

OPTIMASI BERAT STRUKTUR TAIL BOOM LSU-05 AKIBAT TEGANGAN LENTUR DARI ASPEK BENTUK PENAMPANG GEOMETRI

Dony Hidayat, Afid Nugroho, Nanda Wirawan

Pusat Teknologi Penerbangan, Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional

Pos El : dony.hidayat@lapan.go.id, afid.nugroho@lapan.go.id, nanda.wirawan@live.com

Abstrak

Beberapa optimasi telah dilakukan untuk mengurangi berat dari LAPAN Surveillance UAV (LSU-05). Salah satu optimasi berat dari LSU-05 yang dilakukan adalah dengan membandingkan bentuk dari geometri tail boom. Tail boom LSU-05 diasumsikan sebagai batang dengan bentuk geometri tertentu yang dikenai beban terkonsentrasi pada ujungnya. Hasil yang didapatkan dari metode analitik kemudian dibandingkan dengan hasil dari metode numerik menggunakan perangkat lunak metode elemen hingga. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa bentuk penampang I memiliki berat paling ringan dibandingkan dengan geometri lain dengan dimensi yang sama.

Kata kunci : Optimasi, Tailboom, Gaya Lentur, Geometri

Abstract

Several optimization to reduce structural weight of LAPAN surveillance UAV (LSU-05) has been conducted. On this paper, structural weight of LSU-05 was optimized by comparing several tail boom geometries. Tail boom of LSU-05 assumed as cantilever with certain geometry subjected to concentrated load on its tip. Bending stress and displacement results from analytical method was compared with numerical method using commercial (Finite Element Method) FEM software. Results show that I beam geometry has lightest weight compared to other geometries with the same dimension.

Keywords: Optimization, Tailboom, Bending, Geometry

Nomenclature

σ	: Tensile stress
M	: Moment
y	: Thickness
I	: Inertia

1. PENDAHULUAN

LSU-05 yang telah berhasil terbang perdana pada tahun 2014 masih memiliki permasalahan *over weight* pada strukturnya. Dari DR&O LSU-05, disebutkan bahwa berat total strukturnya sebesar 35,35 kg, namun setelah dilakukan proses manufaktur, berat struktur diperoleh sebesar 47,67 kg. Sehingga *over weight* yang terdapat pada struktur LSU-05 sebesar 34% [1].

Optimasi dari struktur pesawat terbang diperlukan agar diperoleh struktur yang dapat menahan beban yang terjadi, namun masih cukup ringan agar pesawat tersebut dapat terbang sesuai dengan performa yang diinginkan [2,3,4,5]. Beberapa pilihan yang dapat digunakan untuk optimasi berat struktur pesawat antara lain: penggunaan material komposit, cara manufaktur, pemilihan geometri, dll. [2,3,4,5,6,7]

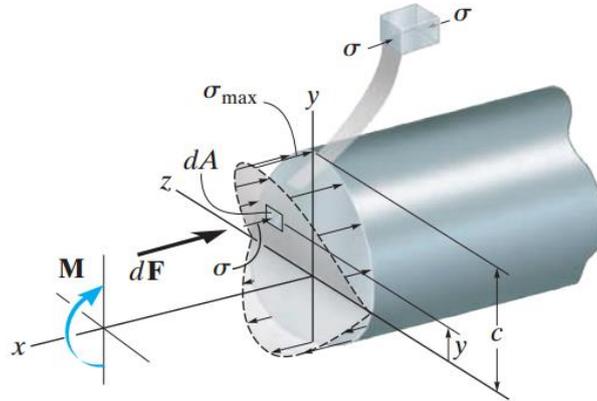
Hasil perhitungan tegangan pada *tail boom* LSU-05 [8] menunjukkan bahwa *tail boom* masih dapat dilakukan optimasi. Optimasi berat *tail boom* LSU-05, dilakukan dengan cara melakukan pemilihan bentuk penampang geometri. Diasumsikan bahwa *tail boom* LSU-05 hanya mendapatkan beban inersia akibat gaya berat dari struktur *horizontal tail plane* (HTP) maupun *vertical tail plane* (VTP). *Tail boom* dimodelkan sebagai *cantilever*. Sambungan *tail boom* ke *fuselage* dimodelkan sebagai tumpuan jepit pada bagian pangkal *cantilever*. Untuk memodelkan berat dari struktur HTP dan VTP LSU-05, pada bagian ujung *cantilever* diberikan gaya sebesar 50 N.

Hasil yang diperoleh akan diverifikasi dan dibandingkan dengan menggunakan dua perangkat lunak yang berbeda untuk mengetahui keakuratan metode komputasi yang digunakan oleh dua perangkat lunak tersebut.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tegangan Lentur

Akibat adanya beban dari luar yang bekerja pada struktur *beam*, maka pada bagian dalam struktur *beam* tersebut terjadi *internal shear force* dan *bending moment* yang nilainya berbeda dari setiap posisi sepanjang *axis* dari *beam*. Besar dari gaya geser dan momen diplot pada diagram gaya geser dan momen sehingga nilai maksimalnya dapat ditentukan dari diagram tersebut [9,10].



