

ANALISIS OPTIMASI TEBAL *RIB* SAYAP PESAWAT *WIG IN GROUND EFFECT 2 SEAT* DENGAN FEM

Bayu Handoko¹, H. Abu Bakar²

Program Studi Teknik Penerbangan Fakultas Teknik
Universitas Nurtanio Bandung

ABSTRAKSI

Pada Tugas Akhir ini, penulis akan melakukan optimasi tebal *rib* sayap pesawat WIG dengan menggunakan program *Finite Element Method* (FEM). Dimana dari hasil analisis terhadap *rib* tersebut dapat diketahui geometri tebal *web rib* sepanjang bentangan sayap.

Penentuan tebal *rib* dilakukan berdasarkan analisis beban geser yang diterimanya. Hasil perhitungan dalam analisis tebal *rib* dapat diverifikasi dengan menggunakan *software catia* melalui *Finite Element Method*.

Keberhasilan dalam memperoleh tebal *rib* yang optimal dapat dilihat dari nilai *margin of safety*. Hasil dari analisis menunjukkan nilai dari *margin of safety* pada *web rib* di setiap *station* yang digambarkan dalam bentuk grafik. *margin of safety* untuk perhitungan manual memiliki nilai 1,08.

Nilai *margin of safety* dari hasil verifikasi menggunakan FEM memiliki nilai 1,04. Nilai *margin of safety* lebih besar dari 0 menunjukkan bahwa material dari struktur kuat menahan tegangan yang terjadi.

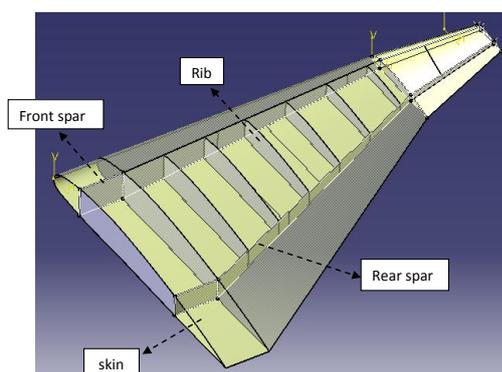
Pendahuluan

Pesawat terbang memiliki komponen-komponen utama diantaranya sayap (*wing*), bodi pesawat (*fuselage*), ekor pesawat (*empenage*), roda pendaratan (*landing gear*), mesin (*engine*), dan lain-lain. Komponen pesawat yang sangat penting dan paling berpengaruh pada pesawat adalah di bagian sayap pesawat, karena sayap berfungsi untuk menghasilkan gaya angkat (*lift*). Oleh karena itu sayap pesawat harus memenuhi persyaratan, salah satunya kekuatan struktur agar dapat menahan beban dan gaya yang timbul pada sayap. Kontruksi sayap harus benar-benar kuat, artinya komponen-komponen pada sayap harus mampu

menyangga dan menahan semua beban yang timbul dalam berbagai macam kondisi, baik pada saat *take off* dan *landing*, di darat maupun di udara sesuai dengan regulasi untuk masing-masing jenis pesawat yang mengacu pada CASR (*Civil Aviation Safety Regulation*).

Pesawat yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah pesawat jenis *wing ground effect* (WIG), yaitu pesawat yang terbangnya menggunakan *ground effect*. Pesawat ini biasanya diterbangkan di atas permukaan laut, dengan memanfaatkan permukaan air laut yang akan menciptakan bantalan udara di bawah sayap pada saat pesawat berada di udara.

Struktur penyusun sayap pesawat WIG-2 *seater* terdiri dari *upper skin*, *lower skin*, *spar* dan *rib*. *Upper skin* dan *lower skin* berfungsi untuk menahan beban internal yaitu tegangan geser, tegangan tekan, dan tegangan tarik yang berasal dari perbedaan tekanan (*pressure*) yang terjadi pada sayap. *Rib* berfungsi untuk menahan tegangan geser akibat dari lift. Komponen-komponen tersebut membentuk suatu kesatuan struktur yang dinamakan *wing box*.



Gambar 1 Wing Box

Optimasi tebal dari *Rib* adalah menghitung tebal *web Rib* yang tepat dan efektif dalam menahan tegangan yang di alami/di pikulnya. Tebal *web* yang dihitung harus mampu menahan *buckling* yang timbul akibat tebal *web* yang tipis. Salah satu teknik untuk mengatasi timbulnya *buckling* (tekuk) pada *web rib* adalah menggunakan konstruksi/bahan komposit, yaitu dengan cara menaikkan momen inersia penampang dari struktur *web* tersebut naik namun berat struktur tetap terjaga beratnya.

