

ANALISIS TEGANGAN EKSPERIMENTAL PADA BALOK BAJA WF 150x75x5x7 DENGAN MENGGUNAKAN STRAIN GAUGE

Y. Djoko Setiyarto

Program Studi Teknik Sipil - Universitas Komputer Indonesia

Email: setiyarto@telkom.net

Dalam dunia Teknik Sipil, kegiatan eksperimental perlu dilakukan, terutama bila ingin memahami perilaku suatu elemen struktur tertentu. Tulisan berikut ini akan memaparkan hasil eksperimental di laboratorium dengan menggunakan strain gauge. Hasil pengukuran regangan dengan strain gauge bila dibanding dengan perhitungan teoritis memberikan perbedaan yang relatif kecil, selama akurasi pemasangan dan penggunaannya cermat dan benar.

Kata Kunci : strain gauge, eksperimental, regangan, baja WF

1. LATAR BELAKANG

Eksperimental merupakan kegiatan yang harus dilakukan bidang ilmu eksak tidak terkecuali teknik sipil. Pada rekayasa struktur di dunia teknik sipil, kegiatan eksperimental dilakukan umumnya karena ingin memahami perilaku suatu struktur atau elemen struktur. Misalnya ingin dipelajari perilaku struktur eksisting bila terjadi perubahan pembebanan atau perubahan konfigurasi, atau eksperimental untuk sistem struktur inovasi baru. Contoh lain yang sering menjadi pemicu riset adalah eksperimental untuk material baru, di mana tujuannya ingin mempelajari perilaku dan sifat elastisitas dari material baru ini ketika diaplikasikan pada sistem struktur tertentu. Eksperimental juga dilakukan dengan alasan untuk kepentingan panduan lapangan (code of practice), terutama untuk code yang dianggap sampai saat ini belum final. Hal ini disebabkan karena adanya dua pendekatan yang digunakan untuk panduan lapangan tersebut, yaitu pendekatan rasional (memenuhi hukum kompatibilitas, keseimbangan, dan konstitutif) dan

pendekatan tidak rasional (empiris) akibat adanya tuntutan lapangan yang mendesak.

Terlepas dari pentingnya kegiatan eksperimental dalam rekayasa struktur, percobaan sederhana berikut ingin mempelajari perilaku perilaku lentur dan geser dari balok baja WF ketika menerima beban terpusat dan mengetahui seberapa besar perbedaan perhitungan teoritis untuk desain baja WF (pre-analisis) dengan hasil eksperimental. Topik yang dibahas yaitu pengujian baja WF 150 x 75 x 5 x 7 dengan pembebanan terpusat yang diaplikasikan dari UTM dan dipelajari perilaku regangannya dengan menggunakan *strain gauge*. Pengujian yang dilakukan bersifat nondestruktif, sehingga beban terpusat yang diaplikasikan harus di bawah beban maksimum yang menyebabkan baja mencapai kondisi leleh.

2. STRAIN GAUGE

Semua bentuk pengukuran regangan umumnya berkaitan dgn pengukuran perubahan panjang dari suatu panjang. Untuk suatu kondisi regangan yang konstan atau linear pengukuran ini tidak akan menghasil-

kan error. Namun untuk regangan yang kuadratik, cubic atau quartic, pengukuran ini akan menghasilkan error, yang besarnya bergantung pada panjang alat ukur yang digunakan dan kondisi medan regangan. Untuk meminimumkan error ini, pengukuran sebaiknya dilakukan dengan panjang alat yang seminimum mungkin.

Berdasarkan hal tersebut maka suatu alat ukur regangan harus memiliki karakteristik dasar sebagai berikut; memiliki panjang dan lebar alat ukur yang tidak terlalu besar, memiliki sensitivitas atau nilai regangan terkecil yang dapat dibaca pada skala di mana sensitivitas dapat ditingkatkan dengan menerapkan faktor pembesaran, memiliki rentang pembacaan yang nilai terbesar dapat dibaca, memiliki akurasi hasil bacaan. Salah satu alat ukur regangan yang memenuhi karakteristik dasar tersebut adalah *strain gauge* atau *Electrical Resistance Strain Gauges* (ERSG).

