

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 PENDAHULUAN

Pada bab ini akan ditampilkan hasil-hasil dari pengujian yang telah dilakukan di laboratorium. Hasil penelitian ini dimulai dari menampilkan hasil dari pengujian karakteristik material beton bertulang hingga hasil pengujian kuat tekan pada kolom beton bertulang yang diperkuat dengan *Glass Fibre Reinforced Polymer*. Data yang dibutuhkan dalam menganalisis antara lain:

1. data pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat halus,
2. data pemeriksaan berat jenis dan penyerapan air agregat kasar,
3. data modulus halus butir (MHB) agregat halus,
4. data modulus halus butir (MHB) agregat kasar,
5. data uji kandungan lumpur dalam pasir,
6. data kuat tekan beton riil (pengujian kuat tekan silinder),
7. data kuat tarik baja riil,
8. data beban dan simpangan kolom tanpa *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*,
9. data beban dan simpangan kolom dengan perkuatan *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*,
10. gambar pola retak dan kerusakan yang terjadi pada kolom tanpa dan dengan perkuatan *Glass Fibre Reinforced Polymer (GFRP)*, dan
11. gambar pola keruntuhan kolom.

Hasil pengujian kemudian dianalisis untuk mendapatkan kuat tekan kolom beton bertulang dengan dan tanpa *GFRP*. Hasil pengujian yang telah dianalisis akan ditampilkan dalam bentuk tabel maupun grafik guna memberikan kemudahan dalam mencapai tujuan dari penelitian ini.

5.2 HASIL PENELITIAN

5.2.1 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Halus

Pemeriksaan berat jenis adalah perbandingan relatif massa jenis suatu zat dan massa jenis air murni. Pemeriksaan penyerapan air adalah untuk mengetahui kemampuan agregat dalam menyerap air. Berdasarkan hasil pemeriksaan yang dilakukan terhadap berat jenis dan penyerapan air pada agregat halus maka didapatkan data hasil sebagai berikut.

Berat Jenis Curah	= 2,7535
Berat Jenis Jenuh Kering Muka	= 2,7824
Berat Jenis Semu	= 2,8533
Penyerapan Air	= 1,051 %

5.2.2 Pemeriksaan Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar

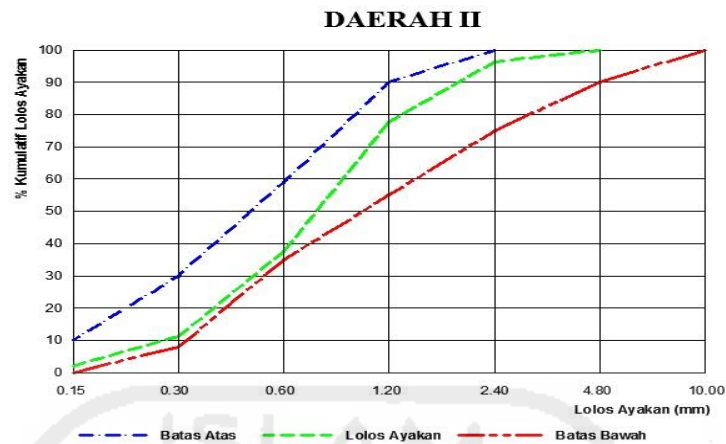
Pemeriksaan berat jenis adalah perbandingan relatif massa jenis suatu zat dan massa jenis air murni. Pemeriksaan penyerapan air adalah untuk mengetahui kemampuan agregat dalam menyerap air. Berdasarkan hasil pemeriksaan yang dilakukan terhadap berat jenis dan penyerapan air pada agregat kasar maka didapatkan data sebagai berikut.

Berat Jenis Curah	= 2,4215
Berat Jenis Jenuh Kering Muka	= 2,4988
Berat Jenis Semu	= 2,6242
Penyerapan Air	= 3,1885 %

5.2.3 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Halus

Pemeriksaan modulus halus butir dilakukan untuk mengetahui suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan dan kekasaran butiran-butiran agregat. Hasil pemeriksaan diperoleh nilai MHB agregat halus sebesar 2,749.

Berdasarkan hasil uji, pasir yang digunakan dalam penelitian termasuk dalam daerah gradasi 2 (dua) yaitu kategori pasir agak kasar. Hal tersebut dapat diketahui dari hasil uji yang tertuang pada Gambar 5.1.

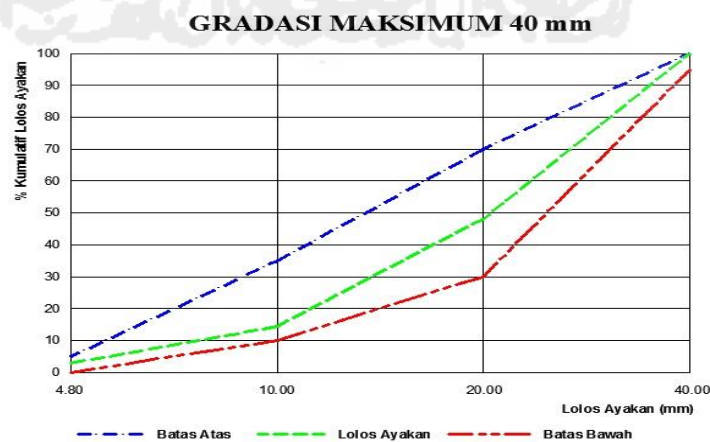


Gambar 5.1 Daerah gradasi II

5.2.4 Modulus Halus Butir (MHB) Agregat Kasar

Pemeriksaan modulus halus butir dilakukan untuk mengetahui suatu indeks yang dipakai untuk ukuran kehalusan dan kekasaran butiran-butiran agregat. Hasil pemeriksaan diperoleh nilai MHB agregat kasar sebesar 3,323. Hasil pemeriksaan tersebut dapat juga dijadikan pedoman dalam menentukan daerah gradasi kerikil sehingga dapat mengklasifikasikan bahwa agregat kasar yang digunakan masuk pada kategori kerikil tertentu sesuai yang telah disyaratkan.

Berdasarkan hasil uji, kerikil yang digunakan dalam penelitian termasuk dalam daerah gradasi butir maksimum 40 mm. Hal tersebut dapat diketahui dari hasil uji yang tertuang pada Gambar 5.2.



Gambar 5.2 Gradasi maksimum 40 mm

5.2.5 Uji Kandungan Lumpur dalam Pasir

Pemeriksaan uji kandungan lumpur dalam pasir dilakukan untuk mengetahui tingkat kadar lumpur pada agregat halus. Kadar lumpur dalam agregat mempengaruhi terhadap kualitas agregat yang akan digunakan. Hasil kadar lumpur yang dikandung oleh pasir sebesar 0,8 %. Menurut Peraturan Umum Bahan Bangunan di Indonesia 1982 (PUBI-1982). Berat bagian yang lolos ayakan no 200 (0,075 mm) adalah :

- a. untuk pasir maksimum 5 %
- b. untuk kerikil maksimum 1 %

Berdasarkan hasil pemeriksaan kadar lumpur yang dilakukan didapat nilai kadar lumpur sebesar 0,8 %. Jika dihubungkan dengan persyaratan yang diisyaratkan oleh PUBI-1982 yang menyatakan bahwa kadar lumpur maksimum yang diperbolehkan pada agregat halus yang digunakan untuk campuran adalah 5%. Maka dapat ditarik kesimpulan bahwa pasir yang digunakan sudah memenuhi persyaratan PUBI-1982.

5.2.6 Kuat Tekan Beton

Adukan beton pada penelitian ini dirancang menurut SNI 03-2834-2000 dengan kuat tekan beton rencana sebesar 20 MPa. Perbandingan campuran beton berdasarkan berat antara semen : pasir : kerikil adalah 1 : 2,27 : 3,14. Berdasarkan hasil uji kuat tekan silinder ukuran 150 mm x 300 mm kuat tekan beton rata-rata yang didapat pada umur 7 hari sebesar 23,92 MPa dan dikonversikan pada umur 28 hari sebesar 34,17 MPa lebih besar dari kuat tekan beton rencana yaitu 20 MPa. Selanjutnya untuk menyakinkan kuat tekan terpasang, *hammer test* dilakukan pada kolom. Hasil kuat tekan dengan pengujian ini ternyata menghasilkan nilai di atas kuat tekan rencana, yaitu untuk KS (Kolom Standar) sebesar 29,16 MPa, KG1 (Kolom *Glass* 1) sebesar 32,18 MPa, dan KG2 (Kolom *Glass* 2) sebesar 27,85 MPa. Dengan demikian mutu beton terpasang sesuai dengan rencana dan memenuhi syarat. Hal ini dapat terjadi dikarenakan beberapa hal, antara lain:

1. kualitas dari bahan material yang digunakan,

2. proses pemadatan beton saat dicetak, dan
3. proses perawatan beton yang sudah dicetak.