Optimasi perhitungan tebal *Rib* dilakukan dengan cara mendekati *level*

stress terhadap *strength* dari material untuk mendapatkan tebal material yang tepat.

Perumusan Masalah

1. Bagaimana analisa optimasi tebal rib sayap pesawat *wig* supaya dapat menahan beban dan memenuhi persyaratan CASR yang ditentukan?
2. Berapa *factor of safety* dan *margin of safety* yang didapat?
3. Berapa berat total dari web rib hasil optimasi?

Tipe Sayap Wig 2-Seater

Pesawat WIG 2 *seater* menggunakan tipe *wing swept forward* atau yang sering dikenal dengan *swept* ke depan pada sayap utamanya dan menggunakan tipe *swept back* pada *winglet*-nya. Struktur sayapnya terdiri atas *spar* depan, *spar* belakang, *rib-rib*, panel atas (*upper skin*), dan panel bawah (*lower skin*).

Geometri sayap dari pesawat WIG ini terbagi menjadi tiga bagian besar yaitu *winglet*, *wing swept forward*, dan *wing constant*. *Wing constant* memiliki *chord* yang tetap. *Winglet* memiliki bentuk *swept back* atau *swept* ke arah belakang.



Gambar 2 Pesawat WIG-2 seater

PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan membahas optimasi tebal *web rib* untuk memperoleh tebal *web rib* yang dapat menahan tegangan geser maksimum dan menjaga wing box tetap berbentuk airfoil.

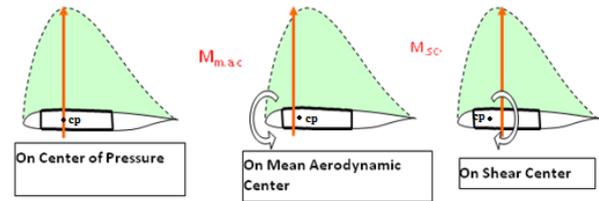
Jika diperoleh ukuran tebal *web rib* hasil dari perhitungan adalah tipis, maka harus diantisipasi agar tidak terjadi *buckling*. Cara mengantisipasinya adalah dengan menaikkan besarnya inerti penampang dari struktur *web rib* dengan menggunakan *foam*. Setelah mendapatkan tebal *web rib* maka langsung dapat dihitung massa dari *rib* tersebut.

Optimasi Struktur Rib

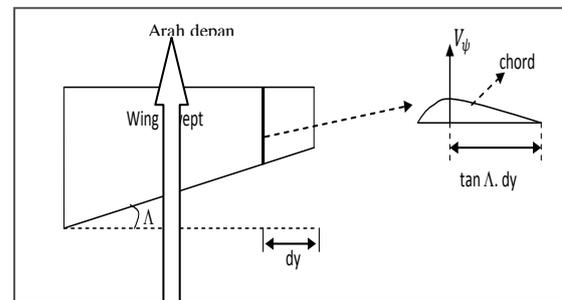
Rib berfungsi untuk mempertahankan bentuk airfoil sehingga bila terjadi gaya geser yang terjadi akibat momen torsi. *Rib* sendiri berbentuk *web* yang geometrinya mengikuti bentuk *airfoil* dari sayap. Jumlah *web rib* pada pesawat *wing in ground effect* adalah 11 *web rib* untuk sebelah sayapnya, berdasarkan disain yang ditentukan, jarak antar rib 500 mm dan ada satu *web rib* yang jaraknya 300 mm karena sambungan antara *winglet* dan *wing swept forward*.

Menghitung Gaya geser yang dibebani pada Struktur Web Rib

Gaya geser terdapat pada struktur *web rib* adalah gaya geser yang berasal dari momen torsi. Gaya geser karena lift dikonversi menjadi gaya tekan karena arahnya.