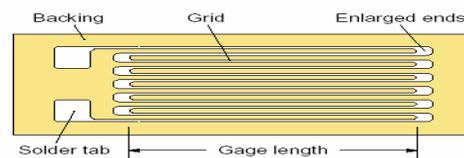
ERSG merupakan salah satu system ukur regangan yang memperlihatkan sifat-sifat alat ukur regangan yang optimum dan paling banyak/sering digunakan dalam pekerjaan analisis tegangan. ERSG juga banyak dimanfaatkan sebagai sensor pada berbagai transducer untuk pengukuran beban, torsi, tekanan dan percepatan. Prinsip kerja ERSG ditemukan oleh Lord Kelvin (1856), yaitu: "perubahan tahanan pada suatu material (baja/copper) dapat terjadi akibat perubahan-regangan pada material tersebut". Tiga dasar pengukuran regangan dengan ERSG antara lain:

- perubahan tahanan kawat sebagai fungsi perubahan regangan
- material yang berbeda mempunyai sensitivitas perubahan tahanan yang berbeda
- Jembatan wheatstone merupakan rangkaian yang dapat digunakan untuk mengukur perubahan tahanan yang terjadi secara akurat.

Berdasarkan ukuran, strain gage ter-

bagi atas strain gage ukuran pendek (ukuran terpendek = 0,2 mm) dan strain gage ukuran panjang (ukuran terpanjang = 102 mm).

ERSG yang ada pada saat ini biasanya terdiri atas suatu foil tipis (setebal 0,02 mm) yang direkatkan pada suatu backing material yang terkadang terbuat dari polyamida. Melalui backing material inilah biasanya ERSG direkatkan pada permukaan benda uji. ERSG mengukur perubahan panjang terhadap panjang gage dan mengkonversinya menjadi regangan.



Gambar 1. Bagian Strain Gauge

Dalam eksperimental, regangan biasanya ditentukan dengan mengukur secara akurat perubahan tahanan dan kemudian membagi perubahan tahanan tersebut dengan faktor *gauge*-nya, F :

$$\varepsilon = \left[\frac{\Delta R}{R} \right] / F \quad (1)$$

Untuk mendefinisikan kondisi regangan bidang, perlu diketahui komponen-komponen regangan ε_x , ε_y dan γ . Regangan geser γ_{xy} tidak dapat diukur langsung, namun dapat diperoleh dengan pengukuran regangan normal di tiga arah yang berbeda pada lokasi yang sama. Seperti diketahui dari teori elastisitas untuk kondisi regangan bidang berlaku:

$$\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\phi_i + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\phi_i \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan transformasi regangan (Dally 1991), besarnya regangan

geser dari data regangan *strain gauge* dihitung dengan persamaan:

$$\gamma_{x'y'} = 2(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta + \gamma_{xy} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) \quad (3)$$

Dimana ε_{xx} dan ε_{yy} merupakan regangan dari data terukur *strain gage*, sedangkan $\gamma_{xy} = 0$ karena asumsi regangan *strain gage* merupakan regangan pada arah utama. Jika diasumsikan pemasangan tiap *strain gage* tepat membentuk sudut 45° terhadap garis horisontal ($\theta = 45^\circ$), maka persamaan 3 disederhanakan akan menjadi:

$$\begin{aligned} \gamma_{x'y'} &= 2(\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx}) \cdot \sin(45^\circ) \cdot \cos(45^\circ) + 0 \\ \gamma_{x'y'} &= \varepsilon_{yy} - \varepsilon_{xx} \end{aligned} \quad (4)$$

Persamaan ini akan digunakan untuk menghitung besarnya regangan geser dalam pengolahan rekaman data output dari *data logger*.



Gambar 2. Strain Gauge dalam kemasan beserta bungkusnya

Strain gauge (*Electrical Resistance Strain Gauges*) yang digunakan adalah *strain gauge* (SG) produksi *Tokyo Sokki Kenkyujo*, jenis FLA-6-11 yang berukuran panjang kurang lebih 2 cm. Dalam bungkusnya, tertera nilai *gauge factor* yang dimiliki SG tersebut adalah 2,1. SG digunakan untuk mengukur besarnya regangan yang terjadi, dan sifat penggunaannya umumnya adalah sekali pakai.