Kualitas dari material yang digunakan berpengaruh terhadap kuat tekan yang dihasilkan pada pengujian ini. kerikil yang bersudut dan bukan kerikil yang bulat yang digunakan dalam pengujian ini, sehingga kerikil dapat saling mengunci. Selain itu, kerikil yang digunakan untuk campuran beton ini sebelum digunakan dicuci terlebih dahulu, dipilih kerikil yang warnanya agak kehitam-hitaman dan dikeringkan sampai permukaannya kering dalam kondisi jenuh kering muka, sehingga bersih dari kotoran-kotoran yang dapat mengganggu mutu beton.

5.2.7 Kuat Tarik Baja

Pengujian kuat tarik baja dilakukan dengan maksud untuk mengetahui kualitas dari baja tulangan yang akan digunakan untuk kolom. Baja tulangan yang digunakan adalah diameter P12 untuk tulangan pondasi, P10 untuk tulangan pokok dan P8 untuk tulangan sengkang. Dari hasil pengujian dan perhitungan didapatkan rata-rata mutu baja sebesar:

$$P12 = 329,075 \text{ MPa}$$

$$P10 = 346,62 \text{ MPa}$$

$$P8 = 311,765 \text{ MPa}$$

5.3 PENGUJIAN KOLOM BETON BERTULANG

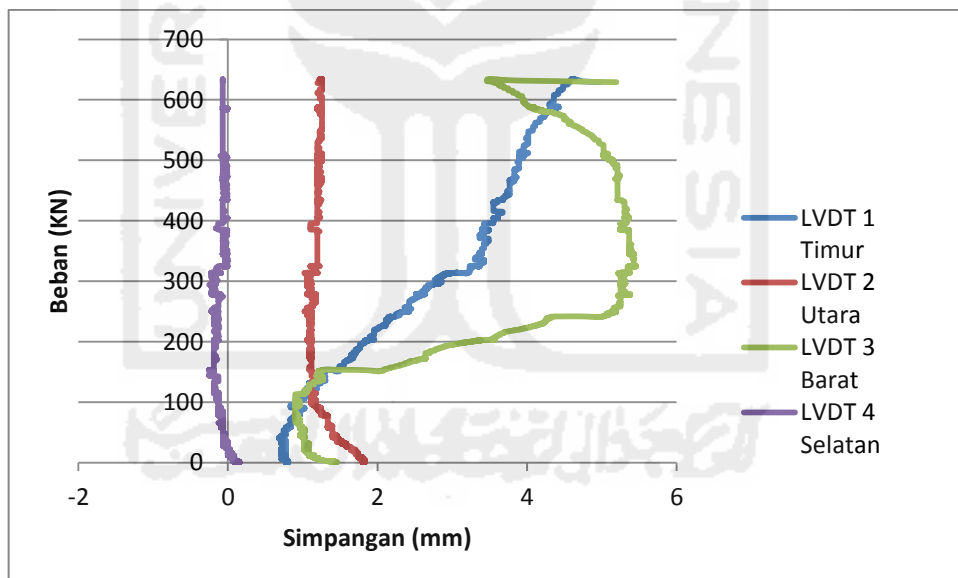
Subbab ini berisi tentang hasil pengujian berupa respon beban-simpangan, beban-penurunan, dan tegangan-regangan baja tulangan *strain gauge* pada benda uji KS, KG1 dan KG2 yang dipresentasikan dalam bentuk grafik sebagai berikut.

5.3.1 Hubungan Beban-Simpangan Benda Uji Kolom

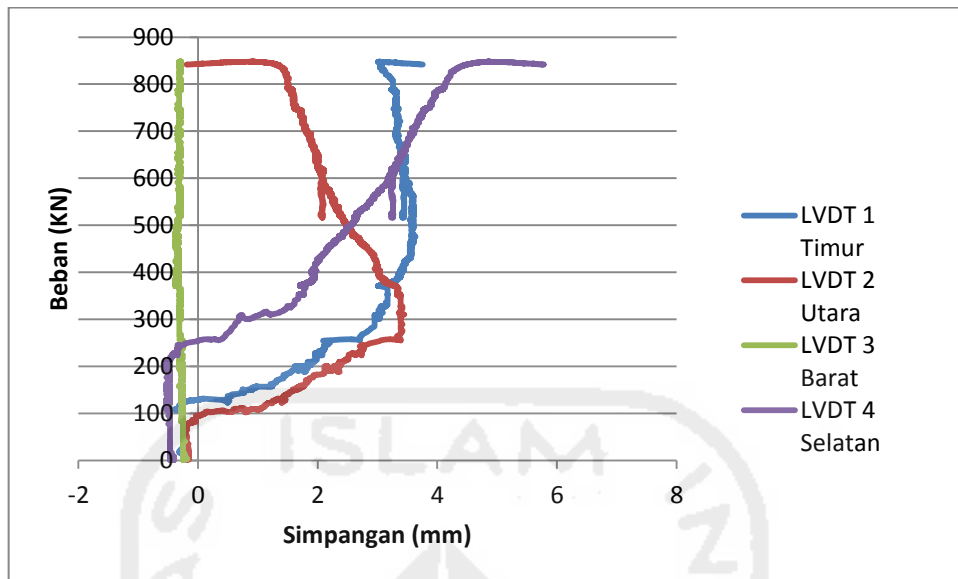
Pada pengujian ini data simpangan diambil dari 4 sisi dan diambil pada tengah bentang. Besarnya simpangan ini diukur dengan menempatkan LVDT pada tempat-tempat tersebut.



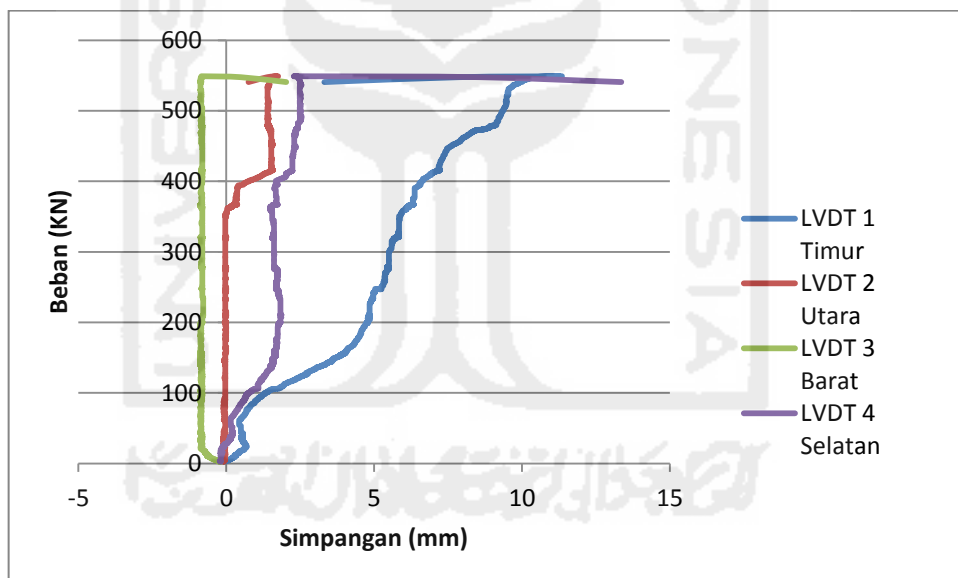
Gambar 5.3 Penempatan posisi LVDT pada 4 sisi kolom



Gambar 5.4 Hubungan beban-simpangan LVDT Kolom Standar (KS)



Gambar 5.5 Hubungan beban-simpangan LVDT Kolom *Glass 1* (KG1)



Gambar 5.6 Hubungan beban-simpangan LVDT Kolom *Glass 2* (KG2)

Berdasarkan Gambar 5.4 sampai dengan gambar 5.6 terdapat perbedaan simpangan yang terjadi pada kolom-kolom tersebut. Kolom-kolom yang diuji pada pengujian ini mempunyai dimensi yaitu tinggi dan luasan yang sama akan tetapi terdapat 1 buah kolom tanpa perkuatan sebagai kolom standar dan 2 buah kolom dengan perkuatan pada bagian lapangan dengan menggunakan *GFRP*

sehingga kemampuan menahan beban dan nilai simpangan pun berbeda-beda. LVDT 1, LVDT 2, LVDT 3, dan LVDT 4 digunakan untuk mengetahui besarnya simpangan pada daerah tengah kolom dimana pada daerah ini kemungkinan mengalami daerah simpangan terbesar.

