



- b. Balok dengan angkur *dynabolt* dan perkuatan GFRP tidak mampu melampaui kapasitas balok monolit maupun dengan balok tanpa angkur *dynabolt*. Penambahan angkur *dynabolt* pada sambungan beton lama dengan mortar *grouting* diperkirakan menurunkan kekakuan balok dan retak dini didalam inti beton akibat adanya lubang untuk pemasangan angkur *dynabolt*.
- c. Adanya jumlah lubang untuk angkur *dynabolt* yang semakin banyak dan rapat diperkirakan akan menurunkan kekakuan balok dan mempercepat proses retak, sehingga perlu penelitian lanjutan mengenai jumlah dan jarak lubang yang paling optimal dan dapat meningkatkan kapasitas lentur balok dibanding balok tanpa angkur *dynabolt*.

## 5.6 Daftar Pustaka

- Abdulrahman, A.S., Kadir, M.R.A., 2022. Behavior and flexural strength of fire damaged high strength reinforced rectangular concrete beams after strengthening with CFRP laminates. *Ain Shams Engineering Journal* 13. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101767>
- Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M., 2012. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Constr Build Mater* 37, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052>
- Djamaluddin, R., Hino, S., 2011. Kapasitas Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Telah Meleleh dengan Menggunakan Lembaran GFRP. *Dinamika Teknik Sipil* 11, 293–300.
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2017. Relationship Model of the Moment Capacity of GFRP Sheet Strengthened RC Beams to the Duration of Sea Water Exposure, in: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.280>
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R., Tata, A., 2016. Flexural capacity of reinforced concrete beams strengthened using GFRP sheet after fatigue loading for sustainable construction, in: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, pp. 66–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.692.66>
- Gergess, A.N., Shaikh Al Shabab, M., Massouh, R., 2020. Repair of Severely Damaged Reinforced Concrete Beams with High-Strength Cementitious Grout. *Transp Res Rec* 2674, 372–384. <https://doi.org/10.1177/0361198120919116>



- Hijriah, Parung, H., Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2019. Study On Behavior Of Frp Sheet Debonding As Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete Beam. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 10, 252–260.
- Idris, M., Parung, H., Djamaluddin, R., 2019. Flexural Behavior of Shear-Cracked Reinforced Concrete Beam Strengthened with GFRP Sheet. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 10, 64–72.
- Jumaat, Z., Kabir, H., Obaydullah, M., 2010. Structural performance of reinforced concrete beams repairing from spalling. *European Journal of Scientific Research* 45, 089–102.
- Kabashi, N., Avdyli, B., Krasniqi, E., Këpuska, A., 2020. Comparative Approach to Flexural Behavior of Reinforced Beams with GFRP, CFRP, and Steel Bars. *Civil Engineering Journal* 6, 50–59. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2020-03091452>
- Kim, H.Y., You, Y.J., Ryu, G.S., 2021. Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Carbon Textile Grid and Cementitious Grout. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 5046 14, 5046. <https://doi.org/10.3390/MA14175046>
- Liu, T.Q., Feng, P., Lu, X., Yang, J.Q., Wu, Y., 2020. Flexural behavior of novel hybrid multicell GFRP-concrete beam. *Compos Struct* 250, 112606. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.112606>
- Machmud, H., Tjaronge, M.W., Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2019. The Capacity of Reinforced Concrete Beams Post Rebars Yielded with FRP Sheet Strengthening. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10, 232–241.
- Naser, M.Z., Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., 2019. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Eng Struct* 198, 109542. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109542>
- Ozyildirim, H.C., Moruza, G.M., 2016. High-Performance Grouting Materials in Shear Keys Between Box Beams. <https://doi.org/10.3141/2577-05> 2577, 35–42. <https://doi.org/10.3141/2577-05>
- Saribiyik, A., Caglar, N., 2016. Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP. *Structural Engineering and Mechanics* 58, 825–845. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.58.5.825>
- Sultan, M.A., Djamaluddin, R., Tjaronge, W., Parung, H., 2015. Flexural capacity of concrete beams strengthened using GFRP sheet after seawater immersion,



in: Procedia Engineering. Elsevier Ltd, pp. 644–649.  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.092>

Wu, Z., Yuan, H., Asakura, T., Yoshizawa, H., Kobayashi, A., Kojima, Y., Ahmed, E., 2005. Peeling Behavior and Spalling Resistance of Bonded Bidirectional Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Journal of Composites for Construction* 9, 214–226. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:3\(214\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:3(214))

Zhang, X., Zhang, Y., Liu, Bin, Liu, Bowen, Wu, W., Yang, C., 2021. Corrosion-induced spalling of concrete cover and its effects on shear strength of RC beams. *Eng Fail Anal* 127, 105538. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105538>.



## BAB VI

### PEMBAHASAN UMUM

#### 6.1 Perilaku Lentur Balok Beton Bertulang

##### a. Kapasitas Lentur Balok Beton Bertulang

Berdasarkan hasil pengujian struktur balok beton yang diberikan perkuatan dengan GFRP akan mengalami peningkatan beban maksimum mencapai hampir dua kali terhadap balok tanpa perkuatan. Balok BGS dan BGS merupakan asumsi pemodelan dari kondisi balok yang dilakukan perbaikan dengan mortar *grouting* dan perkuatan GFRP pasca mengalami *spalling*. Kondisi balok dianggap mengalami penurunan kinerja tulangan tarik sebesar 63% dengan perhitungan besi ulir D13 mm balok eksisting tereduksi menjadi tulangan D10 mm. Dari hasil pengujian pada **Tabel 23** perbaikan pada balok menggunakan Sikagrout-215 mampu mengembalikan dimensi benda uji balok beton bertulang dan meningkatkan kemampuan kapasitas balok dalam menahan beban ultimit. Pada saat beban meningkat secara signifikan dan tulangan balok meleleh, balok masih mampu menahan beban selama GFRP masih melekat pada beton.

Berdasarkan **Tabel 23**, dalam hal persentase kenaikan beban maksimum rata-rata, terdapat variasi yang signifikan antara balok kontrol dan balok dengan variasi. Balok dengan variasi (BNS) menunjukkan peningkatan beban maksimum rata-rata tertinggi sebesar 79,19%, sedangkan BGS menunjukkan peningkatan sebesar 61,24%. Peningkatan beban juga terjadi pada BGSDB sebesar 53,53%. Ada pengaruh besar dengan penggunaan GFRP sebagai perkuatan dibandingkan balok biasa, hal ini disebabkan GFRP memiliki kekuatan tarik yang tinggi, yaitu sekitar 2000 MPa. Nilai ini jauh lebih tinggi daripada kekuatan tarik beton, yaitu sekitar 2 MPa. Dengan demikian, GFRP dapat meningkatkan kapasitas lentur balok dengan cara meningkatkan kapasitas tarik balok. Pemasangan GFRP dengan model U-Wrap pada balok dapat meningkatkan momen inersia balok, sehingga meningkatkan kapasitas lentur balok (Ali et al., 2021).



**Tabel 23.** Hasil pengujian beban ultimit

Benda Uji	Kode Spesimen	Beban Maks (kN)	Rata-rata Beban Maks (kN)	Presentasi kenaikan (%)
Balok Kontrol	BK 01	19,68	19,47	-
	BK 02	19,25		
Balok Monolit+GFRP	BNS 01	34,18	34,88	79,19
	BNS 02	35,58		
Balok Komposit+GFRP	BGS 01	28,52	31,39	61,24
	BGS 02	34,25		
Balok Komposit + <i>Dynabolt</i> +GFRP	BGSDB 01	29,72	29,89	53,53
	BGSDB 02	30,05		

Meskipun penggunaan GFRP sebagai bahan perkuatan mampu meningkatkan kapasitas beban balok beton, namun tidak berdampak signifikan terhadap peningkatan kekakuan balok. Hal ini disebabkan oleh perbedaan sifat material GFRP dan beton. GFRP memiliki kekuatan tarik yang tinggi tetapi modulus elastisitas yang relatif rendah dibandingkan dengan beton (Franklin, 2021). Dalam konteks balok beton, kekakuan berhubungan dengan sejauh mana balok mampu menahan deformasi ketika dikenakan beban. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas beban tidak selalu berarti peningkatan kekakuan. Sebaliknya, balok dapat mengalami deformasi lebih besar sebelum mencapai titik keruntuhan (Jung et al., 2019).

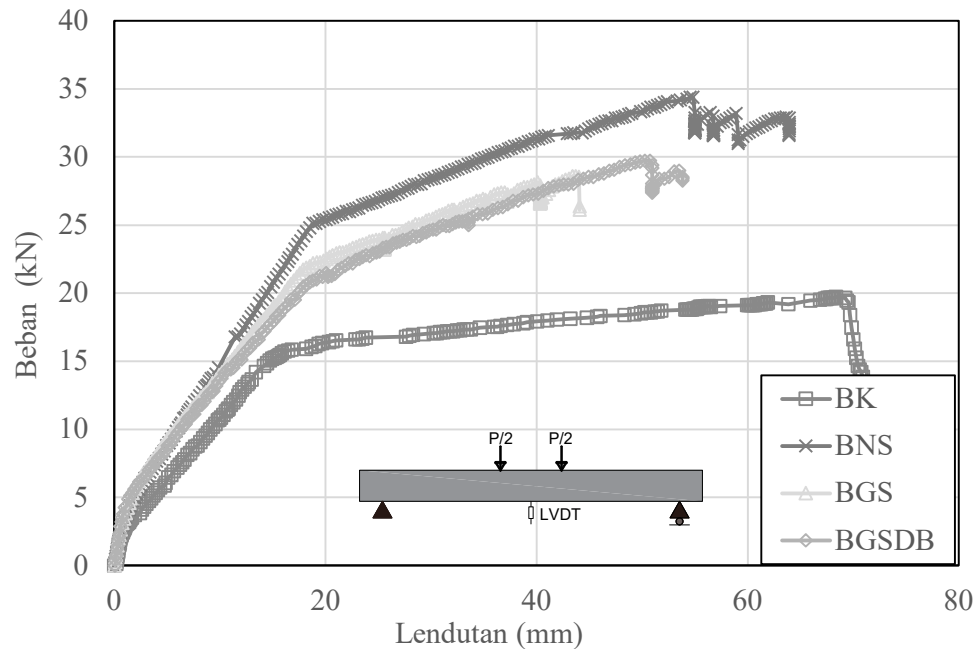
Meskipun demikian, peningkatan kapasitas beban tetap menjadi aspek penting dalam desain dan konstruksi struktur beton. Penggunaan GFRP sebagai bahan perkuatan dapat memberikan manfaat signifikan dalam hal ini, terutama dalam kondisi yang membutuhkan peningkatan kekuatan tarik, dan perbaikan mendesak pada infrastruktur aktif misalnya jembatan.

### **b. Hubungan Kapasitas beban dan lendutan**

Untuk mengukur besarnya lendutan (defleksi) yang terjadi pada benda uji balok maka digunakan alat LVDT sebanyak 3 buah yang dihubungkan ke komputer (data logger), dengan posisi LVDT ditempatkan pada momen maksimum balok uji. Berdasarkan data pada **Gambar 57** diperoleh lendutan maksimum balok kontrol



(BK) sebesar 69,70 mm, sehingga dapat disimpulkan bahwa balok BK memiliki lendutan maksimum tertinggi dibanding semua variasi benda uji.



**Gambar 57.** Hubungan lendutan dan beban untuk semua variasi

Balok BGS memiliki lendutan maksimum terendah, yaitu sebesar 44,07 mm. Lendutan maksimum ini lebih rendah sebesar 37,8% daripada lendutan maksimum balok kontrol yang menunjukkan bahwa balok BGS mengalami penurunan kapasitas lentur. Balok BNS dan BGSDB memiliki lendutan maksimum yang lebih rendah daripada balok kontrol, sebesar 55,55 mm dan 52,11 mm, masing-masing. Lendutan maksimum ini lebih rendah sebesar 27,31% dan 35,27% daripada lendutan maksimum balok kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa balok BNS dan BGSDB juga mengalami penurunan kapasitas lentur.

**Gambar 57** juga memperlihatkan bahwa pada balok BNS yang merupakan balok monolit atau tanpa mortar *grouting* menunjukkan tingkat kekakuan yang paling tinggi diantara semua variasi balok lainnya. Dari grafik terlihat bahwa pengaruh perkuatan lembaran GFRP sangat signifikan meningkatkan kapasitas dan kekakuan balok hampir dua kali lipat dibanding balok tanpa perkuatan GFRP. Hal ini berbeda pada balok komposit dengan perbaikan mortar *grouting* yaitu BGS dan



BGSDB, terlihat kekakuan balok lebih rendah dibanding balok BNS. Interaksi antara mortar *grouting* dan beton lama mempengaruhi kapasitas beban balok. Adanya celah atau retak antara *grouting* dan beton dapat menyebabkan penurunan kapasitas beban balok BGS dan BGSDB, terlihat perbedaan kapasitas beban antara balok BGS, BGSDB dan BNS yang signifikan.

Balok BGSDB, yang menggunakan tambahan angkur dyanbolt pada sambungan beton lama dan mortar *grouting*, menunjukkan tingkat kekakuan dan kapasitas lentur yang sedikit lebih rendah dibanding balok BGS yang tanpa angkur dyanbolt. Pengaruh penambahan lubang untuk angkur menurunkan tingkat kekakuan balok sehingga diindikasikan mengalami retak lentur lebih awal di dalam inti beton. Pengaruh jumlah dan jarak serta kedalaman lubang juga mempengaruhi tingkat kekakuan dan kapasitas lentur balok. Hal ini dapat dilihat dari grafik yang berhimpit antara balok BGS dan BGSDB.

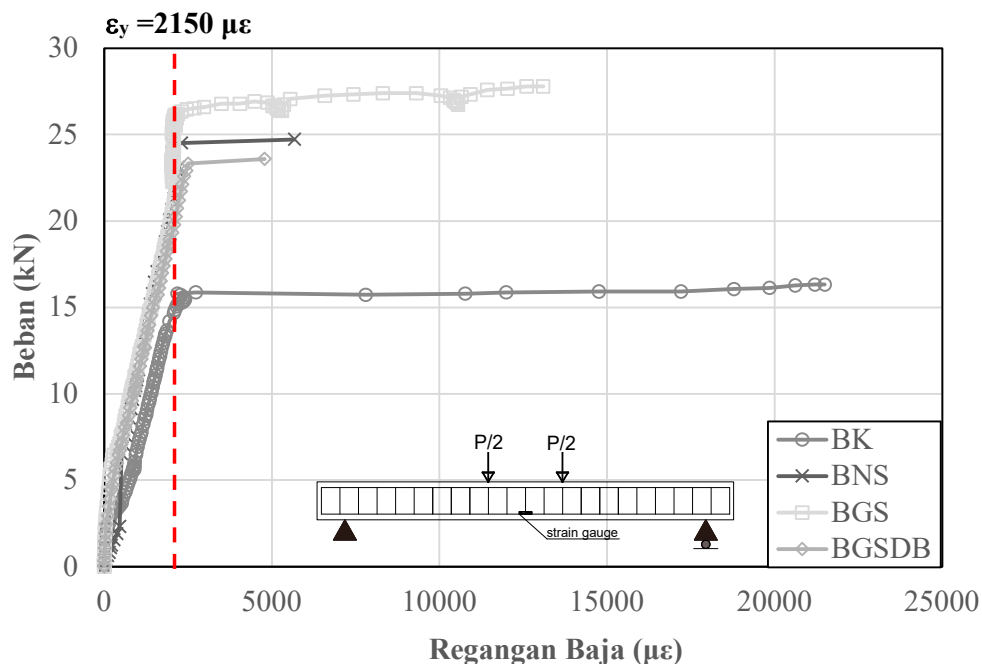
### c. Hubungan beban dan regangan baja

Hubungan beban dan regangan pada baja dapat dijelaskan dengan menggunakan teori elastisitas dari hukum Hooke. Teori ini menyatakan bahwa dalam rentang elastis, regangan yang dialami oleh baja secara proporsional akan meningkat terhadap beban yang diterapkan padanya. Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada **Gambar 58**, didapatkan nilai maksimum regangan baja untuk balok BK 21197 $\mu\epsilon$ , BGS 13095 $\mu\epsilon$ , BNS 5671 $\mu\epsilon$ , dan BGSDB 4787 $\mu\epsilon$ . Balok BGSDB memperlihatkan penurunan regangan baja tertinggi sebesar 77,42% diikuti oleh balok BNS dengan penurunan sebesar 73,24%, dan terakhir balok BGS dengan penurunan sebesar 38,22%. Penurunan regangan ini dapat menjelaskan adanya peningkatan kekuatan lentur, geser, dan deformasi beton yang terjadi melalui perbaikan *grouting* dan perkuatan GFRP.

Balok kontrol (BK) memiliki kapasitas beban dan deformasi yang lebih rendah daripada balok dengan perbaikan mortar *grouting* dan perkuatan lembaran GFRP. Hal ini membuktikan bahwa perkuatan GFRP sangat efektif dalam meningkatkan kapasitas balok dan mampu mengembalikan kinerja balok sama dengan kondisi awal perencanaan. Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan dengan GFRP dapat meningkatkan kinerja balok yang mengalami kondisi pasca *spalling*



(Cheng et al., 2020). Balok yang diperkuat GFRP dengan tambahan angkur *dynabolt* (BGSDB) memiliki kinerja sedikit lebih rendah dibandingkan balok perkuatan GFRP tanpa dyanbolt (BGS).



**Gambar 58.** Hubungan beban-regangan baja seluruh variasi benda uji

#### d. Hubungan beban dan regangan beton

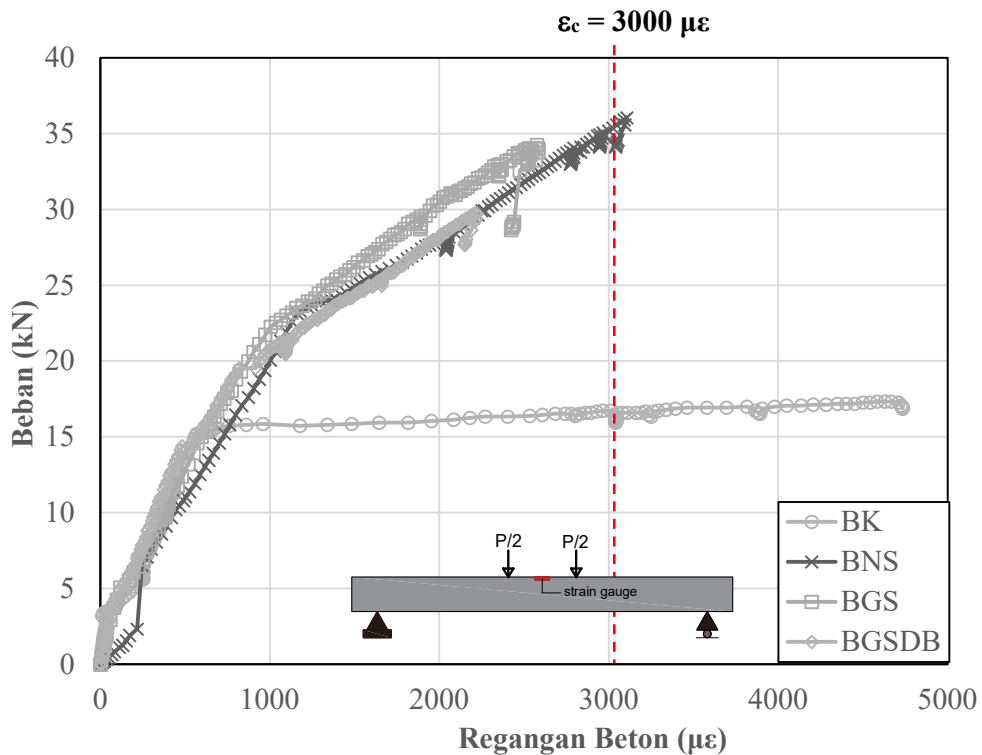
Menurut teori elastisitas linier, regangan pada beton meningkat secara linier seiring dengan bertambahnya beban dalam rentang elastis linier, dimana hubungan antara beban dan regangan berbanding lurus. Hal ini ditentukan oleh modulus elastisitas beton ( $E$ ). Akan tetapi pada regangan yang lebih tinggi, beton mengalami deformasi plastis atau retak, dan hubungan antara beban dan regangan tidak lagi proporsional (Kabashi et al., 2020).

Berdasarkan data yang disajikan dalam **Gambar 59**, nilai maksimum regangan beton untuk berbagai jenis balok adalah  $4732\mu\epsilon$  untuk BK,  $3055\mu\epsilon$  untuk BNS,  $2570\mu\epsilon$  untuk BGS, dan  $2134\mu\epsilon$  untuk BGSDB. Balok BGSDB menunjukkan penurunan regangan beton tertinggi sebesar 89,93% dibandingkan dengan balok kontrol. Hal ini disebabkan oleh perkuatan dengan lembaran GFRP dan tambahan angkur *dynabolt* pada sambungan beton lama dengan mortar *grouting* yang secara





signifikan menurunkan kekuatan tarik dan deformasi beton akibat adanya lubang untuk pemasangan *dynabolt* pada inti beton. Sedangkan, balok BNS yang hanya menerima perkuatan GFRP tanpa *grouting* atau monolit menunjukkan penurunan regangan beton terendah sebesar 85,58%. Hasil ini memperlihatkan bahwa perilaku balok yang diperkuat GFRP sangat signifikan meningkatkan kuat tarik dan deformasi beton sehingga kembali ke kondisi awal.



**Gambar 59.** Hubungan beban-regangan beton semua variasi balok

Selain itu, hal ini menunjukkan bagaimana perkuatan GFRP dapat mengurangi regangan beton, meningkatkan kekuatan tarik, dan mencegah keruntuhan dini. Dan juga sejalan dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini menunjukkan hubungan berbanding lurus antara regangan dan beban (Djamaluddin et al., 2016; Zhang et al., 2019). Dengan kata lain, nilai regangan yang lebih tinggi dihasilkan dari beban yang lebih besar yang diterapkan pada balok.



Berdasarkan grafik pada **Gambar 59**, juga diketahui bahwa regangan maksimum beton sebesar  $3000\mu\epsilon$  berada di antara nilai-nilai regangan maksimum beton untuk berbagai jenis balok yang diteliti. Balok BK dan BNS memiliki regangan maksimum beton yang lebih tinggi dari  $3000\mu\epsilon$ , sedangkan balok BGS, dan BGSDB memiliki regangan maksimum beton yang lebih rendah dari  $3000\mu\epsilon$ . Hal ini menunjukkan bahwa balok BK dan BNS mampu menahan regangan yang lebih besar sebelum mencapai titik keruntuhan, sedangkan balok BGS, dan BGSDB hanya mencapai titik keruntuhan pada regangan yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, regangan maksimum beton sebesar  $3000\mu\epsilon$  dapat digunakan sebagai titik referensi untuk membandingkan kinerja berbagai jenis balok dalam menahan regangan. Nilai ini dapat digunakan untuk mengevaluasi dan membandingkan efektivitas berbagai metode Perkuatan dalam meningkatkan kapasitas balok untuk menahan regangan (S. S. Zhang et al., 2021).