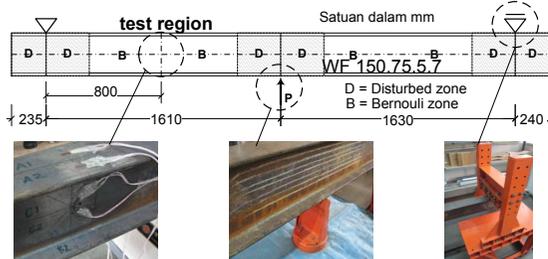
3. TEST SETUP DAN INSTRUMENTASI

Sistem pengujian baja WF yang dilakukan

di laboratorium adalah dengan memberi beban terpusat di sekitar tengah bentang balok baja, kemudian pada daerah uji (*test region*) dipelajari perilaku balok baja saat menerima beban terpusat tersebut. Baja Wide Flange yang digunakan berukuran 150 x 75 x 5 x 7 dengan mutu BJ 37. Baja tersebut digunakan sebagai benda uji, yang akan dipelajari perilakunya saat mulai menerima beban hingga sebelum mencapai kondisi leleh. Panjang baja adalah $\pm 3,7$ m, sehingga cukup diletakkan pada tumpuan yang telah tersedia pada alat uji.

Pada Gambar 3 terlihat sistem pengujian secara keseluruhan. Balok baja bertumpu pada dudukan UTM di sekitar tengah bentang. Sedangkan di sekitar kedua ujung balok baja di tahan oleh tumpuan yang berfungsi menahan gaya angkat ke atas akibat beban yang diberikan oleh UTM. Pada daerah uji, dipasang instrumentasi *strain gauge* yang bertujuan untuk mengamati perilaku regangan lentur dan regangan geser. *Strain gauge* ini terhubung melalui kabel ke *data logger*, sehingga besarnya regangan yang terjadi akan terekam di *notebook*. Sedangkan besar kecilnya beban dan lendutan yang terjadi pada UTM akan terekam pada PC.

Salah satu tujuan percobaan ini adalah mempelajari regangan lentur dan regangan geser pada balok baja, maka pemasangan instrumentasi *strain gauge* dilakukan seperti Gambar 4. Untuk mengamati perilaku lentur, sebanyak 2 buah *strain gauge* dipasang memanjang pada *flange* atas (diberi kode A_1 dan A_2), dan sebanyak 2 buah *strain gauge* dipasang memanjang pada *flange* bawah (diberi kode B_1 dan B_2). Sedangkan untuk mengamati perilaku geser, 2 buah *strain gauge* yang saling membentuk siku 90° , dipasang di sisi kiri dan kanan *web* (diberi kode C_1 , C_2 , D_1 , dan D_2) dengan posisi seperti belah ketupat, dengan maksud salah satu *strain gauge* akan membentuk sudut 45° terhadap sumbu netral balok baja WF.



beban UTM diaplikasikan, benda uji akan melentur ke atas. Dengan demikian serat atas akan mengalami regangan tarik/pemanjangan (A_1 dan A_2 harus bernilai positif) dan serat bawah akan mengalami regangan tekan/pemendekan (B_1 dan B_2 harus bernilai negatif).

Sedangkan *strain gauge* C_1 , C_2 , D_1 , dan D_2 diharapkan dapat mengukur regangan utama, yang nantinya digunakan untuk menentukan regangan geser. Maka ketika beban UTM diaplikasikan, akan terbentuk tegangan seperti pada Gambar 5. Di mana C_1 & D_1 akan mengalami regangan tarik akibat tegangan utama σ_1 sehingga harus bernilai positif, dan C_2 dan D_2 akan mengalami regangan tekan akibat tegangan utama σ_2 sehingga harus bernilai negatif.