Berdasarkan Gambar 5.4 dapat dilihat bahwa nilai simpangan dari tiap LVDT benda uji KS mempunyai nilai simpangan yang berbeda-beda. Sebagai contoh untuk nilai simpangan maksimal yang didapat pada LVDT 1 sebesar 4,98084 mm, LVDT 2 sebesar 1,83209 mm, LVDT 3 sebesar 5,4592 mm, dan LVDT 4 sebesar 0,15298 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah timur dan barat nilai simpangan meningkat seiring dengan peningkatan pembebanan karena adanya pengembangan pada daerah tersebut sedangkan nilai simpangan untuk arah utara dan selatan tidak mengalami peningkatan (kondisi tetap) saat pembebanan ditingkatkan.

Berdasarkan Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa nilai simpangan dari tiap LVDT benda uji KG1 mempunyai nilai simpangan yang berbeda-beda. Sebagai contoh untuk nilai simpangan maksimal yang didapat pada LVDT 1 sebesar 3,75745 mm, LVDT 2 sebesar 3,449 mm, LVDT 3 sebesar -0,18906 mm, dan LVDT 4 sebesar 5,7786 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah timur, utara, dan selatan nilai simpangan mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan pembebanan sedangkan nilai simpangan arah barat tidak mengalami peningkatan (kondisi tetap) saat pembebanan ditingkatkan dan nilainya menjadi minus dikarenakan pada saat dimulainya pengujian, nilai pada *data logger* tidak nol. Untuk arah utara nilai simpangan terjadi penurunan hal ini dikarenakan saat peningkatan pembebanan, terjadi penurunan pada pondasi yang disebabkan tidak rataanya permukaan lantai kerja sehingga pondasi harus menyesuaikan posisi kedudukannya guna menemukan keseimbangan yang baru.

Berdasarkan Gambar 5.6 dapat dilihat bahwa nilai simpangan dari tiap LVDT benda uji KG2 mempunyai nilai simpangan yang berbeda-beda. Sebagai contoh untuk nilai simpangan maksimal yang didapat pada LVDT 1 sebesar 11,35479 mm, LVDT 2 sebesar 1,75435 mm, LVDT 3 sebesar 2,02643 mm, dan LVDT 4 sebesar 13,36038 mm. Hal ini menunjukkan bahwa pada arah timur dan

selatan nilai simpangan mengalami peningkatan seiring dengan peningkatan pembebanan sedangkan pada arah barat dan selatan nilai simpangannya tidak mengalami peningkatan (kondisi tetap) saat pembebanan ditingkatkan. Untuk arah timur dan utara nilai simpangan mengalami penurunan sedangkan untuk arah barat dan selatan nilai simpangan mengalami peningkatan, hal ini dikarenakan pada saat pembebanan maksimum tercapai terjadi keruntuhan pada bagian bawah kolom, sehingga menyebabkan posisi kolom berpindah, arah perpindahan kolom lebih cenderung ke arah barat dan selatan. Hasil dari pembacaan simpangan maksimum dari setiap benda uji dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Simpangan maksimum pada semua benda uji

Benda Uji	No LVDT	Simpangan Terbesar (mm)
KS	1 (timur)	4,98084
	2 (utara)	1,83209
	3 (barat)	5,45920
	4 (selatan)	0,15298
KG1	1 (timur)	3,75745
	2 (utara)	3,44900
	3 (barat)	-0,18906
	4 (selatan)	5,77860
KG2	1 (timur)	11,35479
	2 (utara)	1,75435
	3 (barat)	2,02643
	4 (selatan)	13,36038

Pada benda uji KS nilai simpangan untuk arah timur dan barat lebih besar dibandingkan dengan arah utara dan selatan, hal ini disebabkan terjadi pengembangan pada arah tersebut. Sebagaimana diketahui bahwa akibat gaya aksial, kolom disatu sisi akan mengalami pemendekan tetapi disisi lain kolom akan mengembang kearah samping. Benda uji KG1 dan KG2 nilai simpangan untuk arah timur dan barat terdapat selisih yang besar, dimana pada arah timur nilai simpangan lebih besar dari arah barat, untuk arah utara dan selatan juga terdapat selisih yang besar, dimana pada arah selatan nilai simpangan lebih besar dari arah utara, hal ini mungkin disebabkan karena posisi pembebanan yang

kurang sentris dimana posisi pembebanan lebih cenderung ke arah timur dan selatan, dan juga kemungkinan bisa disebabkan karena adanya tegangan yang tinggi terhadap kolom, karena bagian lapangan kolom terkekang oleh *GFRP* sehingga menyebabkan terjadinya kerusakan pada daerah atas dan daerah bawah terlebih dahulu.

5.3.2 Hubungan Beban-Penurunan Benda Uji Kolom

5.3.2.1 Perhitungan Teoritis Beban Sentris

Beban sentris menyebabkan tegangan tekan yang merata diseluruh bagian penampang yang menyebabkan saat terjadi keruntuhan, tegangan dan regangannya akan merata diseluruh bagian penampang. Kapasitas beban aksial kolom *nonslender* dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

Diketahui:

$$\begin{aligned} f'c &= 29,16 \text{ MPa (sebagai KS)} \\ &= 32,18 \text{ MPa (sebagai KG1)} \\ &= 27,85 \text{ MPa (sebagai KG2)} \end{aligned}$$

$$f_y = 346,62 \text{ MPa}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$\emptyset \text{ pokok} = 10 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} A_{st} &= 4 \times (1/4 \pi 10^2) \\ &= 314,16 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_g &= 150 \times 150 \text{ mm} \\ &= 22500 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

$$\psi_f = 0,95 \text{ (Tabel 11.1 ACI 440.2R-08)}$$

$$\begin{aligned} \rho_g &= (A_{st} / A_g) \times 100\% \\ &= (314,16 / 22500) \times 100\% \\ &= 1,39626 \% \end{aligned}$$

$$r_c = 25 \text{ mm}$$

$$\epsilon_{fe} = \min (0,004, k_e \cdot \epsilon_{fu}) \text{ dipakai } 0,004 \text{ (Persamaan 3.19)}$$

$$n = 1 \text{ lapis}$$

$$\begin{aligned}
 E_f &= 26100 \text{ MPa (Tabel 4.2)} \\
 t_f &= 1,3 \text{ mm (Tabel 4.2)} \\
 A_e/A_c &= 1 - \frac{\left[\left(\frac{b}{h} \right) (h-2rc)^2 + \left(\frac{h}{b} \right) (b-2rc)^2 \right]}{\frac{3Ag}{1-\rho_g}} - \rho_g \text{ (Persamaan 3.20)} \\
 &= 1 - \frac{\left[\left(\frac{150}{150} \right) (150-2 \times 25)^2 + \left(\frac{150}{150} \right) (150-2 \times 25)^2 \right]}{\frac{3 \times 22500}{1-1,39626}} - 1,39626 \\
 &= 0,74774 \\
 k_a &= \frac{A_e}{A_c} \left(\frac{b}{h} \right)^2 \text{ (Persamaan 3.17)} \\
 &= 0,74774 \\
 f_l &= \frac{\psi^2 E_f n t_f \epsilon_{fe}}{\sqrt{(b^2+h^2)}} \text{ (Persamaan 3.18)} \\
 &= \frac{0,95 \times 26100 \times 1 \times 1,3 \times 0,004}{\sqrt{(150^2+150^2)}} \\
 &= 1,215601 \\
 f'_{cc} &= f'_c + 3,3 k_a f_l \text{ (Persamaan 3.16)} \\
 &= 32,18 + (3,3 \times 0,74774 \times 1,215601) \\
 &= 35,18 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