Gambar 3 Arah momen *pitching* dan momen geser ke *shear center*



Gambar 4 Arah momen *swept*

Perhitungan gaya geser akibat momen torsi dapat dianalisis pada setiap *station* dari *wing box*.

$$M_{pic} = \frac{n_{max} \cdot mtow \cdot g}{S_{eff}} \cdot \frac{c_m}{cl_{max}} \cdot Ct^2 \cdot b \cdot \left\{ \psi + B \cdot \psi^2 + \left(B^2 \cdot \frac{\psi^3}{3} \right) \right\}$$

$$M_{swept} = \frac{n_{max} \cdot mtow \cdot g}{S_{eff}} \cdot Ct \cdot b^2 \cdot \tan \Lambda \cdot \left(\frac{\psi^2}{2} + \frac{B}{3} \cdot \psi^3 \right)$$

$$M_{geser} = \frac{n_{max} \cdot mtow \cdot g}{S_{eff}} \cdot ct^2 \cdot b \cdot \left(\frac{rs - fspar}{2} - mac \right) \cdot (1 + B \cdot \psi) \cdot \left(\psi + \frac{B}{2} \cdot \psi^2 \right)$$

$$M_T = M_{pic} + M_{swept} + M_{geser}$$

Dimana:

- n_{max} = load factor
- $mtow$ = maksimum take off weight
- g = gravitasi
- S_{eff} = luas sayap efektif
- c_m = koefisien momen
- cl_{max} = koefisien lift
- Ct = chord tip
- b = span
- rs = rear spar
- f_{spar} = front spar
- mac = mean aerodynamic chord

ψ = daerah distribusi lokal *chord*
 Perhitungan gaya geser dapat dilihat pada lampiran 1

Tabel 1 Gaya geser akibat momen torsi

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	momen torsi (N.m)	Tinggi box (mm)	gaya geser akibat momen torsi (N)
1	0	0	44,88	0
2	0,5	336,7066	88,12	1910,433
3	0,8	743,5378	105,06	3538,634
4	1	730,8869	118,92	3073,071
5	1,5	267,3391	160,49	832,8787
6	2	-490,939	188,21	1304,253
7	2,5	-2491,39	229,72	5422,67
8	3	-4510,73	257,50	8758,838
9	3,5	-8757,46	299,07	14641,21
10	4	-12117,7	324,36	18679,39
11	4,5	-12117,7	324,36	18679,39

Penomoran pada *web rib* ditentukan dari ujung *wingtip* menuju ke *wing root* dengan jarak 500 mm pada setiap section, untuk rib ke-3 jaraknya 300 mm dari *web rib* yang ke-2 karena adanya sambungan antara *wing swept back* dengan *wing swept forward*.

Tebal Teoritik web Rib

Tebal Teoritik adalah tebal *web rib* berdasarkan perhitungan kemampuan material untuk menahan beban yang terjadi pada struktur *rib*. Tebal Teoritik pada *web rib* berbeda-beda tergantung pada lebar *box* dan gaya yang terjadi.

Persamaan yang digunakan untuk menghitung tebal teoritik akibat gaya geser adalah:

$$t_{rib} = \frac{F_{geser}}{W_{box} S_{cu}}$$

Dimana:

F_{geser} =Gaya geser pada *web rib*

W_{box} = Lebar *box*

S_{cu} = *shear strength* material E-glass

Perhitungan tebal *web rib* ke-2 :

$$t_{rib} = \frac{1910,43}{88,12 \times 40} = 1,08 \text{ mm}$$

Hasil perhitungan tebal *web rib* ditunjukkan pada Tabel 2

Tabel 2 Tebal perhitungan tebal teoritik akibat gaya geser

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	F_{geser} (N)	w box (mm)	S_{cu} rib (Mpa)	t rib teoritik (mm)	t web rib real (mm)
1	0	0	44,88	40	0,00	0,2
2	0,5	1910,433	88,12	40	1,08	1,2
3	0,8	3538,634	105,06	40	1,68	1,8
4	1	3073,076	118,92	40	1,29	1,4
5	1,5	832,8772	160,49	40	0,26	0,4
6	2	1304,253	188,21	40	0,35	0,4
7	2,5	5421,245	229,72	40	1,18	1,2
8	3	8758,837	257,50	40	1,70	1,8
9	3,5	14641,19	299,07	40	2,45	2,6
10	4	18679,39	324,36	40	2,88	3
11	4,5	18679,39	324,36	40	2,88	3

Tebal Manufacturing

Tebal *Manufacturing* adalah tebal yang terdapat dipasaran atau tebal yang dapat diproduksi oleh mesin tebalnya 0.1(mm) dan kelipatannya, tapi untuk disain dari *web rib* harus terdiri dari 2 lapisan jadi tebal minimum dari *web rib* adalah 0,2mm.

