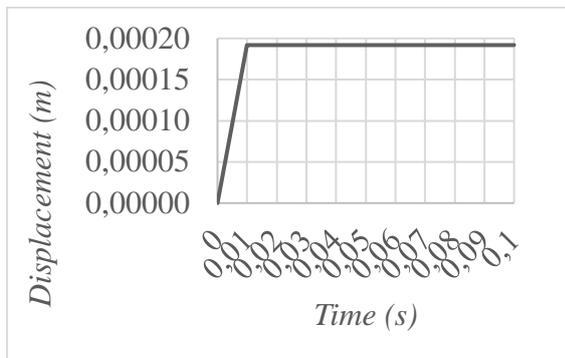
Pada Gambar 17 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U3 sebesar 0.0000179868 m.



Gambar 17 *Displacement* Tahap 2 terhadap waktu untuk orientasi arah U3.

Displacement U2 sebagai arah dominan dengan nilai terbesar, menunjukkan bahwa *displacement* dominan adalah arah vertikal, berbanding lurus dengan gravitasi.

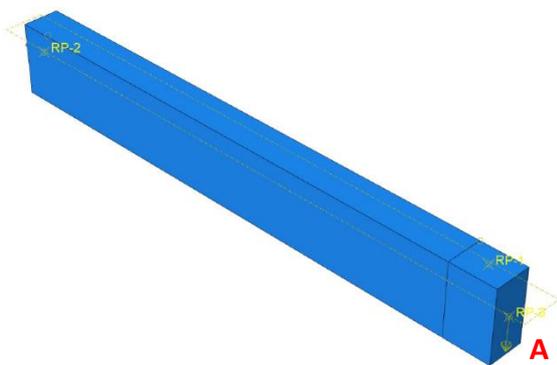
Dengan menerapkan gabungan seluruh displacement dari arah 1, 2 dan 3 pada beton dan tulangan baja, maka didapat *displacement* maksimum berdasarkan resultan *displacement* pada bentang 6 m sebesar 0.00019 m.



Gambar 18 *Displacement* Resultan Tahap 2 terhadap waktu.

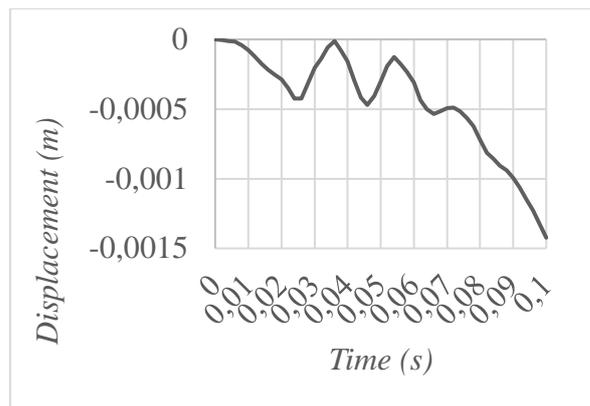
Tahap 3: Penerapan Beban Titik

Selanjutnya pada Tahap 3, balok telah sepenuhnya siap untuk diberikan beban eksternal. Beban eksternal tersebut diberikan pada ujung bebas seperti pada Gambar 5.20. Skema gaya yang bekerja pada tahap ini merupakan gaya eksternal dan berat sendiri yang ditahan oleh tulangan longitudinal dan sengkang serta kabel prategang yang secara parsial mengambil bagian dalam menahan beban dan berat struktur.



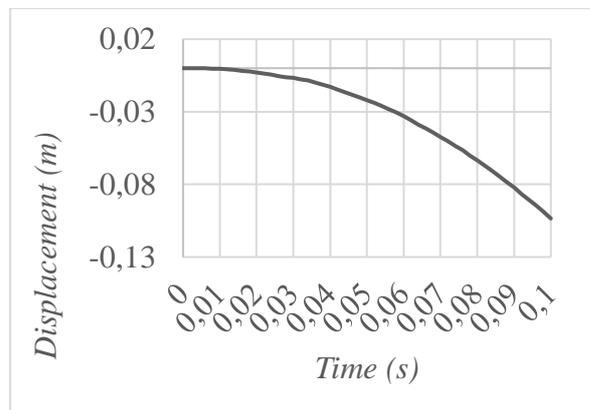
Gambar 19 Point Load pada titik A.

Pada Gambar 20 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U1 sebesar -0.00142303 m.