Tabel 5.2 Rekapitulasi nilai f'_{cc} kolom dengan perkuatan *GFRP*

Benda Uji	f'_c (MPa)	f'_{cc} (MPa)
KG1	32,18	35,18
KG2	27,85	30,85

Perhitungan teoritis beban sentris untuk kolom standar

$$\begin{aligned}
 P_{KS} &= 0,80 \times 0,85 \times f'_c \times (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y \\
 &= 0,80 \times 0,85 \times 29,16 \times (22500 - 314,16) + (346,62 \times 314,16) \\
 &= 53,72413 \text{ ton} \\
 &= 527033,7 \text{ N} \\
 &= 527,72413 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Perhitungan beban sentris untuk kolom dengan perkuatan *GFRP* (KG1)

$$\begin{aligned}
 P_{KG1} &= 0,80 \times 0,85 \times f'_{cc} \times (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y \\
 &= 0,80 \times 0,85 \times 35,18 \times (22500 - 314,16) + (346,62 \times 314,16) \\
 &= 62,98133 \text{ ton} \\
 &= 617846,9 \text{ N} \\
 &= 617,8469 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Perhitungan beban sentris untuk kolom dengan perkuatan *GFRP* (KG2)

$$\begin{aligned}
 P_{KG2} &= 0,80 \times 0,85 \times f'_{cc} \times (A_g - A_{st}) + A_{st} \times f_y \\
 &= 0,8 \times 0,85 \times 30,85 \times (22500 - 314,16) + (346,62 \times 314,16) \\
 &= 56,32241 \text{ ton} \\
 &= 552522,9 \text{ N} \\
 &= 552,5229 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

Tabel 5.3 Nilai beban sentris kolom tanpa perkuatan dan dengan perkuatan *GFRP*

Benda Uji	$f'c$ atau $f'cc$ (MPa)	Beban Sentris (KN)
KS	29,16	527,7241
KG1	35,18	617,8469
KG2	30,85	552,5229

5.3.2.2 Perhitungan Estimasi Beban Tekuk

Buckling merupakan suatu proses dimana struktur tidak mampu mempertahankan bentuk aslinya, sedemikian rupa berubah bentuk dalam rangka menemukan keseimbangan baru. Fenomena tekuk atau *buckling* dapat terjadi pada sebuah kolom, lateral *buckling* balok, pelat dan cangkang. Besar beban tekuk atau kapasitas tekan P_c menurut Euler dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

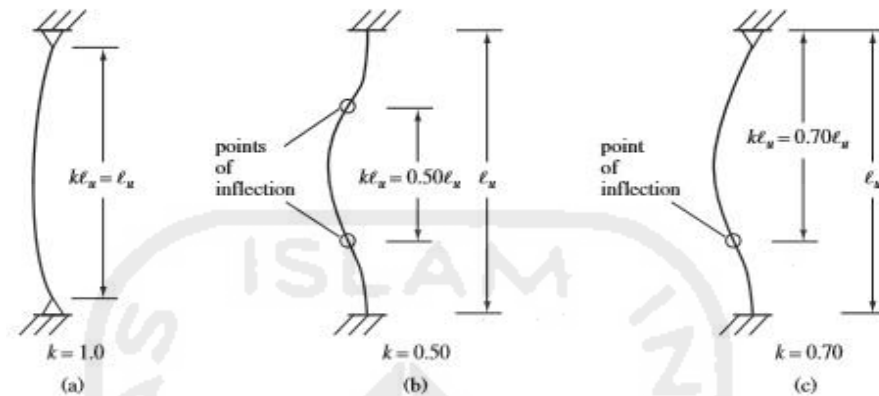
Diketahui:

$$\begin{aligned}
 P_{beton} &= V_{kolom} \times BJ_{beton} = 0,15 \text{ m} \times 0,15 \text{ m} \times 1,2 \text{ m} \times 2,4 \text{ ton/m}^3 \\
 &= 0,0648 \text{ ton} \\
 &= 635,688 \text{ N} \\
 &= 0,635688 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

$$P_D = P_{beton} + P_{sentris}$$

$$= 635,688 + 527033,7 = 527669,39 \text{ N}$$

$k = 0,7$ (ujung-ujung pada kolom jepit dan sendi)



Gambar 5.7 Nilai faktor panjang efektif kolom (k)

Perhitungan:

$$\begin{aligned} E_c &= 4700 \times \sqrt{f'_c} \text{ (Persamaan 3.38)} \\ &= 4700 \times \sqrt{29,16} \\ &= 25380 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_g &= 1/12 \times b \times h^3 \text{ (Persamaan 3.40)} \\ &= 1/12 \times 150 \times 150^3 \\ &= 42187500 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} B_d &= \frac{\text{beban tetap aksial terfaktor}}{\text{beban aksial terfaktor maksimal dari kombinasi beban yang sama}} \text{ (Persamaan 3.39)} \\ &= \frac{1,2 \times PD}{(1,2 \times PD) + (1,6 \times PL)} \\ &= \frac{1,2 \times 527669,39}{(1,2 \times 527669,39) + (1,6 \times 0)} = 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} EI &= \frac{0,4 E_c I_g}{1 + \beta_d} \text{ (Persamaan 3.37)} \\ &= \frac{0,4 \times 25380 \times 42187500}{1 + 1} \\ &= 214,14 \times 10^9 \end{aligned}$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(k l_u)^2} \text{ (Persamaan 3.36)}$$

$$= \frac{\pi^2 \times 214,14 \times 10^9}{(0,7 \times 1200)^2}$$

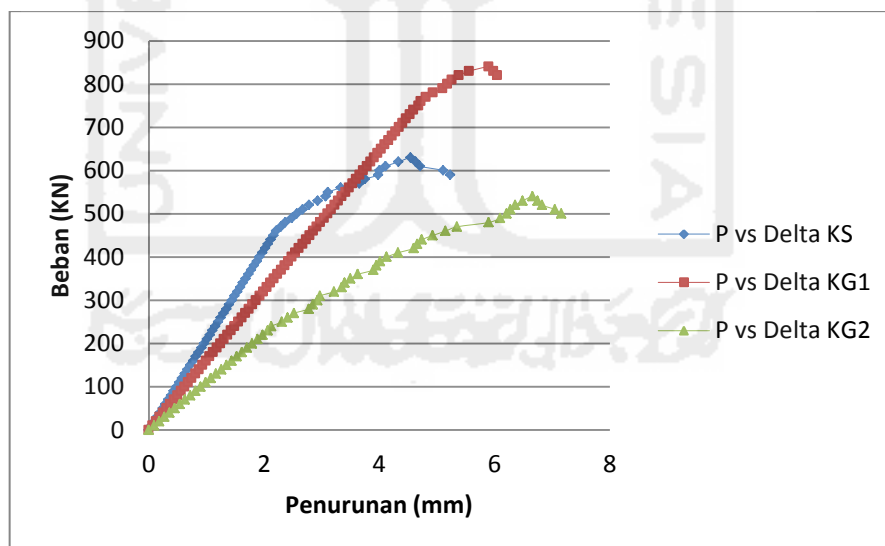
$$= 2995,291 \text{ KN}$$

Tabel 5.4 Hasil perhitungan beban tekuk (P_c) semua kolom tanpa dan dengan perkuatan *GFRP*

Benda uji	f'_c atau f'_{cc} (MPa)	Beban Tekuk (KN)
KS	29,16	2992,307
KG1	35,18	3286,702
KG2	30,85	3077,797

5.3.2.3 Beban Sentris Maksimum Berdasarkan Hasil Uji Laboratorium

Pada pengujian ini besarnya penurunan pada kolom diukur dengan menempatkan dial dibawah *load cell* yang ditahan dengan plat penghubung antara *load cell* dengan permukaan kolom.



Gambar 5.8 Hubungan beban-penurunan dial KS, KG1 dan KG2

Berdasarkan Gambar 5.8 dapat dilihat bahwa terjadi peningkatan nilai penurunan seiring dengan peningkatan pembebanan. Pembacaan *dial gauge*

dilakukan pada setiap kenaikan pembebanan dengan kelipatan 10 KN. Tabel 5.5 menunjukkan nilai beban maksimum dan penurunan pada kolom uji.