Gambar 2-1 Variasi tegangan lentur [9]

Nilai tegangan lentur pada *beam* diturunkan dari persamaan :

$$M = \int_A y dF = \int_A y (\sigma dA) = \int_A y \left(\frac{y}{c} \sigma_{max} \right) dA$$

$$M = \frac{\sigma_{max}}{c} \int_A y^2 dA$$

Integral dari persamaan diatas merupakan momen inersia dari luas penampang terhadap sumbu netral. Jadi persamaan untuk tegangan lentur adalah :

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I}$$

σ_{max} : *Bending stress* maksimum yang terjadi pada titik terjauh dari sumbu netral (Pa)

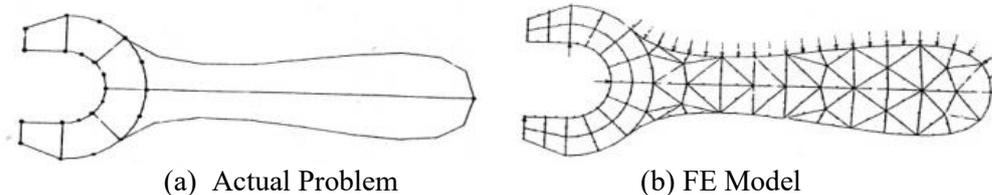
M : Resultan dari momen dalam (Nm)

c : Jarak tegak lurus dari sumbu netral ke titik terjauh dari sumbu netral (m)

I : Momen inersia penampang (m^4)

2.2 Finite Element Method (FEM)

Secara garis besar Metode elemen hingga (*finite element method*) adalah suatu cara untuk menyelesaikan mekanika kontinum (*continuum mechanics*) dengan cara melakukan diskritisasi. Seperti yang terlihat pada gambar dibawah ini yang menunjukkan bagaimana suatu struktur kontinum dibagi menjadi sejumlah elemen berhingga yang masing-masing elemen terhubung melalui titik-titik nodal [11].



(a) Actual Problem

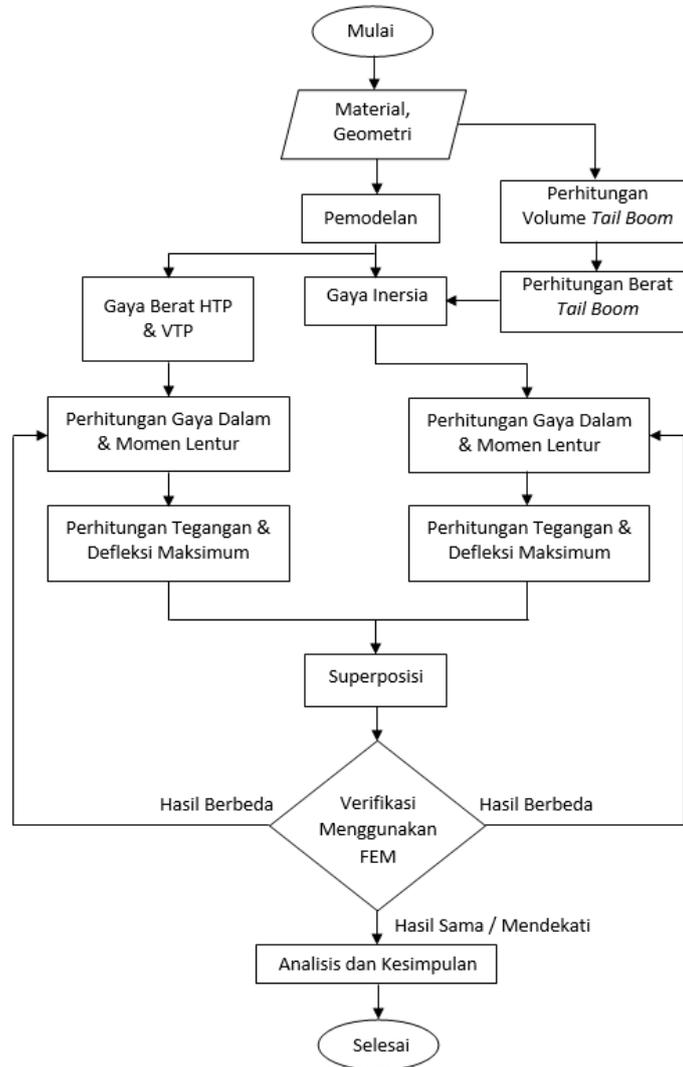
(b) FE Model

Gambar 2-2 Diskritisasi (*meshing*) struktur[11]

Solusi yang diperoleh dengan metode elemen hingga hanyalah suatu perkiraan yang mendekati keadaan sesungguhnya. Semakin banyak jumlah elemen hasil diskritisasi maka semakin baik solusi yang dihasilkan, namun jumlah elemen yang banyak akan memerlukan waktu perhitungan yang lama dan komputer yang canggih.