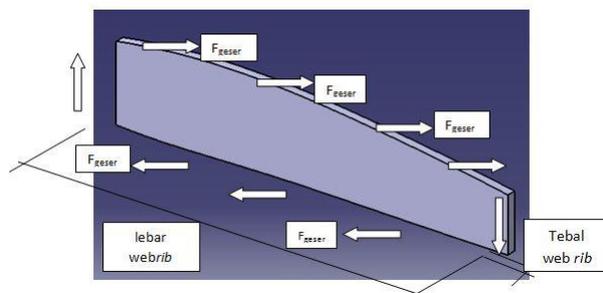
Berdasarkan tebal teoritik *web rib* yang diperoleh dari perhitungan tebal *teoritical* akibat gaya geser dapat ditentukan tebal *manufacturing web rib* setiap *section* adalah:

Tabel 3 Tebal *web rib* yang akan digunakan atau yang dapat diproduksi :

No. <i>Web Rib</i>	Jarak <i>rib</i> dari <i>wing tip</i> (m)	Tebal <i>web rib</i> real (mm)
1	0	0,2
2	0,5	1,2
3	0,8	1,8
4	1	1,4
5	1,5	0,4
6	2	0,4
7	2,5	1,2
8	3	1,8
9	3,5	2,6
10	4	3
11	4,5	3

Tegangan yang terjadi pada *web rib*

Tegangan geser dari *web rib* diperoleh dari gaya geser akibat momen torsi. seperti yang dijelaskan pada gambar:



Gambar 5 Tegangan geser yang terjadi pada *web rib*

Persamaan yang digunakan untuk menghitung tegangan geser adalah:

$$\tau_{rib} = \frac{F_{geser}}{W_{box}t_{rib}}$$

Dimana:

- τ_{rib} = tegangan geser pada *web rib*
- F_{geser} = gaya geser yang terjadi di *web rib*
- W_{box} = lebar box
- t_{rib} = tebal *web rib*

Perhitungan tegangan geser pada *web rib* ke-2

$$\tau_{rib} = \frac{1910,43}{88,12 \times 1,2} = 18,07 \text{ Mpa}$$

Hasil perhitungan tegangan geser di tunjukan pada tabel 4.4

Tabel 4 Perhitungan tegangan geser pada *web rib*

No. <i>Web Rib</i>	Jarak <i>rib</i> dari <i>wing tip</i> (m)	F_{geser} (N)	h box (mm)	t <i>rib</i> (mm)	τ_{rib} (Mpa)
1	0	0,00	44,88	0,2	0,00
2	0,5	1910,43	88,12	1,2	18,07
3	0,8	3538,63	105,06	1,8	18,71
4	1	3073,08	118,92	1,4	18,46
5	1,5	832,88	160,49	0,4	12,97
6	2	1304,25	188,21	0,4	17,32
7	2,5	5421,25	229,72	1,2	19,67
8	3	8758,84	257,50	1,8	18,90
9	3,5	14641,19	299,07	2,6	18,83
10	4	18679,39	324,36	3	19,20
11	4,5	18679,39	324,36	3	19,20

Membandingkan Tegangan geser pada *web rib* dengan *shear Strength Material*

Shear strength material didapatkan dari tabel properti material. Seperti yang telah diketahui sebelumnya bahwa material yang digunakan untuk *web rib* adalah material E-glass fabric 0/90 degree. Nilai dari *shear strength* material E-glass fabric 0/90 degree adalah 40 Mpa.

Tabel 5 Perbandingan tegangan geser masimum

No. <i>Web Rib</i>	Jarak <i>rib</i> dari <i>wing tip</i> (m)	Shear Strength (Mpa)	Tegangan geser <i>web rib</i> (Mpa)
1	0	40	0,00
2	0,5	40	18,07
3	0,8	40	18,71
4	1	40	18,46
5	1,5	40	12,97
6	2	40	17,32
7	2,5	40	19,67
8	3	40	18,90
9	3,5	40	18,83
10	4	40	19,20
11	4,5	40	19,20

Dari perhitungan dapat diperoleh grafik tegangan geser dan shear strength material E-glass:



Gambar 6 Perbandingan tegangan geser dengan shear Strength E-glass

Dari grafik dapat disimpulkan bahwa tegangan geser yang terjadi pada *web rib* masih dibawah *shear strenght* material E-glass.