Tabel 5.5 Beban maksimum dan nilai penurunan pada semua benda uji

Benda Uji	Beban Maksimal (KN)	Penurunan (mm)	Rata-rata Beban (KN)	Rata-rata Penurunan (mm)
KS	634.2333	5,23	634,2333	5,23
KG1	847.7563	6,05	698,3355	6,605
KG2	548.9146	7,16		

Dari Tabel 5.5 dapat dilihat bahwa benda uji kolom yang dilapisi *GFRP* mempunyai beban lebih besar dan mengalami penurunan yang lebih besar dibandingkan dengan benda uji yang tidak dilapisi *GFRP*. Hal ini membuktikan bahwa pengaruh *GFRP* sebagai pengekang dan perkuatan kolom mampu meningkatkan kapasitas beban aksial.

5.3.2.4 Perbandingan Beban Sentris Maksimum Hasil Perhitungan Teoritis Dengan Hasil Laboratorium

Dari hasil perhitungan beban aksial teoritis yang didapatkan, maka dapat dibandingkan dengan hasil dari pengujian yang dapat dilihat pada Tabel 5.6 sebagai berikut.

Tabel 5.6 Perbandingan nilai beban sentris teoritis dan beban sentris pengujian

Benda Uji	f'_c dan f'_{cc} Benda Uji (MPa)	P_{teoritis} (KN)	$P_{\text{pengujian}}$ (KN)	Rata-rata P_{teoritis} (KN)	Rata-rata $P_{\text{pengujian}}$ (KN)
KS	29,16	527,7241	634.2333	527,7241	634,2333
KG1	35,18	617,8469	847.7563	585,1849	698,3355
KG2	30,85	552,5229	548.9146		

Dari Tabel 5.6 dapat dilihat bahwa nilai beban hasil pengujian laboratorium lebih besar dibandingkan dengan nilai beban perhitungan teoritis. Hal ini disebabkan karena pada saat pembuatan benda uji, pemadatan dan perawatannya dilakukan dengan benar dan teliti sehingga hasil pengujian didapatkan lebih besar

dari hasil perhitungan teoritis, nilai beban dari hasil pengujian untuk benda uji KS meningkat sebesar 20,18% dari nilai beban teoritis benda uji KS, untuk benda uji KG1 meningkat sebesar 37,21 % dari nilai beban teoritis benda uji KG1 dan untuk benda uji KG2 tidak mengalami peningkatan akan tetapi mengalami penurunan dari nilai beban teoritis KG2.

5.3.3 Hubungan Tegangan-Regangan Baja Tulangan *Strain Gauge* Kolom

5.3.3.1 Perhitungan Teoritis Regangan Baja Tulangan

Besar regangan baja tulangan dapat ditentukan berdasarkan perbandingan 2 segitiga yang sebangun. Untuk regangan baja tulangan dapat dihitung sebagai berikut.

Diketahui:

$$f_y = 346,62 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 346,62 / 200000 = 1,733 \times 10^{-3}$$

$$b = 150 \text{ mm}$$

$$h = 150 \text{ mm}$$

$$d_s = \text{selimut beton} + \frac{1}{2} \text{Ø tul pokok} + \text{Ø tul sengkang}$$

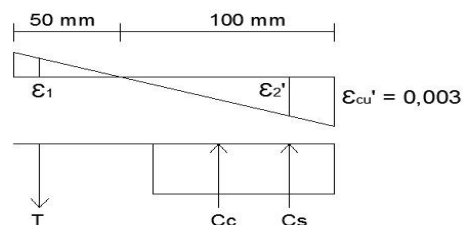
$$= 20 + \frac{1}{2} 10 + 8 = 33 \text{ mm}$$

Perhitungan:

Tinjauan beton tekan menentukan (terjadi jika $c > c_b$)

$$c_b = \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot (150 - 33)}{600 + 346,62} = 74,159 \text{ mm}$$

diambil $c = 100 \text{ mm} (> c_b)$

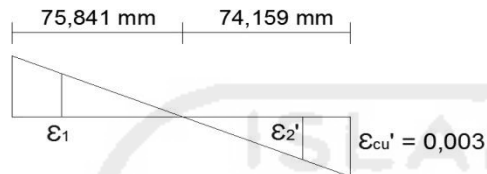


$$\varepsilon_1 = \frac{50 - 33}{100} 0,003 = 0,51 \times 10^{-3} < \varepsilon_y \text{ baja tulangan belum leleh}$$

$$\varepsilon_2' = \frac{100-33}{100} 0,003 = 2,01 \times 10^{-3} > \varepsilon_y \text{ baja tulangan sudah leleh}$$

Tinjauan pada keadaan seimbang (terjadi pada nilai $c = c_b$)

$$c_b = \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot (150-33)}{600 + 346,62} = 74,159 \text{ mm}$$



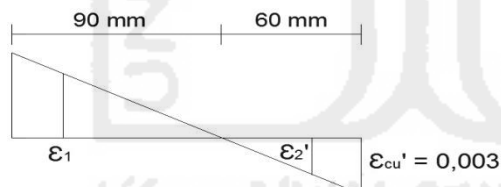
$$\varepsilon_1 = \frac{75,841-33}{74,159} 0,003 = 1,733 \times 10^{-3} = \varepsilon_y \text{ baja tulangan sudah leleh}$$

$$\varepsilon_2' = \frac{74,159-33}{74,159} 0,003 = 1,665 \times 10^{-3} < \varepsilon_y \text{ baja tulangan belum leleh}$$

Keadaan tulangan tarik yang menentukan (terjadi pada $c < c_b$)

$$c_b = \frac{600 \cdot d}{600 + f_y} = \frac{600 \cdot (150-33)}{600 + 346,62} = 74,159 \text{ mm}$$

diambil $c = 60 \text{ mm} (< c_b)$



$$\varepsilon_1 = \frac{90-33}{60} 0,003 = 2,85 \times 10^{-3} > \varepsilon_y \text{ baja tulangan sudah leleh}$$

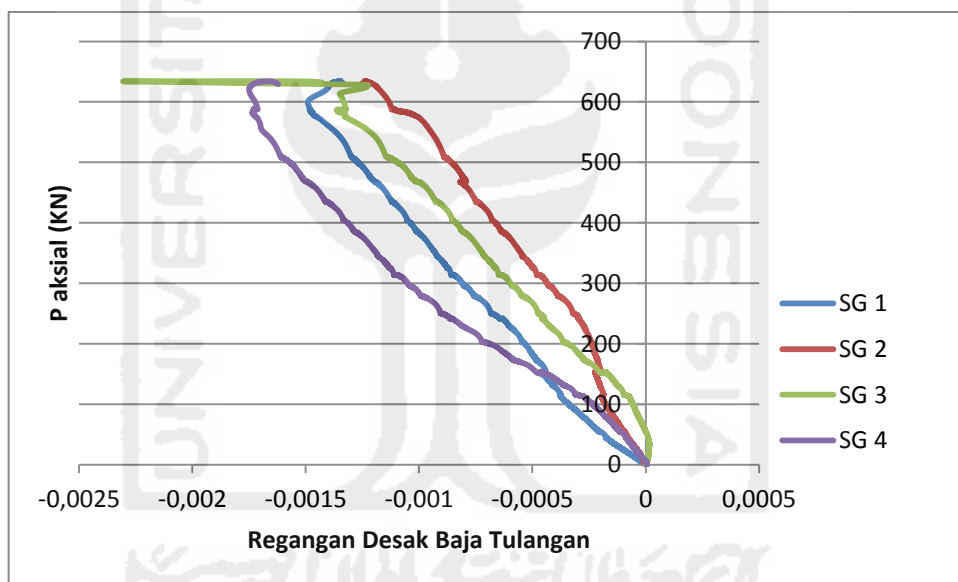
$$\varepsilon_2' = \frac{60-33}{60} 0,003 = 1,35 \times 10^{-3} < \varepsilon_y \text{ baja tulangan belum leleh}$$