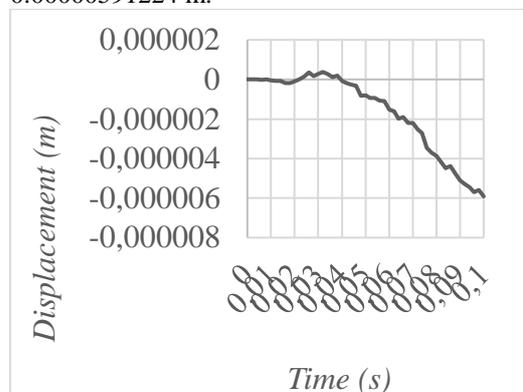
Gambar 20 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U1.

Pada Gambar 21 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U2 sebesar -0.103454 m.



Gambar 21 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U2.

Pada Gambar 22 menunjukkan *displacement* yang terjadi untuk orientasi arah U3 sebesar -0.00000591224 m.

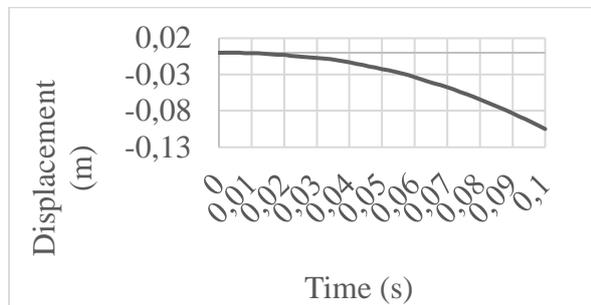


Gambar 22 *Displacement* Tahap 3 terhadap waktu untuk orientasi arah U3.

Displacement U2 sebagai arah dominan dengan nilai terbesar, menunjukkan bahwa *displacement* dominan

aadalah arah vertikal, berbanding lurus dengan gravitasi.

Dengan menerapkan gabungan seluruh displacement dari arah 1, 2 dan 3 pada beton dan tulangan baja, maka didapat *displacement* maksimum berdasarkan resultan *displacement* pada bentang 6 m sebesar -0.104882942 m seperti pada Gambar 23.



Gambar 23 *Displacement* Resultan Tahap 3 terhadap waktu

6. KESIMPULAN

Defleksi pada balok dengan tendon prategang berturut-turut pada Tahap 2 adalah 0.000135679 m; -0.0020762 m dan 0.0000380809 m untuk U1, U2 dan U3; serta resultan defleksinya sebesar -0.00190244 m. Defleksi pada balok dengan tendon prategang berturut-turut pada Tahap 3 adalah 0.00994647 m; -0.20317 m dan -0.0000132575 m untuk U1, u2 dan U3; serta resultan defleksinya sebesar -0.193236788 m.

Defleksi pada balok dengan tendon CFRP berturut-turut pada Tahap 2 adalah 0.00000486012 m; 0.000169056 m dan 0.0000179868 m untuk U1, U2 dan U3; serta resultan defleksinya sebesar 0.00019 m. Defleksi pada balok dengan tendon CFRP berturut-turut pada Tahap 3 adalah -0.00142303 m; -0.103454 m dan -0.00000591224 m untuk U1, u2 dan U3; serta resultan defleksinya sebesar -0.104882942 m.

DAFTAR PUSTAKA

Burke, C.R., Dolan, C.W., (2001), *Flexural Design of Prestressed Concrete Beams Using FRP Tendons*, *PCI Journal*.

Dassault Systemes, (2011), *Abaqus Analysis User's Manual*. RI, USA: Dassault Systemes Dassault System Corp.

Dolan, C.W., and Hamilton, H,R (Trey)., (2019), *Prestressed Concrete (Building, Design and Construction)*, Springer Nature Switzerland, Switzerland.

El-Hacha, R., (2005), *Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (ACI 440.4R-04)*, ASCE Structures Congress (2005), New York, USA.

Gilbert, R.I., Mickleborough, N. C., and Ranzi, G., (2018), *Design of Prestressed Concrete to Eurocode 2, Second edition*, CRC Press, New York, USA.

Imran, I., Simatupang, R., (2010), Pengaruh Jenis Baja Tulangan Terhadap Perilaku Plastifikasi Elemen Struktur SRPMK, *Jurnal Teknik Sipil Volume 6 Nomor 1, April 2010* : 1-77.

S Magdalena, G. M., (2011), Perencanaan Gedung Beton Bertulang Dengan Menggunakan Balok-Balok Kantilever (Studi Kasus Gedung Berbentuk Oval), Tugas Akhir Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Mercu Buana.

Schmidt, J.W., Bennitz, A., Täljsten, B., Goltermann, P., Pedersen, H., (2012), *Mechanical Anchorage of FRP Tendons - A Literature Review*, *Construction and Building Materials* 32 (2012) 110–121.