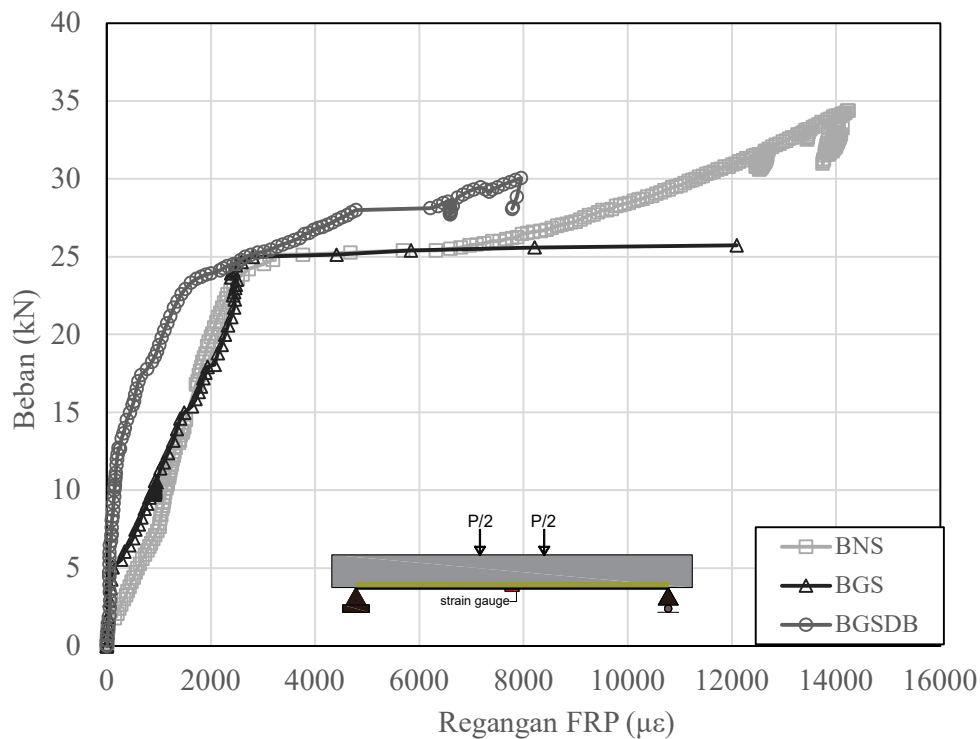
#### e. Hubungan beban dan regangan GFRP

Rasio perubahan panjang GFRP dengan panjang awalnya dikenal sebagai regangan. Ketika beban yang diterapkan pada balok beton bertulang bertambah, regangan GFRP juga meningkat. Laju peningkatan beban yang diterapkan berkorelasi langsung dengan laju peningkatan regangan GFRP. Ketika balok mencapai beban maksimumnya, regangan GFRP mencapai nilai maksimumnya. Hal ini menunjukkan bahwa ketika beban yang ditempatkan pada balok bertambah, maka regangan GFRP juga akan meningkat. Selain itu, nilai regangan GFRP untuk bobot tertentu meningkat seiring dengan kuantitas dan luas GFRP yang digunakan. Artinya ketika beban yang sama diterapkan, balok dengan GFRP lebih banyak akan mempunyai regangan GFRP lebih besar. Pada saat balok beton bertulang mengalami keruntuhan, GFRP mencapai regangan ultimitnya. Regangan ultimit ini menunjukkan batas maksimum regangan yang dapat dicapai oleh GFRP sebelum terjadi kegagalan struktural.

Grafik pada **Gambar 60**, menunjukkan nilai maksimum regangan GFRP untuk balok BNS  $14980\mu\epsilon$ , BGS  $12000\mu\epsilon$  dan BGSDB  $7953\mu\epsilon$ . Berdasarkan data dalam Gambar 62 dan Tabel 10, terdapat hubungan yang konsisten antara regangan maksimum GFRP dan beban maksimum yang diterima balok uji. Secara spesifik,



nilai regangan GFRP cenderung meningkat seiring dengan peningkatan beban maksimum pada masing-masing balok uji. Ini menunjukkan bahwa GFRP berfungsi efektif dalam menahan tegangan tarik yang dihasilkan oleh momen lentur, dengan regangan maksimumnya mencapai 22.000  $\mu\epsilon$ .



**Gambar 60.** Hubungan beban-regangan GFRP semua variasi balok

Dari hasil pengujian balok BNS yang merupakan balok monolit, dan diperkuat dengan lembaran GFRP, menunjukkan nilai rata-rata regangan GFRP tertinggi sebesar 14980 $\mu\epsilon$ . Ini menunjukkan bahwa balok BNS memiliki kapasitas deformasi paling besar sebelum terjadi keruntuhan. Hal ini mencerminkan tingkat daktilitas balok BNS meningkat tajam dengan adanya perkuatan lembaran GFRP sehingga ketahanan balok terhadap beban lentur juga meningkat.

Sedangkan balok dengan angkur *dynabolt* BGSDB memiliki nilai regangan GFRP terendah, namun beban maksimum rata-ratanya lebih tinggi diantara semua balok uji. Balok BNS2 mencatatkan nilai regangan GFRP tertinggi yaitu 22000 $\mu\epsilon$  meskipun beban maksimum yang dicapai lebih rendah dari BGS dan BGSDB. Hal



ini menunjukkan bahwa BNS memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan deformasi sebelum mencapai kegagalan. Grafik pada **Gambar 60** menggambarkan efektivitas Perkuatan dengan GFRP dalam meningkatkan kapasitas beban dan mengendalikan deformasi pada struktur balok, dengan kinerja terbaik terlihat pada BNS.

Meskipun penambahan GFRP pada balok beton bertulang diketahui dapat meningkatkan kekuatannya, kekakuan balok tidak banyak meningkat. Alasan di balik hal ini adalah, berbeda dengan material lain seperti baja, GFRP memiliki kekuatan tarik yang tinggi dan kekakuan yang relatif rendah. Kekakuan suatu material menentukan ketahanannya terhadap deformasi elastis; bahan dengan kekakuan yang lebih tinggi akan lebih tahan terhadap perubahan bentuk. Jadi, meskipun GFRP dapat memperkuat balok, hal ini tidak selalu menghasilkan balok yang lebih kuat dan lebih tahan terhadap deformasi.

## 6.2 Kapasitas Perkuatan GFRP

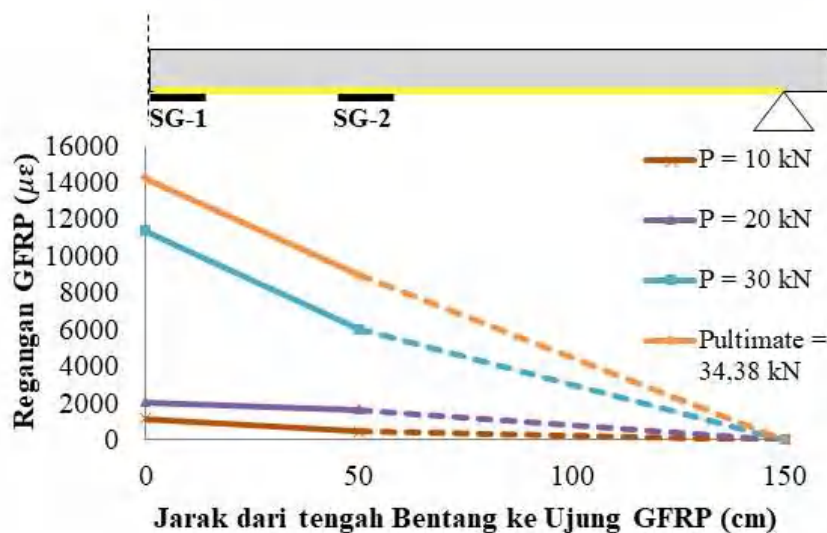
### a. Distribusi Regangan FRP

Memahami perilaku material dan kinerja struktural sangat penting dalam hal perkuatan struktur beton, dan hal ini terutama berlaku dalam hal distribusi regangan polimer yang diperkuat serat kaca (GFRP). Untuk pemahaman menyeluruh tentang distribusi regangan GFRP dalam aplikasi tulangan beton, lihat standar ACI 440-2R-08. Teori distribusi regangan FRP berbasis ACI 440-2R-08 mencakup sejumlah gagasan penting. Pertama, menurut hukum elastisitas Hooke, distribusi regangan FRP mempunyai kecenderungan linier selama fase awal pembebanan. Ini menyiratkan bahwa gaya yang diterapkan pada FRP akan menentukan regangannya. Namun, pelepasan ikatan antara FRP dan beton menyebabkan distribusi regangan FRP menjadi non-linier seiring dengan bertambahnya beban. Ketika FRP mulai terpisah dari permukaan beton, terjadi situasi yang disebut debonding, yang menyebabkan regangan meningkat melebihi beban. Oleh karena itu, mengetahui kapan debonding terjadi sangat penting untuk menciptakan perkuatan GFRP yang efektif.



Kedua, modulus elastisitas GFRP, ketebalan lembaran GFRP, jumlah lapisan GFRP, tegangan rupture rencana, jenis perekat yang digunakan, dan perhitungan desain berdasarkan dimensi struktur, susunan tulangan, dan sifat material beton semuanya berdampak pada distribusi regangan GFRP. Masing-masing variabel ini mungkin berdampak pada seberapa besar GFRP dapat meningkatkan kinerja dan kapasitas struktural. Karena komponen-komponen ini tidak dapat diprediksi, sulit untuk memperkirakan distribusi regangan GFRP dengan akurat dalam praktik lapangan (Orouji et al., 2023). Oleh karena itu, sangat penting untuk terus memantau struktur beton yang diperkuat dengan GFRP. Pengukuran regangan secara real time memungkinkan validasi desain dan modifikasi yang diperlukan.

Berdasarkan **Gambar 61** yang menunjukkan nilai distribusi regangan FRP pada balok dengan perkuatan GFRP pada sisi lentur balok, dapat dianalisis bahwa pada benda uji BNS hampir memiliki perilaku yang serupa. Distribusi regangan masih proporsional pada beban 10 kN sampai 20 kN, ditunjukkan dengan pola regangan yang relatif seragam di sepanjang balok.



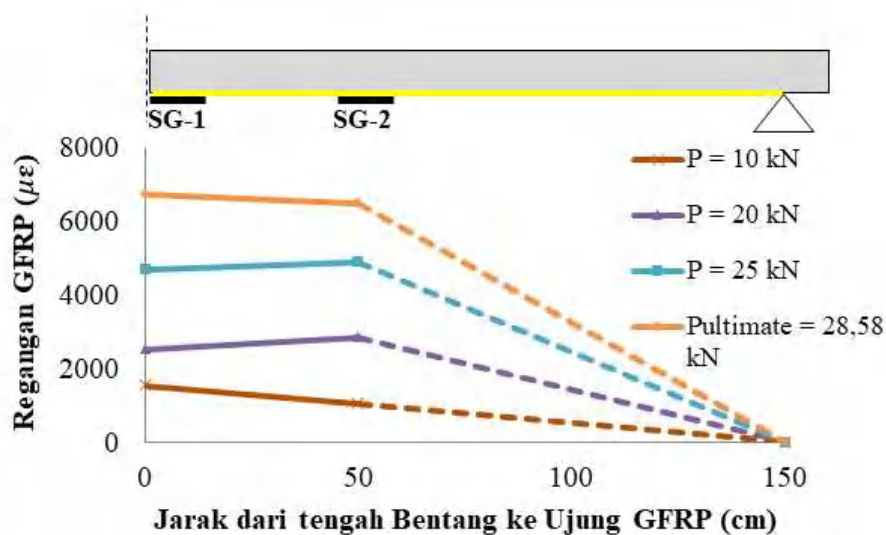
**Gambar 61.** Distribusi regangan GFRP balok BNS

Kemudian mulai terjadi perubahan pola distribusi regangan yang tidak proporsional pada beban 30 kN sampai beban maksimum 34,38 kN. Hal ini ditandai dengan selisih nilai regangan yang sangat besar pada strain gauge di tengah bentang



dibandingkan dengan di dibawah titik beban, yang mengindikasikan mulai terjadinya debonding antara GFRP dan beton di tengah bentang pada beban mencapai lebih dari 25 kN. Pada beban ultimit 34,38 kN, regangan GFRP mencapai  $14241\mu\epsilon$  yang menunjukkan GFRP mulai terlepas dari beton, dimulai dari tengah bentang hingga ke arah tumpuan. Secara keseluruhan, grafik regangan GFRP menggambarkan perilaku balok komposit GFRP-beton yang baik hingga beban 25 kN, dan debonding mulai terjadi pada beban lebih tinggi yang mengakibatkan lepasnya GFRP dari beton.

Dalam **Gambar 62** menunjukkan distribusi regangan GFRP pada balok BGS yang diperkuat dengan GFRP pada sisi momen maksimum balok. Nilai regangan pada berbagai tingkat beban menunjukkan pola yang konsisten. Pada beban 10 kN, nilai regangan berkisar antara  $1000-1500\mu\epsilon$ , pada beban 20 kN berkisar antara  $2500 - 2800\mu\epsilon$ , dan pada beban 25 kN mencapai kisaran  $4600 - 4800\mu\epsilon$ . Selama rentang beban ini, distribusi regangan GFRP tetap proporsional, yang menandakan bahwa regangan masih berbanding lurus dengan besarnya beban yang diberikan. Namun, pada saat mencapai beban maksimum 25 kN, terjadi perubahan distribusi regangan yang tidak proporsional. Perbedaan nilai regangan yang signifikan terjadi di tengah bentang, mengindikasikan dimulainya proses debonding GFRP di daerah tersebut saat beban melebihi 25 kN.

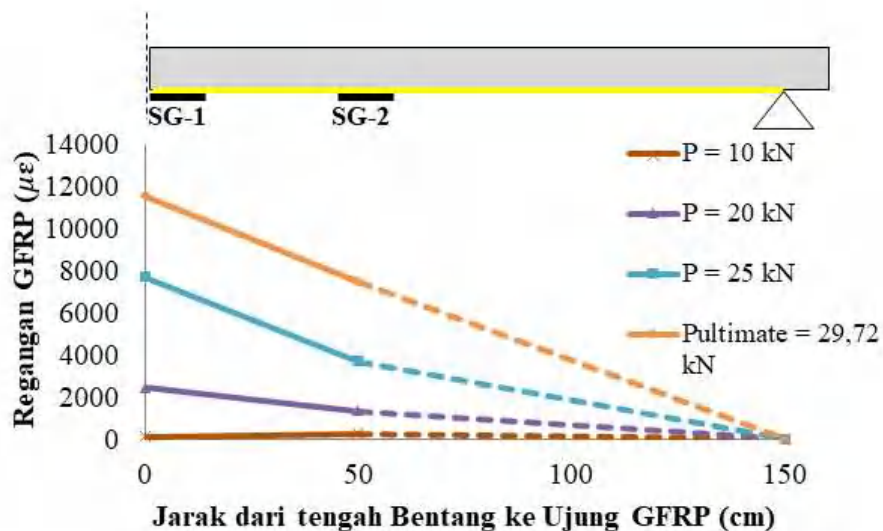


**Gambar 62.** Distribusi regangan GFRP balok BGS



Khusus pada saat regangan GFRP mencapai  $6700 \mu\epsilon$  (regangan mikro) di tengah bentang pada beban ultimit  $28,58 \text{ kN}$ , dan GFRP terlepas dari tengah bentang hingga ujung tumpuan. Bahkan ketika terjadi debonding GFRP, nilai beban akhir masih relatif tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan GFRP pada balok beton BGS secara efektif meningkatkan nilai kekuatan ultimit dan regangannya. Secara keseluruhan, analisis ini memberikan bukti ilmiah yang meyakinkan bahwa penggunaan GFRP meningkatkan kapasitas balok beton bertulang untuk menopang beban sebelum terjadinya retak yang merambat.

Pada **Gambar 63**, terlihat bahwa nilai regangan BGSDDB meningkat seiring dengan peningkatan beban yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa kemampuan struktur dalam menahan retakan meningkat seiring dengan meningkatnya beban yang diberikan padanya. Material GFRP menunjukkan distribusi regangan yang konstan untuk beban antara  $10$  dan  $25 \text{ kN}$ . Dengan kata lain bahwa regangan material masih sebanding dengan beban yang diberikan, dan perkuatan GFRP efektif pada rentang ini.



**Gambar 63.** Distribusi regangan GFRP balok BGSDDB

Distribusi regangan linier berubah pada beban maksimum. Terlihat jelas bahwa ketika beban mencapai kurang lebih  $30 \text{ kN}$ , debonding GFRP mulai terjadi di tengah bentang. Ketika beban cukup tinggi, terjadi proses yang disebut



debonding di mana lembaran GFRP mulai terpisah dari permukaan beton. Nilai BGSDDB tertinggi terjadi pada posisi SG-1 di dekat tumpuan dengan beban 25 kN sebesar  $760 \mu\epsilon$ . Ini menunjukkan bahwa retakan awal terjadi di daerah tengah bentang, dan ini merupakan titik awal dari kegagalan struktur. Pada beban ultimit sebesar 29,72 kN, regangan GFRP mencapai  $11500\mu\epsilon$  (mikrostrain) dan terlepas dari tengah bentang hingga ujung tumpuan. Ini menunjukkan bahwa penambahan GFRP sangat efektif dalam meningkatkan ketahanan retak beton. Hasil ini menunjukkan bagaimana perkuatan GFRP dapat meningkatkan kapasitas struktural beton dan memberikan kekuatan tambahan bahkan setelah terjadinya debonding pada tingkat beban tertentu.

Pola sebaran regangan menunjukkan kegagalan ikatan yang terjadi. Tulangan konvensional tidak lagi mampu mentransfer beban ketika kurva regangan horizontal mencapai tahap awal kegagalan ikatan. Beban kemudian mulai ditransfer ke GFRP, yang menawarkan lebih banyak perkuatan. Dengan meningkatnya tegangan, strain gauge yang jauh dari pusat bentang akan mulai mencatat regangan, yang merupakan tanda bahwa perpindahan beban pada GFRP bergerak di sepanjang permukaan material dan juga beton (Ali dkk., 2021a).

Proses debonding, yaitu saat perkuatan GFRP mulai terlepas dari beton, dapat diidentifikasi dengan melihat pola distribusi regangan GFRP. Selisih nilai regangan GFRP yang signifikan pada daerah tengah bentang adalah tanda bahwa debonding telah dimulai (Hijriah et al., 2019). Balok BGS menunjukkan perubahan paling mencolok dalam pola distribusi regangan, terlihat distribusi regangan GFRP sangat terkonsentrasi di tengah bentang dan semakin berkurang hingga hampir tidak ada lagi saat mendekati ujung balok yang diperkuat GFRP.

## **b. Kapasitas Rekatan Balok Perkuatan GFRP**

Kemampuan pengikatan GFRP pada balok komposit dipengaruhi oleh interaksi antara gaya dalam pada komponen beton dan GFRP. Gaya tekan beton dan gaya tarik GFRP masing-masing berhubungan dengan regangan beton dan regangan GFRP. Regangan diukur berdasarkan hasil percobaan dan kapasitas momen lentur balok  $M_u$  ditentukan oleh gaya dalam yang timbul dari keseimbangan antara gaya tarik GFRP ( $T_f$ ) dan gaya tekan beton ( $C_c$ ). Dengan





membagi momen lengan  $z$  dengan momen ultimat  $M_u$ , hasil pengujian dapat digunakan untuk menentukan nilai kapasitas ikatan GFRP. Faktor dasar yang digunakan untuk menghitung kekuatan rekat balok bertulang GFRP ditunjukkan pada **Tabel 24**.

Berdasarkan **Tabel 25**, kapasitas rekatan balok komposit berturut-turut 150 kN untuk BNS, 121 kN untuk BGS dan 145 kN untuk BGSDB. Sedangkan tegangan rekatannya berturut-turut  $0,335 \text{ N/mm}^2$ ,  $0,269 \text{ N/mm}^2$  dan  $0,324 \text{ N/mm}^2$ . Kapasitas rekatan tertinggi dicapai oleh balok BNS, yaitu sebesar 150 kN. Nilai ini lebih tinggi dari kapasitas rekatan balok BGS sebesar 121 kN dan balok BGSDB mendekati yaitu sebesar 145 kN. Peningkatan kapasitas rekatan pada balok BNS disebabkan oleh aksi monolit dari balok (tanpa mortar *grouting*) sedangkan balok BGS dan BGSDB terjadi aksi komposit beton lama dan *grouting* pada sambungan. Angkur *dynabolt* memberikan ikatan yang baik antara sambungan cold joint sehingga mencegah delaminasi dini sehingga meningkatkan kekakuan dan kapasitas balok BGSDB.

**Tabel 24.** Parameter perhitungan kapasitas rekatan GFRP

No.	Parameter	BNS	BGS	BGSDB	Satuan
1	Momen ultimat ( $M_u$ )	21729,90	19632,90	18732,90	kN.mm
2	Regangan Beton ( $\epsilon_c$ )	0,0291	0,0214	0,0469	mm/mm
3	Regangan GFRP ( $\epsilon_f$ )	0,0231	0,0352	0,0191	mm/mm
4	Tinggi Balok ( $h$ )	200	200	200	mm
5	Luas permukaan GFRP ( $A$ )	450000	450000	450000	mm <sup>2</sup>

Tegangan rekatan tertinggi diperoleh oleh balok BNS, yaitu sebesar  $0,335 \text{ N/mm}^2$ . Nilai ini lebih tinggi dari tegangan rekatan balok BGS sebesar  $0,269 \text{ N/mm}^2$  dan balok BGSDB sebesar  $0,323 \text{ N/mm}^2$ . Tegangan rekatan yang tinggi pada balok BNS menunjukkan bahwa lembaran GFRP pada daerah lentur mampu mencapai daya lekat maksimum pada beton, khususnya pada beton monolit (BNS). Namun, lembaran GFRP juga rentan terhadap debonding, yaitu terlepasnya GFRP dari beton.

Mortar *grouting* pada balok BGS menurunkan tegangan rekatan GFRP menjadi  $0,269 \text{ N/mm}^2$ . Hal ini disebabkan adanya delaminasi antara beton lama dengan mortar *grouting* sebelum mencapai kapasitas maksimum GFRP atau



dengan kata lain terjadi debonding dini pada GFRP. Tegangan rekatan pada balok BGSDB yang diberikan tambahan perkuatan geser berupa angkur *dynabolt*, yaitu sebesar  $0,324 \text{ N/mm}^2$ , mengindikasikan bahwa angkur *dynabolt* cukup efektif mencegah delaminasi pada sambungan dan debonding dini pada GFRP. Kombinasi ini terbukti mampu meningkatkan tegangan rekatan pada lembaran GFRP.

Dalam berbagai jenis dan tingkat penerapan, GFRP digunakan untuk memperoleh kapasitas pengikatan dan tegangan antara beton dan serat karbon. Dalam kasus tertentu, kegagalan diakibatkan oleh beban yang diterapkan pada kontak beton-GFRP, yang menyebabkan lekatan GFRP terlepas dari permukaan beton. Tegangan geser antarmuka yang melebihi kekuatan lekatan akibat beban kerja adalah penyebab kerusakan ini. Lebih lanjut, temuan pengujian menunjukkan bahwa kapasitas ikatan dan tegangan juga dipengaruhi oleh area kontak GFRP. Secara umum, gaya-gaya pada komponen beton dan GFRP yang berinteraksi mempengaruhi kapasitas ikatan GFRP; nilai interaksi ini dapat dihitung dengan menggunakan momen lentur balok. Dengan demikian, tegangan geser antar muka yang melebihi kekuatan ikatan merupakan penyebab rusaknya ikatan (Wu et al., 2022).