Margin Of Safety

Salah satu persyaratan suatu material dapat digunakan dalam struktur ialah bila material tersebut memiliki kekuatan (*properti strength*) melebihi tegangan yang dibebaninya (*stress ultimate*) atau dengan kata lain *factor of safety* memiliki nilai lebih dari 0. Dan pada CASR part 23.303 ditentukan minimal *faktor of safety* (faktor keamanan) sebesar 1.5.

Sedangkan *Margine of safety*

$$Margin\ of\ safety = \left(\frac{stress\ ultimate\ material}{tegangan\ maksimum\ akibat\ beban\ disain} - 1 \right) > 0$$

desain yang dirancang masih mempunyai *margin*, atau sisa kelebihan ketika pembebanan mengalami hal yang sangat kritis sekali.

Perhitungan *margin of safety* pada *web rib* ke-2

$$MS = \left(\frac{40}{18,07} - 1 \right) = 1,21$$

Hasil perhitungan *margin of safety* ditunjukkan pada Tabel 6

Tabel 6 Perhitungan *margin of safety*

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	Shear Strength (Mpa)	Tegangan geser web rib (Mpa)	faktor of safety	margin of safety
1	0	40	0,00	2,07	1,07
2	0,5	40	18,07	2,21	1,21
3	0,8	40	18,71	2,14	1,14
4	1	40	18,46	2,17	1,17
5	1,5	40	12,97	3,08	2,08
6	2	40	17,32	2,31	1,31
7	2,5	40	19,67	2,03	1,03
8	3	40	18,90	2,12	1,12
9	3,5	40	18,83	2,12	1,12
10	4	40	19,20	2,08	1,08
11	4,5	40	19,20	2,08	1,08

Dari hasil perhitungan *margin of safety* lebih dari 0, yaitu antara 1,08 sampai 2,08 maka disain aman untuk digunakan.

Menentukan lebar core (foam)

Lebar dari *core* harus ditentukan agar dapat menahan tegangan geser yang terjadi pada *web rib* sehingga tidak menimbulkan buckling, persamaan untuk menghitung lebar *core* adalah:

$$h_c = \sqrt{\frac{\tau_{cu} \cdot A_{rib} \cdot h_{box}^2 \cdot 2}{C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot A_{skin}}}$$

Dimana :

- h_c = lebar *core*
- τ_{cu} = tegangan geser pada web rib
- A_{rib} = luas penampang *rib*
- h_{box} = tinggi box
- C = konstanta jepit
- E = modulus young material E-glass 90⁰
- A_{skin} = luas skin

Perhitungan lebar *core* untuk web rib ke-2

$$h_c = \sqrt{\frac{40 \times 479,04 \times 1,2 \times 88,12^2 \cdot 2}{4 \times 3,14^2 \times 2500 \times 479,04 \times 0,8}} = 0,97\ mm$$

hasil perhitungan untuk web rib yang lain dapat dilihat pada Tabel 7

Tabel 7 Perhitungan untuk menentukan lebar *core*

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	τ_{cu} (Mpa)	w box (mm)	t rib (mm)	h box (mm)	c	π	E (Mpa)	t skin (mm)	hc lebar core (mm)	hc real lebar core (mm)
1	0	40	200,00	0,2	44,88	4	3,14	25000	0,8	0,20	2
2	0,5	40	479,04	1,2	88,12	4	3,14	25000	0,8	0,97	2
3	0,8	40	566,50	1,8	105,06	4	3,14	25000	0,8	1,42	2
4	1	40	641,22	1,4	118,92	4	3,14	25000	0,8	1,42	2
5	1,5	40	865,39	0,4	160,49	4	3,14	25000	0,8	1,02	2
6	2	40	1014,84	0,4	188,21	4	3,14	25000	0,8	1,20	2
7	2,5	40	1239,01	1,2	229,72	4	3,14	25000	1,4	1,92	2
8	3	40	1388,46	1,8	257,50	4	3,14	25000	1,8	2,32	4
9	3,5	40	1612,63	2,6	299,07	4	3,14	25000	2,2	2,93	4
10	4	40	1749,00	3	324,36	4	3,14	25000	2,2	3,41	4
11	4,5	40	1749,00	3	324,36	4	3,14	25000	2,2	3,41	4

Dari tabel dapat disimpulkan lebar core real harus lebih besar dari pada lebar teoritikal supaya *web rib* yang didisain kuat menahan tegangan yang terjadi.