Tabel 5.7 Nilai regangan baja tulangan untuk bermacam kondisi

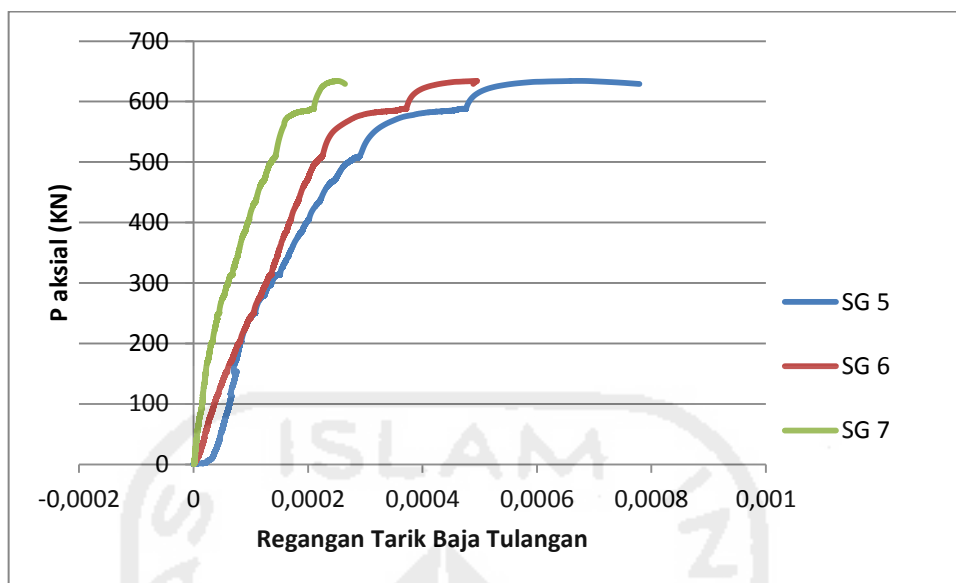
Kondisi	ε Tul Sebelah kiri (ε_1)	ε Tul Sebelah kiri (ε_2)
Beton Tekan Menentukan	$0,51 \times 10^{-3}$	$2,01 \times 10^{-3}$
Keadaan Seimbang	$1,733 \times 10^{-3}$	$1,655 \times 10^{-3}$
Tulangan Tarik menentukan	$2,85 \times 10^{-3}$	$1,35 \times 10^{-3}$

5.3.3.2 Regangan Baja Tulangan Berdasarkan Hasil Uji Laboratorium

Hubungan tegangan dan regangan pada baja tulangan ini ditinjau pada dua titik yaitu pada bagian baja tulangan yang mengalami tarik (sengkang) dan baja tulangan yang mengalami tekan (pokok). *Strain gauge* pada baja tulangan tekan dipasang di bagian tengah bentang dengan jumlah empat buah, setiap tulangan pokok mempunyai satu buah *strain gauge*, sedangkan untuk tulangan tarik dipasang pada tulangan sengkang dengan jumlah dua buah untuk sengkang di bagian tengah bentang dan dua buah untuk sengkang bagian bawah. Hubungan tegangan dan regangan baja tulangan untuk ketiga benda uji dapat dilihat pada Gambar 5.9 sampai 5.14.



Gambar 5.9 Hubungan gaya desak (P)-regangan desak (ϵ) baja tulangan *strain gauge*-1,2,3, dan 4 tulangan pokok pada kolom standar (KS)

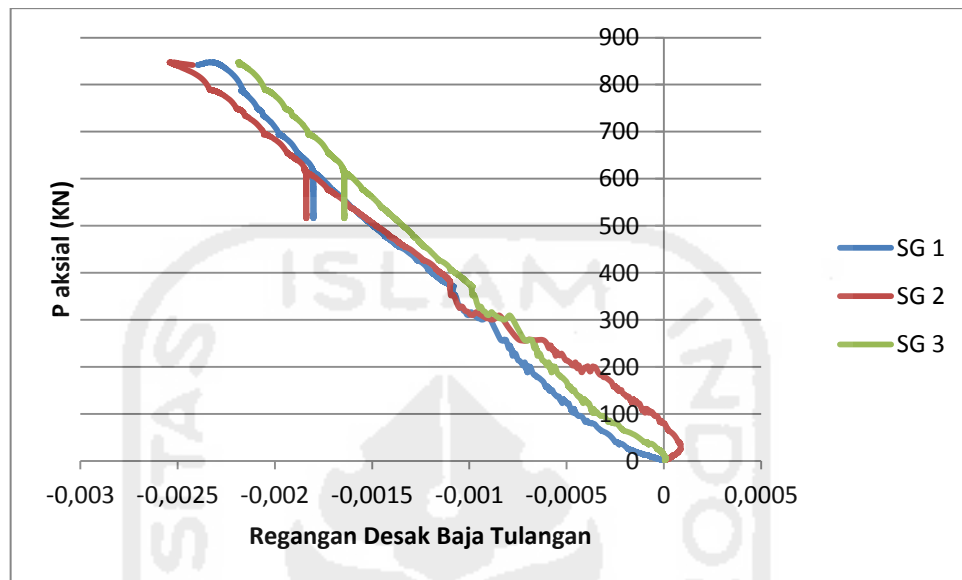


Gambar 5.10 Hubungan gaya desak (P)-regangan tarik (ϵ) baja tulangan *strain gauge*- 5,6, dan 7 tulangan sengkang pada kolom standar (KS)

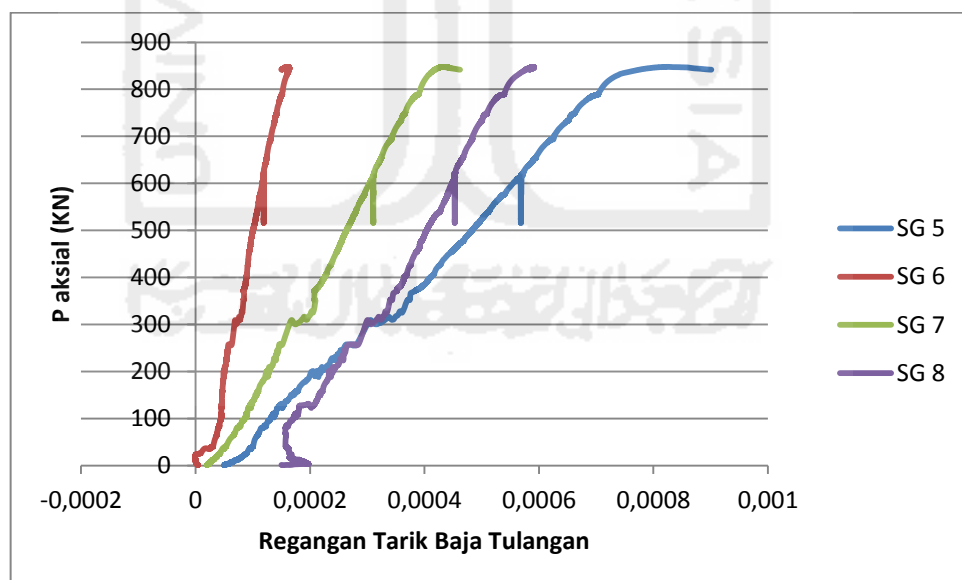
Berdasarkan Gambar 5.9 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan pokok benda uji KS untuk SG 1 sebesar -0,001491, SG 2 sebesar -0,001257, SG 3 sebesar -0,002306, dan SG 4 sebesar -0,001750. Nilai regangan untuk baja tulangan pokok hasilnya minus, hal ini dikarenakan baja tulangan pokok mengalami tekan. Dari besarnya nilai regangan baja pada tulangan pokok yang terbaca oleh *strain gauge*, nilainya lebih rendah dibandingkan dengan regangan leleh teoritis baja tulangan sebesar 0,001733. Pada benda uji KS baja tulangan menjadi tekuk akibat ditekan, hal ini menunjukkan bahwa baja tulangan yang tertekuk atau bengkok karena ditekan belum tentu sudah mencapai batas leleh.

Berdasarkan Gambar 5.10 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan sengkang benda uji KS untuk SG 5 sebesar 0,000779, SG 6 sebesar 0,000495, SG 7 sebesar 0,000265. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca oleh *strain gauge*, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan sengkang KS belum mencapai regangan leleh. Hal ini dapat dilihat dari nilai regangan pengujian lebih kecil dibandingkan dengan nilai regangan leleh teoritis baja tulangan sengkang sebesar 0,001559. Hal ini disebabkan karena

keruntuhan beton yang terjadi lebih dahulu sebelum baja tulangan mencapai batas regangan leleh.