**Tabel 25.** Kapasitas GFRP dan tegangan rekatan GFRP untuk semua benda uji

<b>Type Balok</b>	<b>M<sub>U</sub></b> (kN.mm)	<b>ε<sub>c</sub></b> (mm/mm)	<b>ε<sub>f</sub></b> (mm/mm)	<b>h</b> (mm)	<b>c</b> (mm)	<b>z</b> (mm)	<b>T<sub>uf</sub></b> (kN)	<b>A</b> mm <sup>2</sup>	<b>Tegangan rekatan (σ<sub>f</sub>)</b> (N/mm <sup>2</sup> )
BNS	21729.90	0.0291	0.0231	200	111.612	144.194	150.699	450000	0.335
BGS	19632.90	0.0214	0.0352	200	75.649	162.176	121.059	450000	0.269
BGSDB	18782.40	0.0469	0.0191	200	142.178	128.911	145.700	450000	0.324

**Keterangan**

Tinggi blok tegangan ekuivalen (c)       $c = (\epsilon_c \cdot h) / (\epsilon_f + \epsilon_c)$

Besar lengan momen (z)                       $z = (h - 1/2 \cdot c)$

Kapasitas Rekatan Ultimit (T<sub>uf</sub>)               $M_U / z$

Tegangan Rekatan FRP (σ<sub>f</sub>)                       $T_{uf} / A$



## 6.3 Pola Retak dan Mode Kegagalan

### a. Pola Retak

Meskipun retaknya sudah membesar, balok masih mampu menahan beban ketika mencapai beban maksimum. Namun dalam keadaan seperti ini, defleksi balok cukup signifikan. Sekalipun kapasitas balok untuk menopang beban mulai menurun setelah melampaui beban maksimum, defleksi balok masih sangat meningkat. Lendutan yang terus meningkat ini menunjukkan bahwa retakan yang semakin lebar menyebabkan balok menjadi berkurang kekakuannya. Sebelum akhirnya balok runtuh, retak lentur ini akan terus bergerak dari sisi tarik ke sisi tekan. Kerusakan pada penampang balok akibat retakan yang merambat inilah yang menyebabkan keruntuhan. Pola patah lentur yang terdapat pada benda uji balok, yang ditandai dengan defleksi yang cukup besar hingga balok hancur total, hal ini cukup menggambarkan keruntuhan balok yang disebabkan oleh tegangan lentur yang melebihi kapasitas balok.

Pada **Gambar 51** di atas menampilkan pola retak yang terjadi pada balok kontrol (BK) dimana retak awal terjadi pada sisi tarik dan merambat ke atas menuju sumbu netral balok secara vertikal. Retak awal terjadi pada beban 3,32 kN yang menunjukkan bahwa balok mulai mengalami deformasi elastis. Kemudian dilanjutkan proses leleh pada saat beban mencapai 16,03 kN yang menandakan bahwa material telah mencapai batas elastisitasnya. Dari hasil pengujian balok sampai mencapai beban ultimate tercatat lebar retak yang terjadi adalah sebesar 2.5 mm pada beban ultimate 19,47 kN.

Sebanyak 20 pola retakan terbentuk setelah melewati beban maksimum, pola retak yang terbentuk pada kegagalan lentur cenderung mengikuti arah tegangan lentur yang terjadi pada balok. Hal ini berarti retakan akan lebih cenderung berjalan sejajar dengan arah beban yang diterapkan, mengikuti garis lentur pada balok. Retakan ini mungkin akan menjadi lebih terfokus dan lebih panjang seiring dengan peningkatan beban hingga mencapai kegagalan maksimum.

Pada **Gambar 52**, balok BNS atau tanpa perbaikan mortar *grouting*, perkuatan dengan tambahan lembaran GFRP sebagai pengganti tulangan lentur memberikan kuat lentur maksimum yang cukup tinggi dibandingkan balok tanpa



GFRP. Hal ini juga menyebabkan tingkat kekakuan dari balok BNS cukup tinggi dibandingkan balok type lain. Pada gambar 11 dibawah ini memperlihatkan retak yang terjadi adalah retak lentur secara vertikal dari sisi tarik balok ke arah sumbu netral terlihat pada tengah bentang kemudian merambat ke sisi tumpuan kiri dan tumpuan kanan. Pada beban 28,8 kN retak yang diamati sebesar 0.4 mm kemudian ketika beban ditingkatkan retak yang terjadi menjadi sebesar 3.6 mm pada beban 31,1 kN dan diikuti terlepasnya lembaran GFRP dari beton (*debonding*) ke arah tumpuan kiri. Terjadi retak pada balok arah memanjang ke sisi tumpuan kiri pada saat beban mencapai 32,8 kN dan terlepasnya beton sisi tarik balok pada jarak 250 mm dari tumpuan beban. Pada beban maksimum 34,88 kN *debonding* berlanjut sampai posisi tumpuan balok sebelah kiri sampai pengujian dihentikan.

Secara vertikal, retak lentur mulai terjadi di bagian bawah balok pada daerah momen lentur maksimum. Retak ini kemudian merambat ke atas menuju sumbu netral balok sambil bercabang. Total terdapat sekitar 30 alur retak lentur yang saling bercabang satu sama lain. Secara horizontal, retak terjadi di tepat ditengah bentang, dimulai dari ujung satu ke arah tumpuan sebelah kiri diikuti dengan terlepasnya lembaran GFRP dari beton (*debonding*). Retak horizontal pada bidang antar muka kedua lapisan beton menunjukkan terjadinya delaminasi dini antar beton akibat ikatan yang tidak sempurna (*adhesi* yang buruk). Setelah melewati beban maksimum, balok mengalami keruntuhan daktail ditandai lendutan berlebih dan hancurnya penampang balok.

Pola retak pada balok BGS yang diperlihatkan **Gambar 53** menunjukkan pada awal beban terjadi retak vertikal pada sisi tarik dibawah beban ke arah sumbu netral. Pada saat mencapai beban 22,3 kN terjadi *debonding* pada lembaran GFRP yang menyebabkan lembaran GFRP terbelah dua dan lepas sepenuhnya pada bagian kiri balok serta terjadinya retak horizontal pada sambungan beton lama dengan mortar *grouting* yang terjadi tepat di bawah tumpuan beban. Lebar retak yang diamati sebesar 0,4 mm pada saat beban mencapai 24 kN sampai dengan 27,3 kN lebar retak sebesar 0,8 mm. Keruntuhan beton terjadi saat mortar *grouting* terlepas (*delaminasi*) dari beton eksisting pada bagian bawah tumpuan pada beban maksimum 31,39 kN.



Beberapa retak kecil yang terbentuk selama perambatan retak dapat bergabung menjadi satu retak utama yang lebih dominan. Selain secara vertikal, terlihat pula retak horizontal pada bidang antarmuka beton lama dan beton hasil *grouting*. Hal ini mengindikasikan lemahnya daya lekat di antara kedua beton tersebut. Setelah itu, benda uji mengalami leleh pada beban 24 kN hingga akhirnya mencapai beban maksimum 31,39 kN. Pada beban maksimum ini, disertai suara keras, GFRP terlepas seluruhnya dari permukaan balok. Pelepasan ini terjadi karena GFRP berusaha menahan beban menggantikan fungsi tulangan baja yang telah leleh. Retak vertikal sudah merambat melewati sumbu netral balok dan retak horizontal juga sudah cukup lebar. Pada kondisi ini, balok BGS mengalami kegagalan struktur ditandai hancur dan terlepasnya seluruh GFRP dari permukaan balok.

Berdasarkan pengamatan pola retak pada balok BGSDB seperti di tampilkan pada **Gambar 54** memperlihatkan kegagalan lentur ditandai dengan retak arah vertikal dan horizontal pada sambungan beton lama dengan mortar *grouting* dan terlepasnya lembaran GFRP dari beton (*debonding*) di tengah balok ke arah kiri sampai tumpuan pada saat beban mencapai 28,1 kN. Kemudian dilakukan pengukuran lebar retak pada daerah yang mengalami retak maksimum dan diperoleh lebar retak sebesar 0.8 mm pada beban maksimum 29,89 kN. Penambahan angkur *dynabolt* pada balok BGSDB memberikan pengaruh yang cukup signifikan dan mencegah terlepasnya mortar *grouting* dari beton eksisting (delaminasi). Total terdapat 25 pola retak lentur pada beton dan GFRP, yang mengindikasikan retak telah menjalar hampir ke seluruh penampang melintang balok.

## **b. Mode Kegagalan Balok**

Rangkaian proses pengujian memperlihatkan ke delapan balok yang diuji memiliki perilaku yang hampir sama pada tahap pembebanan awal, yaitu terjadi kegagalan lentur dengan ditandai oleh retak lentur. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan penelitian (Djamaluddin et al., 2016; Tata et al., 2018) dimana kondisi balok berhasil didesain gagal lentur tidak mengalami patah pada daerah tekan



balok. Terlihat dari hasil pengujian pada **Gambar 64**, bahwa setiap balok mengalami kegagalan akibat lentur.



(a) Balok Kontrol BK



(b) Balok BNS



(c) Balok BGS



(a) Balok BGSDB

**Gambar 64.** Hasil uji lentur variasi benda uji

Ketidakmampuan balok untuk menopang beban yang lebih besar dari kekuatannya inilah yang menyebabkan kegagalan awal. Patahan seperti ini disebut retak lentur karena dimulai pada sepertiga tengah bentang balok dan semakin



intensif seiring dengan pergerakan dari sisi tarik ke sisi tekan (Djamaluddin dan Irmawaty, 2017). Momen lentur pada ruas yang diuji inilah yang menimbulkan tegangan tarik pada dasar beton. Proses ini terus berlangsung hingga beban mencapai puncaknya, dan pada saat itu beban berhenti bertambah.

Pada **Gambar 64 (a)**, Terlihat jelas bahwa benda uji balok mengalami keruntuhan lentur dan patahan yang merambat secara vertikal. Momen lentur yang terjadi pada balok ketika dibebani inilah yang menyebabkan hal tersebut. Beton mengalami tegangan tekan pada bagian atas dan tegangan tarik pada bagian bawah akibat momen lentur tersebut. Balok akan mulai patah jika momen lentur yang dihasilkan lebih besar dari kekuatan beton; retakan ini akan bertahan sampai balok tersebut mengalami kegagalan. Perilaku ini juga diamati dalam penelitian Saribiyik and Caglar, (2016). Dalam penelitian tersebut, dilakukan pengujian kuat lentur balok beton bertulang dengan beban dua 4 titik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa balok mengalami kegagalan lentur pada beban yang lebih rendah dari yang diprediksi oleh teori.

**Gambar 64 (b)** menunjukkan bagaimana patahan lentur pada balok BNS pertama kali muncul pada daerah momen maksimum, yaitu tepat di bawah beban. Patahan tersebut kemudian menjadi semakin lebar dan bergerak secara vertikal searah dengan tekanan permukaan beton. Selain itu, rekahan mulai bergerak secara bertahap ke arah strip GFRP yang diikatkan ke sisi tarik balok, menunjukkan bahwa lapisan perkuatan telah mengalami debonding. Diawali dari lokasi patahan lentur, proses debonding lembaran GFRP secara bertahap menyebar ke setiap bagian pada sisi tarik balok. Debonding, atau hilangnya daya rekat antara keduanya, merupakan indikasi bahwa ikatan antara lembaran GFRP dan beton melemah setelah GFRP tersebut terkelupas.

Ketika lembaran GFRP benar-benar terpisah dari beton dan beton mulai runtuh saat mendekati regangan maksimumnya, balok BNS akhirnya mengalami keruntuhan lentur total menurut analisis Wu et al (2022). Penelitian ini mengkaji kuat lentur balok beton bertulang yang ditambahkan lembaran GFRP. Temuan menunjukkan bahwa kuat lentur balok dengan delaminasi dan debonding GFRP lebih rendah dibandingkan balok tanpa fenomena tersebut. Pada akhirnya, balok





BGS mengalami kegagalan lentur secara total ketika strip GFRP benar-benar terlepas dari beton dan beton mulai hancur karena mencapai regangan maksimal.

**Gambar 64 (c)** pada balok BGS menunjukkan bagaimana kapasitas beton bertulang menurun apabila tulangan pada balok beton juga dikurangi. Teknik *grouting* digunakan dalam perbaikan untuk mengatasi masalah ini. Namun temuan pengujian menunjukkan bahwa kekuatan balok tidak meningkat karena perubahan ini. Sebaliknya, terjadi delaminasi dan keretakan dini, yang mengakibatkan kerusakan struktural yang parah.

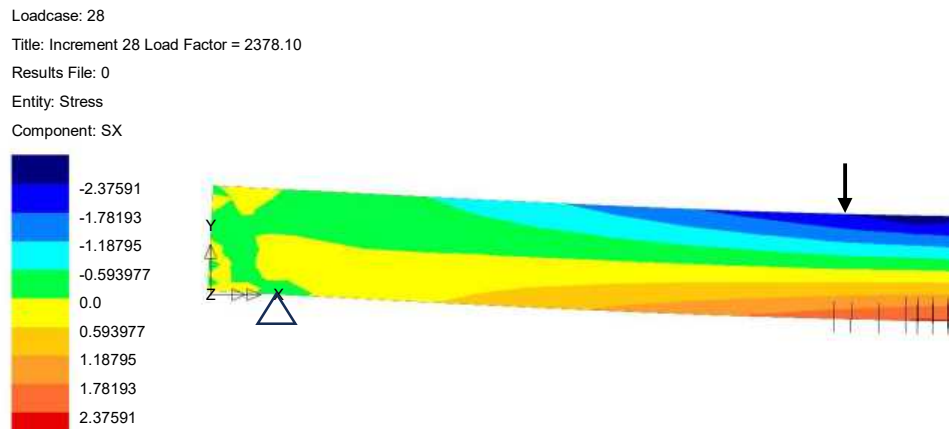
Hal ini dapat dipengaruhi oleh melemahnya tulangan pada balok beton sehingga dapat melemahkan balok dan meningkatkan kerentanannya terhadap kerusakan. Balok akan mengalami keruntuhan jika beban yang diberikan lebih besar dari kapasitasnya (Naser et al., 2019). Sejumlah masalah, termasuk daya rekat yang tidak memadai antara *grouting* dan beton, tekanan yang tidak seimbang saat menuangkan mortar *grouting*, atau penanganan yang tidak kompeten selama aplikasi, dapat menyebabkan delaminasi dini pada benda uji (Ganesh dan Murthy, 2019). Delaminasi dini dapat terjadi jika *grouting* tidak merata pada permukaan beton atau tidak menempel dengan baik pada beton. Tekanan atau tegangan pada *grouting* yang tidak merata pada seluruh permukaan beton dapat menyebabkan keretakan (Ganesh and Murthy, 2019).

**Gambar 64 (d)** menunjukkan bahwa terjadinya retakan lentur pada daerah momen maksimum juga merupakan awal mula pola retakan. Retakan ini hanya sedikit menyebar ke arah lembaran GFRP saat bergerak mendekati beton. Selain membatasi penyebaran retakan, angkur *dynabolt* pada sambungan cold joint terbukti mampu mencegah terjadinya delaminasi dini saat beban terus ditingkatkan. Akibatnya, delaminasi lembaran GFRP juga dapat dicegah terjadi lebih cepat dan kekuatan lentur balok meningkat sebelum mengalami kegagalan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan GFRP sebagai material perkuatan yang efektif dalam meningkatkan kekuatan balok beton (Djamaluddin et al., 2015).

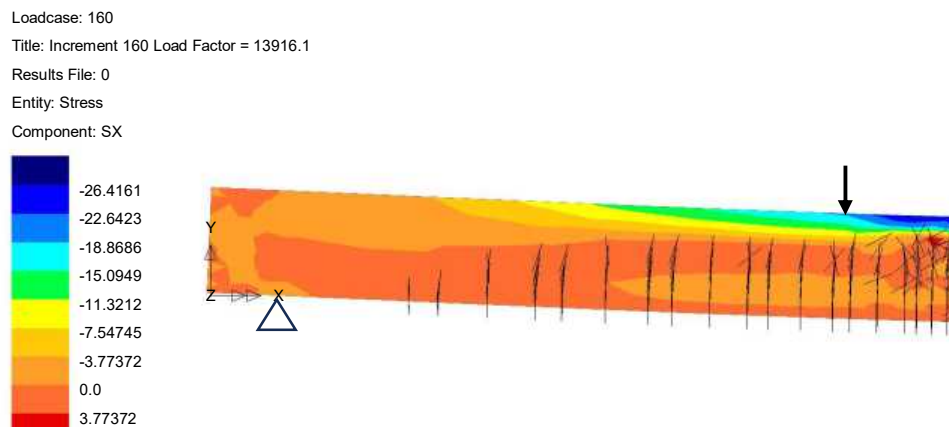


## 6.4 Analisis Menggunakan Finite Element Method (FEM)

Dalam penelitian ini dilakukan juga analisis *Finite Element Method* atau metode elemen hingga menggunakan aplikasi LUSAS Modeller v14.0 hal ini bertujuan untuk membandingkan hasil FEM dengan hasil eksperimental. LUSAS Modeller adalah sistem pemodelan berbasis fitur asosiatif. Model geometri dimasukkan dalam hal fitur geometri yang dibagi menjadi elemen hingga untuk melakukan analisis. Adapun hasil analisis menggunakan LUSAS Modeller yang menampilkan kontur tegangan masing-masing variasi balok uji ditunjukkan dibawah ini:



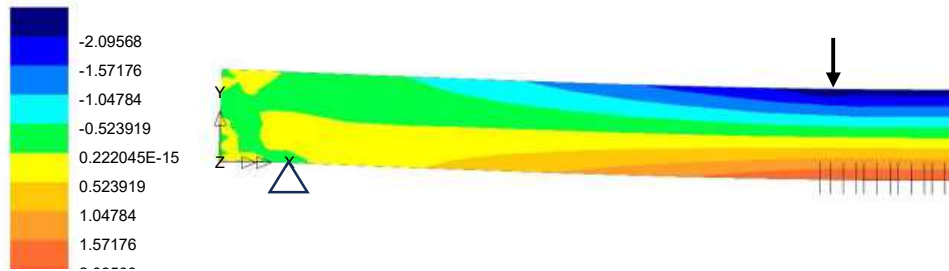
**Gambar 65.** Kontur tegangan balok kontrol (BK) saat beban *crack*



**Gambar 66.** Kontur tegangan balok kontrol (BK) saat beban ultimit

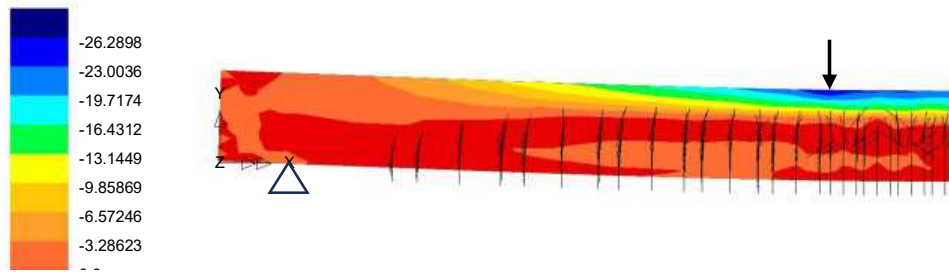


Loadcase: 26  
 Title: Increment 26 Load Factor = 2178.10  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



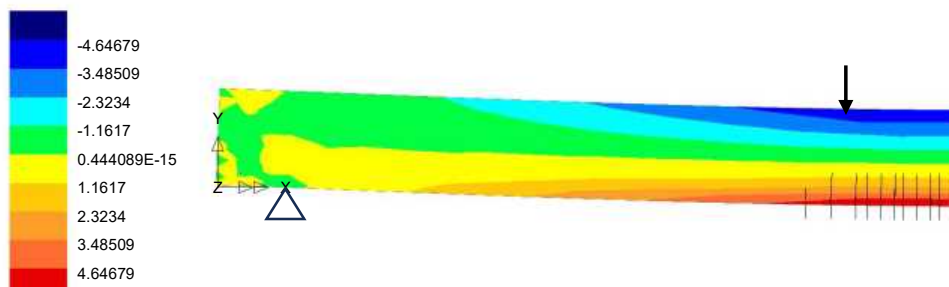
**Gambar 67.** Kontur tegangan balok monolit + GFRP (BNS) saat beban *crack*

Loadcase: 184  
 Title: Increment 184 Load Factor = 17978.1  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



**Gambar 68.** Kontur tegangan balok monolit + GFRP (BNS) saat beban ultimit

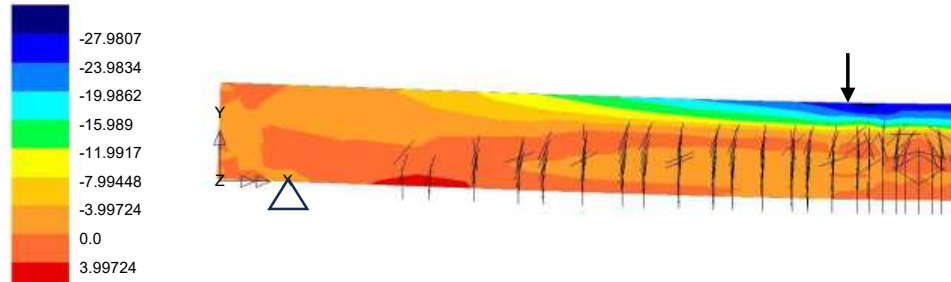
Loadcase: 14  
 Title: Increment 14 Load Factor = 4390.60  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



**Gambar 69.** Kontur tegangan balok grouting + GFRP (BGS) saat beban *crack*

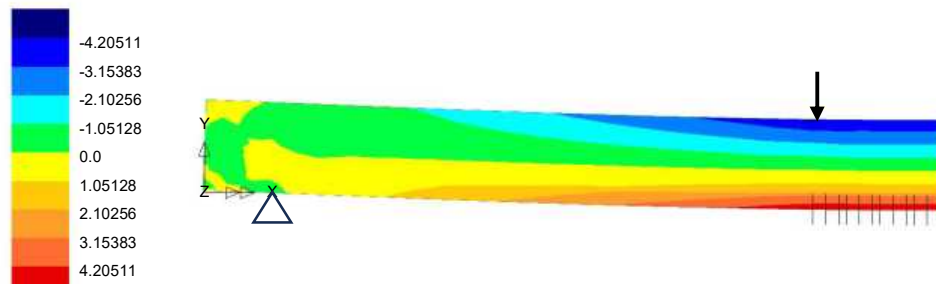


Loadcase: 55  
 Title: Increment 55 Load Factor = 21520.0  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



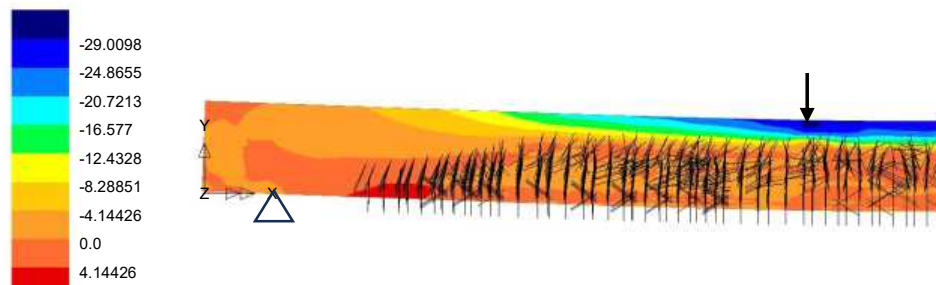
**Gambar 70.** Kontur tegangan balok grouting + GFRP (BGS) saat beban ultimit

Loadcase: 13  
 Title: Increment 13 Load Factor = 3890.60  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