Menghitung Buckling Strength

Menaikkan nilai dari *buckling strength* untuk menahan tegangan tekan yang timbul sehingga tidak terjadinya *buckling* pada *web rib* dapat dilakukan dengan menggunakan *core* pada tebal dari *web rib*. Tujuan menggunakan *core* ini adalah untuk menaikkan nilai inerti penampang dari struktur sehingga secara otomatis nilai dari *buckling strength*-nya akan ikut naik. *Core* yang dipakai disini adalah material komposit berjenis foam.

Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung *buckling strength* pada *web rib*:

$$\tau_{buckling} = \frac{F_{cor}}{A} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I}{A_{rib} \cdot L}; A = h \cdot t_{rib}$$

Dimana:

- A_{rib} = luas area *rib*
- C = konstanta jepit
- E = modulus elastisitas material
- I = inersia
- L = jarak antar *rib*
- h = tinggi *box*
- t_{rib} = tebal *rib*

Perhitungan *buckling strength* untuk *web rib* ke-2

$$\tau_{buckling} = \frac{4 \times 3,14 \times 25000 \times \frac{479,04 \times 0,8 \times 2^2}{2}}{88,12 \times 1,2 \times 479,04^2} = 920,24 \text{ mpa}$$

Hasil perhitungan *buckling strength web rib* ditunjukkan pada Tabel 4.8

Tabel 8 Menentukan nilai buckling strength pada web rib:

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	C	π	E (Mpa)	w box (mm)	t skin (mm)	hc (mm)	h box (mm)	t rib (mm)	S buckling (Mpa)
1	0	4	3,14	25000	200,00	0,8	2	44,88	0,2	17451,02
2	0,5	4	3,14	25000	479,04	0,8	2	88,12	1,2	920,24
3	0,8	4	3,14	25000	566,50	0,8	2	105,06	1,8	428,15
4	1	4	3,14	25000	641,22	0,8	2	118,92	1,4	429,65
5	1,5	4	3,14	25000	865,39	0,8	2	160,49	0,4	825,62
6	2	4	3,14	25000	1014,84	0,8	2	188,21	0,4	600,36
7	2,5	4	3,14	25000	1239,01	1,4	2	229,72	1,2	235,13
8	3	4	3,14	25000	1388,46	1,8	4	257,50	1,8	641,46
9	3,5	4	3,14	25000	1612,63	2,2	4	299,07	2,6	402,36
10	4	4	3,14	25000	1749,00	2,2	4	324,36	3	296,45
11	4,5	4	3,14	25000	1749,00	2,2	4	324,36	3	296,45

Dari tabel diketahui bahwa besarnya *buckling strength* (kemampuan material untuk menahan *buckling*) pada setiap *web rib* berbeda tergantung dari tinggi box dan lebar box, serta tebal dari skin pada station yang didisain. Nilai *buckling strength* harus lebih besar dari nilai tegangan yang mampu ditahan oleh material E-glass.

Tabel 9 Perhitungan massa total web rib

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	Tebal manufacturing web rib (mm)	Tinggi box (mm)	Lebar box (mm)	Volume box (mm ³)		ρ (g/cc)	m (kg)
					t rib.h box.	W box		
1	0	0,2	44,88	200,00	1795,20	1,90E-06	0,003	
2	0,5	1,2	88,12	479,04	50657,39	1,90E-06	0,10	
3	0,8	1,8	105,06	566,50	107129,68	1,90E-06	0,20	
4	1	1,4	118,92	641,22	106753,64	1,90E-06	0,20	
5	1,5	0,4	160,49	865,39	55554,92	1,90E-06	0,11	
6	2	0,4	188,21	1014,84	76399,96	1,90E-06	0,15	
7	2,5	1,2	229,72	1239,01	341550,45	1,90E-06	0,65	
8	3	1,8	257,50	1388,46	643541,21	1,90E-06	1,22	
9	3,5	2,6	299,07	1612,63	1253947,87	1,90E-06	2,38	
10	4	3	324,36	1749,00	1701916,92	1,90E-06	3,23	
11	4,5	3	324,36	1749,00	1701916,92	1,90E-06	3,23	

Dari hasil perhitungan diatas diperoleh berat dari rib sayap sebelah kanan sebesar 11,4 kg, jadi berat total dari rib pada sayap WIG 2 seater adalah 22,9 kg.