Gambar 3.
Setup Pengujian WF 150.75.5.7

Karena nilai hambatan *strain gauge* (SG) setelah disambung dengan kabel berubah sekitar 0.9 ohm, maka perlu dilakukan koreksi faktor gauge (GF) sebagai berikut:

Nilai hambatan SG tanpa kabel: $R = 120 \text{ W}$

Nilai gauge factor: $K = 2.1$

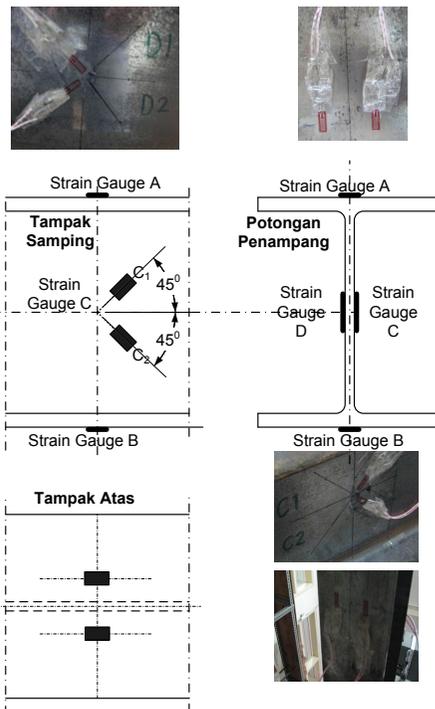
Nilai hambatan SG + kabel: $R' = 120.9 \text{ W}$

Nilai koreksi GF (AVOmeter): $K_0 = 2.0844$

Angka yang dimasukkan dalam *data logger*:

$$\frac{2.00}{K_0} = 0.959524$$

Untuk memastikan pemasangan *strain gauge* telah benar, maka perlu diprediksi apakah *strain gauge* mengalami pemendekan atau pemanjangan. *Strain gauge* A_1 , A_2 , B_1 , dan B_2 diharapkan dapat mengukur regangan lentur. Maka ketika



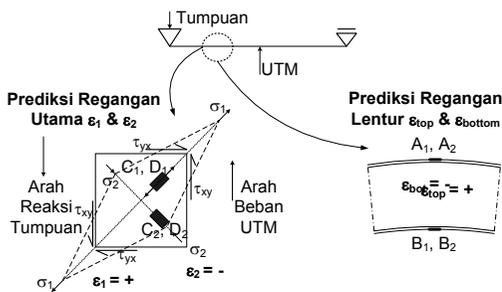
Gambar 4. Instrumentasi Strain Gauge

4. PRE-ANALISIS TEORITIS NILAI STRAIN GAUGE

Pre-analisis bertujuan untuk memprediksi hasil *output* percobaan sebelum pembebanan diaplikasikan pada benda uji. Sehingga apabila diperoleh hasil *output* percobaan yang berbeda jauh dengan pre analisis maka kesalahan tersebut perlu dikoreksi.

Pre-analisis yang dilakukan meliputi prediksi beban maksimum dan lendutan, serta prediksi regangan yang terjadi pada *strain gauge*. Tabel 1 dan 2 berikut merupakan pre-analisis yang dilakukan terhadap pengujian WF 150x75x5x7.

Gambar 5. Prediksi awal regangan SG



Tabel 1. Prediksi Teoritis Lendutan dan Regangan

Beban (kgf)	Lendutan (mm)	Regangan Lentur
850	4.434	0.000189
1200	6.265	0.000267

Tabel 2. Prediksi Teoritis Regangan Geser

Beban (kgf)	Regangan Geser
600	0.000057
850	0.000267

Lendutan teoritis tersebut dihitung dengan metoda *Unit Load* (Persamaan 5) yang mengasumsikan bahwa lendutan terjadi pada daerah uji diakibatkan oleh adanya beban seperti yang tercantum dalam Tabel 1.

$$\Delta = \int_a^b \frac{M.m}{EI_x} dx \tag{5}$$

Regangan lentur teoritis dihitung dengan menentukan terlebih dahulu momen lentur (M) akibat beban terpusat. Kemudian dengan mengalikan lengan momen dan membaginya dengan momen inersia akan diperoleh tegangan lentur. Regangan lentur dihasilkan dengan menggunakan persamaan elastisitas atau Hukum Hooke. Sedangkan regangan geser teoritis diperoleh dengan menentukan terlebih dahulu gaya geser. Perkalian gaya geser dengan statis momen dan membagikan dengan perkalian momen inersia dan tebal web baja akan diperoleh besarnya tegangan geser. Regangan geser diperoleh dengan cara membagi tegangan geser dengan modulus geser.