**Gambar 71.** Kontur tegangan balok grouting + Dynabolt+ GFRP (BGSDB) saat beban *crack*

Loadcase: 71  
 Title: Increment 71 Load Factor = 22865.4  
 Results File: 0  
 Entity: Stress  
 Component: SX



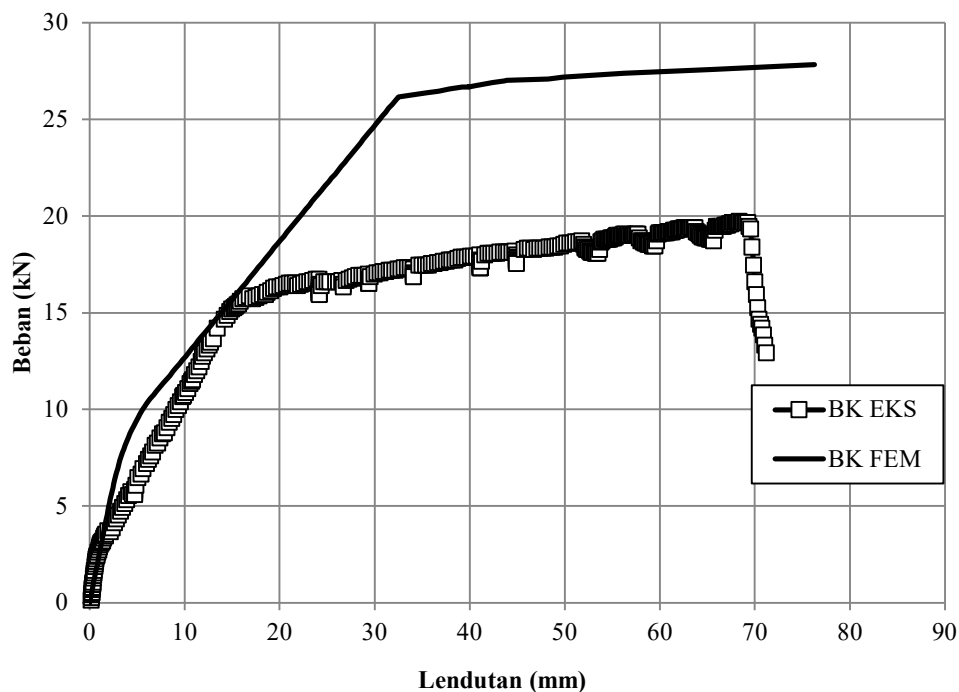
**Gambar 72.** Kontur tegangan balok grouting + Dynabolt+ GFRP (BGSDB) saat beban ultimit



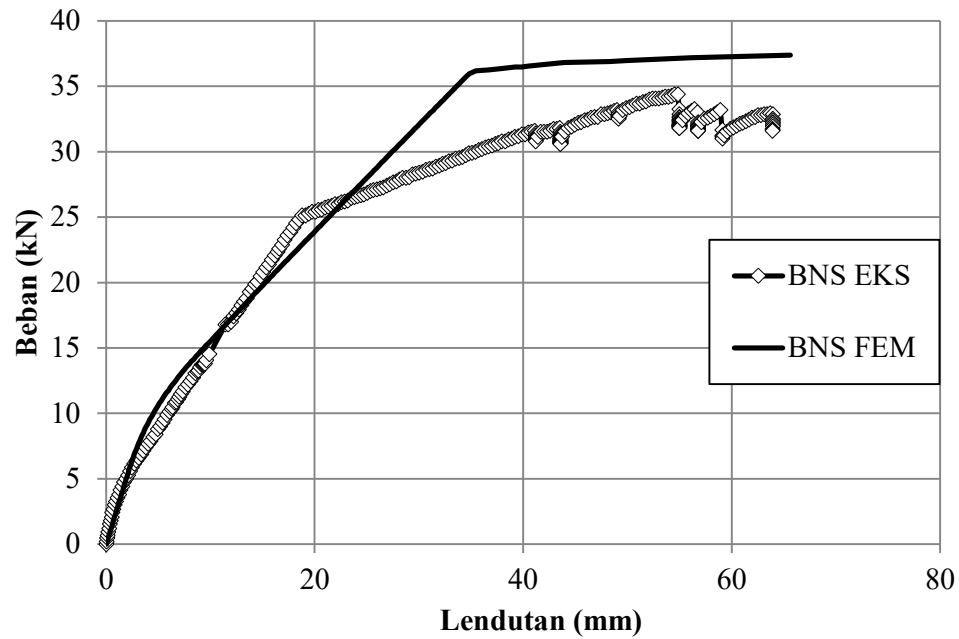
Berdasarkan **Gambar 65-72** di atas, dapat dilihat bahwa hasil FEM menunjukkan kemiripan dengan hasil eksperimental dimana tegangan terkonsentrasi pada bagian tengah bentang benda uji dan daerah kritis ditunjukkan pada kontur dengan warna biru gelap. Selanjutnya hasil analisis dan output grafik FEM dibandingkan dengan hasil eksperimental ditunjukkan pada **Tabel 26** dan **Gambar 73** sampai dengan **Gambar 87** dibawah ini.

**Tabel 26.** Perbandingan hasil eksperimen dan FEM

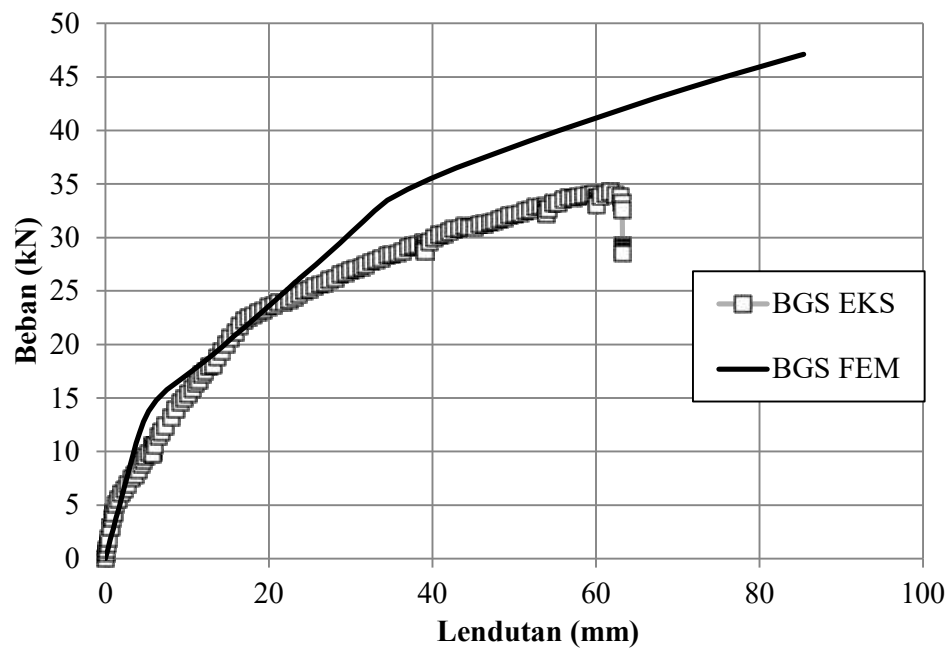
Uraian	Satuan	Tipe				
		BK	BNS	BGS	BGSDB	
Hasil Penguujian	$P_{crack}$	kN	3.33	4.69	6.06	4.93
	$P_{ultimate}$	kN	19.47	34.88	31.39	29.89
Hasil FEM	$P_{crack}$	kN	4.75	6.15	6.46	6.78
	$P_{ultimate}$	kN	27.83	36.72	42.46	40.57
Hasil Analisis	$P_{crack}$	kN	2.80	3.59	3.59	3.59
	$P_{ultimate}$	kN	24.00	58.06	58.06	58.06



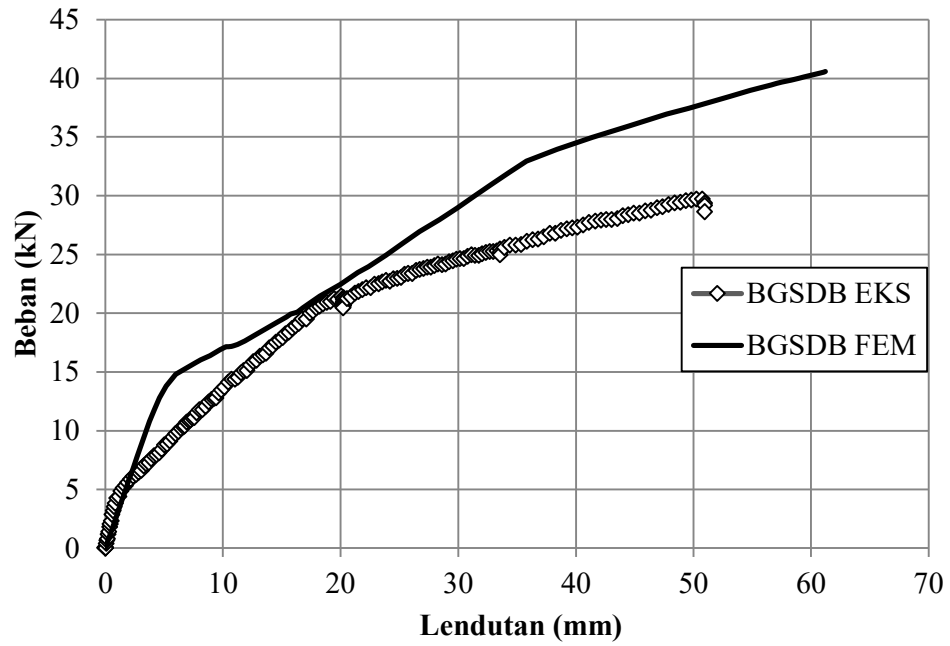
**Gambar 73.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\Delta$  balok kontrol (BK)



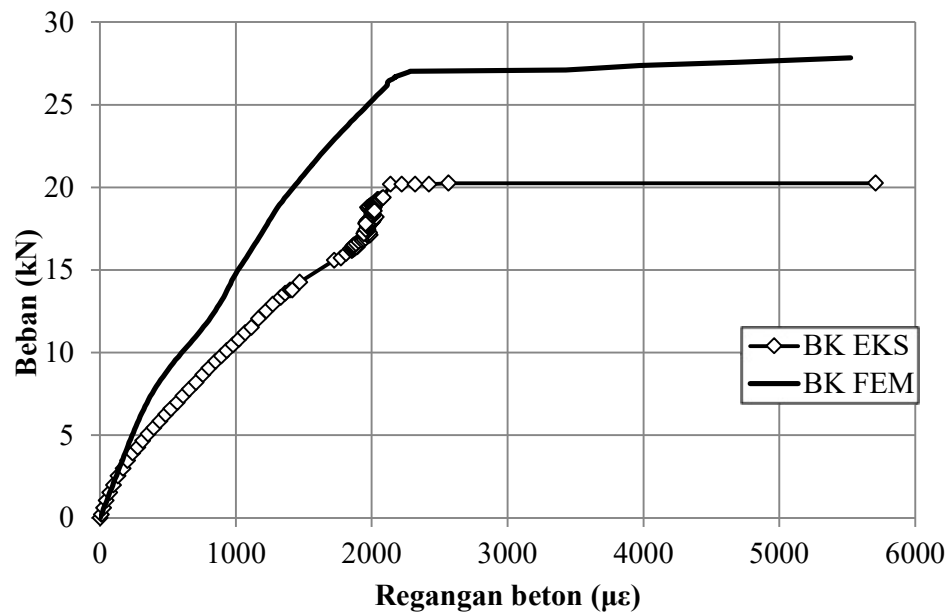
**Gambar 74.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\Delta$  balok monolit + GFRP (BNS)



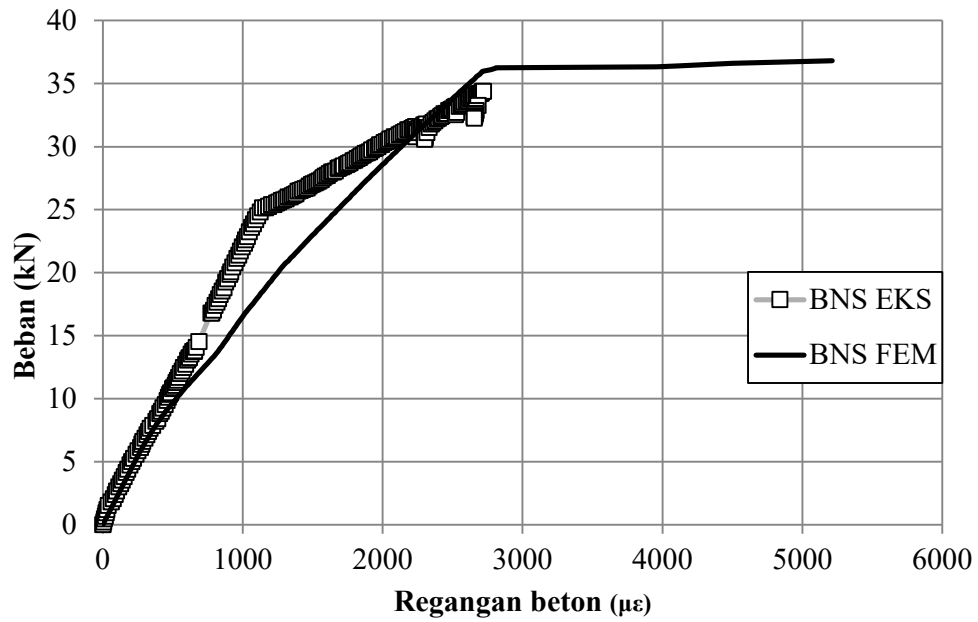
**Gambar 75.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\Delta$  balok grouting + GFRP (BGS)



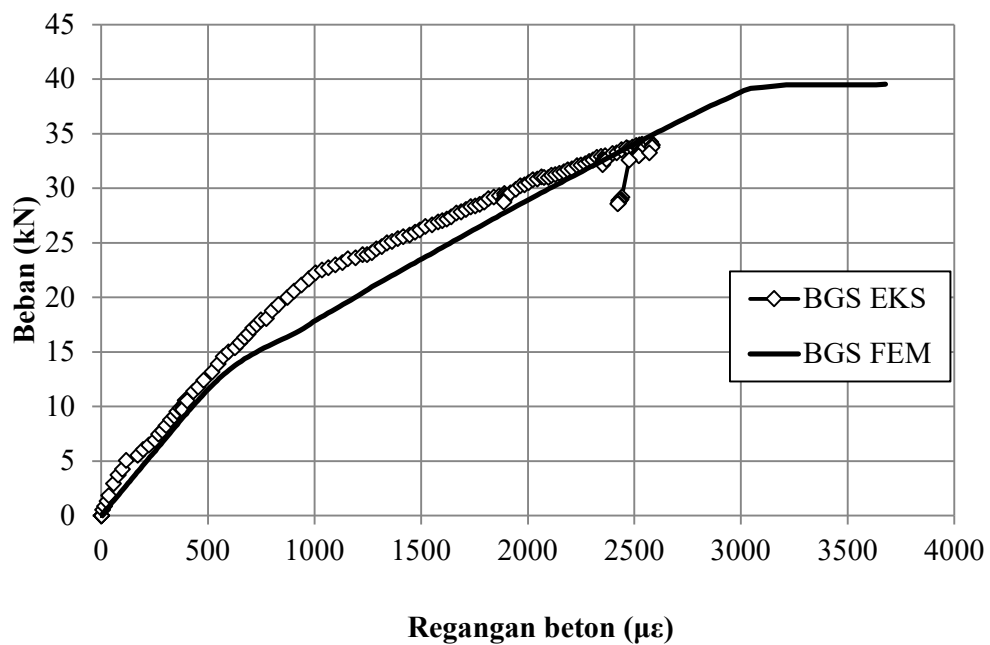
**Gambar 76.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\Delta$  balok *grouting + dyanbolt + GFRP (BGSDB)*



**Gambar 77.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\epsilon_{\text{beton}}$  balok kontrol (BK)

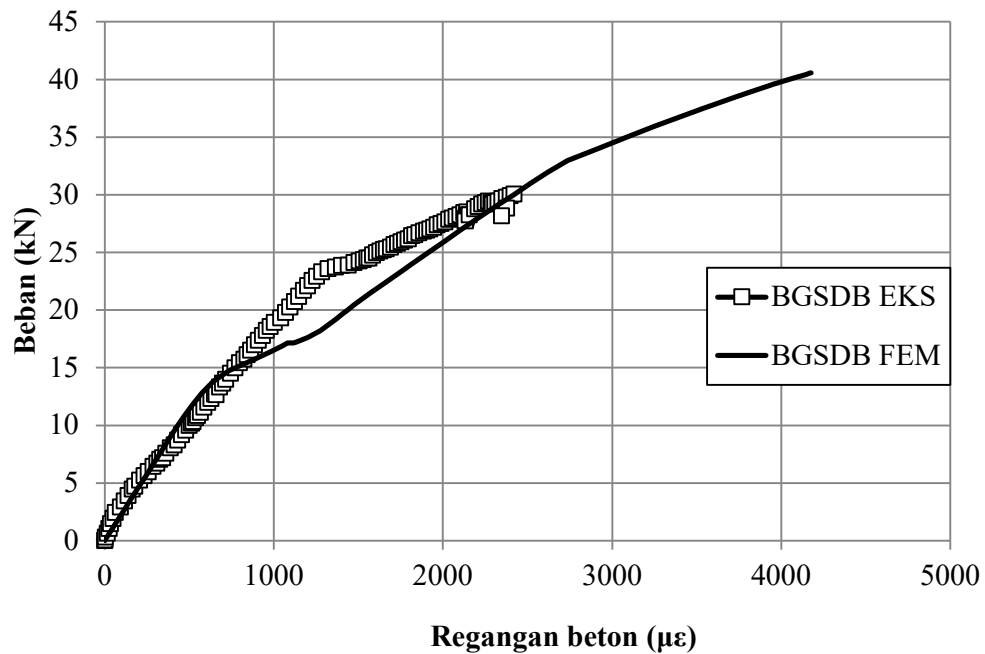


**Gambar 78.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{\text{beton}}$  balok monolit + GFRP (BNS)

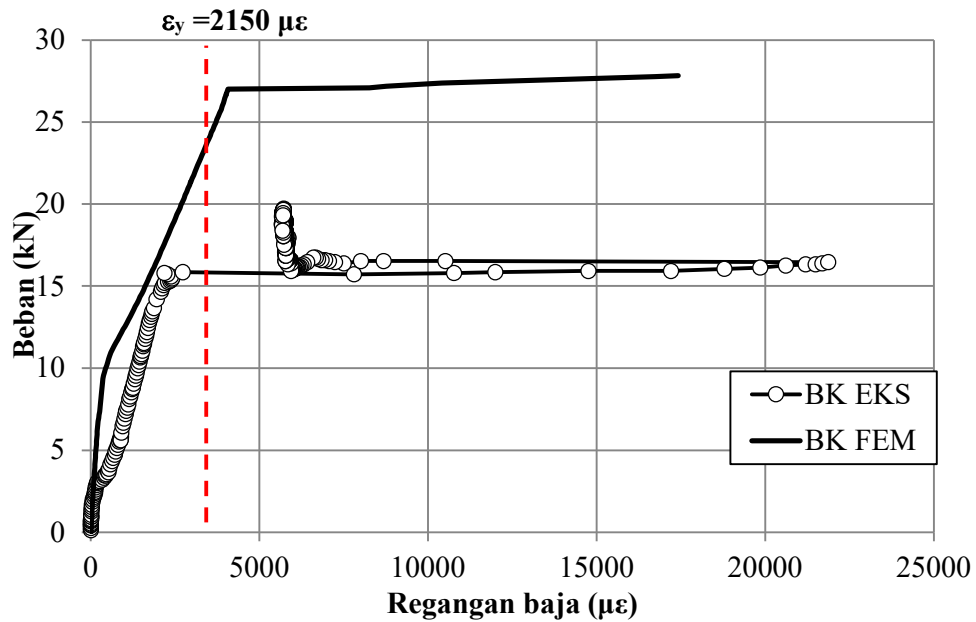


**Gambar 79.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{\text{beton}}$  balok grouting + GFRP (BGS)

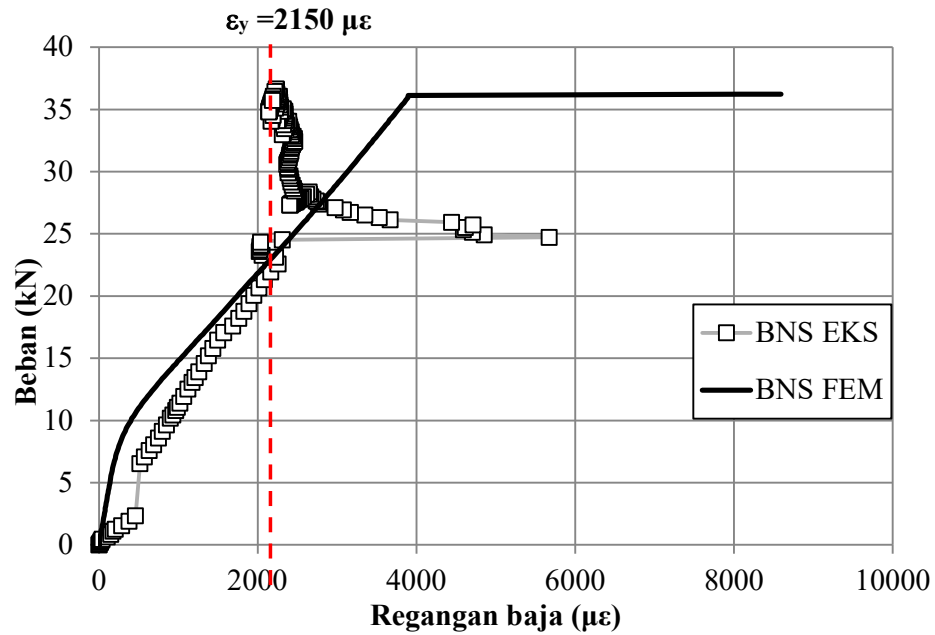




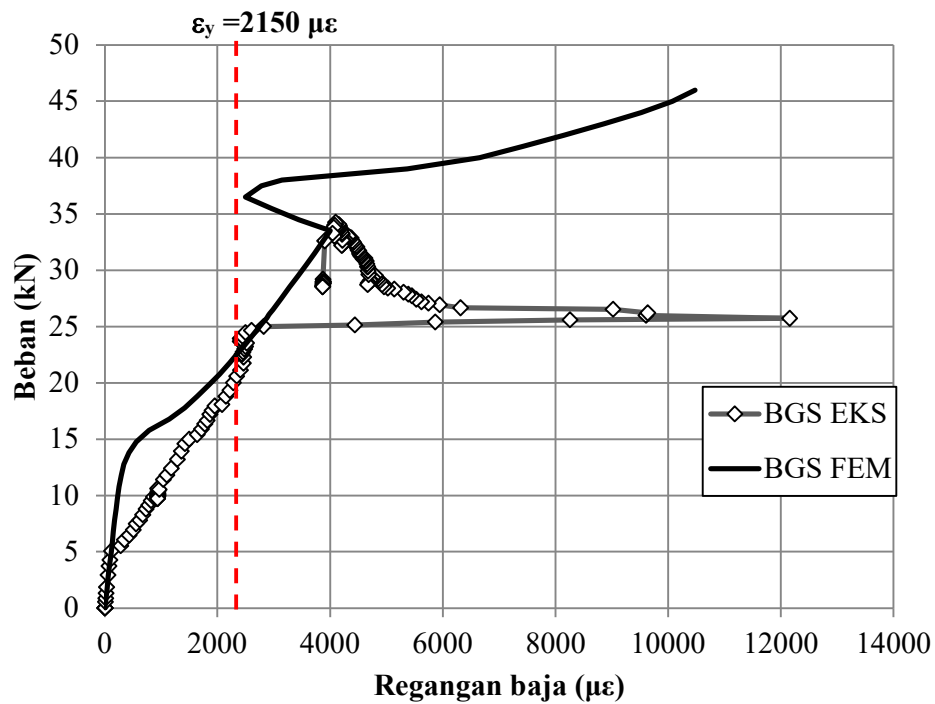
**Gambar 80.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\epsilon_{\text{beton}}$  balok *grouting + dynabolt + GFRP (BGSDB)*