3. METODOLOGI

3.1 Diagram Alir

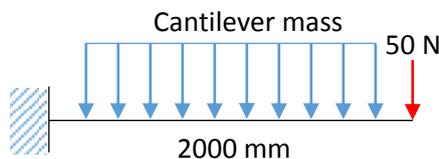


3.2 Asumsi dan Data Awal

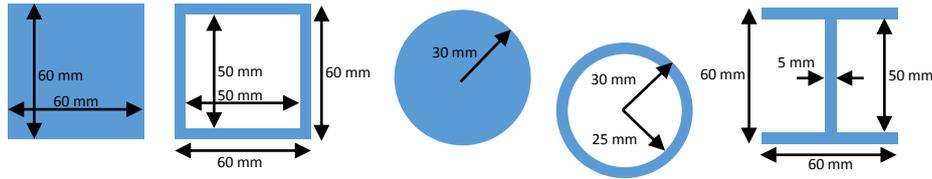
Asumsi yang digunakan dalam perhitungan kali ini adalah:

- Pembebanan statik [2]
- Deformasi akibat pembebanan sangat kecil [2]

Adapun model dan bentuk penampang dari *tail boom* LSU-05 adalah sebagai berikut:



Gambar 3-13 Pemodelan *Tail Boom* LSU-05[4]



Gambar 3-14 Penampang *Tail Boom* LSU-05 (dari kiri ke kanan: square, circle, tube, I, box)

Material yang digunakan adalah aluminum yang memiliki massa jenis $\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$ dan modulus elastisitas $E = 70 \text{ GPa}$. [12]

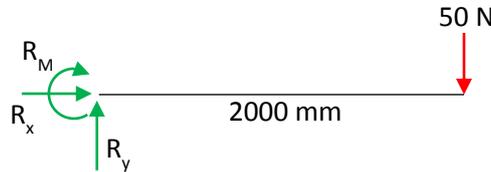
3.3 Metode Penghitungan Analitik

Dalam pemodelan *tail boom* LSU-05 ini, digunakan metode superposisi [9,10] untuk memudahkan perhitungan gaya dan momen yang terjadi akibat pembebanan yang terjadi. Pemodelan pembebanan dibagi menjadi dua, yaitu: pemodelan pembebanan akibat gaya berat HTP & VTP dan pemodelan pembebanan akibat gaya inersia *tail boom* itu sendiri. Kedua hasil yang didapat akan disuperposisikan sehingga mendapatkan gaya dan momen total yang terjadi pada *tail boom* LSU-05.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan

Dari model *tail boom* LSU-05, akan didapatkan diagram benda bebas sebagai berikut:

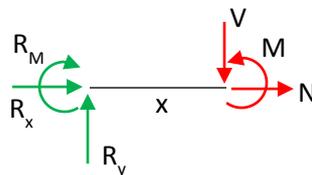


Gambar 4-1 Diagram Benda Bebas *Tail Boom* LSU-05

Gaya dan momen reaksi akibat gaya berat HTP dan VTP:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma F_y &= 0 & \Sigma M &= 0 \\ R_x &= 0 & R_y &= 50 \text{ N} & R_M &= -100 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Adapun diagram benda bebas gaya dalam *tail boom* LSU-05 sepanjang $0 < x < 2000 \text{ mm}$:

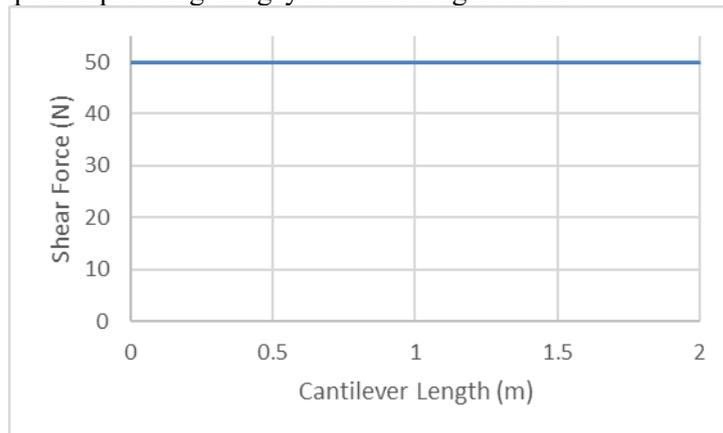


Gambar 15-2 Diagram Benda Bebas Gaya Dalam *Tail Boom* LSU-05

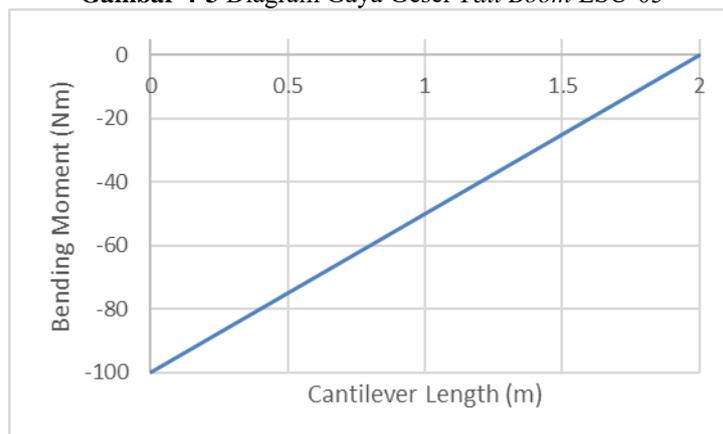
Gaya geser dan momen lentur dari gaya dalam *tail boom* LSU-05 adalah:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma F_y &= 0 & \Sigma M &= 0 \\ R_x &= 0 & R_y &= V & R_M &= M - V \cdot x \\ & & V &= 50 \text{ N} & M &= -R_M + V \cdot x \\ & & & & &= -100 + 50 \cdot x \text{ (Nm)} \end{aligned}$$

Sehingga akan didapatkan plot diagram gaya dalam sebagai berikut:



Gambar 4-3 Diagram Gaya Geser *Tail Boom* LSU-05



Gambar 4-4 Diagram Momen Lentur *Tail Boom* LSU-05

Dari diagram gaya dalam di atas akan diketahui *bending stress* yang mungkin terjadi pada *tail boom* LSU-05 dengan menggunakan persamaan 1:

$$\sigma_{max} = \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

Adapun defleksi maksimum dapat dihitung menggunakan rumus :

$$\delta_{max} = \frac{-PL^3}{3EI} \quad (2)$$

δ_{max} = Defleksi maksimum (m)

L = Panjang cantilever (m)

I = Momen Inersia (m⁴)

P = Gaya (N)

E = Modulus Elastisitas (MPa)

Untuk menghitung momen inersia dari penampang dapat menggunakan rumus :

$$I_x = \int_A y^2 dA \quad (3)$$

I_x = Momen Inersia terhadap sumbu x (m⁴)

A = Luas penampang (m²)

y = Jarak elemen terhadap titik acuan sumbu x (m)

Tabel 4-4 Tabel Perbandingan Penampang Tail Boom LSU-05

Cross section	I (m ⁴)	σ (MPa)	δ max (m)	Mass (kg)	σ _y /Mass
Square	1.08E-06	2.78	1.76E-03	19.44	17.747
Circle	6.36E-07	4.72	2.99E-03	15.268	22.596
Tube	3.29E-07	9.11	5.78E-03	4.665	73.951
I	5.06E-07	5.93	3.77E-03	4.59	75.163
Box	5.59E-07	5.37	3.41E-03	5.94	58.081

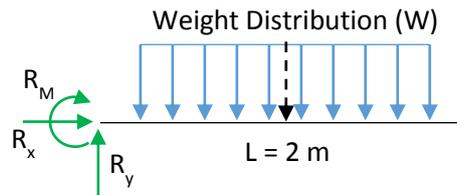
Adapun hasil yang didapatkan dari simulasi software adalah sebagai berikut:

Tabel 4-5 Perbandingan Penampang Tail Boom LSU-05 Menggunakan Perangkat Lunak MSC Patran/Nastran dan Solidwork

Cross section	MSC Patran/Nastran				Solidwork			
	I (m ⁴)	σ (MPa)	δ max (m)	Mass (kg)	I (m ⁴)	σ (MPa)	δ max (m)	Mass (kg)
Square	1.08E-06	2.78	1.76E-03	19.44	1.08E-06	2.8	1.79E-03	19.44
Circle	6.36E-07	4.72	3.0E-03	15.268	6.36E-07	4.7	3.039E-03	15.628
Tube	3.29E-07	9.1	5.79E-03	4.665	3.29E-07	9.1	5.875E-03	4.665
I	5.07E-07	5.92	3.77E-03	4.59	5.07E-07	5.9	3.819E-03	4.59
Box	5.59E-07	5.37	3.41E-03	5.94	5.59E-07	5.4	3.463E-03	5.94

Pemodelan Gaya Inersia Tail Boom LSU-05

Gaya inersia tail boom dimodelkan sebagai beban terdistribusi pada cantilever. Gaya inersia ini didapatkan dengan cara mengalikan massa dari setiap masing-masing penampang dengan percepatan gravitasi dibagi dengan panjang cantilever, sehingga akan didapatkan diagram benda bebas sebagai berikut:



Gambar 4-5 Diagram Benda Bebas akibat Beban Inersia pada Tail Boom LSU-05

Menggunakan persamaan kesetimbangan gaya untuk masing-masing penampang geometri, akan didapatkan gaya reaksi dan momen reaksi pada titik tumpu cantilever sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma F_y &= 0 & \Sigma M &= 0 \\ R_x &= 0 & R_y &= (2 * W) \text{ N} & R_M &= -(2 * W) \text{ Nm} \end{aligned}$$

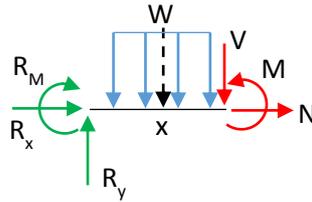
Gaya dan momen untuk reaksi dari masing-masing penampang dapat dilihat pada tabel di bawah.

Tabel 4-3 Perbandingan Gaya dan Momen Reaksi akibat Beban Inersia dari Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05

Cross Section	Cantilever Mass (kg)	Weight Distribution per meter (N/m)	Reaction Force at y-direction (N)	Reaction Moment (Nm)
Square	19.44	95.3532	190.7064	-190.706
Box	5.94	74.89023	149.7805	-149.78
Circle	15.268	22.88313	45.76625	-45.7663
Tube	4.665	22.51395	45.0279	-45.0279

I	4.59	29.1357	58.2714	-58.2714
---	------	---------	---------	----------

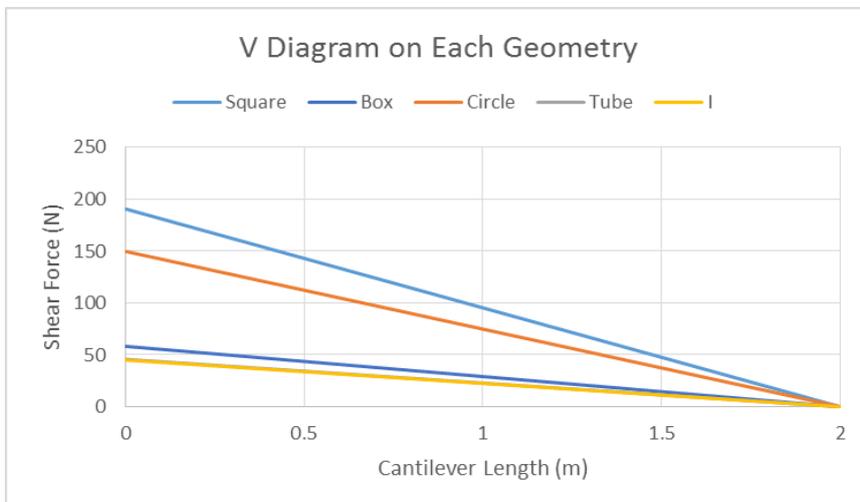
Diagram benda bebas dan persamaan kesetimbangan gaya untuk mendapatkan gaya dalam dan momen lentur masing-masing penampang geometri adalah sebagai berikut:



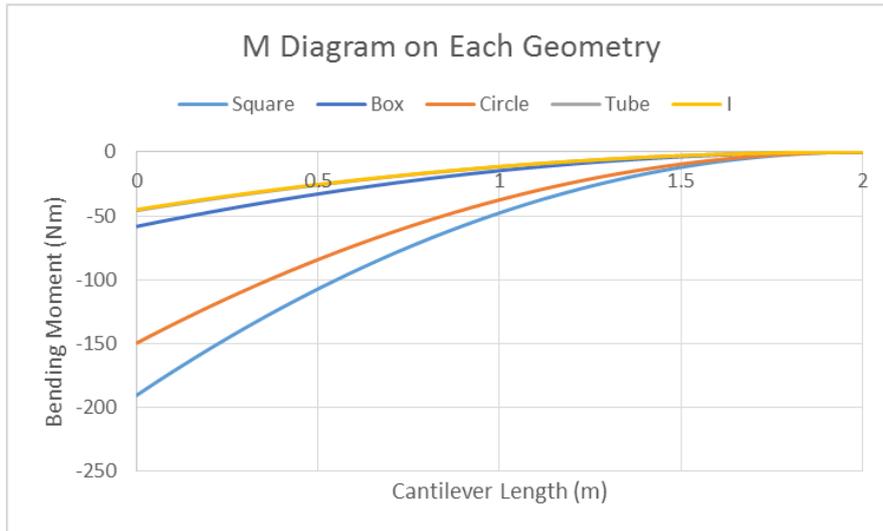
Gambar 4-6 DBB Gaya Dalam akibat Beban Inersia pada Tail Boom LSU-05

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 & \Sigma F_y &= 0 & \Sigma M &= 0 \\ R_x &= 0 & V &= (R_y - W \cdot x) \text{ N} & M &= (R_M + V \cdot x + 0.5 \cdot W \cdot x^2) \text{ Nm} \end{aligned}$$

Sehingga akan didapatkan gaya dalam dan momen lentur untuk masing-masing penampang dapat dilihat pada grafik di bawah. Dikarenakan nilai gaya dalam dan momen lentur dari penampang geometri tube dan I hampir sama, maka pada grafik di bawah, plot nilai gaya dalam dan momen lentur kedua penampang tersebut berhimpit sehingga menyebabkan hanya salah satu plot penampang geometri yang terlihat.



