

## ANALISIS PENGARUH PEMASANGAN *WINGLET* TERHADAP DISTRIBUSI TEKANAN PADA *WING* BOEING 737-500 DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

<sup>1</sup>Fahriza Maulana, <sup>2</sup>Ferry Setiawan, S.T., M.T., <sup>3</sup>Gaguk Marausna, S.T., M. Eng

<sup>1,2,3</sup> *Teknik Dirgantara, Sekolah Tinggi Teknologi Kedirgantaraan*

### Abstrak

*Pada era pesawat modern, pemasangan winglet sendiri adalah untuk mengurangi vortex pada wingtip pesawat, sehingga komponen ini dapat mengurangi gaya hambat atau drag pada pesawat sehingga bahan bakar lebih efisien. Namun, efek negatif dari pemasangan winglet ini adalah terjadinya crack pada spar sebagai komponen penyangga utama dari wing pesawat. Oleh karena itu, perlu adanya analisis yang bertujuan untuk mengetahui seberapa besar akibat dari pemasangan winglet tersebut. Untuk melakukan analisis tersebut, tentunya peneliti wajib mengetahui dimensi wing Boeing 737-500 dan jenis – jenis material yang digunakan pada wing sesuai dengan AMM ATA 6 dan jurnal penelitian sebelumnya. Pada proses analisis ini, peneliti melakukan simulasi dengan menggunakan 3 variasi kecepatan yaitu 210 knot, 230 knot dan 250 knot serta pembebanan berdasarkan gaya lift maksimal yang dihasilkan oleh wing. Dengan data tersebut, maka peneliti dapat mengetahui reaksi wing melalui simulasi stress, displacement dan strain yang dihasilkan. Berdasarkan data hasil simulasi, maka dapat diketahui bahwa stress maksimal yang terjadi pada wng Boeing 737-500 tanpa pemasangan winglet adalah terletak pada titik pemasangan engine. Pada wing dengan pemasangan winglet, dapat diketahui bahwa titik stress terbesar tidak jauh berbeda dibandingkan wing tanpa winglet. Namun, beban yang dihasilkan oleh pemasangan winglet ini memiliki peningkatan 10% hingga 35% dimana nilai tersebut merupakan nilai yang cukup besar bagi struktur pesawat terbang.*

**Kata kunci :** Boeing 737-500, Winglet, Wing, Metode Elemen Hingga

### Abstract

*In the era of modern aircraft, the installation of the winglet itself is to reduce the vortex on the wingtip of the aircraft, so that this component can reduce drag or drag on the aircraft so that it is more fuel efficient. However, the negative effect of installing these winglets is the occurrence of cracks in the spar as the main supporting component of the aircraft wing. Therefore, there is a need for an analysis that aims to find out how big the impact of the winglet installation is. To carry out this analysis, of course, researchers must know the dimensions of the Boeing 737-500 wing and the type of material used on the wing in accordance with AMM ATA 6 and previous research journals. In this analysis process, the researcher performs a simulation using 3 variations of speed, namely 210 knots, 230 knots and 250 knots and loading based on the maximum lift force generated by the wing. With these data, researchers can determine the reaction of the wing through the simulation of the resulting stress, displacement and strain. Based on the simulation results, it can be seen that the maximum stress that occurs on the Boeing 737-500 without winglet installation is at the engine mounting point. On the wing with winglet installation, it can be seen that the greatest stress point is not much different from the wing without winglet. However, the load generated by the installation of these winglets has an increase of 10% to 35% which is a fairly large value for the aircraft structure..*

**Keywords:** Boeing 737-500, Winglet, Wing, Finite Element Method

## PENDAHULUAN

Boeing 737-500 merupakan salah satu jenis pesawat pabrikan Boeing yang termasuk dalam seri 737 *Classic*. Pesawat ini dirancang untuk menggantikan pendahulunya yaitu Boeing 737-200, yang awalnya menggunakan mesin dengan jenis JT8D. Boeing 737-500 dirancang dengan menggunakan engine CFM56-3B yang disebut sebagai engine yang lebih efisien serta polusi suara yang lebih sedikit. Pesawat ini mampu beroperasi dengan fasilitas bandara yang sama dengan Boeing 737-200. Untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, Boeing memodifikasi komponen *wing* pada seri 737-500 dengan pemasangan *winglet* namun tidak mengubah konstruksi pada *wing 737 classic*.