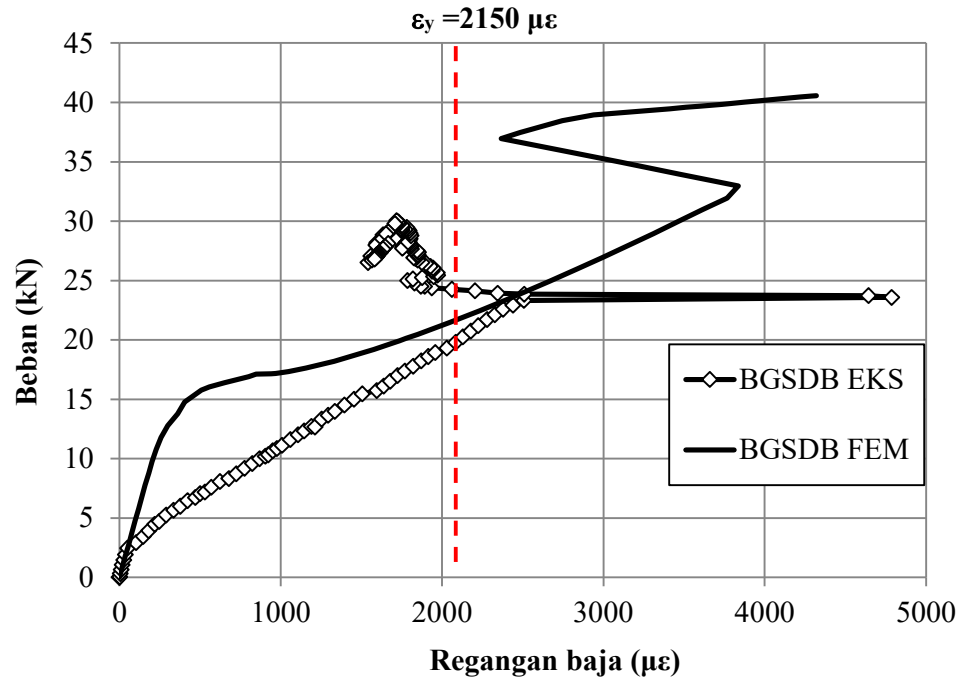
**Gambar 81.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\epsilon_{\text{baja}}$  balok kontrol (BK)



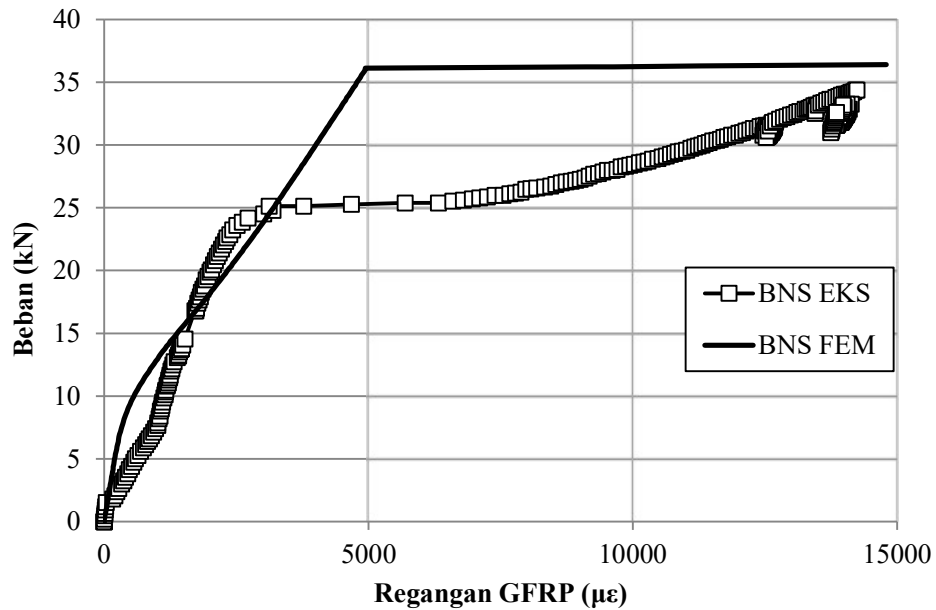
**Gambar 82.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\epsilon_{\text{baja}}$  balok monolit + GFRP (BNS)



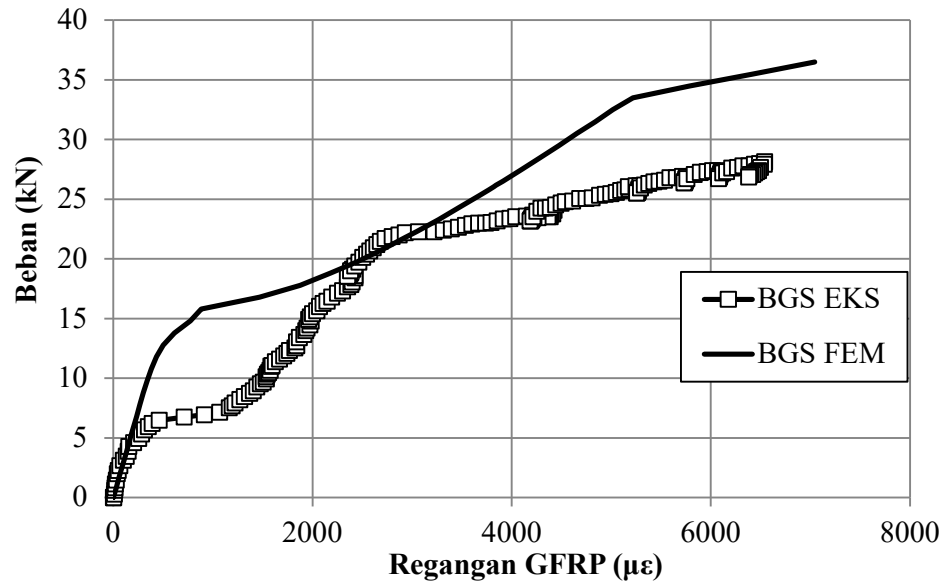
**Gambar 83.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik P- $\epsilon_{\text{baja}}$  balok grouting + GFRP (BGS)



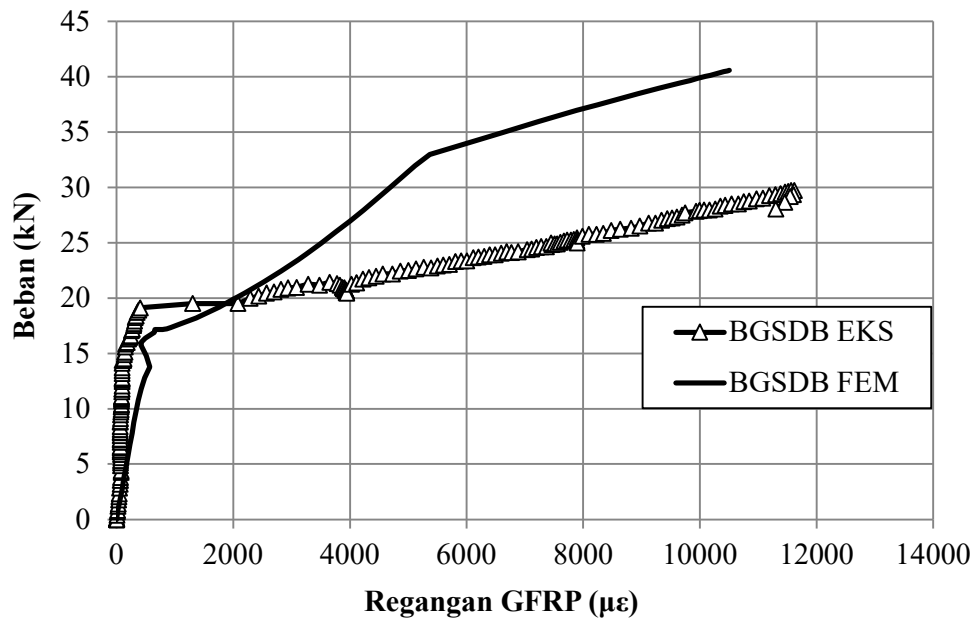
**Gambar 84.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{\text{baja}}$  balok *grouting + dynabolt + GFRP (BGSDB)*



**Gambar 85.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{\text{GFRP}}$  balok monolit + GFRP (BNS)



**Gambar 86.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{GFRP}$  balok *grouting + GFRP (BGS)*



**Gambar 87.** Perbandingan hasil FEM dan eksperimen pada grafik  $P-\epsilon_{GFRP}$  balok *grouting + dynabolt + GFRP (BGSDB)*

Berdasarkan **Tabel 26** perbandingan antara hasil FEM dan hasil pengujian, balok monolit + GFRP (BNS) memiliki hasil FEM yang paling tinggi dibandingkan



balok uji lain dengan rasio perbandingan sebesar 0,91 sedangkan, pada balok BK memiliki rasio perbandingan sebesar 0,71 dan balok komposit BGS serta BGSDDB memiliki rasio perbandingan sebesar 0,67 dan 0,65. Perbedaan ini terjadi karena pada analisis FEM balok BGS dan BGSDDB dimodelkan dalam aksi komposit beton, mortar *grouting* dan lembaran GFRP. Mutu tinggi dari mortar *grouting* dan tegangan tarik yang tinggi pada GFRP memberikan sumbangan kekakuan dan kapasitas balok sehingga kekuatannya meningkat sangat signifikan. Hal tersebut berbanding terbalik dengan hasil eksperimen dimana beton lama dan mortar *grouting* tidak bekerja secara komposit atau tidak bersifat monolit dan lembaran GFRP mengalami debonding dini sebelum mencapai kapasitas tarik ultimitnya.

### 6.5 Kebaharuan / Novelty

- a. Metode perbaikan dengan mortar *grouting*, ankur *dynabolt* dan perkuatan dengan GFRP pada balok beton bertulang terbukti dapat meningkatkan kapasitas balok mencapai 53,53 %.
- b. Pengaruh penambahan ankur *dynabolt* pada sambungan mortar *grouting* dan beton lama terbukti memberikan efek mencegah terjadinya delaminasi pada *cold joint longitudinal* dan mencegah debonding dini pada lembaran GFRP.
- c. Penelitian ini memberikan detail peningkatan kekuatan pada sambungan *cold-joint longitudinal*. Detail yang berkaitan dengan metode pemasangan, pengujian dan analisa yang dihasilkan oleh penelitian ini dapat digunakan selanjutnya menjadi dasar yang penting untuk aplikasi dilapangan.



## BAB VII

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 7.1 Kesimpulan

1. Balok komposit mortar *grouting*, angkur *dynabolt* dan lembaran GFRP (BGSDB) memiliki kapasitas beban maksimum tertinggi hingga mencapai 29,89 kN atau meningkat sebesar 53,53% dibandingkan BK. Temuan ini menunjukkan bahwa tambahan angkur *dynabolt* pada *cold joint longitudinal* terbukti mampu mencegah debonding dini dan meningkatkan kuat lentur balok.
2. Balok dengan tambahan angkur *dynabolt* pada sambungan *cold joint longitudinal* menunjukkan peningkatan kapasitas geser, mencegah delaminasi dini, dan mencegah debonding GFRP dari balok sehingga meningkatkan kapasitas dan kekakuan balok. Adanya pembuatan lubang untuk angkur *dynabolt* diperkirakan menyebabkan retak mikro didalam inti beton yang menyebabkan kapasitas lentur balok BGSDB lebih rendah dibanding balok tanpa angkur *dynabolt* BGS.
3. Pola retak dan mode kegagalan pada Balok BK adalah retak lentur, hal ini ini mencapai puncaknya pada beban maksimum 19,47 kN dimana daerah tekan balok telah hancur. Balok BNS mengalami kegagalan lentur diawal beban dan terus meningkat hingga mencapai beban maksimum sebesar 32 kN ditandai dengan terjadinya debonding pada lembaran GFRP ke arah tumpuan kiri. Balok BGS dan BGSDB mengalami kegagalan lentur pada saat beban mencapai masing-masing 22,30 kN dan 28,10 kN dan terjadi delaminasi pada sambungan mortar *grouting* dan beton lama, serta debonding pada GFRP. Perkuatan GFRP terbukti mampu mencegah retak lentur sehingga meningkatkan ketahanan beton, namun keruntuhan daktail terjadi tiba-tiba ketika debonding terjadi pada GFRP.



## 7.2 Saran

Setelah melakukan serangkaian penelitian maka penulis dapat memberikan saran perbaikan dan peningkatan penelitian khususnya untuk perkuatan balok beton bertulang menggunakan GFRP antara lain sebagai berikut:

- Perlu dilakukan analisis pendahuluan dalam menentukan kebutuhan luasan GFRP sebagai pengganti tulangan lentur untuk memastikan perbaikan dengan GFRP tidak membuat kapasitas balok melebihi kekuatan awalnya sehingga menyebabkan balok lebih kuat daripada kolom (*strong beam weak column*)
- Perlunya treatment yang baik pada balok eksisting sebelum dilakukan penuangan mortar *grouting* agar diperoleh ikatan yang baik antara sambungan (*cold joint longitudinal*).
- Perlunya pengujian kapasitas geser dan cabut angkur *dynabolt* dan kedalaman pengangkuran pada balok eksisting.
- Penelitian tentang jumlah dan jarak efektif antar angkur *dynabolt* masih perlu dilakukan untuk menentukan jumlah dan jarak optimum dari angkur *dynabolt* yang paling efektif kinerjanya.
- Variasi penggunaan type dan jenis bahan *grouting* disarankan untuk dilakukan pengujian untuk mengetahui type dan jenis *grouting* yang memiliki lekatan yang kuat dengan beton lama atau eksisting.
- Perlu mensimulasikan lekatan antara beton lama dengan mortar *grouting* serta lekatan antara beton dan lembaran GFRP pada analisis FEM sesuai dengan perilaku pada benda uji.

## Daftar Pustaka

- Alam, M.A., Jumaat, M.Z., 2008. Strengthening of R.C. Beams Using Externally Bonded Plates and Anchorages. *Aust J Basic Appl Sci* 3, 2207–2211.
- Ali, H., Assih, J., Li, A., 2021. Flexural capacity of continuous reinforced concrete beams strengthened or repaired by CFRP/GFRP sheets. *Int J Adhes Adhes* 104. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2020.102759>



- Al-Mashgari, H.A.Y., Hejazi, F., Alkhateeb, M.Y., 2021. Retrofitting of corroded reinforced concrete beams in flexure using CFRP rods and anchor bolt. *Structures* 29, 1819–1827. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2020.12.047>
- Almusallam, T.H., 2006a. Load-deflection behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets subjected to different environmental conditions. *Cem Concr Compos* 28, 879–889. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.017>
- Almusallam, T.H., 2006b. Load-deflection behavior of RC beams strengthened with GFRP sheets subjected to different environmental conditions. *Cem Concr Compos* 28, 879–889. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.017>
- Alshaikhly, A.S., Alam, M.A., Mustapha, K.N., 2016. An Advanced Method for Repairing Severely Damaged Beams in Shear with Externally Bonded Steel Plates Using Adhesive and Steel Connectors. *Arab J Sci Eng* 41, 4077–4097. <https://doi.org/10.1007/S13369-016-2079-5/METRICS>
- Alwash, N.A., Kadhum, M.M., Mahdi, A.M., 2019. Rehabilitation of corrosion-defected RC beam-column members using patch repair technique. *Buildings* 9. <https://doi.org/10.3390/buildings9050120>
- Askar, M.K., Hassan, A.F., Al-Kamaki, Y.S.S., 2022. Flexural and shear strengthening of reinforced concrete beams using FRP composites: A state of the art. *Case Studies in Construction Materials* 17, e01189. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01189>
- Attari, N., Amziane, S., Chemrouk, M., 2012. Flexural strengthening of concrete beams using CFRP, GFRP and hybrid FRP sheets. *Constr Build Mater* 37, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.052>
- Brito, E.N., Júlio, S., Branco, F.A., Dias Da Silva, V., 2005. Reinforced Concrete Jacketing-Interface Influence on Monotonic Loading Response. *ACI Struct J* 102.
- Broomfield, J.P., Bentur, Arnon., Diamond, Sidney., Berke, N.S., 1997. *Corrosion of Steel In Concrete: Understanding, Investigation and Repair*. E & FN Spon.
- Canaval, J.H., Silva, T.J. DA, Santos, A.C., 2018. Experimental study of RC beams strengthened for bending by reinforced grout layer and connectors. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais* 11, 810–833. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952018000400009>





- Chalioris, C.E., Kytinou, V.K., Voutetaki, M.E., Papadopoulos, N.A., 2019. Repair of heavily damaged RC beams failing in shear using U-shaped mortar jackets. *Buildings* 9. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS9060146>
- Chaudhry, C., 2007. Evaluation of Grouting as a Strengthening Technique for Earthen Structures in Seismic Areas: Case Study Chiripa (Historic Preservation and Conservation). University of Pennsylvania, Pennsylvania.
- Cheng, X., Liu, H., Su, J., Ma, L., Li, G., 2020. Flexural Performance of Prestressed Beams with Grouting Material of Various Compactnesses. *KSCE Journal of Civil Engineering* 24, 2419–2434. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-0107-1>
- Ciampa, E., Ceroni, F., Pecce, M.R., 2022. Bond Behavior of Steel Plates Externally Bonded on Concrete Elements. *Lecture Notes in Civil Engineering* 198 LNCE, 232–242. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-88166-5\\_19/COVER](https://doi.org/10.1007/978-3-030-88166-5_19/COVER)
- De Lorenzis, L., Zurich, E., Nanni, A., Miller, B., 2001. Bond of FRP Laminates to Concrete. *ACI Mater J* 98, 256–264.
- Djamaluddin, R., Amir Sultan, M., Irmawati, R., Shinichi, H., 2015. Bond Characteristics of GFRP Sheet on Strengthened Concrete Beams due to Flexural Loading. *International Journal of Engineering and Technology* 7, 110–115. <https://doi.org/10.7763/ijet.2015.v7.776>
- Djamaluddin, R., Hino, S., 2011. Kapasitas Lentur Perkuatan Balok Beton Bertulang Yang Telah Meleleh dengan Menggunakan Lembaran GFRP. *Dinamika Teknik Sipil* 11, 293–300.
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2017. Relationship Model of the Moment Capacity of GFRP Sheet Strengthened RC Beams to the Duration of Sea Water Exposure, in: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 1195–1202. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.280>
- Djamaluddin, R., Irmawaty, R., Tata, A., 2016. Flexural capacity of reinforced concrete beams strengthened using GFRP sheet after fatigue loading for sustainable construction, in: *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publications Ltd, pp. 66–73. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.692.66>
- Do-Dai, T., Chu-Van, T., Tran, D.T., Nassif, A.Y., Nguyen-Minh, L., 2022. Efficacy of CFRP/BFRP laminates in flexurally strengthening of concrete beams with corroded reinforcement. *Journal of Building Engineering* 53, 104606. <https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2022.104606>



- Faroz, S.A., Pujari, N.N., Ghosh, S., 2016. Reliability of a corroded RC beam based on Bayesian updating of the corrosion model. *Eng Struct* 126, 457–468. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2016.08.003>
- Ferrari, V.J., De Hanai, J.B., De Souza, R.A., 2013. Flexural strengthening of reinforcement concrete beams using high performance fiber reinforcement cement-based composite (HPFRCC) and carbon fiber reinforced polymers (CFRP). *Constr Build Mater.* <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.026>
- Ganesh, P., Murthy, A.R., 2019. Repair, retrofitting and rehabilitation techniques for strengthening of reinforced concrete beams - A review. *Advances in Concrete Construction* 8, 101–117. <https://doi.org/10.12989/ACC.2019.8.2.101>
- Gergess, A.N., Shaikh Al Shabab, M., Massouh, R., 2020a. Repair of Severely Damaged Reinforced Concrete Beams with High-Strength Cementitious Grout. *Transp Res Rec* 2674, 372–384. <https://doi.org/10.1177/0361198120919116>
- Gergess, A.N., Shaikh Al Shabab, M., Massouh, R., 2020b. Repair of Severely Damaged Reinforced Concrete Beams with High-Strength Cementitious Grout. *Transp Res Rec* 2674, 372–384. <https://doi.org/10.1177/0361198120919116>
- Goyal, A., Pouya, H.S., Ganjian, E., Claisse, P., 2018. A Review of Corrosion and Protection of Steel in Concrete. *Arab J Sci Eng.* <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3303-2>
- Gupta, N., Dhiman, P., Dhiman, A., 2019. Design and Detailing of RC Jacketting for Concrete Columns, *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*.
- Hag-Elsafi, O., Alampalli, S., Kunin, J., 2001. Application of FRP laminates for strengthening of a reinforced-concrete T-beam bridge structure. *Compos Struct* 52, 453–466. [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(01\)00035-6](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(01)00035-6)
- Hariati;, Setyaning Astutik, Y., Hayadi Umar, U., 2020. Studi Komparatif Kerusakan Beton pada Struktur Kolom yang Keropos dengan Metode Grouting. *Journal of Civil Engineering and Planning* 1.
- Herry Prabowo, 2018. Estimasi Umur Layan Struktur Beton Bertulang Terpapar Ion Klorida Pada Infrastruktur Sungai Kota Pontianak, in: *Seminar Nasional Penerapan Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi (PIPT)*.
- Hijriah, Parung, H., Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2019. Study On Behavior Of Frp Sheet Debonding As Flexural Strengthening Of Reinforced Concrete



Beam. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 10, 252–260.

- Idris, M., Parung, H., Djamaluddin, R., 2019. Flexural Behavior of Shear-Cracked Reinforced Concrete Beam Strengthened with GFRP Sheet. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)* 10, 64–72.
- Ju, H., Lee, D.H., Cho, H.C., Kim, K.S., Yoon, S., Seo, S.Y., 2014. Application of Hydrophilic Silanol-Based Chemical Grout for Strengthening Damaged Reinforced Concrete Flexural Members. *Materials* 2014, Vol. 7, Pages 4823–4844 7, 4823–4844. <https://doi.org/10.3390/MA7064823>
- Jumaat, Z., Kabir, H., Obaydullah, M., 2010. Structural performance of reinforced concrete beams repairing from spalling. *European Journal of Scientific Research* 45, 089–102.
- Kabir, M.I., 2014. Short and long term performance of concrete structures repaired-strengthened with FRP (Doctor of Philosophy ). University of Technology, Sydney .
- Kantarci, F., Maraş, M.M., 2022. Fabrication of Novel Geopolymer Grout as Repairing Material for Application in Damaged RC Beams. *International Journal of Civil Engineering* 20, 461–474. <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00695-9>
- Kh, H.M., Özakça, M., Ekmekyapar, T., 2016. A Review on Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Fiber Reinforced Polymers. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics* 22, 13–48.
- Kim, H.Y., You, Y.J., Ryu, G.S., 2021. Reinforced Concrete Slabs Strengthened with Carbon Textile Grid and Cementitious Grout. *Materials* 2021, Vol. 14, Page 5046 14, 5046. <https://doi.org/10.3390/MA14175046>
- Kim, J., Jeong, S., Kim, H., Kim, Y., Park, S., 2022. Bond Strength Properties of GFRP and CFRP according to Concrete Strength. *Applied Sciences* 2022, Vol. 12, Page 10611 12, 10611. <https://doi.org/10.3390/APP122010611>
- Li, D., Zhang, S., Yang, W., Zhang, W., 2014. Corrosion monitoring and evaluation of reinforced concrete structures utilizing the ultrasonic guided wave technique. *Int J Distrib Sens Netw* 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/827130>
- Machmud, H., 2019. Kapasitas Balok Beton Bertulang Pasca Tulangan Meleleh Dengan Perkuatan Lembar FRP (Program Doktor Teknik Sipil). Universitas Hasanuddin, Makassar, Indonesia.



