

TEGANGAN PADA SPAR CAP SAYAP PESAWAT TERBANG

Sasi Kirono
B2TKS/BPPT
sasi.kirono@yahoo.com

Abstrak

Sifat mekanis dibutuhkan pada material komponen sayap pesawat terbang diantaranya adalah kuat tarik dari material. Tujuan penelitian ini adalah membahas metode pengukuran tegangan tarik pada spar cap sayap pesawat terbang dengan menggunakan peralatan di laboratorium. Peralatan tersebut terdiri dari sensor regangan, sensor beban, dan silinder hidrolik. Pembahasan hasil penelitian meliputi korelasi antara beban uji dan hasil pengukuran tegangan tarik *spar cap* pada daerah linier elastis. Dengan membandingkan hasil pengukuran tegangan eksperimental terhadap tegangan teoritis pada suatu tingkat tegangan di daerah linear elastis. Hasil pengukuran sensor regangan pada pengujian untuk beban tarik maksimum 73 kN terjadi pada *spar* tegak sebesar 21,39 N/mm² pada garis sumbu beban tarik, dan pada cap datar sebesar 52,74 N/mm² pada tegangan nominal.

Kata kunci : Kuat tarik, Sensor regangan, linear elastis.

Abstract

The mechanical properties of the materials on the wing aircraft component is given the tensile strength of the materials. The purpose of this study was to determine the measuring method of tensile stress on the wing spar cap aircraft component using equipment which is available in the laboratory. The equipment consists of strain gauges, load cell and hydraulic actuator. The discussion of the test result includes correlation between test load and the measurement results and the tension stress on the spar cap in linear elastic range and comparison of the measurement results of the experimental stress with theoretical stress on the linear elastic stress level. The result of strain gauge measurement on the tensile test of the loading maximum 73 kN at the vertical spar is equal 21,39 N/mm² on the load axis and at the horizontal spar is equal 52,74 N/mm² on the nominal stress.

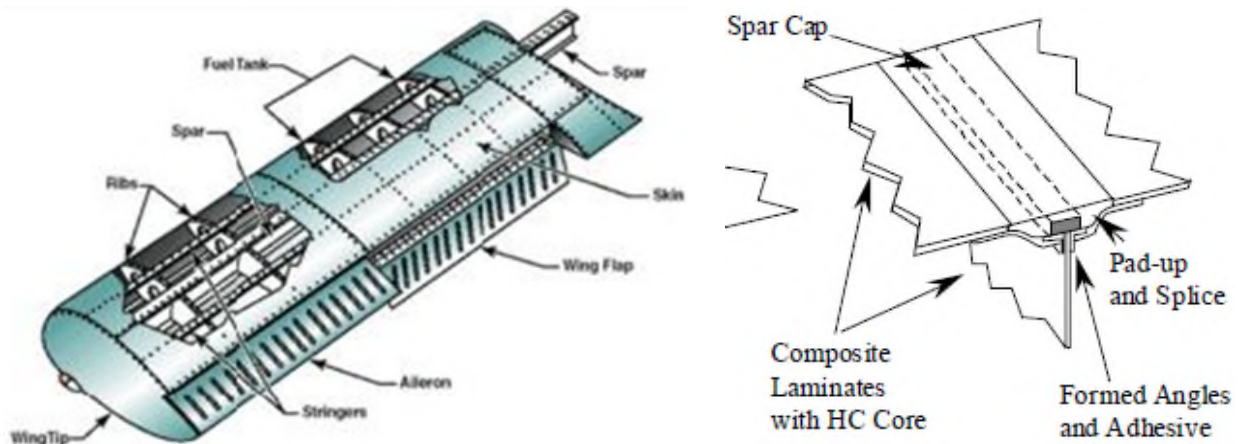
Keywords: Tensile strength, Strain gauge, linear elastis.