Gambar 4-7 Diagram Gaya Lintang akibat Beban Inersia pada Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05



Gambar 4-8 Diagram Momen Lentur akibat Beban Inersia pada Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05

Untuk mendapatkan defleksi maksimum pada *cantilever* dengan beban terdistribusi merata disepanjang *cantilever*, dapat menggunakan rumus

$$\delta_{max} = \frac{-wL^4}{8EI} \tag{4}$$

Dengan menggunakan hasil yang di dapatkan pada gambar (4-9) dan (4-10) ke persamaan (1) dan (4) kita akan mendapatkan tegangan lentur dan tegangan geser maksimum dari setiap penampang akibat beban inersia.

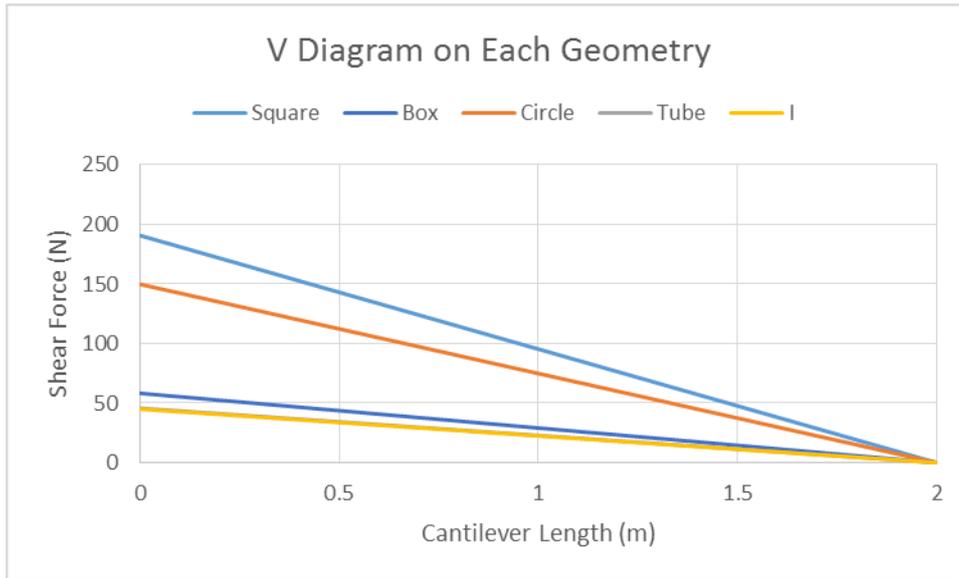
Tabel 4-4 Perbandingan Tegangan dan Defleksi akibat Berat Inersia pada Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05

Cross section	σ_{max} (MPa)	δ_{max} (m)
Square	5.30	-2.52E-03
Box	3.13	-1.49E-03
Circle	7.06	-3.36E-03
Tube	4.17	-1.98E-03
I	2.67	-1.27E-03

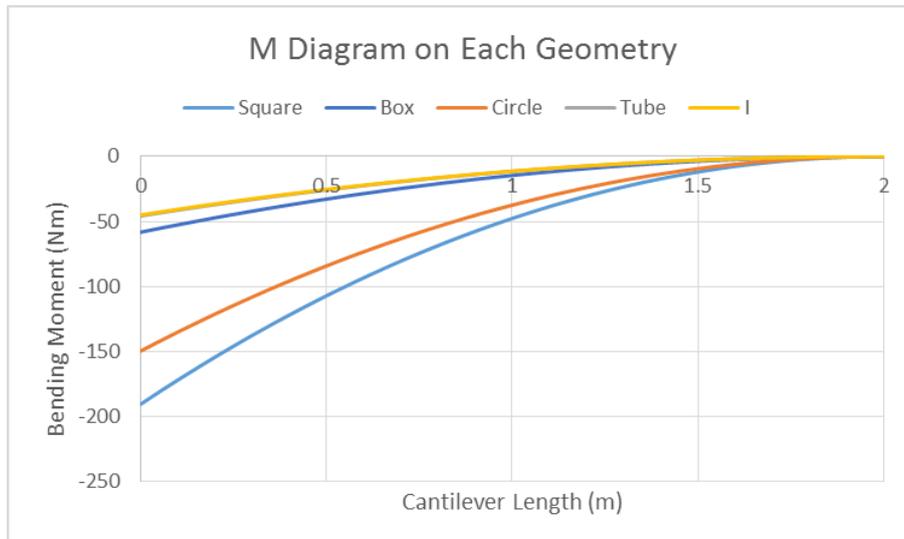
Superposisi Gaya, Tegangan dan Defleksi pada Tail Boom LSU-05

Untuk mendapatkan gaya, tegangan, dan defleksi total pada tail boom LSU-05, dilakukan superposisi gaya, tegangan dan defleksi yang didapatkan akibat gaya berat HTP & VTP dan gaya inersia dari tail boom itu sendiri.