- Machmud, H., Tjaronge, M.W., Djamaluddin, R., Irmawaty, R., 2019. The Capacity of Reinforced Concrete Beams Post Rebars Yielded with FRP Sheet Strengthening. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 10, 232–241.
- Masoud, S., Soudki, K., 2006. Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams. *Cem Concr Compos* 28, 969–977. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.07.013>
- Moawad, M.S., Fawzi, A., 2021. Performance of concrete beams partially/fully reinforced with glass fiber polymer bars. *Journal of Engineering and Applied Science* 68, 1–18. <https://doi.org/10.1186/S44147-021-00028-6/FIGURES/18>
- Mohammad Ranjbar, M., Kazemi, M., Yousefi Moghadam, S., Madandoust, R., 2017. Analytical study on the behavior of corrosion damaged reinforced concrete beams strengthen with FRP. *Revista Română de Materiale / Romanian Journal of Materials* 47, 514–521.
- Nadhim Hassan, W., Sc Student, M., Jabbar Lafta, D., DrJamal Abdulsamad Khudhair, L., 2022. Rehabilitation of RC deep beams failing in shear using CFRP sheets and steel plates. *International Journal of Mechanical Engineering* 7.
- Napoli, A., Bank, L.C., Brown, V.L., Martinelli, E., Matta, F., Realfonzo, R., 2013. Analysis and design of RC structures strengthened with mechanically fastened FRP laminates: A review. *Compos B Eng* 55, 386–399. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2013.06.038>
- Naser, M.Z., Hawileh, R.A., Abdalla, J.A., 2019. Fiber-reinforced polymer composites in strengthening reinforced concrete structures: A critical review. *Eng Struct* 198, 109542. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2019.109542>
- Oh, H.S., Sim, J., 2004. Interface debonding failure in beams strengthened with externally bonded GFRP. *Compos Interfaces* 11, 25–42. <https://doi.org/10.1163/156855404322681037>
- Orouji, M., Najaf, E., 2023. Effect of GFRP rebars and polypropylene fibers on flexural strength in high-performance concrete beams with glass powder and microsilica. *Case Studies in Construction Materials* 18, e01769. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2022.E01769>
- Ortega, I., Pellicer, T.M., Calderón, P.A., Adam, J.M., 2018. Cement-based mortar patch repair of RC columns. Comparison with all-four-sides and one-side repair. *Constr Build Mater* 186, 338–350. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.148>



- Ozyildirim, H.C., Moruza, G.M., 2016. High-Performance Grouting Materials in Shear Keys Between Box Beams. <https://doi.org/10.3141/2577-05> 2577, 35–42. <https://doi.org/10.3141/2577-05>
- Saribiyik, A., Caglar, N., 2016. Flexural strengthening of RC beams with low-strength concrete using GFRP and CFRP. *Structural Engineering and Mechanics* 58, 825–845. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.58.5.825>
- Sherwood, E.G., Soudki, K.A., 2000. Rehabilitation of corrosion damaged concrete beams with CFRP laminates—A pilot study. *Composites: Part B* 453–459.
- Solahuddin, B.A., Yahaya, F.M., 2023. A state-of-the-art review on experimental investigation and finite element analysis on structural behaviour of fibre reinforced polymer reinforced concrete beam. *Heliyon* e14225. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14225>
- Stanciu, M.D., Drăghicescu, H.T., Roșca, I.C., 2021. Mechanical Properties of GFRPs Exposed to Tensile, Compression and Tensile–Tensile Cyclic Tests. *Polymers* 2021, Vol. 13, Page 898 13, 898. <https://doi.org/10.3390/POLYM13060898>
- Sultan, M.A., Djamaluddin, R., 2017. Pengaruh Rendaman Air Laut terhadap Kapasitas Rekat GFRP-Sheet pada Balok Beton Bertulang. *Jurnal Teknik Sipil* 24. <https://doi.org/10.5614/jts.2017.24.1.5>
- Sultan, M.A., Djamaluddin, R., Tjaronge, W., Parung, H., 2015. Flexural capacity of concrete beams strengthened using GFRP sheet after seawater immersion, in: *Procedia Engineering*. Elsevier Ltd, pp. 644–649. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.11.092>
- Tata, A., Anthonius Fredirik Raffel, Djamaluddin, R., 2018. Debonding Failure Pada Balok Beton Bertulang Dengan Perkuatan Lembar Gfrp Yang Dipengaruhi Beban Berulang Dan Rendaman Air Laut. *JURNAL SIPIL SAINS* 8, 16. <https://doi.org/10.33387/SIPILSAINS.V8I16.870>
- Tatar, J., Viniarski, C., Ishfaq, M., Harries, K.A., Head, M., 2022. Effect of U-Wrap Anchors on Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Flexurally Strengthened with Externally Bonded CFRP Sheets. *Journal of Composites for Construction* 27. <https://doi.org/10.1061/JCCOF2.CCENG-3924>
- Tigeli, M., Moyo, P., Beushausen, H., 2012. Behaviour of corrosion damaged reinforced concrete beams strengthened using CFRP laminates. *RILEM Bookseries* 6, 1079–1085. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8\\_151](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0723-8_151)



- Torres-Acosta, A.A., Navarro-Gutierrez, S., Terán-Guillén, J., 2007. Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. *Eng Struct* 29, 1145–1152. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2006.07.018>
- Wang, H.T., Wu, G., 2018. Bond-slip models for CFRP plates externally bonded to steel substrates. *Compos Struct* 184, 1204–1214. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2017.10.033>
- Wang, L., Zhang, X., Zhang, J., Ma, Y., Xiang, Y., Liu, Y., 2014. Effect of insufficient grouting and strand corrosion on flexural behavior of PC beams. *Constr Build Mater* 53, 213–224. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.11.069>
- Wu, C., Su, Y., Zhang, P., Zhu, H., Gao, D., Sheikh, S.A., 2022. Experimental Study of GFRP Reinforced Concrete Beams With U-Shaped CFRP Grid-Reinforced ECC Stay-in-Place Formwork. *Front Mater* 9, 872232. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2022.872232/BIBTEX>
- Wu, Z., Yuan, H., Asakura, T., Yoshizawa, H., Kobayashi, A., Kojima, Y., Ahmed, E., 2005. Peeling Behavior and Spalling Resistance of Bonded Bidirectional Fiber Reinforced Polymer Sheets. *Journal of Composites for Construction* 9, 214–226. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0268\(2005\)9:3\(214\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0268(2005)9:3(214))
- Xie, F., Tian, W., Diez, P., Zlotnik, S., Gonzalez, A.G., 2023. Bonding Performance of Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars under the Influence of Deformation Characteristics. *Polymers (Basel)* 15, 2604. <https://doi.org/10.3390/POLYM15122604>
- Xie, J.H., Hu, R.L., 2013. Experimental study on rehabilitation of corrosion-damaged reinforced concrete beams with carbon fiber reinforced polymer. *Constr Build Mater* 38, 708–716. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.023>
- Yang, J., Haghani, R., Blanksvärd, T., Lundgren, K., 2021. Experimental study of FRP-strengthened concrete beams with corroded reinforcement. *Constr Build Mater* 301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124076>
- Zabihi-Samani, M., Shayanfar, M.A., Safiey, A., Najari, A., 2018. Simulation of the Behavior of Corrosion Damaged Reinforced Concrete Beams with/without CFRP Retrofit. *Civil Engineering Journal* 4, 958–970. <https://doi.org/10.28991/cej-0309148>
- Zamin, M., Jumaat, B., Obaydullah, M., 2010. Structural Performance of Reinforced Concrete Beams Repairing from Spalling. *European Journal of Scientific Research* 45, 89–102.



- Zhang, S., Du, S., Ang, Y., Lu, Z., 2021. Study on performance of prestressed concrete hollow slab beams reinforced by grouting with ultra-high performance concrete. *Case Studies in Construction Materials* 15, e00583. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00583>
- Zhang, W., Zhu, X., Xu, S., Wang, Z., Li, W., 2019. Experimental study on properties of a new type of grouting material for the reinforcement of fractured seam floor. *Journal of Materials Research and Technology* 8, 5271–5282. <https://doi.org/10.1016/J.JMRT.2019.08.049>
- Zhang, X., Zhang, Y., Liu, Bin, Liu, Bowen, Wu, W., Yang, C., 2021. Corrosion-induced spalling of concrete cover and its effects on shear strength of RC beams. *Eng Fail Anal* 127, 105538. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2021.105538>
- Zhao, J., Luo, X., Wang, Z., Feng, S., Gong, X., Shumuye, E.D., 2021. Experimental study on bond performance of carbon- and glass-fiber reinforced polymer (CFRP/GFRP) bars and steel strands to concrete. *Materials* 14, 1–22. <https://doi.org/10.3390/MA1405126>



# Lampiran Disertasi

Lampiran Disertasi

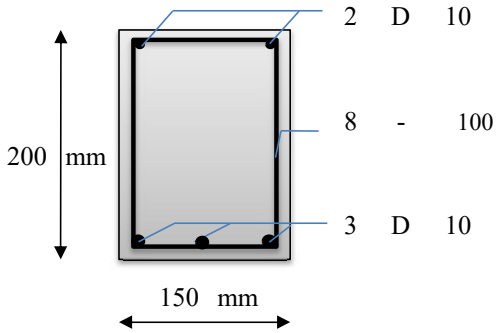
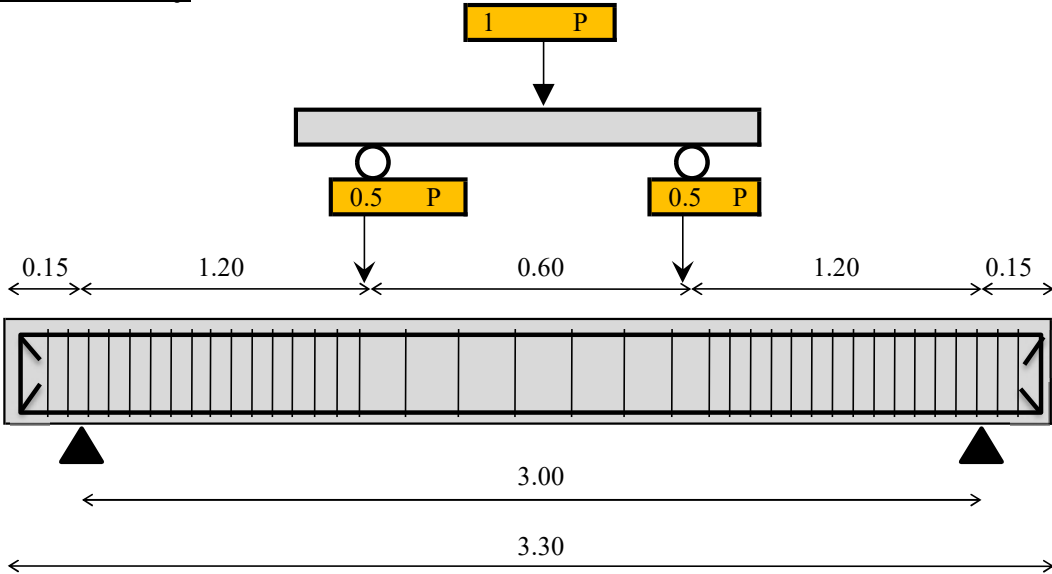


**LISA PENDAHULUAN**

**BAGIAN 1. PENGINTUPAN DATA AWAL**



**Par Benda Uji**



**Dimensi benda uji**  
 150 mm x 200 mm x 3300 mm

$$\frac{a}{d} = 7.27273$$

Menurut SK SNI - 03 - 2847 - 2002 (hal 63) , perencanaan tinggi balok minimum (h) dengan mutu baja 400 Mpa, adalah:

- balok dengan dua tumpuan sederhana

$$h = \frac{L}{16}$$

$$= \frac{3000}{16.0}$$

$$= 188 \text{ mm} \approx 200 \text{ mm}$$

$$b = \frac{d}{1.5} = \frac{165}{1.5} = 110.000 \text{ mm} \approx 150 \text{ mm}$$



**Penampang**

mensi balok (B x H) = 150 mm x 200 mm  
 langan tarik 3 D 10  
 langan tekan 2 D 10

**Data Material**

Kuat tekan beton  $f_c = 26.6$  MPa  
 Kuat leleh baja  $f_y = 430$  MPa

**Data Analisis**

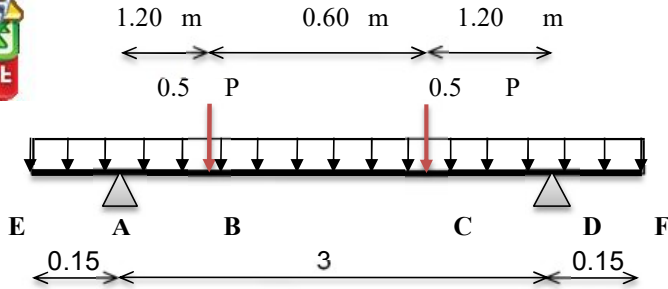
Kuat tekan beton  $f_c = 26.61$  MPa  
 Kuat leleh tulangan tarik  $f_y = 430$  MPa  
 Kuat leleh tulangan tekan  $f_y = 430$  MPa  
 Kuat leleh tulangan transversal  $f_y = 280$  MPa  
 Modulus elastisitas beton  $E_c = 24245.2162$  MPa  
 Modulus elastisitas baja  $E_s = 200000$  MPa  
 Modulus keruntuhan  $f_r = 0.7 f_c^{0.5} = 3.61$  MPa  
 Berat jenis beton  $g_c = 2400$  kg/m<sup>3</sup>  
 Lebar penampang  $b = 150$  mm  
 Tinggi penampang  $h = 200$  mm  
 Tinggi efektif penampang  $d = 165.00$  mm  
 Jarak tulangan tekan ke serat tekan terluar  $d' = 35.00$  mm  
 Beban berat sendiri balok  $q = 0.07$  t/m<sup>1</sup> = 0.72 kN/m<sup>1</sup>  
 Berat benda uji  $W = 0.24$  t = 237.60 kg  
 Luas tulangan tarik  $A_s = 3 D 10 = 235.619$  mm<sup>2</sup>  
 Luas tulangan tekan  $A_s' = 2 D 10 = 157.08$  mm<sup>2</sup>  
 Luas tulangan sengkang  $A_{vs} = 2 D 8 = 100.531$  mm<sup>2</sup>  
 Angka ekuivalensi beton terhadap baja  $n = \frac{E_s}{E_c} = 8.25$  ;  $nf = \frac{E_f}{E_c} = 0.86$

**Perhitungan nilai  $d_s$ ,  $d$ ,  $d'$  dan  $d_d$**

$d_s = 22 + 8 + \frac{10}{2}$	<b><math>d_s = 35</math> mm</b>
$d = 200 - 35$	<b><math>d = 165</math> mm</b>
$d' = 22 + 8 + \frac{10}{2}$	<b><math>d' = 35</math> mm</b>
$d_d = 200 - 22 - 8 - \frac{10}{2}$	<b><math>d_d = 165</math> mm</b>



**Gaya Dalam**



$$q = 0.15 \cdot 0.2 \cdot 2.4$$

$$= 0.072 \text{ t/m}$$

$$= 0.72 \text{ kN/m}$$

\*gambar dalam satuan meter

$$V_A = V_D = 0.5 P + \frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 3.3$$

$$= 0.5 P + 1.188 \text{ kN}$$

$$M_{\text{maks di tengah bentang}} = -\frac{1}{2} \cdot 0.72 \cdot 1.65^2 + (0.5 P + 1.188) \cdot 1.5 - 0.5 P \cdot 0.3$$

$$M_{\text{maks di tengah bentang}} = -0.9801 + 0.75 P + 1.782 - 0.15 P$$

$$= 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}$$

$$M_{\text{maks di tengah bentang}} = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}$$

**Bila digunakan satuan t.m maka :**

$$V_A = V_D = 0.5 P + \frac{1}{2} \cdot 0.072 \cdot 3.3$$

$$= 0.5 P + 0.1188 \text{ ton}$$

$$M_{\text{maks pada tengah bentang}} = -\frac{1}{2} \cdot 0.072 \cdot 1.65^2 + (0.5 P + 0.1188) \cdot 1.5 - 0.5 P \cdot 0.3$$

$$= -0.098 + 0.75 P + 0.1782 - 0.15 P$$

$$= 0.08019 + 0.6 P \text{ t.m}$$

$$M_{\text{maks pada tengah bentang}} = 0.08019 + 0.6 P \text{ t.m}$$

**Geser yang terjadi**

$$EA \quad ( 0.00 \leq x \leq 0.15 )$$

$$M_x = -0.5 q x^2$$

$$= -0.5 \cdot 0.072 x^2$$

$$= -0.036 x^2$$

$$M_{0.00} = 0 \text{ t.m}$$

$$M_{0.15} = -0.00081 \text{ t.m}$$

$$V_x = -0.072 x$$

$$V_{0.00} = 0 \text{ ton}$$

$$V_{0.15} = -0.0108 \text{ ton}$$



$$\underline{( 0.15 \leq x \leq 1.35 )}$$

$$= -0.5 \cdot x^2 + ( 0.5 P + 0.1188 ) ( x - 0.15 )$$

$$= -0.5 \cdot 0.072 x^2 + 0.5 P x - 0.075 P + 0.1188 x - 0.01782$$

$$= -0.036 x^2 + 0.5 P x + 0.1188 x - 0.075 P - 0.01782$$

$$M_{0.15} = -0.00081 + 0 P \quad \text{t.m}$$

$$M_{1.35} = 0.07695 + 0.6 P \quad \text{t.m}$$

$$V_x = -0.072 x + 0.5 P + 0.1188$$

$$V_{0.15} = 0.108 + 0.5 P \quad \text{ton}$$

$$V_{1.35} = 0.0216 + 0.5 P \quad \text{ton}$$

$$\underline{BC ( 1.35 \leq x \leq 1.95 )}$$

$$M_x = -0.036 x^2 + 0.5 P x + 0.1188 x - 0.075 P - 0.01782$$

$$- 0.5 P ( x - 1.35 )$$

$$= -0.036 x^2 + 0 P x + 0.1188 x - 0.6 P - 0.01782$$

$$M_{1.35} = 0.07695 + 0.6 P \quad \text{t.m}$$

$$M_{1.95} = 0.07695 + 0.6 P \quad \text{t.m}$$

$$\max ; -0.072 x + 0 P + 0.1188 = 0$$

$$x = 1.65 \quad \text{m}$$

$$M_{1.65} = 0.08019 + 0.6 P \quad \text{t.m}$$

$$V_x = -0.072 x + 0 P + 0.1188$$

$$V_{1.35} = 0.0216 + 0 P \quad \text{ton}$$

$$V_{1.95} = -0.0216 + 0 P \quad \text{ton}$$

$$\underline{CD ( 1.95 \leq x \leq 3.15 )}$$

$$M_x = -0.036 x^2 + 0 P x + 0.1188 x - 0.6 P - 0.01782$$

$$- 0.5 P ( x - 1.95 )$$

$$= -0.036 x^2 + -0.5 P x + 0.1188 x - 1.575 P - 0.01782$$

$$M_{1.95} = 0.07695 + 0.6 P \quad \text{t.m}$$

$$M_{3.15} = -0.00081 + 0 P \quad \text{t.m}$$

$$V_x = -0.072 x + -0.5 P + 0.1188$$

$$V_{1.95} = -0.0216 + -0.5 P \quad \text{ton}$$

$$V_{3.15} = -0.108 + -0.5 P \quad \text{ton}$$



(  $0.00 \leq x \leq 0.15$  ) ; dari kanan

$$= -0.5 q x^2$$

$$= -0.5 \cdot 0.072 x^2$$

$$= -0.036 x^2$$

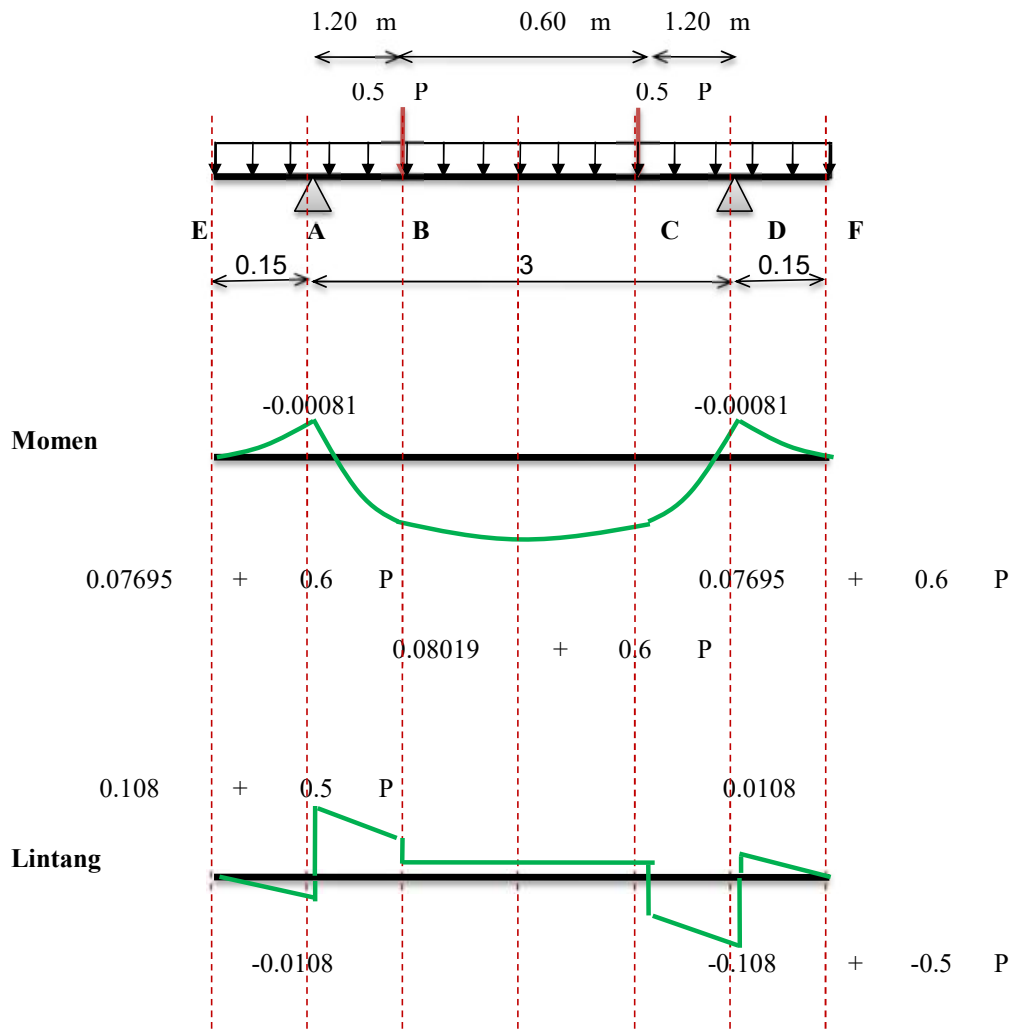
$M_{0.00} = 0 \text{ t.m}$

$M_{0.15} = -0.00081 \text{ t.m}$

$V_x = 0.072 x$

$V_{0.00} = 0 \text{ ton}$

$V_{0.15} = 0.0108 \text{ ton}$

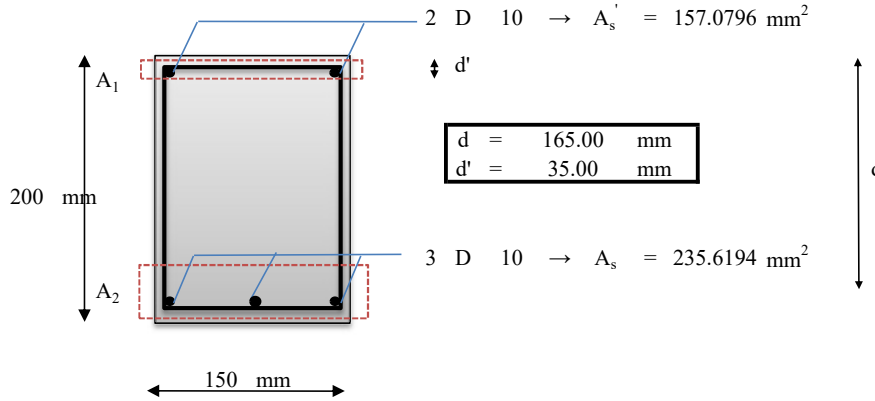




**LISA PENDAHULUAN**

**BAGIAN 2. ANALISA BEBAN AWAL RETAK BALOK**

**Luasan Transformasi**



$$A_{\text{beton}} = 150 \cdot 200 = 30000 \text{ mm}^2$$

$A_{\text{tulangan transformasi ke beton}}$  terdiri atas :