1. PENDAHULUAN

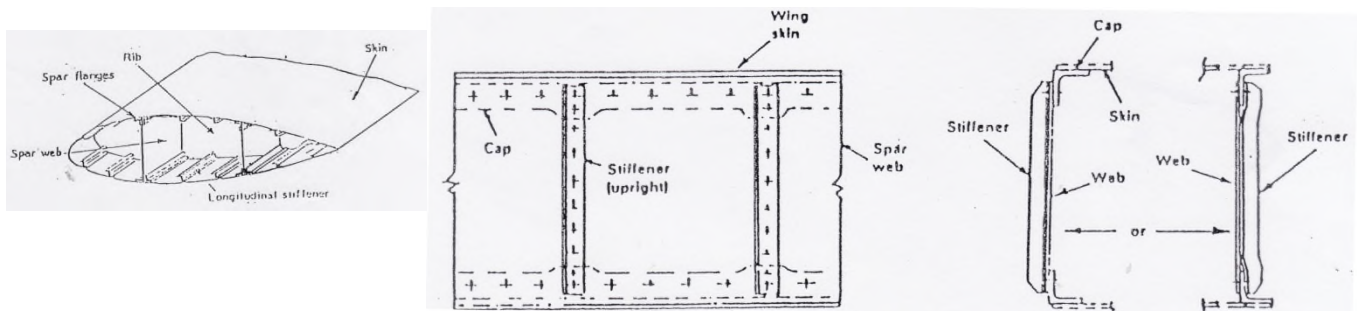
Pada perancangan sayap pesawat terbang biasanya menggunakan dua spar atau lebih, hal ini dilakukan untuk memenuhi kebutuhan ruang untuk penyimpanan bahan bakar sehingga digunakan konstruksi dua spar pada *wing box* seperti Gambar 1-1. Konstruksi dua spar pada umumnya meliputi *front spar* dan *rear spar* seperti Gambar 1-2. Konstruksi *spar cap* seperti berfungsi untuk menahan dan mentransmisikan beban aksial tekan dan aksial tarik akibat lentur. *Spar Cap* tersebut dirancang dengan jari-jari girasi yang besar agar mampu menahan tegangan tekuk lokal yang tinggi. *Cap* biasanya dihubungkan dengan penguat vertikal yang dikelilingi ke *web*. Struktur tersebut harus mampu menahan gaya angkat daerah kulit sayap bagian bawah yang menimbulkan tegangan lentur terhadap sayap. *Spar* yang merupakan rangka sayap akan mengalami beban tekan pada struktur bagian atas dan beban tarik pada struktur bagian bawah[1]. Sehingga *spar cap* bagian bawah[2] dapat diasumsikan akan mengalami beban tarik dalam pengujian. Pengukuran dengan sensor regangan pada benda uji *spar cap*, dapat mengetahui tegangan yang timbul secara eksperimental pada rangka batang tersebut. Disini dibahas mengenai metode pengukuran dengan sensor regangan dan analisa hasil penelitian pengukuran. Sayap pesawat terpasang pada badan pesawat (*fuselage*). Sayap mempunyai dua spar. Satu spar biasanya terletak dekat dengan bagian depan dari sayap, dan yang lainnya sekitar dua atau tiga dari jarak ke depan dari *wing trailing edge*. Spar terpasang paralel pada sumbu lateral pesawat terbang dari *fuselage* ke depan sampai ke *wing tip* dan biasanya terpasang

pada *fuselage* oleh sambungan *fiting* dari sayap berupa batang datar atau *trusses*[8]. *Spar* adalah struktur utama batang pada komponen sayap yang membentang sepanjang span pada sisi kanan *fuselage*. *Spar* membawa beban terbang dan berat dari dasar sayap[9]. Struktur lain dalam bentuk batang seperti *ribs* juga diikat pada *spar* atau beberapa *spar* dengan konstruksi tegangan kulit untuk menunjang beban yang timbul. Pada sayap pesawat terbang komponen *wing box* terbuat dari metal dengan dua lapisan, satu bagian untuk material kulit (*skin*) dan bagian lainnya untuk material *cap* dari *spar* yang terdistribusi sepanjang permukaan kulit[10].

Model struktur konstruksi sayap (*wing spar*) bahwa akibat gaya gaya yang bekerja akan memberikan efek pada komponen dan struktur sayap, dalam hal ini *spar* bagian atas mengalami tekan dan *spar* bagian bawah mengalami tarik .



Gambar 1-1. Sayap (*wing spar*) dan *Spar Cap*[8]



Gambar 1-2. *Spar* dan *cap* pada sayap

Struktur *spar cap* bagian bawah dalam penggunaannya di pesawat terbang, sebagian besar menerima beban tarik pada operasinya[7]. Pembebanan operasi tersebut meliputi beban saat penerbangannya mulai dari lepas landas, penerbangan menerima beban angin sampai mendarat di landasan. Simulasi beban-beban tersebut agar cukup kekuatan adalah dengan memberikan beban statis dengan faktor keamanan. Dengan asumsi bahwa struktur *spar cap* bagian bawah menerima beban tarik, maka pada struktur tersebut, dapat dilakukan simulasi beban aksial statis tarik, seperti Gambar 1-2.

Metode eksperimental sensor regangan (*strain gauge*) ini ditentukan melalui pengukuran terhadap perubahan sifat tarik bahan akibat pembebanan pada struktur *spar cap* bagian bawah. Prinsip kerja sensor regangan ialah harga tahanan suatu kawat penghantar listrik akan berubah jika kawat itu mengalami regangan . Apabila kawat itu ditempelkan pada permukaan bahan struktur *spar cap* bagian bawah yang mengalami regangan, sehingga regangan permukaan tersebut berpengaruh pada kawat pengantar. Maka perubahan tahanan yang terukur menunjukkan adanya regangan pada batang tersebut. Jadi dengan

mengukur perubahan tahanan, maka regangan pada permukaan struktur *spar cap* bagian bawah dapat ditentukan.