5. HASIL PENGUJIAN REGANGAN LENTUR DENGAN STRAIN GAUGE

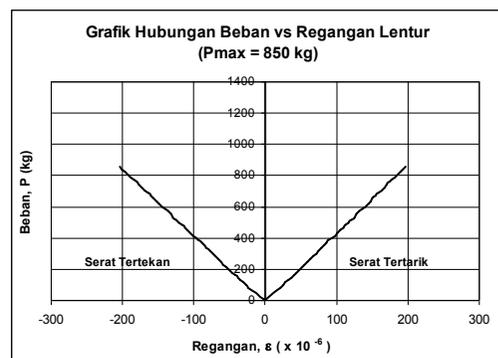
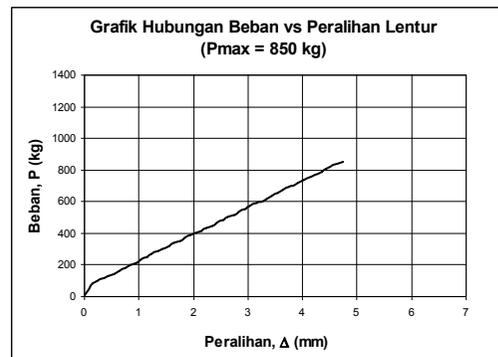
Berikut ini merupakan pembahasan hasil pengujian regangan lentur yang dilakukan dengan menggunakan 2 jenis pembebanan yang berbeda, yaitu $P_{max} = 850$ kgf dan 1200 kgf, dengan harapan dapat mempelajari perilaku regangan lentur baja ketika beban diaplikasikan. Kedua jenis pembebanan tersebut masih berada dalam kondisi elastis (nondestruktif). Karena berdasarkan analisis kuat lentur nominal (sesuai metode LRFD 2005), balok WF model uji tersebut mampu menerima beban terpusat maksimal 1710.469 kgf, sehingga kedua jenis pembebanan terpusat dianggap masih di bawah batas elastis. Beban yang diaplikasikan oleh mesin uji UTM setiap kelipatan 3 detik bertambah hingga mencapai target P_{max} yang diinginkan.

Dari hasil pengujian saat $P_{max} = 850$ kgf dan 1200 kgf menunjukkan bahwa nilai regangan *strain gauge* pada A_1 , A_2 , B_1 , dan B_2 sudah sesuai dengan pre-analisis, di mana serat atas mengalami tarik (positif) dan serat bawah mengalami tekan (negatif). Namun ada kemungkinan terjadi kesalahan pemasangan *strain gauge* karena nilai regangan serat atas dan serat bawah meskipun beda tanda (positif/negatif) seharusnya tetap memiliki harga mutlak yang sama, karena sumbu garis netral berada di tengah-tengah penampang. Untuk pembebanan awal, perbedaan nilai harga mutlak tidak terlihat, tetapi ketika mencapai beban maksimum terlihat perbedaan yang cukup signifikan. Jika dibandingkan dengan pre-analisis, untuk $P = 852$ kgf diperoleh perbedaan nilai regangan serat atas dan peralihan sebesar 4.5% (0.0001975) dan 7.1% (4.76 mm), dan untuk $P = 1200$ kgf diperoleh perbedaan nilai regangan serat atas dan peralihan sebesar 3.44% (0.0002735) dan 7.26% (6.72 mm).

Perbedaan hasil pengujian dan pre-analisis dipandang tidak berbeda jauh karena perbedaan nilainya kecil (<10%) dan dianggap pengujian lentur dengan menggunakan *strain gauge* cukup akurat.