- $A_1 = \text{luas transformasi tulangan tekan (atas)}$
- $A_2 = \text{luas transformasi tulangan tarik (bawah)}$

$$A_1 = n \cdot A_s' = 8.249 \cdot 157.0796 = 1295.758 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = n \cdot A_s = 8.249 \cdot 235.6194 = 1943.637 \text{ mm}^2$$

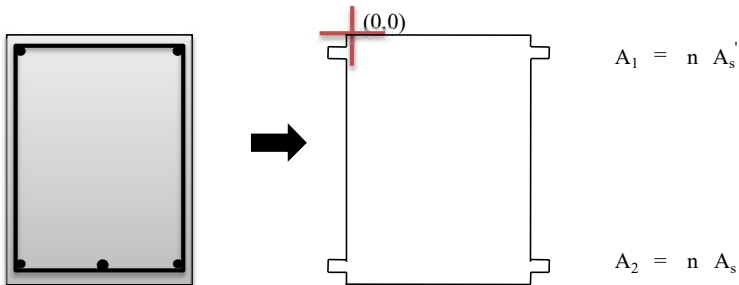
$$A_{\text{tulangan transformasi ke beton}} = A_1 + A_2 = 3239.394 \text{ mm}^2$$

$A_{\text{lubang pengganti tulangan}}$  terdiri atas :

$$A_1' = 157.0796 \text{ mm}^2$$

$$A_2' = 235.6194 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{lubang pengganti tulangan}} = A_1' + A_2' = 392.6991 \text{ mm}^2$$



$$A_1 = n \cdot A_s'$$

$$A_2 = n \cdot A_s$$

$$A = A_{\text{beton}} + A_{\text{tulangan transformasi ke beton}} - A_{\text{lubang pengganti tulangan}}$$

$$A = 32846.6953 \text{ mm}^2$$



**Momen terhadap Serat Tekan Terluar**

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum A_i y_i}{A} \\
 &= \frac{A_{\text{beton}} \cdot 0.5 h + (n - 1) A_s' d' + (n - 1) A_s d}{A} \\
 &\quad + \frac{(n - 1) A_{s1} d_1 + (n - 1) A_{s2} d_2}{A} \\
 &= \frac{30000 \cdot 0.5 \cdot 200 + 7.249 \cdot 5497.787 + 7.249 \cdot 38877.2091}{32846.7}
 \end{aligned}$$

**y<sub>atas</sub> = 101.1267 mm**

**Momen Inersia Transformasi**

$$\begin{aligned}
 I_{g \text{ beton}} &= \frac{b h^3}{12} + b h (y_{\text{atas}} - 0.5 h)^2 \\
 &= \frac{150 \cdot 200^3}{12} + 150 \cdot 200 (101.126659 - 0.5 \cdot 200)^2 \\
 &= 100038080.8 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ As trans - lubang}} &= (n - 1) A_s (d - y_{\text{atas}})^2 \\
 &= (8.249 - 1) \cdot 235.6194 \cdot (165 - 101.1267)^2 \\
 &= 6968374.638 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ As' trans - lubang}} &= (n - 1) A_s' (d' - y_{\text{atas}})^2 \\
 &= (8.249 - 1) \cdot 157.0796 \cdot (35.00 - 101.1267)^2 \\
 &= 4979137.72 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$

**I<sub>g trans</sub> = I<sub>g beton</sub> + I<sub>g As trans - lubang</sub> + I<sub>g As' trans - lubang</sub>**  
**I<sub>g trans</sub> = 111985593.2 mm<sup>4</sup>**

y<sub>bawah</sub> = h - y<sub>atas</sub>  
 = 200.00 - 101.13

**y<sub>bawah</sub> = 98.87 mm**

$$\begin{aligned}
 M_{\text{crack}} &= \frac{I_{g \text{ trans}} f_r}{y_{\text{bawah}}} \\
 &= \frac{111985593.2 \cdot 3.61}{98.87} \\
 &= 4089867.041 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

**M<sub>crack</sub> = 4.089867 kN.m**

0.8019 + 0.6 P = 4.089867  
**P = 5.479945 kN**

**$\frac{1}{2} P = 2.739973 \text{ kN}$**

**Alternatif Solusi dengan Menggunakan Penampang Bruto**

y<sub>atas</sub> = 0.5 h  
 = 0.5 · 200  
**y<sub>atas</sub> = 100 mm**

$$\begin{aligned}
 I_{g \text{ bruto}} &= \frac{b h^3}{12} \\
 &= \frac{150 \cdot 200^3}{12} \\
 &= 100000000 \text{ mm}^4
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} a_h &= h - y_{atas} \\ &= 200.00 - 100.00 \end{aligned}$$

$$a_h = \mathbf{100.00 \text{ mm}}$$

$$f_r = 3.61 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} M_{crack} &= \frac{I_{g \text{ bruto}} f_r}{y_{bawah}} \\ &= \frac{100000000}{100.00} \cdot 3.61 \\ &= 3610989.64 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

$$M_{crack} = \mathbf{3.61 \text{ kN.m}}$$

$$0.8019 + 0.6 P = 3.61099$$

$$P = \mathbf{4.681816 \text{ kN}}$$

$$\frac{1}{2} P = \mathbf{2.340908 \text{ kN}}$$

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat diketahui bahwa retak pertama terjadi pada beban

$$P = \mathbf{5.479945 \text{ kN}}$$

Berdasarkan hasil uji eksperimental diketahui bahwa retak pertama terjadi pada beban

$$P = \mathbf{3.33 \text{ kN}}$$

$$M_{crack} = \mathbf{2.7969 \text{ kN.m}}$$

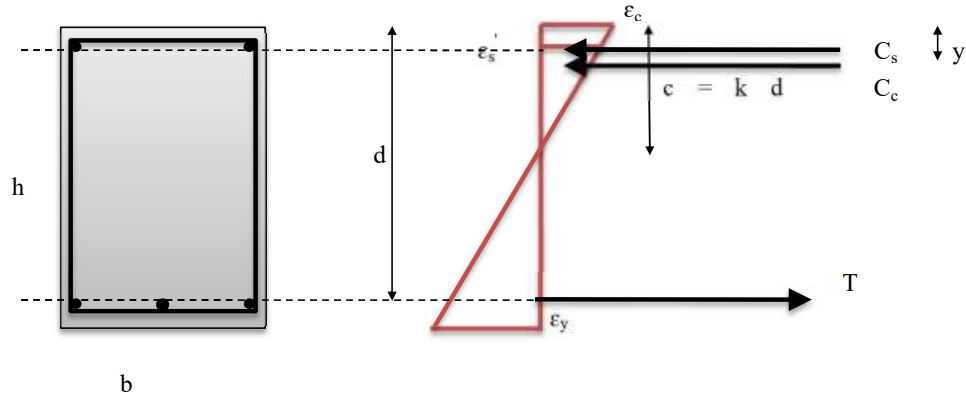




## ALISA PENDAHULUAN

### BAGIAN 3. ANALISA BEBAN AWAL TULANGAN LELEH PADA BALOK

Penentuan Nilai k dengan *Trial-Error*



$$d = 165.00 \text{ mm}$$

$$d' = 35.00 \text{ mm}$$

$$k = 0.31410037$$

$$k d = 51.8266 \text{ mm}$$

$$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{430}{200000}$$

$$\epsilon_y = 0.00215$$

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= \epsilon_s \frac{k d}{d - k d} \\ &= 0.00215 \cdot \frac{51.8266}{165.00 - 51.83} \end{aligned}$$

$$\epsilon_c = 0.00098457$$

$$\begin{aligned} \epsilon_s' &= \epsilon_c \frac{k d - d'}{k d} \\ &= 0.00098 \cdot \frac{51.8266 - 35.00}{51.83} \end{aligned}$$

$$\epsilon_s' = 0.00031966$$

$$\begin{aligned} f_s' &= E_s \epsilon_s' \\ &= 200000 \cdot 0.00032 \\ &= 63.9321 \text{ MPa} \end{aligned}$$

... bila nilai  $f_s'$  lebih kecil dari nol gunakan nol

$$f_s' = 63.9321 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} C_c &= 0.5 f_c b k d \\ &= 0.5 \cdot 26.61 \cdot 150.00 \cdot 51.83 \end{aligned}$$

$$C_c = 103435.61 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} C_s &= A_s' f_s' \\ &= 157.08 \cdot 63.9321 \end{aligned}$$

$$C_s = 10042.44 \text{ N}$$

$$\begin{aligned} T &= C_c + C_s \\ &= 103435.61 + 10042.44 \end{aligned}$$

$$T = 113478.04 \text{ N}$$



$$= A_s f_y$$
$$= 101316.36 \text{ N}$$

lai selisih T harus mendekati nol

$$C_c + C_s - A_s f_y = 0$$
$$113478.04 - 101316.36 = -12161.68084$$
$$= -12161.68 \dots \text{Cek ulang nilai k}$$

$$\mathbf{k = 0.31410037}$$

$$y = \frac{C_s d' + C_c \cdot 0.33 k d}{T}$$
$$= \frac{10042.44 \cdot 35.00 + 103435.61 \cdot 17.28}{113478.04}$$

$$y = 18.8441 \text{ mm}$$

$$J_d = d - y$$
$$= 165.00 - 18.8441$$

$$\mathbf{J_d = 146.16 \text{ mm}}$$

$$M_y = A_s f_y J_d$$
$$= 14807986.33 \text{ N.mm}$$

$$\mathbf{M_y = 14.81 \text{ kN.m}}$$

$$\mathbf{M_{maks \text{ di tengah}} = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}}$$

$$M_y = M_{maks \text{ pada tengah bentang}}$$
$$14.81 = 0.8019 + 0.6 P$$
$$14.01 = 0.6 P$$

$$\mathbf{P = 23.34 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{P = 2.33 \text{ ton}}$$

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat diketahui bahwa tulangan leleh pada beban

$$\mathbf{P = 23.34 \text{ kN}}$$

Berdasarkan hasil eksperimental maka dapat diketahui bahwa tulangan leleh pada beban

$$\mathbf{P = \quad \quad \text{ kN}}$$

$$\mathbf{M_y = 0.80 \text{ kN.m}}$$



## LISA PENDAHULUAN

### BAGIAN 4. ANALISA BEBAN *ULTIMATE* BALOK

#### ekan Nilai $\rho$ (apakah melebihi nilai $\rho_{max}$ atau tidak)

Untuk  $f_c \leq 30$  MPa

$$\beta_1 = 0.85$$

Untuk  $f_c > 30$  MPa

$$\beta_1 = 0.85 - \frac{0.05 (f_c - 30)}{7}$$

Karena  $f_c = 26.61$  MPa

Maka  $\beta_1 = 0.85$

$$a_b = \frac{600 \beta_1 d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 165.00}{600 + 430.00}$$

$$a_b = 81.699 \text{ mm}$$

$$\rho_b = \frac{A_{s_b}}{b \cdot d} = \frac{0.85 f_c a_b}{f_y d} = \frac{0.85 \cdot 26.61 \cdot 81.699}{430 \cdot 165}$$

$$\rho_b = 2.60\%$$

$$\rho_{max} = 0.75 \rho_b = 0.01953$$

$$\rho_{max} = 1.95\%$$

$$\rho_{min} = \frac{1.4}{f_y} = 0.00326$$

$$\rho_{min} = 0.33\%$$

$$\rho = \frac{(A_s - A_s')}{b \cdot d} = \frac{(235.619 - 157.08)}{150 \cdot 165}$$

$$\rho = 0.32\%$$

Cek:  $\rho \leq \rho_{max}$   
 $0.32\% < 1.95\% \dots \text{Ok}$

#### Kontrol Tulangan Tekan Sudah Leleh atau Belum

$$a = \frac{(A_s - A_s') f_y}{0.85 f_c b} = \frac{(235.61945 - 157.08) \cdot 430}{0.85 \cdot 26.61 \cdot 150}$$

$$a = 9.95387 \text{ mm}$$

$$a_{min \text{ leleh}} = \frac{600 \beta_1 d'}{600 - f_y} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 35}{600 - 430}$$

$$a_{min \text{ leleh}} = 105 \text{ mm}$$

Cek:  $a < a_{min \text{ leleh}}$   
 $9.953865 < 105 \dots \text{Tulangan tekan belum leleh (hitung ulang nilai a)}$

$$p = \frac{600 A_s' - A_s f_y}{1.7 f_c b} = \frac{600 \cdot 157.08 - 235.619 \cdot 430}{1.7 \cdot 26.61 \cdot 150}$$

$$p = -1.041684$$

$$q = \frac{600 \beta_1 d' A_s'}{0.85 f_c b} = \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 35 \cdot 157.08}{0.85 \cdot 26.61 \cdot 150}$$

$$q = 826.40228$$

$$a = (p^2 + q)^{0.5} - p = (1.0851046 + 826.402)^{0.5} - (-1.04168)$$

$$a = 29.8078 \text{ mm}$$



**Tulangan Tarik Sudah Leleh atau Belum**

$$a_s \text{ leleh} = \frac{600 \beta_1 d_d}{600 + f_y}$$

$$= \frac{600 \cdot 0.85 \cdot 165}{600 + 430}$$

**a<sub>maks leleh</sub> = 81.699 mm**

Cek : a < a<sub>maks leleh</sub>  
 29.807764 < 81.699 ... **Ok, tulangan tarik sudah leleh**

Karena tulangan tekan belum leleh, maka perlu dihitung tegangan pada tulangan tekan

$$f'_s = \frac{a - \beta_1 d'}{a} \cdot 600$$

$$= \frac{29.807764 - 0.85 \cdot 35}{29.8078} \cdot 600$$

$$= 1.1627315 \text{ MPa}$$

**f'<sub>s</sub> = 1.16273 MPa**

... **bila nilai f'<sub>s</sub> lebih kecil dari nol gunakan nol**

Cek : f'<sub>s</sub> < f<sub>y</sub>  
 1.1627315 < 430 ... **Ok**

**Momen Nominal Penampang**

$$M_{nc} = 0.85 f'_c a b ( d - 0.5 a )$$

$$= 0.85 \cdot 26.61 \cdot 29.8078 \cdot 150 ( 165 - 0.5 \cdot 29.808 )$$

**M<sub>nc</sub> = 15179779.02 N.mm**

$$M_{ns} = A_s' f'_s ( d - d' )$$

$$= 157.07963 \cdot 1.16273 \cdot ( 165 - 35 )$$

**M<sub>ns</sub> = 23743.38675 N.mm**

$$M_n = M_{nc} + M_{ns}$$

**M<sub>n</sub> = 15203522.4 N.mm**

atau

**M<sub>n</sub> = 1.5203522 t.m**

**Ø M<sub>n</sub> = 12162817.92 N.mm**

atau

**Ø M<sub>n</sub> = 1.2162818 t.m**

$$\text{Ø } M_n = M_{maks}$$

$$1.21628 = 0.08019 + 0.6 P$$

$$1.13609 = 0.6 P$$

**P<sub>maks</sub> = 1.8934863 ton**

Untuk beban 0.5 P maka :

**0.5 P<sub>maks</sub> = 0.9467432 ton**

**Momen Nominal Penampang tanpa Reduksi Lentur**

$$M_n = M_{maks}$$

$$1.52035 = 0.08019 + 0.6 P$$

$$1.44016 = 0.6 P$$

**P<sub>maks</sub> = 2.4002704 ton**

Untuk beban 0.5 P maka :

**0.5 P<sub>maks</sub> = 1.2001352 ton**

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil analisis balok maka beban maksimum (tanpa reduksi lentur) pada balok sebesar :

**P<sub>maks</sub> = 2.4003 ton**

Berdasarkan hasil eksperimental maka beban maksimum pada balok sebesar :

**P<sub>maks</sub> = 1.793 ton**

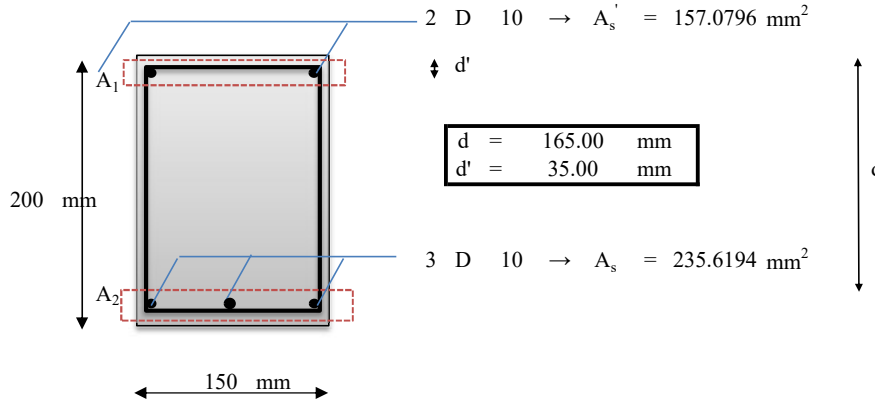
**M<sub>maks</sub> = 1.16 kN.m**



## LISA PENDAHULUAN

### BAGIAN 2. ANALISA BEBAN AWAL RETAK BALOK

#### Luasan Transformasi



$$A_{\text{beton}} = 150 \cdot 200 = 30000 \text{ mm}^2$$

$A_{\text{tulangan transformasi ke beton}}$  terdiri atas :

- $A_1 = \text{luas transformasi tulangan tekan (atas)}$
- $A_2 = \text{luas transformasi tulangan tarik (bawah)}$

$$A_1 = n A_s' = 8.249 \cdot 157.0796 = 1295.758 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = n A_s = 8.249 \cdot 235.6194 = 1943.637 \text{ mm}^2$$

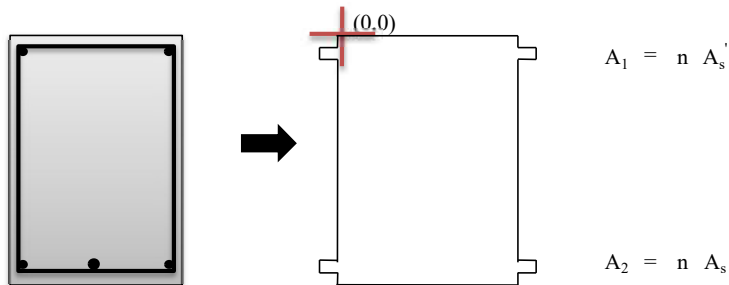
$$A_{\text{tulangan transformasi ke beton}} = A_1 + A_2 = 3239.394 \text{ mm}^2$$

$A_{\text{lubang pengganti tulangan}}$  terdiri atas :

$$A_1' = 157.0796 \text{ mm}^2$$

$$A_2' = 235.6194 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{lubang pengganti tulangan}} = A_1' + A_2' = 392.6991 \text{ mm}^2$$



$$A = A_{\text{beton}} + A_{\text{tulangan transformasi ke beton}} - A_{\text{lubang pengganti tulangan}}$$

$$A = 32846.6953 \text{ mm}^2$$



**Momen terhadap Serat Tekan Terluar**

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sum A_i y_i}{A} \\
 &= \frac{A_{\text{beton}} \cdot 0.5 h + (n - 1) A_s' d' + (n - 1) A_s d + n f A_f h}{A} \\
 &\quad + \frac{(n - 1) A_{s1} d_1 + (n - 1) A_{s2} d_2}{A} \\
 &= \frac{30000 \cdot 0.5 \cdot 200 + 7.249 \cdot 5497.787 + 7.249 \cdot 38877.2091 + 33837.52675}{32846.7}
 \end{aligned}$$

**y<sub>atas</sub> = 102.1568 mm**

**Momen Inersia Transformasi**

$$\begin{aligned}
 I_{g \text{ beton}} &= \frac{b h^3}{12} + b h (y_{\text{atas}} - 0.5 h)^2 \\
 &= \frac{150 \cdot 200^3}{12} + 150 \cdot 200 (102.156825 - 0.5 \cdot 200)^2 \\
 &= 100139556.8 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ As trans - lubang}} &= (n - 1) A_s (d - y_{\text{atas}})^2 \\
 &= (8.249 - 1) \cdot 235.6194 \cdot (165 - 102.1568)^2 \\
 &= 6745411.851 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ As' trans - lubang}} &= (n - 1) A_s' (d' - y_{\text{atas}})^2 \\
 &= (8.249 - 1) \cdot 157.0796 \cdot (35.00 - 102.1568)^2 \\
 &= 5135482.807 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ Frp}} &= n f \cdot A_f (h - y_{\text{atas}})^2 \\
 &= 0.862026 \cdot 195 \cdot (201.30 - 102.1568)^2 \\
 &= 1652267.974 \text{ mm}^4 \\
 I_{g \text{ trans}} &= I_{g \text{ beton}} + I_{g \text{ As trans - lubang}} + I_{g \text{ As' trans - lubang}} + I_{g \text{ FRP}}
 \end{aligned}$$

**I<sub>g trans</sub> = 113672719.4 mm<sup>4</sup>**

$$\begin{aligned}
 y_{\text{bawah}} &= h - y_{\text{atas}} \\
 &= 201.30 - 102.16
 \end{aligned}$$

**y<sub>bawah</sub> = 99.14 mm**

$$\begin{aligned}
 M_{\text{crack}} &= \frac{I_{g \text{ trans}} f_r}{y_{\text{bawah}}} \\
 &= \frac{113672719.4 \cdot 3.61}{99.14} \\
 &= 4140184.245 \text{ N.mm}
 \end{aligned}$$