Terdapat hubungan konstanta kesebandingan antara tahanan relatif sensor regangan (*strain gauge*) $\Delta R/R$ dan regangan yang disebut K – faktor.

$$\Delta R/R = K \cdot \varepsilon \quad (1)$$

$$\varepsilon = \Delta l/l \quad (2)$$

Harga dari ΔR : perubahan tahanan kawat ukur regangan sesudah pengujian[4]

R : tahanan kawat ukur sebelum pengujian

K : gauge faktor atau faktor dari *strain gauge*

ε : regangan yang terjadi pada benda uji[5]

Δl : perubahan panjang benda uji setelah pengujian

l : panjang mula benda uji

Tegangan pada benda kaku dilakukan pengukuran pada daerah linier elastis dan perhitungan dengan persamaan hukum Hooke[3][6] terdapat korelasi hubungan linier antara tegangan dan regangan.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Harga dari σ : tegangan

ε : regangan

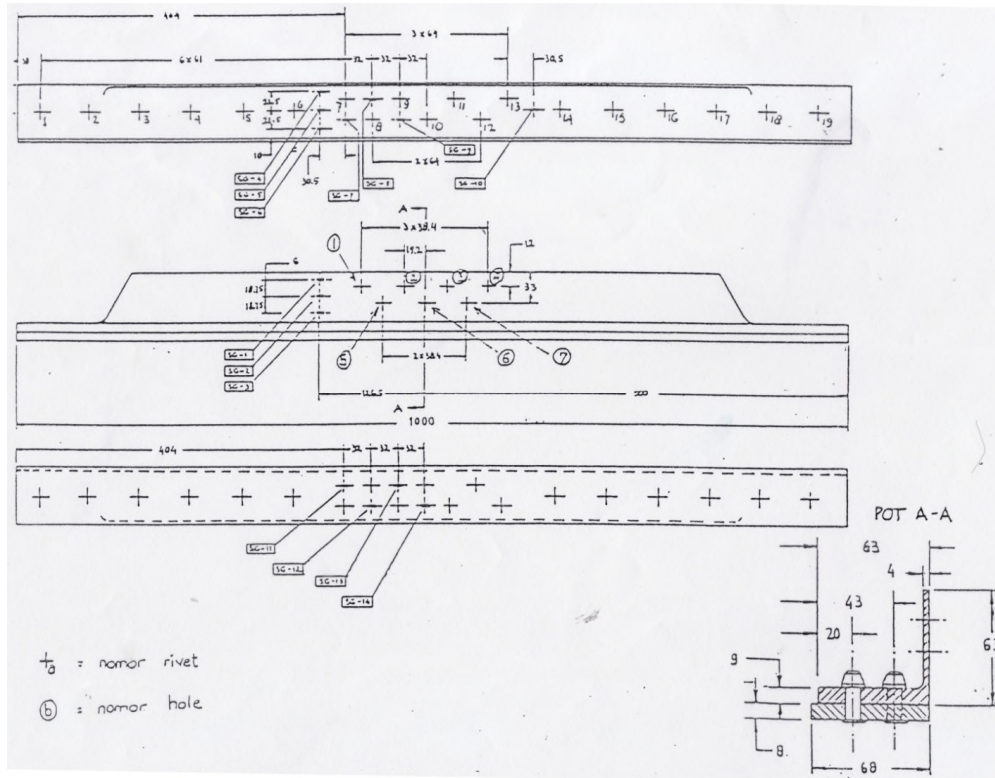
E : modulus elastisitas

Jenis sensor regangan atau *strain gauge* yang digunakan menggunakan merk HBM dengan tipe HBM – 6/120 LY 13 untuk material Aluminium. Dengan area 1,5 mm, menggunakan k faktor kepekaan $1,98 \pm 0,1\%$ yang mampu sampai 80000 μS . Menggunakan perekat lem *Z70cyanoacrylate*, dengan pelapis *cover SG 25 ABM 75*.