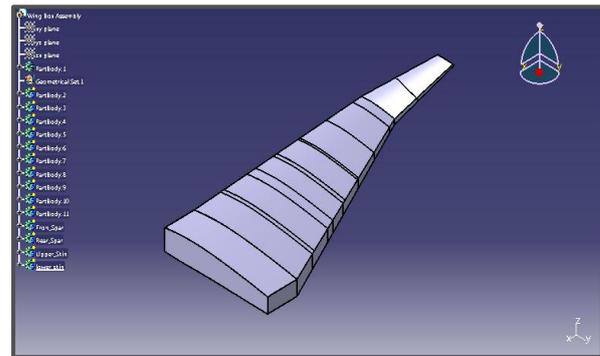
Pengujian Hasil Optimasi Tebal *rib* dengan FEM

Finite element method (FEM) adalah metode yang dapat digunakan untuk menganalisis distribusi tegangan pada sebuah struktur yang diberikan beban statis (*pressure*). Langkah awal yang dilakukan sebelum analisis distribusi tegangan dengan FEM adalah memodelkan hasil perhitungan analisis *web rib* tersebut ke dalam bentuk *wing box*. Model *wing box* tersebut langsung dapat diberikan beban sesuai dengan jenis beban dan besarnya kuantitas beban yang diinginkan dan kemudian divisualisasikan nilai distribusi tegangan tersebut dalam bentuk distribusi warna.

Pemodelan Hasil Perhitungan Optimalisasi

Analisis *web rib* yang telah dihitung dapat langsung dimodelkan kedalam bentuk struktur *wing box*. Model tersebut dapat langsung diberikan jenis material yang disesuaikan dengan jenis material pada perhitungan analisis *web rib* tersebut.

Berikut ini adalah gambar hasil pemodelan *wing box* dengan ketebalan dan ukuran yang sesuai dengan perhitungan analisis yang telah dilakukan (untuk melihat langkah-langkah pembuatan model *wing box* dapat dilihat pada lampiran):



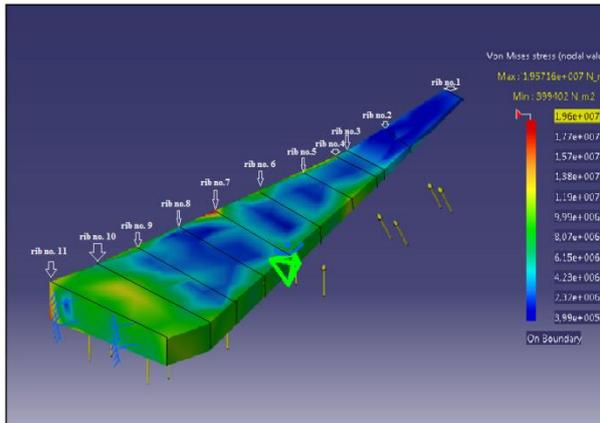
Gambar 7 Model *wing box* hasil perhitungan analisis

Analisis Distribusi Tegangan dengan Menggunakan FEM

Setelah melakukan pemodelan benda *solid* seperti yang telah digambarkan di atas, maka langkah selanjutnya adalah memberikan material pada model benda *solid* tersebut. Material yang diberikan adalah material komposit *E-glass* dengan massa jenis 1900 Kg/m^3 dan *yield strength* adalah $40 \times 10^6 \text{ N/m}^2$.

Hasil distribusi tegangan yang ditampilkan dalam bentuk distribusi warna oleh FEM dapat langsung dilakukan analisisnya. Analisis difokuskan pada distribusi perubahan warna di permukaan *web rib* dari *wing box* (hal ini dikarenakan komponen *rib* lah yang dilakukan analisis sehingga difokuskan hanya pada *web rib* saja).

Berikut ini adalah gambar distribusi nilai tegangan yang terjadi pada *wing box*.



Gambar 8 Distribusi tegangan yang terjadi pada wing box

Nilai distribusi tegangan telah dikonversikan kedalam bentuk distribusi warna, yang mana setiap warna mewakili nilai dari tegangannya. Nilai tegangan yang diwakilkan dalam warna dapat dilihat di samping kanan pada gambar.