Gambar 5.11 Hubungan gaya desak (P)-regangan desak (ϵ) baja tulangan *strain gauge*- 1,2, dan 3 tulangan pokok pada kolom *glass* 1 (KG1)

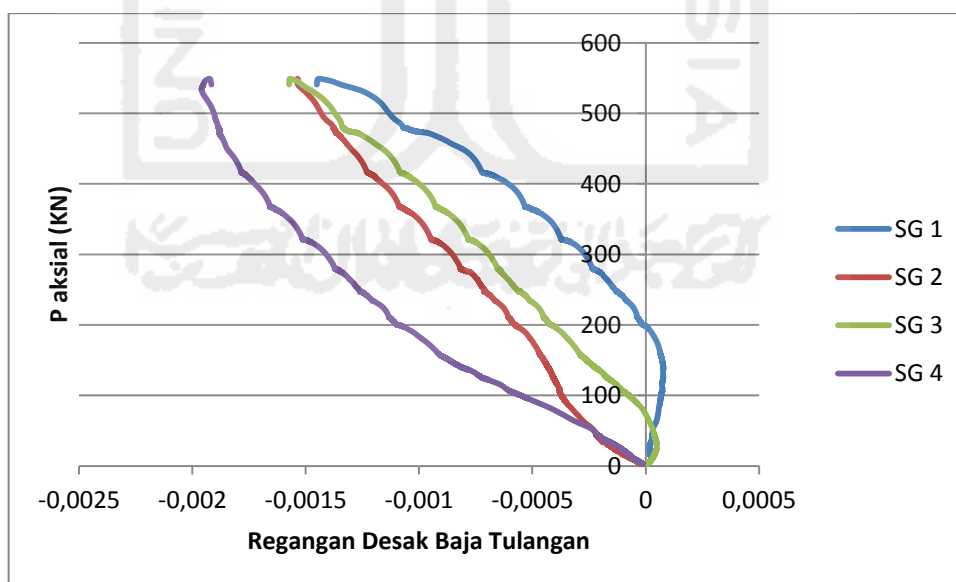


Gambar 5.12 Hubungan gaya desak (P)-regangan tarik (ϵ) baja tulangan *strain gauge*- 5,6,7, dan 8 tulangan sengkang pada kolom *glass* 1 (KG1)

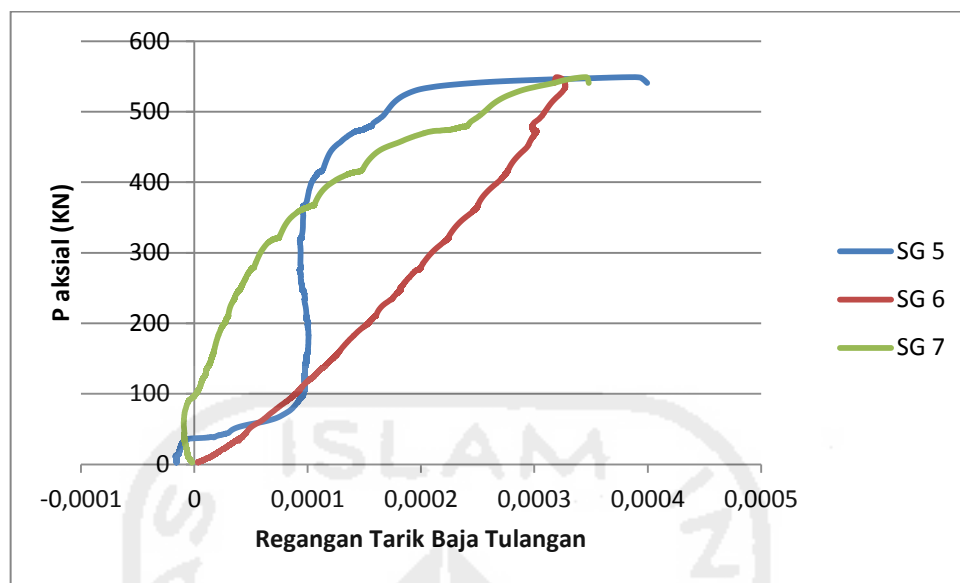
Berdasarkan Gambar 5.11 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan pokok benda uji KG1 untuk SG 1 sebesar -0,002398, SG 2

sebesar $-0,002422$, SG 3 sebesar, dan $-0,002185$. Nilai regangan untuk baja tulangan pokok hasilnya minus, hal ini dikarenakan baja tulangan pokok mengalami tekan. Dari besarnya nilai regangan baja pada tulangan pokok yang terbaca oleh *strain gauge*, nilainya lebih rendah dibandingkan dengan regangan leleh teoritis baja tulangan sebesar $0,001733$. Pada benda uji KG1 baja tulangan menjadi tekuk akibat ditekan, hal ini menunjukkan bahwa baja tulangan yang tertekuk atau bengkok karena ditekan belum tentu sudah mencapai batas leleh.

Berdasarkan Gambar 5.12 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan sengkang benda uji KG1 untuk SG 5 sebesar $0,000901$, SG 6 sebesar $0,000164$, SG 7 sebesar $0,000462$, dan SG 8 sebesar $0,000592$. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca oleh *strain gauge*, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan sengkang KG1 belum mencapai regangan leleh. Hal ini dapat dilihat dari nilai regangan pengujian lebih kecil dibandingkan dengan nilai regangan leleh teoritis baja tulangan sengkang sebesar $0,001559$. Hal ini disebabkan karena kolom sudah mencapai tegangan maksimum sebelum baja tulangan mencapai batas regangan leleh.



Gambar 5.13 Hubungan gaya desak (P)-regangan desak (ϵ) baja tulangan *strain gauge*- 1,2,3, dan 4 tulangan pokok pada kolom *glass* 2 (KG2)



Gambar 5.14 Hubungan gaya desak (P)-regangan tarik (ϵ) baja tulangan *strain gauge*- 5,6, dan 7 tulangan sengkang pada kolom *glass 2* (KG2)

Berdasarkan Gambar 5.13 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan pokok benda uji KG2 untuk SG 1 sebesar -0,001451, SG 2 sebesar -0,001532, SG 3 sebesar -0,001573, dan SG 4 sebesar -0,001916. Nilai regangan untuk baja tulangan pokok hasilnya minus, hal ini dikarenakan baja tulangan pokok mengalami tekan. Dari besarnya nilai regangan baja pada tulangan pokok yang terbaca oleh *strain gauge*, nilainya lebih rendah dibandingkan dengan regangan leleh teoritis baja tulangan sebesar 0,001733. Pada benda uji KG2 baja tulangan menjadi tertekuk akibat ditekan, hal ini menunjukkan bahwa baja tulangan yang tertekuk atau bengkok karena ditekan belum tentu sudah mencapai batas leleh.

Berdasarkan Gambar 5.14 dapat dilihat hasil pembacaan besarnya nilai regangan baja tulangan sengkang benda uji KG2 untuk SG 5 sebesar 0,000399, SG 6 sebesar 0,000318, SG 7 sebesar 0,000348. Dari besarnya nilai regangan baja tulangan yang terbaca oleh *strain gauge*, dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan sengkang KG2 belum mencapai regangan leleh. Hal ini dapat dilihat dari nilai regangan pengujian lebih kecil dibandingkan dengan nilai regangan leleh teoritis baja tulangan sengkang sebesar 0,001559. Hal ini disebabkan karena

keruntuhan beton yang terjadi lebih dahulu sebelum baja tulangan mencapai batas leleh.

Dapat disimpulkan bahwa regangan baja tulangan benda uji yang diperkuat dengan *GFRP* nilainya lebih rendah dibandingkan dengan benda uji tanpa perkuatan *GFRP*, hal ini mungkin dikarenakan beton yang terkekang oleh *GFRP* sehingga menyebabkan baja tulangan seperti tulangan sengkang dan pokok ikut terkekang sehingga terjadinya peregangannya pada baja tulangan menjadi lebih kecil. Nilai regangan baja tulangan pokok dapat dilihat pada Tabel 5.8 sebagai berikut.