2. METODOLOGI

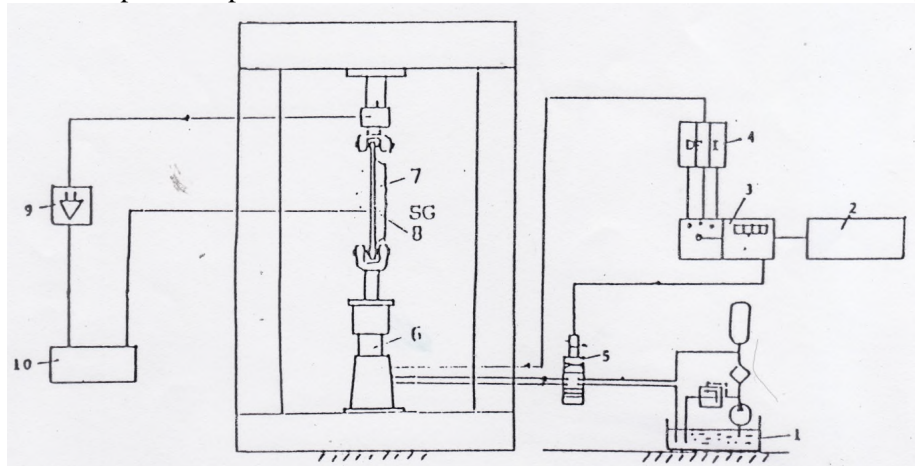
Benda uji yang dipakai pada penelitian ini adalah batang *spar cap* yang terdiri dari *cap* tegak, *cap* datar dan kulit (*skin*) yang semuanya membentuk satu kesatuan, panjang benda uji 1000 mm, disesuaikan dengan langkah mesin dan gaya pengujian.

Penelitian ini menggunakan metodologi pendekatan banding pengukuran tegangan tarik pada komponen *coupon spar cap* sayap pesawat terbang menggunakan peralatan di laboratorium, dilakukan dengan pengujian tarik. Struktur pesawat terbang dirancang bangun menggunakan struktur *damage tolerance* berdasarkan *Joint Aviation Requirements JAR Part 25 Paragraph 25.571*. Metode ini untuk memperkirakan lokasi tegangan tinggi, batas aman. Benda uji tersebut diletakan dengan posisi vertikal pada mesin uji servo hidrolik 250 KN. Kemudian dilakukan penarikan terhadap benda uji tersebut agar mendapatkan beban uji tarik aksial dengan menggunakan silinder hidrolik yang gerakannya diatur dan dikendalikan oleh sinyal listrik. Silinder hidrolik tersebut digunakan untuk dapat menghasilkan gaya tarik. Harga modulus elastisitas bahan $E = 74.300,8 \text{ N/mm}^2$ untuk material *cap* Al 2024.T351 *extrusion* dan $E = 74.995,2 \text{ N/mm}^2$ untuk material *skin* Al 2024.T351 *plate*[11] .



Gambar 2-1. Posisi sensor regangan padaspar cap.

Pada benda uji *spar cap* seperti Gambar 2-1 dirakit dengan (empat belas) sensor regangan (strain gauge) pada posisi yang berbeda, tergantung untuk mengetahui distribusi tegangan yang terukur saat pengujian awal, untuk peletakan kelurusan atau posisi simetri terhadap sumbu beban. Pada pengujian komponen dilakukan pada 3 (tiga) buah benda uji yang nilai rata ratanya seperti terlihat pada Tabel 3-2. Benda uji dikondisikan pada temperatur $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ dan kelembaban $50 \pm 5 \% \text{ RH}$ selama 40 jam.



- Keterangan:
- | | |
|-------------------------|-----------------------------------|
| 1. Hydraulic Power Pack | 6. Silinder hidrolik |
| 2. Command Signal | 7. Benda uji |
| 3. Controller | 8. Strain gauge (sensor regangan) |
| 4. Amplifier | 9. Measuring Amplifier |
| 5. Servo valve | 10. Data logger |

Gambar 2-2. Peralatan pengujian



Gambar 2-3. Mesin uji Servohidrolik 250 KN dan Data logger

Gambar 2-2 memperlihatkan peralatan pengujian pada pengukuran regangan *spar cap* dengan pembebanan tarik. Penarikan statis tersebut dilakukan dengan kecepatan pembebanan konstan 5 KN/detik. Pengujian dilakukan pada mesin uji Servohidrolik 250 KN, selama pengujian berlangsung, dilakukan pengukuran regangan dengan sebuah *data logger* seperti Gambar 2-3 dan dibuat grafik beban tarik terhadap tegangan.

Selama pengujian tarik berlangsung, silinder hidrolik tersebut bergerak dalam arah vertikal. Sinyal listrik dari pengendali elektronik diperkuat dengan amplifier, juga diatur sesuai dengan beban yang diberikan. Gerakan dari silinder hidrolik tersebut terjadi karena tekanan dari fluida kerja oli yang dipompakan dari *hydraulic power pack*, dengan membuka dan menutup *servo valve*, yang dikontrol oleh pengendali elektronik. Selama penarikan statik dilakukan pengukuran regangan pada benda uji *spar cap* untuk suatu pembebanan tertentu, dengan menggunakan sensor regangan yang nilai regangannya tercatat dengan alat *data logger*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk mengetahui tegangan yang terjadi pada *spar cap* dilakukan pengukuran regangan melalui pengukuran dari 14 titik ukur sensor regangan yang terpasang pada benda uji tersebut. Hal itu dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan tarik yang terjadi pada benda uji dan dipengaruhi lubang akibat keling (*rivet*) pada *cap* tegak, *cap* datar dan kulit (*skin*).