6. HASIL PENGUJIAN REGANGAN GESER DENGAN STRAIN GAUGE

Berikut ini merupakan pembahasan hasil pengujian regangan geser yang dilakukan dengan menggunakan 2 jenis pembebanan yang berbeda, yaitu $P_{max} = 600$ kgf dan 8500 kgf, dengan harapan dapat mempelajari perilaku regangan geser baja ketika beban diaplikasikan.

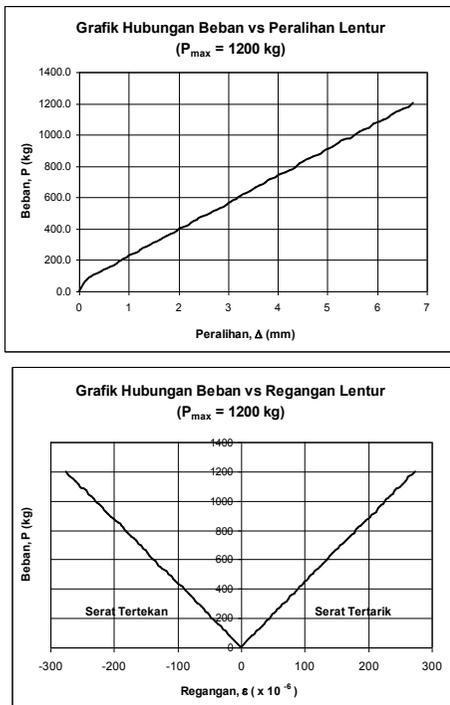


Gambar 6.
Hubungan $P - D$ dan $P - \epsilon$ untuk Pengujian Lentur untuk $P = 850$ kgf

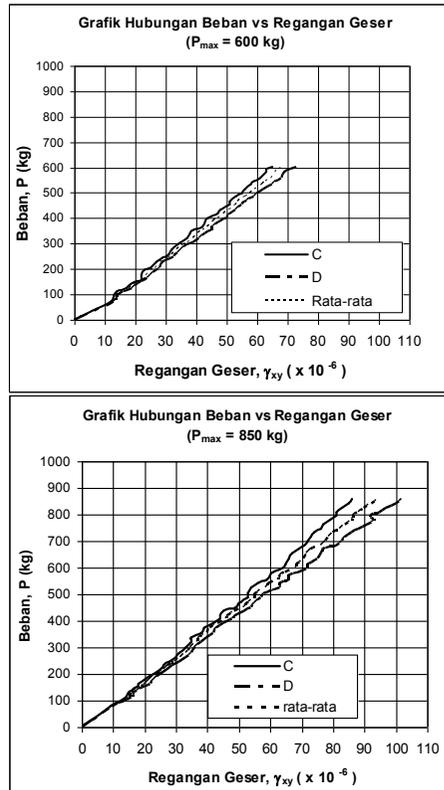
Dari hasil pengujian saat $P_{max} = 850$ kgf dan 600 kgf, terlihat bahwa tanda nilai regangan utama *strain gauge* pada C_1 , C_2 , D_1 , dan D_2 sudah sesuai dengan pre-analisis (Gambar 5), di mana C_1 & D_1 mengalami tarik (positif) dan C_2 & D_2 mengalami tekan (negatif). Asumsi pada pre-analisis, bahwa regangan *strain gauge* C_1 , C_2 , D_1 , dan D_2 merupakan regangan utama, dan pada lokasi tersebut terjadi geser murni. Namun kenyataan dari pengukuran tidaklah demikian, karena besaran regangan yang diperoleh $\epsilon_1 \neq -\epsilon_2$ (tabel output UTM untuk kolom C_1 & C_2 atau D_1 & D_2 terlihat perbedaannya). Hal tersebut terjadi karena kemungkinan akurasi pemasangan *strain gauge* yang kurang cermat, seperti sudut yang dibentuk garis tengah memanjang *strain gauge* dengan sumbu horisontal/netral benda uji

tidak membentuk sudut 45° . Besarnya nilai regangan geser dihitung dengan Persamaan (4) yang hasilnya dapat dilihat pada Gambar 8. Terlihat bahwa hubungan $P-\varepsilon$ mendekati linier, meskipun terdapat sedikit lengkungan kurva.