Gaya lintang dan momen lentur total untuk masing-masing penampang geometri tail boom LSU-05 didapatkan dengan cara melakukan superposisi gaya lintang yang didapatkan pada gambar (5) dengan gambar (9) dan momen lentur yang didapatkan pada gambar (6) dengan gambar (10), sehingga menghasilkan plot grafik yang ditunjukkan pada gambar (11) untuk gaya lintang, dan gambar (12) untuk momen lentur.



Gambar 4-9 Diagram Gaya Dalam untuk Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05



Gambar 4-10 Diagram Momen Lentur untuk Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05

Adapun perbandingan tegangan dan defleksi didapatkan dengan cara melakukan superposisi dari tabel (4-1) dengan tabel (4-4). Hasil yang didapatkan dapat dilihat pada tabel dibawah.

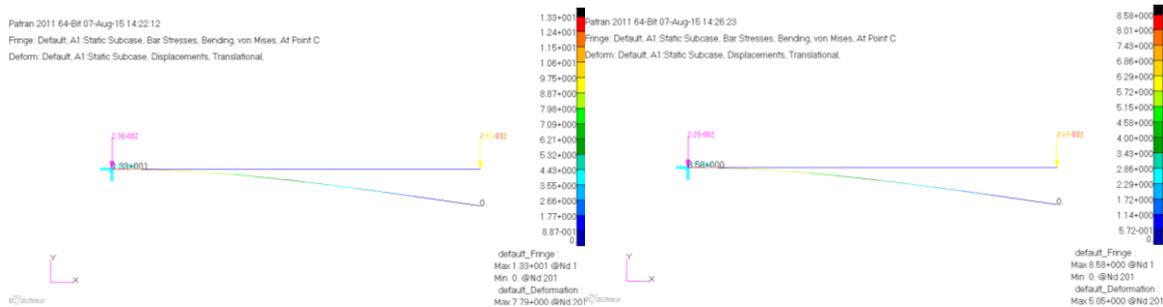
Tabel 4.5 Perbandingan Hasil Perhitungan untuk Tiap Penampang Geometri Tail Boom LSU-05

Cross Section	Mass (kg)	σ_{\max} (MPa)	δ_{\max} (m)
Square	19.44	8.08	-4.29E-03
Box	5.94	8.49	-4.90E-03
Circle	15.268	11.8	-6.36E-03
Tube	4.665	13.3	-7.77E-03
I	4.59	8.6	-5.04E-03

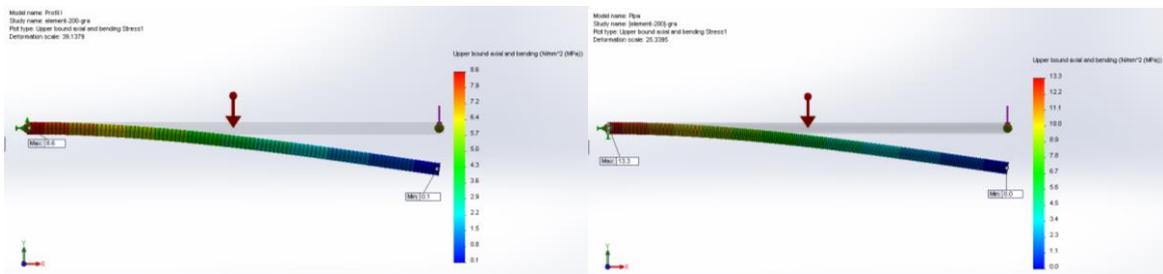
Adapun hasil yang didapatkan dari simulasi software adalah sebagai berikut:

Tabel 4-6 Perbandingan Penampang *Tail Boom* LSU-05 Menggunakan Perangkat Lunak MSC Patran/Nastran dan Solidwork

Cross section	MSC Patran/Nastran			Solidwork		
	σ (MPa)	δ max (m)	δ max % error	σ (MPa)	δ max (m)	δ max % error
Square	8.06	-4.28E-03	-0.15	2.8	1.79E-03	1.49
Circle	8.48	-4.90E-03	0.10	4.7	3.039E-03	1.53
Tube	11.8	-6.36E-03	0.04	9.1	5.875E-03	1.45
I	13.3	-7.79E-03	0.28	5.9	3.819E-03	1.57
Box	8.58	-5.05E-03	0.25	5.4	3.463E-03	1.44



Gambar 4-11 Hasil simulasi menggunakan Nastran untuk profil I dan tube



Gambar 4-12 Hasil simulasi menggunakan Solidworks Simulation untuk profil I dan tube

Analisis

Dari hasil yang didapatkan pada tabel 4, diketahui bahwa tegangan maksimum paling kecil terjadi pada penampang geometri square yang diikuti penampang geometri box, I, circle dan terakhir tube. Namun dari urutan berat, penampang geometri I merupakan yang paling ringan diikuti penampang geometri tube, box, circle, dan terakhir box.