Lokasi peletakan sensor regangan No. 1, 2 dan 3 untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada *cap* tegak. Sensor regangan No. 4, 5 dan 6 untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi pada *cap* datar. Sensor regangan No. 7, 8 dan 9 untuk mengetahui distribusi tegangan minimum pada *cap* datar. Sensor regangan No. 10 untuk mengetahui kesimetrisan dari kedua sisi atas dan bawah. Sensor regangan No. 11, 12, 13 dan 14 untuk mengetahui distribusi tegangan minimum pada kulit. Sensor regangan dan kegunaan seperti terlihat pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1. Sensor regangan dan kegunaan

Sensor Regangan	Kegunaan
1 2 3	Untuk mengetahui distribusi tegangan pada <i>cap</i> tegak
4 5 6	Untuk mengetahui distribusi tegangan pada <i>cap</i> datar
7 8 9	Untuk mengetahui distribusi tegangan minimum pada <i>cap</i> datar
10	Untuk mengetahui kesimetrisan kedua sisi atas dan bawah
11 12 13 14	Untuk mengetahui distribusi tegangan minimum pada kulit

Pada pengujian pendahuluan dilakukan pembebanan pada daerah elastis linier yang mengikuti hukum kriteria Hooke antara pembebanan terhadap perpanjangan atau tegangan terhadap regangan.

Pengaruhnya terhadap hasil pengukuran benda uji pada *cap* tegak untuk beban maksimum 73 kN, besar tegangan pada sensor regangan No.1 sebesar 20,7 N/mm² hampir sama dengan tegangan pada sensor regangan No. 3 sebesar 20,5 N/mm². Sedangkan tegangan pada sensor regangan No. 2 sebesar 21,39 N/mm², sensor regangan No. 2 ini lebih besar karena mendekati garis sumbu beban tarik.

Pada *cap* datar untuk beban maksimum 73 kN, besar tegangan pada sensor regangan No. 4, 5 dan 6 adalah seragam sebesar 54,4 N/mm², karena dekat dengan sumbu beban tarik. Besar tegangan pada sensor regangan No.7 sama dengan sensor regangan No.9 sebesar 50,1 N/mm². Sedangkan tegangan pada sensor regangan No. 8 sebesar 52,74 N/mm², semua mengalami tegangan mendekati tegangan nominal. Tegangan pada sensor regangan No. 10 sebesar 55,4 N/mm² untuk mengetahui kesimetrisan pembebanan dengan membandingkan sensor regangan No.5 yang mempunyai simpangan sekitar 1,8%.

Pada kulit (*skin*) untuk beban maksimum 73 kN, untuk mengetahui tegangan minimum atau tegangan rata-rata dari sensor regangan No. 11, 12, 13 dan 14 adalah sebesar 67,4 N/mm².

Peletakan sensor regangan yang dekat dengan garis sumbu beban tarik, diantaranya sensor regangan No. 2 adalah regangan yang terjadi pada *cap* tegak dan sensor regangan No. 8 adalah regangan yang terjadi pada *cap* datar dan mengalami tegangan terbesar dari tegangan nominal. Sedangkan nilai regangan dan tegangan tersebut seperti terlihat pada Tabel 3-2.