Tabel 10 Margin of safety pada web rib hasil software CATIA

No. Web Rib	Jarak rib dari wing tip (m)	Shear Strength (Mpa)	Tegangan geser web rib (Mpa)	faktor of safety	margin of safety
1	0	40	0,00	∞	∞
2	0,5	40	8,07	4,96	3,96
3	0,8	40	9,03	4,43	3,43
4	1	40	19,60	2,04	1,04
5	1,5	40	15,70	2,55	1,55
6	2	40	10,94	3,66	2,66
7	2,5	40	19,60	2,04	1,04
8	3	40	10,94	3,66	2,66
9	3,5	40	11,90	3,36	2,36
10	4	40	17,70	2,26	1,26
11	4,5	40	19,60	2,04	1,04

Grafik tegangan yang ditunjukkan pada perhitungan analisis *web rib* yang telah dijelaskan sebelumnya memiliki kesamaan terhadap perubahan distribusi tegangan pada hasil perhitungan FEM. Gambar hasil perhitungan FEM menunjukkan perubahan warna dari yang terkecil di daerah *wing let* berubah membesar ke arah *wing root*. Nilai tegangan terbesar terdapat pada daerah *wing root*. Sama halnya dengan gambar grafik hasil perhitungan analisis yang menunjukkan perubahan tegangan yang dimulai dari *wing let* membesar menuju ke arah *wing root*.

Nilai tegangan terbesar yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 adalah sebesar $1.957 \times 10^7 \text{ N/m}^2$ dan nilai tegangan terkecil adalah sebesar $4 \times 10^5 \text{ N/m}^2$. Nilai tegangan maksimum tersebut dapat dijadikan nilai pembandingan terhadap *strength* dari material untuk membuktikan bahwa struktur mengalami kerusakan atau tidak dalam menahan beban yang diberikan. *Strength* dari material adalah $4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$, sedangkan nilai tegangan maksimum yang terjadi pada struktur akibat pembebanan adalah $1.957 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa struktur dalam kondisi aman dengan *margin of safety* minimum 1,04.

Kesimpulan

Hasil perhitungan analisis *web rib* sayap WIG-2 *seater* dan pengujian hasil analisis *web rib* dengan metode FEM dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berat total *rib* hasil analisis adalah 22,9 kg.
2. Tebal *web rib* hasil analisis memiliki nilai yang bervariasi sepanjang bentangan sayap, antara yang paling tipis sebesar 0,2 mm dan paling tebal 3 mm. Untuk mengatasi *buckling* yang terjadi pada *web rib* yang tipis maka dapat dengan membelah tebal *web rib* menjadi dua lapis dan ditengah-tengahnya diberikan *core* dengan ketebalan *core* sesuai dengan perhitungan untuk meningkatkan inersia penampang dari *web rib*.

Saran

Saran yang dapat diberikan oleh penulis dari hasil analisis *web rib* adalah nilai dari *margin of safety* pada *web rib* dapat dikurangi

3. *Margin of safety* pada struktur *web rib* memiliki nilai lebih dari 0 yaitu minimum memiliki nilai 1,08.
4. Hasil pembuktian dengan menggunakan *finite element method* menunjukkan tegangan maksimal yang terjadi pada struktur adalah $1.957 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. Sedangkan nilai dari *yield strength* material E-glass adalah $4 \times 10^7 \text{ N/m}^2$. Nilai ini menunjukkan struktur *wing box* hasil analisis tidak mengalami kegagalan struktur dengan angka *margin of safety* adalah 1,04.
5. Hasil perhitungan optimasi *margin of safety* lebih besar dari hasil menggunakan CATIA yaitu 1.04 sedangkan *margin of safety* hasil optimasi 1,08.

lagi hingga batasan standarnya yaitu lebih besar dari 0 dengan cara merubah material yang digunakan tetapi tidak menambah berat dari rib itu sendiri

DAFTAR PUSTAKA

1. C. Y. Niu, Michael, *Airframe Structur Design*, Technical Book Company, California, 1990.
2. CASR Part 23 R 1/June 2001
3. <http://www.wikipedia.com/gayageser/>[10 Juli 2013]
4. Megson, T.H.G., *structures for engineering students third edition*, California, 1999.
5. Popov, E.P., *mekanika teknik second edition*, Erlangga, Jakarta, 1989.
6. Raymer, P. Daniel, *Aircraft Design A Conceptual Approach*, United States of America, 1992.
7. www.wikipedia.com/momententur/[10 Juli 2013]