Tabel 5.8 Nilai regangan baja tulangan maksimum semua benda uji

Benda Uji	<i>Strain gauge</i> Tulangan Pokok			<i>Strain gauge</i> Tulangan Sengkang		
	Kode SG	Nilai Regangan	Rata-rata Regangan	Kode SG	Nilai Regangan	Rata-rata Regangan
KS	SG1 (tekan)	-0,001491	-0,001701	SG5 (tarik)	0,000779	0,000513
	SG2 (tekan)	-0,001257		SG6 (tarik)	0,000495	
	SG3 (tekan)	-0,002306		SG7 (tarik)	0,000265	
	SG4 (tekan)	-0,001750				
KG1	SG1 (tekan)	-0,002398	-0,002335	SG5 (tarik)	0,000901	0,000530
	SG2 (tekan)	-0,002422		SG6 (tarik)	0,000164	
	SG3 (tekan)	-0,002185		SG7 (tarik)	0,000462	
				SG8 (tarik)	0,000592	
KG2	SG1 (tekan)	-0,001451	-0,001618	SG5 (tarik)	0,000399	0,000355
	SG2 (tekan)	-0,001532		SG6 (tarik)	0,000318	
	SG3 (tekan)	-0,001573		SG7 (tarik)	0,000348	
	SG4 (tekan)	-0,001916				

Pada Tabel 5.8 dapat dilihat bahwa regangan baja pada tulangan tarik untuk kolom yang terkekang oleh *GFRP* nilainya lebih kecil dibandingkan dengan nilai regangan baja tulangan tarik kolom yang tidak terkekang, akan tetapi pada benda uji KG1 nilai regangan baja tulangan tarik sedikit lebih besar dibandingkan dengan benda uji KS, hal ini disebabkan beban yang diterima oleh benda uji KG1 lebih besar dari pada benda uji KS. Pada perhitungan teoritis nilai regangan baja tulangan bernilai positif sedangkan pada pengujian nilai regangan baja menjadi negatif hal ini dikarenakan *strain gauge* yang ditempelkan pada baja tulangan

akan bernilai positif saat baja tulangan tertarik dan akan bernilai negatif apabila baja tulangan tertekan, pada saat pengujian baja tulangan pokok mengalami tekan dan baja tulangan yang mengalami tarik hanya pada tulangan sengkang, karena pembebanan yang dilakukan hanya beban aksial saja.

5.4 POLA KERETAKAN DAN KERUSAKAN KOLOM BETON BERTULANG

5.4.1 Benda Uji Kolom Standar (KS)

Keruntuhan kolom dapat terjadi apabila tulangan bajanya leleh karena tarik, atau terjadinya kehancuran pada beton yang tertekan. Selain itu dapat pula kolom mengalami keruntuhan apabila terjadi kehilangan stabilitas lateral, yaitu terjadi tekuk. Apabila kolom runtuh karena kegagalan materialnya (yaitu lelehnya baja atau hancurnya beton), kolom diklasifikasikan sebagai kolom pendek (*short column*). Apabila panjang kolom bertambah, kemungkinan kolom runtuh karena tekuk semakin besar.

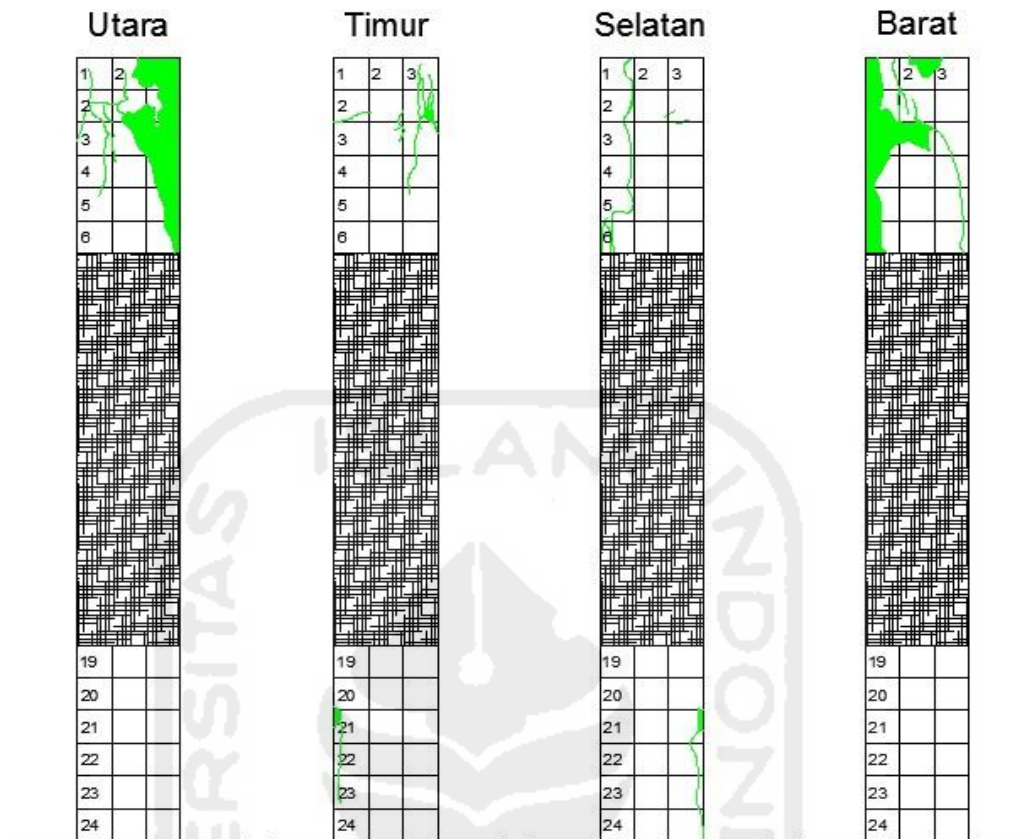
Gambar 5.15 bahwa kerusakan yang terjadi pada KS adalah kerusakan tekuk (*buckling*) pada daerah lapangan kolom dan saat beban maksimum terjadi kolom mengalami keruntuhan mendadak (*sudden failure*) disertai dengan suara ledakan keras akibat energi disipasi pada beton saat mengalami pembebanan, karena tidak memberikan tanda-tanda kerusakan seperti retakan atau terkelupasnya selimut beton, hal ini mungkin karena beton menjadi getas. Selain itu juga kerusakan yang terjadi pada benda uji KS adalah kerusakan tekuk (*buckling*) dan kegagalan kolom yang tidak terkekang (*unconfined concrete*) yang terjadi diakibatkan karena jarak tulangan sengkang yang berfungsi sebagai pengekang yang terlalu jauh, dimana jarak tulangan pengekang digunakan adalah 200 mm.



Gambar 5.15 Kerusakan Kolom Standar (KS)

5.4.2 Benda Uji Kolom *GFRP*-1 (KG1)

Gambar 5.16 dan 5.17 menunjukkan bahwa kolom mengalami kegagalan material dimana kolom mengalami keretakan dan *spalling* pada bagian ujung kolom. Awalnya permukaan kolom mengalami retak rambut, dengan meningkatnya beban, penjarangan dan lebar retak permukaan makin banyak dan membesar hingga selimut beton terkelupas (*spalling*), hal ini dikarenakan posisi *load cell* yang tidak sentris dengan permukaan kolom, sehingga kerusakan hanya terjadi pada bagian atas kolom, untuk daerah lapangan yang diselimuti oleh *GFRP* tidak menunjukkan kerusakan sama sekali seperti terkelupasnya lapisan *GFRP* dengan beton atau sobeknya lapisan *GFRP* itu sendiri. Hal ini membuktikan bahwa pengaruh *GFRP* sebagai pengekang terhadap kolom mampu merubah pola dan posisi kerusakan yang awalnya diperkirakan kerusakan akan terjadi pada bagian tengah kolom seperti benda uji KS berpindah ke bagian atas kolom.



Gambar 5.16 Pola keretakan Kolom Glass 1 (KG1)



Gambar 5.17 Kerusakan Kolom Glass 1 (KG1)

5.4.3 Benda Uji Kolom *GFRP-2* (KG2)

Gambar 5.18 menunjukkan bahwa KG2 mengalami keruntuhan pada bagian bawah kolom. Awalnya pada bagian bawah mengalami retak rambut dengan arah horizontal (lentur), dengan meningkatnya beban, penjarangan dan lebar retak permukaan bagian bawah kolom makin banyak dan membesar, saat beban maksimum terjadi keruntuhan mendadak (*sudden failure*) disertai dengan suara ledakan keras akibat energi disipasi pada beton selama mengalami pembebanan. Untuk daerah lapangan yang diselimuti oleh *GFRP* tidak menunjukkan kerusakan sama sekali seperti terkelupasnya lapisan *GFRP* dengan beton atau sobeknya lapisan *GFRP* itu sendiri. Hal ini membuktikan bahwa pengaruh *GFRP* sebagai pengekang terhadap kolom mampu merubah pola dan posisi kerusakan yang awalnya diperkirakan kerusakan akan terjadi pada bagian tengah kolom seperti benda uji KS berpindah ke bagian bawah kolom.



Gambar 5.18 Kerusakan Kolom *Glass 2* (KG2)