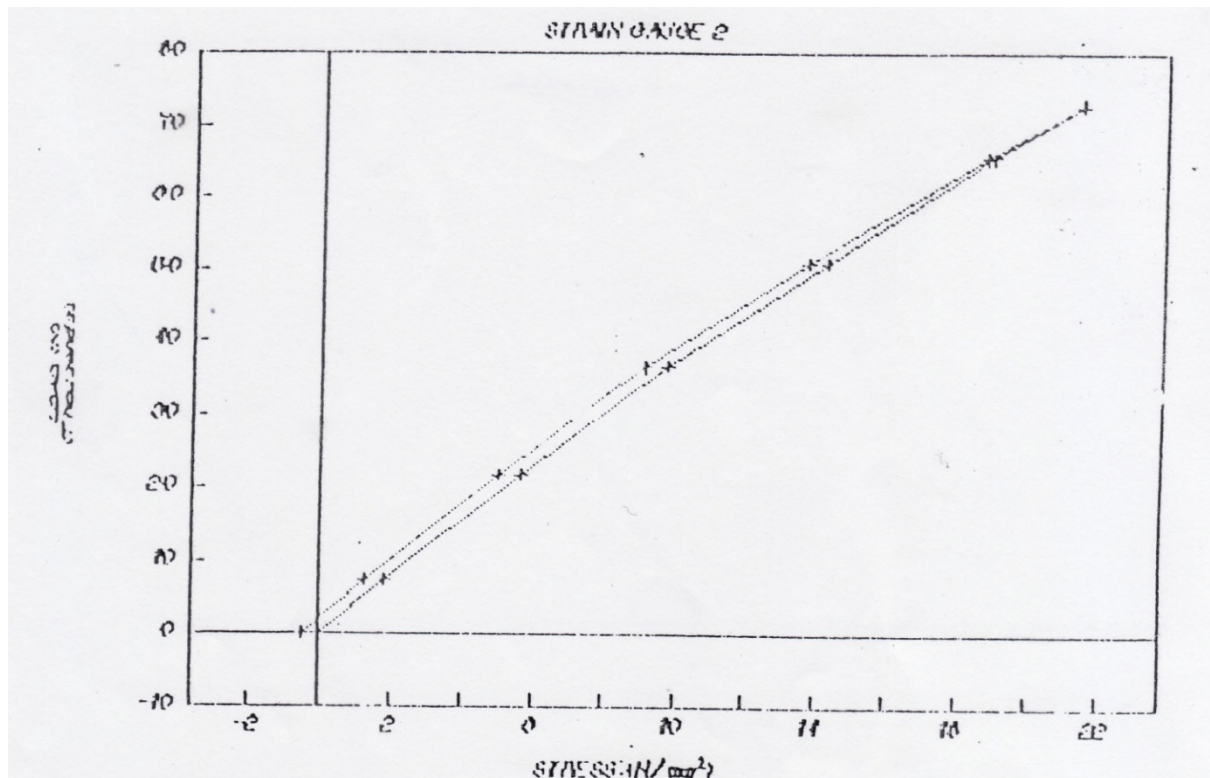
Tabel 3-2. Hasil pengukuran rata-rata regangan yang terjadi pada *cap*.

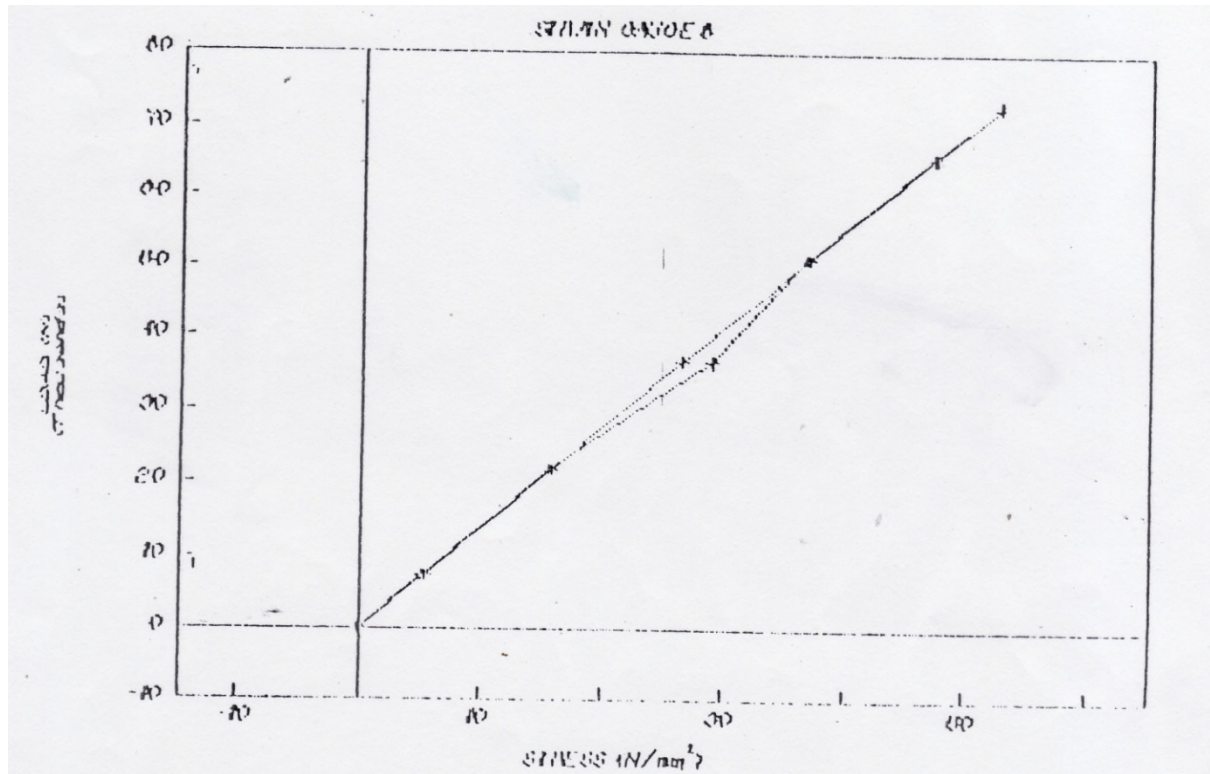
Beban kN	Sensor regangan No.2			Sensor regangan No. 8		
	Tegangan teori N/mm ²	Test		Tegangan Teori N/mm ²	Test	
		Regangan μ S	Tegangan N/mm ²		Regangan μ S	Tegangan N/mm ²
0,15	0	0,004	0	0,014	0,8	0,060
7,4	2,02	24,6	1,84	6,22	72	5,40
22	5,96	75,5	5,66	20,08	211,5	15,86
36,5	9,96	130,3	9,77	33,49	352,2	26,41
51	13,88	189,3	14,20	46,78	492,4	36,93
65,5	17,84	252	18,89	60,13	632,3	47,42