Jika dibandingkan penampang geometri square yang memiliki tegangan maksimum paling kecil namun memiliki struktur paling berat, penampang geometri box memiliki tegangan maksimum 5% lebih besar, disusul penampang geometri I dengan tegangan maksimum 6% lebih besar. Namun berat struktur yang dapat dihemat bila menggunakan struktur dengan penampang box adalah 69%. Jika menggunakan penampang geometri I berat yang dapat dihemat dapat mencapai 76%.

Penampang geometri tail boom yang disarankan untuk digunakan untuk menahan beban lentur adalah penampang geometri I dikarenakan dengan trade off penambahan tegangan sebesar 1.3%, berat struktur tail boom dapat dihemat sebesar 20% bila dibandingkan dengan menggunakan penampang geometri box. Selain itu, jika dilihat dari defleksi maksimum yang terjadi, penampang geometri I mempunyai defleksi maksimum yang paling kecil dibandingkan dengan penampang geometri lainnya.

Dikarenakan gaya geser maksimum τ_{max} jauh lebih kecil daripada tegangan lentur σ_{max} , nilai dari gaya geser maksimum dapat diabaikan dalam perhitungan.

Hasil komputasi dari perangkat lunak MSC Patran/Nastran dengan menggunakan jumlah elemen yang berbeda menunjukkan hasil yang sama, menandakan hasil yang didapatkan sudah konvergen dikarenakan geometri masih sederhana. Adapun perbedaan hasil komputasi dengan menggunakan

perangkat lunak baik MSC Patran/Nastran dan Solidwork dengan dibandingkan dengan menggunakan metode analitik hanya berbeda kurang dari 1.5%.

5. KESIMPULAN

Struktur yang sesuai digunakan sebagai penampang geometri tail boom adalah penampang berbentuk I dikarenakan dengan tradeoff penambahan tegangan sebesar 1.3%, berat struktur tail boom dapat dihemat sebesar 20% bila dibandingkan dengan menggunakan penampang geometri box. Bila dibandingkan dengan penampang geometri berbentuk square, tradeoff yang terjadi adalah dengan penambahan tegangan sebesar 6% namun struktur tail boom akan memiliki berat 76% lebih ringan. Selain itu penampang geometri I memiliki defleksi maksimum paling kecil dibandingkan dengan penampang geometri lainnya

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Gunawan Setyo Prabowo, Bapak Agus Nurtjahjomulyo dan Bapak Atik Bintoro atas bimbingannya dalam penulisan makalah ini.

PERNYATAAN PENULIS

Isi dalam makalah ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- 1) Anggraeni D., Hidayat D., Pramutadi A. M., Mujtahid, Rasyadi A. *Design and Flight Test of Medium Range UAV for Aerial Photography*. IJUSEng – 2015, Vol. 3, No.3, 2015. 40-49
- 2) Bruhn E.F. *Analysis and Design of Flight Vehicle Structures*, Tri-State Offset Company. 1973
- 3) Raymer, Daniel P. “*Aircraft design: A Conceptual Approach*”. AIAA Education Series. Washington, US. 1989
- 4) Torenbeek E. *Advanced Aircraft Design: Conceptual Design, Analysis, And Optimization of Subsonic Civil Airplanes*, John Wiley & Sons Ltd. 2013.
- 5) Denis, H. *Aircraft Loading and Structural Layout*, Professional Engineering Publishing Limited, London. 2004.
- 6) Tsai, Stephen W., Daniel Gay, Suong V. H. *Composite Materials: Design And Applications*, CRC Press. 2003.
- 7) Sadraey, M.H. *Aircraft Design: A Systems Engineering Approach*, John Wiley & Sons Ltd. 2013,
- 8) Abdurrohman K, Wandono F. A. and Hidayat D. *Stress and Analysis of LSU 05 Twin Tail Boom Using FEM*. International Seminar on Aerospace Science and Technology I. LAPAN, Tangerang. 2014. p. 51-60.
- 9) Hibbeler, R. C. *Mechanics of Material*. Prentice Hall. 2011.
- 10) Beer, Ferdinand P. *Mechanics of Material*, McGraw-Hill. 2009.
- 11) Kuntjoro, W. *An Introduction To The Finite Element Method*. McGraw-Hill. 2005.
- 12) ASM Material Data Sheet, <http://asm.matweb.com>