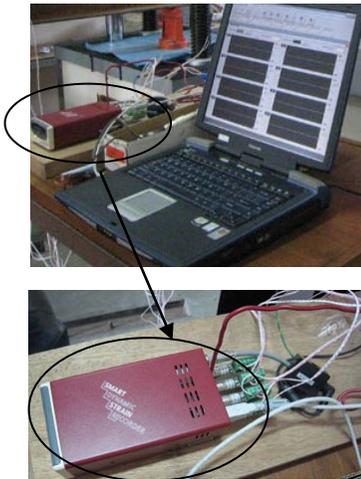
Jika dibandingkan dengan pre-analisis, untuk $P = 600 \text{ kgf}$ & $P = 850 \text{ kgf}$ diperoleh perbedaan nilai regangan geser yang terbaca pada SG sebesar 14.04% (0.000065) & 6.1% (0.000065). Pengujian geser dipandang cukup akurat, meskipun memiliki perbedaan lebih besar dari 10%, yang diakibatkan pemasangan SG yang tidak akurat..



Gambar 7.
Hubungan $P - D$ dan $P - \varepsilon$ untuk Pengujian Lentur untuk $P = 1200 \text{ kgf}$



Gambar 8.
Hubungan $P - \varepsilon$ untuk Pengujian Geser untuk $P = 600 \text{ kgf}$ dan $P = 850 \text{ kgf}$



Gambar 9.

Data logger, berfungsi untuk mengkonversi sinyal-sinyal resistensi dari *strain gauge* menjadi nilai regangan yang tercatat secara otomatis dengan komputer. Jenis data logger yang digunakan DC104R buatan Jepang



Gambar 10.

Akurasi Pemasangan *Strain Gauge* Mempengaruhi Hasil Pengukuran Regangan

7. KESIMPULAN

Kesimpulan yang diperoleh dari hasil eksperimental:

1. Penggunaan *strain gauge* sebagai alat ukur regangan secara umum dipandang akurat dan lebih teliti pembacaan hasil ukurannya.
2. Data hasil pengukuran peralihan (lendutan) diperoleh hasil yang cukup akurat karena memiliki perbedaan den-

gan hasil pre-analisis yang sedikit yaitu 7% – 8% untuk kedua kasus pembebanan.

3. Data hasil pengukuran regangan lentur (regangan serat atas) diperoleh hasil yang cukup akurat karena memiliki perbedaan dengan nilai regangan hasil pre-analisis yang sedikit, yaitu berkisar antara 3.4 – 4.5 % untuk beban maksimum $P = 800$ kgf dan $P = 1200$ kgf.
4. Data hasil pengukuran regangan utama kurang akurat karena memiliki perbedaan dengan hasil pre-analisis yang cukup banyak, yaitu berkisar 6 – 28% untuk beban maksimum $P = 600$ kgf dan $P = 850$ kgf.
5. Kurang tepatnya dan kurang akuratnya dari hasil pengukuran tersebut kemungkinan disebabkan oleh pemasangan *strain gauge* yang saat pelaksanaan eksperimental tidak tepat posisinya sesuai rencana, terutama pemasangan *strain gauge* untuk mengukur regangan utama.
6. Pengaruh besaran material benda uji seperti modulus elastisitas, bentuk dan ukuran penampang baja WF yang belum tentu prismatis di sepanjang bentang turut mempengaruhi ketidaksesuaian hasil pengukuran dengan pre-analisis.

DAFTAR PUSTAKA

- Dally, James W. and Riley, William F. (1991). *Experimental Stress Analysis*. 3rd Edition. Singapore: McGraw-Hill.
- Harris, Harry G and Sabnis, Gajanan M. (1999). *Structural Modeling*. London: Pentech Press.
- Imran, Iswandi. (2007). *Catatan Kuliah Analisis Tegangan Eksperimental*. Bandung : Pascasarjana UNPAR.