Lanjutan Tabel 3-2. Hasil pengukuran rata-rata regangan yang terjadi pada *spar cap*.

73	19,84	285,2	21,39	66,,83	703,2	52,74
65,5	17,84	249,8	18,73	60,12	631,6	47,37
51	13,88	182,9	13,72	46,76	489,4	36,70
36,5	9,92	122,2	9,16	33,43	384,4	28,83
22	5,96	66,9	5,02	20,11	207,8	15,58
7,4	2,00	16,5	1,24	6,73	67,5	5,06
-0,027	0,007	-6,5	-0,49	-0,02	-0,4	-0,30

Pada korelasi hubungan beban dan tegangan seperti pada Gambar 3-1 dan Gambar 3-2 adalah pada suatu tingkat pembebanan 73 kN. Sehingga harga tegangan pengujian dapat diketahui dari hukum Hooke, dengan besar modulus elastisitas $E = 74.300,8 \text{ N/mm}^2$ untuk bahan *cap* Al 2024.T3511 *extrusion* dan $E = 74.995,2 \text{ N/mm}^2$ untuk bahan *skin* Al 2024.T351 *plate*. Harga deviasi pengukuran tegangan pada beban 73 kN mempunyai nilai penyimpangan sekitar 7,8 % lebih tinggi dari harga teoritis untuk sensor regangan No.2 pada *cap* tegak serta penyimpangan sekitar 21 % lebih rendah dari harga teoritis untuk sensor regangan No. 8 pada *cap* datar. Hal tersebut disebabkan karena kemungkinan ukuran yang tidak seragam sepanjang benda uji *spar cap* atau pengambilan harga modulus elastisitas yang merupakan karakteristik dari material komponen pesawat terbang. Pengambilan asumsi linier mengikuti hukum Hooke untuk perhitungan tegangan saat pengujian pada Tabel 3-1 masih memenuhi, karena pada Gambar 3-1 dan Gambar 3-2 terlihat benda uji masih mengikuti hukum Hooke dimana harga pembebanan terhadap tegangan adalah mendekati linier dan material terlihat tidak terjadi perubahan plastis setelah beban dikembalikan ke nol.

Gambar 3-1. Beban tarik terhadap tegangan untuk *strain gauge* No.2.



Gambar 3-2. Beban tarik terhadap tegangan untuk strain gauge No.8.

4. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian pengukuran sensor regangan pada pengujian untuk beban tarik maksimum 73 kN terjadi pada *spar* tegak sebesar 21,39 N/mm² pada garis sumbu beban tarik dari sensor regangan No.2, dan pada *spar cap* datar sebesar 52,74 N/mm² pada tegangan nominal dari sensor regangan No.8. Dengan korelasi linear elastis hukum Hooke serta besar modulus elastisitas $E = 74.300,8$ N/mm² untuk bahan *cap* Al 2024.T3511 *extrusion* dan $E = 74.995,2$ N/mm² untuk bahan *skin* Al 2024.T351 *plate* dapat diketahui nilai tegangannya. Pengukuran tegangan tarik pada *spar cap* sayap pesawat terbang dapat dilakukan dengan baik menggunakan peralatan laboratorium. Penyimpangan 7,8% lebih tinggi dari harga teoritis untuk sensor regangan No.2 pada *cap* tegak dan penyimpangan 21% lebih rendah dari harga teoritis untuk sensor regangan No.8 pada *cap* datar, kemungkinan ketidakteraturan ukuran *spar cap* atau nilai modulus elastisitas.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih diucapkan kepada Kepala Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur dan Kabid. Layanan Jasa Kekuatan Struktur atas fasilitas dan dukungan dalam melakukan kegiatan penelitian.