**M<sub>crack</sub> = 4.140184 kN.m**

$$\begin{aligned}
 0.8019 + 0.6 P &= 4.140184 \\
 \mathbf{P} &= \mathbf{5.563807 \text{ kN}}
 \end{aligned}$$

**$\frac{1}{2} P = 2.781904 \text{ kN}$**



**atif Solusi dengan Menggunakan Penampang Bruto**

$$\begin{aligned} &= 0.5 h \\ &= 0.5 \cdot 201.30 \\ &= \mathbf{100.65 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{g \text{ bruto}} &= \frac{b h^3}{12} \\ &= \frac{150 \cdot 200^3}{12} \\ &= 100000000 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y_{\text{bawah}} &= h - y_{\text{atas}} \\ &= 201.30 - 100.65 \end{aligned}$$

$$y_{\text{bawah}} = \mathbf{100.65 \text{ mm}}$$

$$f_r = 3.61 \text{ MPa}$$

$$\begin{aligned} M_{\text{crack}} &= \frac{I_{g \text{ bruto}} f_r}{y_{\text{bawah}}} \\ &= \frac{100000000 \cdot 3.61}{100.65} \\ &= 3587669.786 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

$$M_{\text{crack}} = \mathbf{3.59 \text{ kN.m}}$$

$$\begin{aligned} 0.8019 + 0.6 P &= 3.58767 \\ \mathbf{P} &= \mathbf{4.64295 \text{ kN}} \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} P = \mathbf{2.321475 \text{ kN}}$$

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat diketahui bahwa retak pertama terjadi pada beban

$$\mathbf{P = 5.563807 \text{ kN}}$$

Berdasarkan hasil uji eksperimental diketahui bahwa retak pertama terjadi pada beban

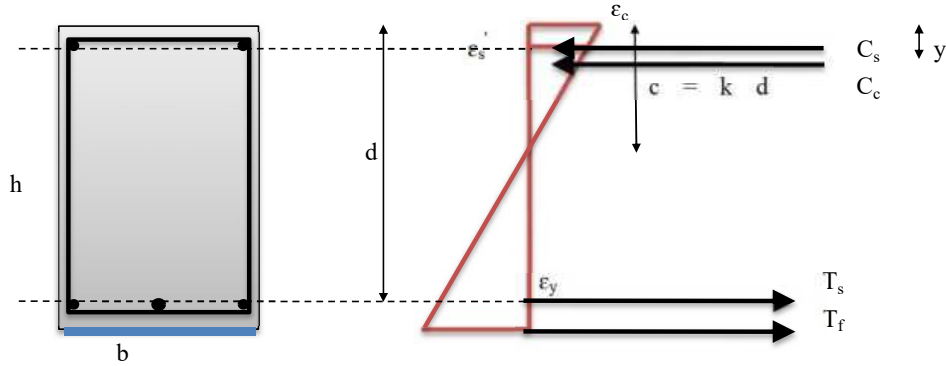
$$\mathbf{P = \text{ } \text{ kN}}$$

$$M_{\text{crack}} = \mathbf{4.140184 \text{ kN.m}}$$



**LISA PENDAHULUAN**  
**BAGIAN 3. ANALISA BEBAN AWAL TULANGAN LELEH PADA BALOK**

... dengan Nilai k dengan *Trial-Error*



$h' = 201.30 \text{ mm}$   
 $d = 165.00 \text{ mm}$   
 $d' = 35.00 \text{ mm}$

$k = 0.28091872$   
 $k h' = 56.5489 \text{ mm}$

$\epsilon_y = \frac{f_y}{E_s} = \frac{430}{200000}$

$\epsilon_y = 0.00215$

$\epsilon_c = \epsilon_s \frac{k h'}{d - k h'}$   
 $= 0.00215 \cdot \frac{56.5489}{165.00 - 56.55}$

$\epsilon_c = 0.00112106$

$\epsilon_f = \epsilon_c \frac{h_f - k h'}{k h'}$   
 $= 0.00112 \cdot \frac{201.30 - 56.55}{56.55}$

$\epsilon_f = 0.0028696$

$\epsilon_s' = \epsilon_c \frac{k h' - d'}{k d}$   
 $= 0.00112 \cdot \frac{56.5489 - 35.00}{56.55}$

$\epsilon_s' = 0.0004272$

$f_s' = E_s \epsilon_s'$   
 $= 200000 \cdot 0.00043$   
 $= 85.4399 \text{ MPa}$

... bila nilai  $f_s'$  lebih kecil dari nol gunakan nol

$f_s' = 85.4399 \text{ MPa}$

$C_c = 0.5 f_c b k h'$   
 $= 0.5 \cdot 26.61 \cdot 150.00 \cdot 56.55$

$C_c = 112860.54 \text{ N}$

$C_s = A_s' f_s'$   
 $= 157.08 \cdot 85.4399$

$C_s = 13420.86 \text{ N}$





$$\begin{aligned} &= C_c + C_s \\ &= 112860.54 + 13420.86 \\ &= \mathbf{126281.40 \text{ N}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} T &= A_s f_y + A_f \epsilon_f E_f \\ &= 113011.55 \text{ N} \end{aligned}$$

Nilai selisih T harus mendekati nol

$$\begin{aligned} C_c + C_s - A_s f_y - A_f \epsilon_f E_f &= 0 \\ 126281.40 - 113011.55 &= -13269.84801 \\ &= -13269.85 \quad \dots \text{Cek ulang nilai k} \end{aligned}$$

$$\mathbf{k = 0.28091872}$$

$$\begin{aligned} y &= \frac{C_s d' + C_c \cdot 0.33 k h'}{T} \\ &= \frac{13420.86 \cdot 35.00 + 112860.54 \cdot 18.85}{126281.40} \end{aligned}$$

$$y = 20.5661 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} J_d &= d - y \\ &= 165.00 - 20.5661 \end{aligned}$$

$$\mathbf{J_d = 144.43 \text{ mm}}$$

$$\begin{aligned} M_T &= (A_s f_y + A_f \epsilon_f E_f) J_d \\ &= 16322703.51 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

$$\mathbf{M_T = 16.32 \text{ kN.m}}$$

$$\mathbf{M_{maks \text{ di tengah}} = 0.8019 + 0.6 P \text{ kN.m}}$$

$$\begin{aligned} M_y &= M_{maks \text{ pada tengah bentang}} \\ 16.32 &= 0.8019 + 0.6 P \\ 15.52 &= 0.6 P \end{aligned}$$

$$\mathbf{P = 25.87 \text{ kN}}$$

$$\mathbf{P = 2.59 \text{ ton}}$$

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan maka dapat diketahui bahwa tulangan leleh pada beban

$$\mathbf{P = 25.87 \text{ kN}}$$

Berdasarkan hasil eksperimental maka dapat diketahui bahwa tulangan leleh pada beban

$$\mathbf{P = \text{ kN}}$$

$$\mathbf{M_v = 0.8019 \text{ kN.m}}$$

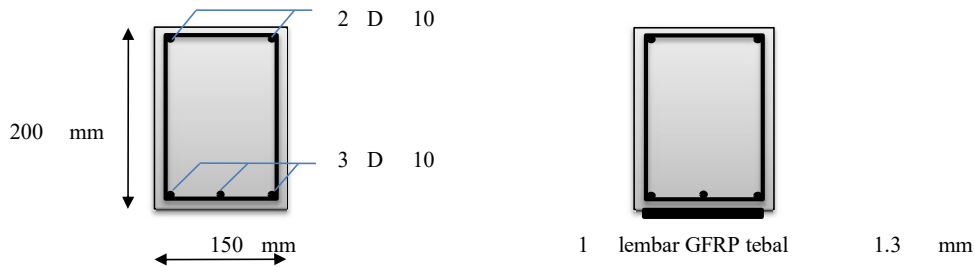


## LISA PENDAHULUAN

### BAGIAN 6. ANALISA DEBONDING FRP

alok	
panjang balok	$L = 3.3 \text{ m}$
Lebar balok	$w_f = 150 \text{ mm}$
Tinggi balok	$d_f = 200 \text{ mm}$
Jarak serat tekan ke titik berat tulangan tarik	$d = 165 \text{ mm}$
Jarak serat tekan ke titik berat tulangan tekan	$d' = 35 \text{ mm}$
Kuat tekan beton	$f'_c = 26.61 \text{ N/mm}^2$
Modulus elastisitas beton	
$E_c = 4700 \cdot f'_c^{0.5}$	$E_c = 24245.2162 \text{ N/mm}^2$
$= 4700 \cdot 26.61^{0.5}$	$E_c = 24245.2162 \text{ N/mm}^2$
Modulus elastisitas beton (hasil uji lab)	$E_c = 24245.2162 \text{ N/mm}^2$
Digunakan modulus elastisitas beton	$E_c = 24245.2162 \text{ N/mm}^2$
Kuat leleh tulangan	$f_y = 430 \text{ N/mm}^2$
Faktor reduksi kuat lentur	$\phi = 1$
Faktor reduksi kekuatan FRP	$\psi_f = 1$
Kuat momen tanpa FRP (tanpa reduksi lentur)	$M_n = 1.52035 \text{ t.m}$ $= 15.2035 \text{ kN.m}$
Kuat momen tanpa FRP (dengan reduksi lentur)	$\phi M_n = 1.52035 \text{ t.m}$ $= 15.2035 \text{ kN.m}$
( $\phi = 1$ )	

#### Gambar penampang benda uji sebelum dan setelah dipasang FRP



#### Data material FRP

Ketebalan per lembaran	$t_f = 1.3 \text{ mm}$
Kuat tarik ultimit	$f_{fu}^* = 460 \text{ N/mm}^2$
Regangan ultimit	$\epsilon_{fu}^* = 0.02 \text{ mm/mm}$
Modulus elastisitas	$E_f = 20900 \text{ N/mm}^2$
Jumlah lapisan FRP	$n = 1$

#### Data material tulangan

Kuat leleh tulangan	$f_y = 430 \text{ N/mm}^2$
Regangan leleh	$\epsilon_y = 0.00215 \text{ mm/mm}$
Modulus elastisitas	$E_s = 200000 \text{ N/mm}^2$

#### Properti material FRP untuk desain

Kondisi terekspos	Jenis FRP	Reduksi faktor lingkungan $C_E$
Interior	CFRP	0.95
	GFRP	0.75
Eksterior	CFRP	0.85
	GFRP	0.65
Lingkungan agresif yang mengandung zat kimia	CFRP	0.85
	GFRP	0.5



erial yang digunakan : **GFRP**

asi balok berada di **Eksterior**  
 ngga digunakan

$$\begin{aligned} \gamma_E &= \mathbf{0.65} \\ f_{fu} &= C_E \cdot f_{fu}^* \\ &= 0.65 \cdot 460 \\ &= 299 \text{ N/mm}^2 \\ \varepsilon_{fu} &= C_E \cdot \varepsilon_{fu}^* \\ &= 0.65 \cdot 0.02 \\ &= 0.013 \text{ mm/mm} \end{aligned}$$

**Perhitungan pre-eliminary**

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 1.05 - 0.05 \frac{f_c}{6.9} \\ &= 1.05 - 0.05 \cdot \frac{26.6107}{6.9} \end{aligned} \quad \boxed{\beta_1 = 0.85717}$$

$$\begin{aligned} A_s &= 3 \cdot D \cdot 10 \\ &= 3 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 10^2 \end{aligned} \quad \boxed{A_s = 235.619449 \text{ mm}^2}$$

$$\begin{aligned} A_s' &= 2 \cdot D \cdot 10 \\ &= 2 \cdot \frac{1}{4} \pi \cdot 10^2 \end{aligned} \quad \boxed{A_s' = 157.079633 \text{ mm}^2}$$

digunakan **1** lembar GFRP tebal **1.3** mm

$$\begin{aligned} A_f &= n \cdot t_f \cdot w_f \\ &= 1 \cdot 1.3 \cdot 150 \end{aligned} \quad \boxed{A_f = 195 \text{ mm}^2}$$

**Nilai regangan balok sebelum balok ditempel FRP**

Beban yang bekerja pada saat FRP ditempel hanya berat sendiri balok

$$n_{\text{ekivalen tulangan ke beton}} = 8.24905$$

Untuk memperkirakan nilai c dapat digunakan

$$0 = \frac{w_f \cdot c^2}{2} + [ n \cdot A_s + ( n - 1 ) ] \cdot c - n \cdot A_s \cdot d$$

$$0 = \frac{150}{2} \cdot c^2 + 1950.89 \cdot c - 320700 - 39853.7$$

$$0 = 75 \cdot c^2 + 1950.89 \cdot c - 360553.775$$

maka  $c = \mathbf{57.53867167 \text{ mm}}$

berdasarkan hasil analisa awal leleh maka :

$$k = \mathbf{0.31410037} \text{ (saat kondisi awal tulangan leleh setelah retak)}$$

$$\begin{aligned} c &= k \cdot d \\ &= \mathbf{51.8265611 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{cr} &= \frac{1}{3} w_f \cdot c^3 + n \cdot A_s \cdot ( d - c )^2 \\ &\quad + ( n - 1 ) \cdot A_s' \cdot ( c - d' )^2 \\ &= \frac{1}{3} \cdot 150 \cdot 51.8266^3 + 8.249 \cdot 235.619 \cdot ( 165 - 51.8266 )^2 \\ &\quad + 7.249 \cdot 157.0796 \cdot ( 51.8266 - 35 )^2 \end{aligned}$$

$$\boxed{I_{cr} = 32177224.56 \text{ mm}^4}$$



$$\begin{aligned} \epsilon_{bi} &= \frac{M_{DL} (d_f - k d)}{I_{cr} E_c} \\ &= \frac{801900 (200 - 0.31410037 \cdot 165)}{2741000000 \cdot 24245.2162} \end{aligned}$$

**$\epsilon_{bi} = 1.788E-06$**

**Menentukan nilai regangan desain untuk FRP**

$$\begin{aligned} \epsilon_{fd} &= 0.41 \left( \frac{f'_c}{n E_f t_f} \right)^{0.5} \leq 0.9 \epsilon_{fu} \\ &= 0.41 \left( \frac{26.6107065}{1 \cdot 20900 \cdot 1.3} \right)^{0.5} \\ &= 0.0128312 \leq 0.9 \cdot 0.02 \\ &0.0128312 < 0.018 \end{aligned}$$

... debonding akan terjadi sebelum FRP putus

gunakan

**$\epsilon_{fd} = 0.0128312$**

**Perkiraan nilai c (akan dicek kembali nantinya)**

nilai c perkiraan sekitar

$c = 0.2 d$

(nilai c selanjutnya akan dicek kembali apakah sesuai atau tidak)

$c = 0.2 d$

$= 0.2 \cdot 165$

$= 33 \text{ mm}$

coba nilai

$c = 46.114 \text{ mm}$

**Menentukan regangan efektif dari perkuatan FRP**

$$\begin{aligned} \epsilon_{fe} &= 0.003 \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \epsilon_{fd} \\ &= 0.003 \left( \frac{200 - 46.114}{46.114} \right) - 1.788E-06 \leq 0.0128312 \\ \epsilon_{fe} &= 0.01001 < 0.012831199 \end{aligned}$$

gunakan

**$\epsilon_{fe} = 0.01000945$**

**Regangan pada beton sebesar:**

$$\begin{aligned} \epsilon_c &= ( \epsilon_{fe} + \epsilon_{bi} ) \left( \frac{c}{d_f - c} \right) \\ &= ( 0.01000945 + 1.788E-06 ) \left( \frac{46.114}{200 - 46.114} \right) \end{aligned}$$

**$\epsilon_c = 0.003$**

**Menghitung regangan yang terjadi pada tulangan tarik**

$$\begin{aligned} \epsilon_s &= ( \epsilon_{fe} + \epsilon_{bi} ) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right) \\ &= ( 0.01000945 + 1.788E-06 ) \left( \frac{165 - 46.114}{200 - 46.114} \right) \end{aligned}$$

**$\epsilon_s = 0.00773427$**



**itung regangan yang terjadi pada tulangan tekan**

$$\frac{\epsilon_s}{d - c} = \frac{\epsilon_s'}{c - d'}$$

$$\epsilon_s' = \frac{\epsilon_s}{d - c} \cdot (c - d')$$

$$= \frac{0.007734267}{165 - 46.114} \cdot (46.114 - 35)$$

= 0.00072303 ... tulangan tekan sudah meleleh  
 gunakan  $\epsilon_s' = 0.000723034$

**Menghitung tegangan yang terjadi pada tulangan dan FRP**

$$f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y \quad f_s' = E_s \epsilon_s' \leq f_y$$

$$= 200000 \cdot 0.00773427 \quad = 200000 \cdot 0.00072303$$

$$= 1546.85345 \text{ N/mm}^2 \quad = 144.6068439 \text{ N/mm}^2$$

$$f_s = 1546.85345 > 430 \quad f_s' = 144.606844 < 430$$

gunakan

$$f_s = 430 \text{ N/mm}^2$$

gunakan

$$f_s' = 144.606844 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{fc} = E_f \epsilon_{fc}$$

$$= 20900 \cdot 0.01000945$$

$$= 209.1974022 \text{ N/mm}^2$$

**Mengecek kesesuaian nilai c**

$$\epsilon'_c = \frac{1.7 f'_c}{E_c}$$

$$= \frac{1.7 \cdot 26.61071}{24245.21615}$$

$$= 0.00186586$$

$$\beta_1 = \frac{4 \epsilon'_c - \epsilon_c}{6 \epsilon'_c - 2 \epsilon_c}$$

$$= \frac{4 \cdot 0.001865861 - 0.003}{6 \cdot 0.001865861 - 2 \cdot 0.003}$$

$$= 0.85915332$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \epsilon'_c \epsilon_c - \epsilon_c^2}{3 \beta_1 \epsilon'_c^2}$$

$$= \frac{3 \cdot 0.001865861 \cdot 0.003 - 0.003^2}{3 \cdot 0.859153318 \cdot 0.00186586^2}$$

$$= 0.86844073$$

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fc} - A_s' f_s'}{\alpha_1 f'_c + \beta_1 w_f}$$

$$c = \frac{235.619449 \cdot 430 + 195 \cdot 209.197402 - 157.08 \cdot 144.607}{0.86844073 \cdot 26.6107 + 0.85915332 \cdot 150}$$

$$= 40.0892437 \text{ mm}$$

$$c = 40.0890 \text{ mm}$$

**Nilai c asumsi awal = 46.114 mm ... Ganti nilai c hingga sesuai**

**Kontribusi tulangan terhadap kuat lentur**

$$M_{ns} = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$= 235.619449 \cdot 430 \left( 165 - \frac{0.85915 \cdot 46.114}{2} \right)$$

$M_{ns} = 14710173.61 \text{ N.mm}$

$$= 1.47102 \text{ t.m}$$



$$M_{ns}' = A_s' f_s' (d - d')$$

$$= 157.08 \cdot 144.6068 \cdot (165 - 35)$$

$$M_{ns}' = \boxed{2952922.69 \text{ N.mm}} = 0.29529 \text{ t.m}$$

**Reinforcement FRP terhadap kuat lentur**

$$M_{nf} = A_f f_{fc} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$$

$$= 195 \cdot 209.1974022 \left( 200 - \frac{0.85915 \cdot 46.114}{2} \right)$$

$$M_{nf} = \boxed{7350600.057 \text{ N.mm}} = 0.73506 \text{ t.m}$$

**Kuat lentur nominal gabungan**

$$\phi M_n = \phi [ M_{ns} + M_{ns}' + \psi_f M_{nf} ]$$

$$= 1 [ 1.471017 + 0.29529 + 1 \cdot 0.73506 ]$$

$$= 2.50137 \text{ t.m}$$

$$M_n = 2.50137 \text{ t.m}$$

$$M_n = M_{maks}$$

$$2.5013696 = 0.08019 + 0.6 P$$

$$2.4211796 = 0.6 P$$

$$\boxed{P_{maks} = 4.0353 \text{ ton}}$$

Untuk beban 0.5 P maka :

$$\boxed{0.5 P_{maks} = 2.01765 \text{ ton}}$$

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil analisis balok dengan FRP maka beban maksimum diperoleh :

$$\boxed{P_{maks} = 4.0353 \text{ ton}} \quad 40.353 \text{ kN}$$

Untuk balok tanpa perkuatan FRP :

$$\boxed{P_{maks} = 2.40027 \text{ ton}}$$

Persentase kenaikan terhadap beban awal

$$= \frac{4.0353 - 2.40027}{2.40027} \times 100 \%$$

$$= \boxed{68.1185\%}$$

Berdasarkan hasil eksperimental maka dapat diketahui bahwa beban maks berada pada :

$$\boxed{P = 30 \text{ kN}}$$

$$\boxed{M_y = 18.0802 \text{ kN.m}}$$



# *Dokumentasi Penelitian*

Dokumentasi Penelitian



Fabrikasi Pembesian



Pembuatan bekisting balok





Penempatan Tulangan



Pemasangan SG Baja Tulangan



Slump Test



Slump Test



Pengecoran Balok



Pemadatan Beton dengan Vibrator



Hasil akhir pengecoran Balok



Perawatan Beton/Curing



Uji Kuat Tarik Tulangan



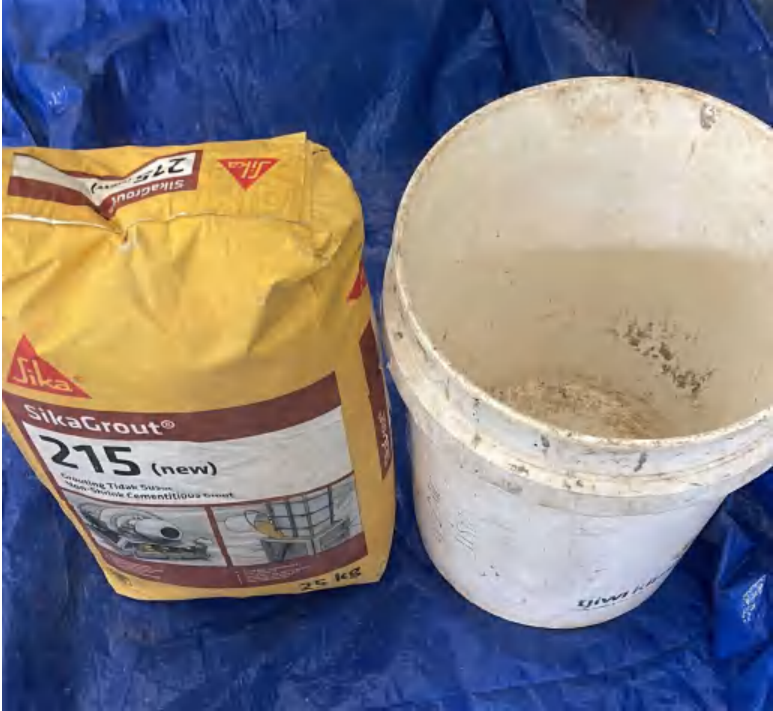
Pemasangan Strain Gauges Beton



Pembuatan lubang Angkur Dynabolt



Pemasangan Angkur Dynabolt



Mortar Grouting



Pengadukan Mortar Grouting





Aplikasi Sika Bond sebelum penuangan Mortar Grouting



Beton setelah pengecoran Mortar Grouting



Persiapan Lembaran GFRP



Aplikasi Epoxy Resin



Pemasangan Lembaran GFRP



Perataan permukaan / Smoothing