PERNYATAAN PENULIS

Penulis dengan ini menyatakan bahwa seluruh isi menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA:

- 1) Bruhn E.F ,1973,*Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, Ohio Printed, Cincinnati, USA.
- 2) Khumar, Bharat ,2005, *An Illustrated Dictionary of Aviation*, Mc Graw Hill, New York, ISBN 0 071396063
- 3) Callister, William D. ,2014, *Materials Science and Engineering*, John Wiley & Sons, Inc, New York.
- 4) Hoffman K., 2010, *Applying The Wheatstone Bridge Circuit*, Hottinger Baldwin Messtechnik.
- 5) Hoffman K., 2010, *Measuring Elementary Load Cases with Strain Gauges*, Hottinger Baldwin Messtechnik.
- 6) Timoshenko S, 1976, *Strength of Materials, Part I*, Robert E Krieger Publishing Company, Huntington New York.
- 7) Ambri, Ramandeep Kaur ,2014, *Spar and Stringer Function and Designing*, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering Vol 1 September, aalria@yahoo.in , diakses April 2016.
- 8) N. Maheswaran, SP. Venkatesan, MS. Sampath Kumar, G Velmurugan, N Sathishkumar, M Priya, 2015, *Study of Weight Optimization on Spar Beam for the Wing of an Aircraft* ME Aeronautical Engineering Exel Engineering College, ISSN-2347-4890, Vol 3 Issue 3 March, www.ijournal.in, diakses April 2016.
- 9) Mohamed Hamdan A, Nithiyakalyani S., 2014, *Design and Structural Analysis of the Ribs and Spars of Swept Back Wing*, International Journal of Emerging Technology and Advance Engineering, ISSN 2250 2459, ISO 9001: 2008 Certified Journal Vol 4 Issue 12 December, www.ijetae.com, diakses April 2016.
- 10) Matthew G Sexstone, 2014, *Aircraft Structural Mass Property Prediction Using Conceptual Level Structural Analysis*, National Aeronautics and Space Administration Langley Research Center, Hampton, Virginia, tersedia di 10.1.1.45.1805.pdf , diakses April 2016.
- 11) Deepak kumar, Loveleen, 2014, *Preliminary Sizing Procedure of Rib of Aircraft* International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, ISSN(0) 2393-8609 Vol 1 No1 September, Deepakgujjar45@gmail.com, diakses April 2016.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP PENULIS



DATA UMUM

Nama Lengkap : Sasi Kirono, Ir, MSc, Prof
Tempat & Tgl. Lahir : Klaten, 28 Agustus 1954
Jenis Kelamin : Laki-Laki
Instansi Pekerjaan : B2TKS- BPPT
NIP. / NIM. : 195408281980031007
Pangkat / Gol. Ruang : Pembina Utama/ IV e
Jabatan Dalam Pekerjaan : Ahli Peneliti Utama
Agama : Islam
Status Perkawinan : Kawin 2 Anak

DATA PENDIDIKAN

SLTA : SMA Negeri I Solo Tahun: 1972
STRATA 1 (S.1) : Teknik Mesin ITB Tahun: 1979
STRATA 2 (S.2) : Materials Science UI Tahun: 1989
STRATA 3 (S.3) : Tahun:

ALAMAT

Alamat Rumah : KompBPPT Jl.Teknologi 3No21Meruya Utara Kembangan
JakBar11620
Alamat Kantor / Instansi : B2TKS-BPPT Kawasan PUSPIPTEK Gd 220 Tangerang Selatan 15314
HP. : 08161436793
Telp. : 021.7560565
Email : sasi.kirono@yahoo.com

RIWAYAT SINGKAT PENULIS



SASI KIRONO, Ir, MSc, Prof. lahir di kota Klaten (Jawa Tengah) pada tanggal 28 Agustus 1954 bekerja sebagai pegawai negeri sipil di lingkungan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), masuk mulai tahun 1979, menjadi salah satu Peneliti di satuan kerja Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS) di Bidang Kajian Struktur. Diperbantukan sebagai staf Sub. Dit . Kekuatan Struktur Direktorat Teknologi IPTN 1982- 1983. Sebagai Koordinator Pelaksana Harian Pengujian Skala Penuh Pesawat Terbang CN 235 1992- 1995, dan N 250 1996–1998. Kepala Bidang Pengujian Komponen dan Konstruksi LUK 1998- 2004. Pembina Utama Gol. IV/e sejak 2001. Karir jabatan fungsional peneliti menjadi Ahli Peneliti Utama sejak 1 November 1999. Dilantik Profesor Riset Bidang Material Teknik dan Konstruksi sejak 5.1.2006. Riwayat pendidikan lulus ITB Teknik Mesin tahun 1979, Lulus UI *MaterialScience* tahun 1989.