<sup>1</sup>Email Address: [180102014@students.sttkd.ac.id](mailto:180102014@students.sttkd.ac.id)

Received 12 Juni 2022, Available Online 30 Juli 2022

 <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i1.595>



**Gambar 1. Posisi crack wing Boeing 737-500 WL**

*Winglet* merupakan suatu komponen yang terletak pada ujung sayap pesawat atau *wingtip*. Bentuk dan jenis *winglet* terdapat banyak macam disesuaikan dengan jenis dan keperluan pesawat itu sendiri. Pada dasarnya, *winglet* berfungsi untuk memperlambat pertemuan antara udara bertekanan tinggi di bawah sayap dengan udara yang bertekanan lebih rendah di atas sayap. Hal ini mengakibatkan putaran udara atau *vortex* yang dihasilkan oleh *wingtip* lebih kecil, sehingga gaya hambat yang dialami oleh pesawat lebih rendah dan konsumsi bahan bakar akan lebih irit.

Namun dibalik fungsinya sebagai *reducer vortex*, *winglet* menghasilkan *coefficient lift* yang lebih besar, sehingga memberikan tekanan yang lebih besar pada *wing* Boeing 737-500. Dampak dari tekanan ini adalah memperpendek usia *spar* pada *wing*. Hal ini dapat dibuktikan dengan tidak sedikitnya Boeing 737-500 WL yang mengalami *crack* pada *spar wing*.

Oleh karena itu perlu adanya analisis pada struktur *wing* Boeing 737-500 sebelum dilakukan modifikasi pemasangan *winglet*. Hal ini bertujuan untuk mengetahui dampak negatif serta solusi dari pemecahan masalah yang diakibatkan oleh dampak negatif dari *winglet*. Hal ini dapat dilakukan dengan memperhitungkan perubahan nilai yang diakibatkan oleh *winglet* terhadap struktur *wing* Boeing 737-500 melalui data *stress*, *displacement* dan *strain* yang terjadi pada struktur *wing* dan memperhitungkan akibat yang terjadi pada struktur *wing*. Untuk mempermudah proses analisis, perhitungan ini dapat dilakukan dengan aplikasi yang menggunakan perhitungan metode elemen hingga.

## TINJAUAN PUSTAKA

Asmoro (2019) melakukan penelitian pada replika *wing* pesawat Boeing 737-400 milik TNI AU. Kemudian replika tersebut diuji dengan *wing* tunnel untuk mengetahui *coefficient lift* yang dihasilkan dengan variasi kecepatan dan sudut serang. Peneliti menyimpulkan bahwa penggunaan *blended winglet* dapat meningkatkan koefisien lift maksimum pada model sayap NACA 2412 dari 0,724 dengan model sayap tapered *wing* tanpa penambahan *winglet* menjadi 0,797 dengan penambahan *winglet* luas 8,5% dan kemiringan sudut 45°.

Hanif (2017) melakukan penelitian dengan judul Pengaruh Sudut Tekuk (*Cant*) *Winglet* Menggunakan Airfoil NACA 2215 pada Aerodinamika Sayap Pesawat. Peneliti melakukan simulasi dengan menggunakan airfoil dengan jenis NACA 2215 yang kemudian diberikan *winglet* dengan beberapa variasi sudut untuk mengetahui koefisien lift dan koefisien drag yang dihasilkan. Peneliti menyimpulkan bahwa *winglet* pada sayap menambah performa aerodinamika pesawat terbang.

Boeing 737-500 merupakan salah satu seri pesawat dari pabrikan Boeing yang masuk ke dalam jenis Boeing 737 *Classic*. Pesawat ini merupakan Boeing 737-200 yang telah mengalami peningkatan spesifikasi sehingga dikategorikan dalam keluarga Boeing 737 *Classic*. Pesawat ini telah mengalami penyempurnaan sehingga lebih ekonomis dibandingkan dengan generasi sebelumnya yaitu Boeing 737-300 (Arifin dan Yuniarti, 2019).

Sormin (2020) melakukan Analisis *Spiroid Winglet* Pada Pesawat *Subsonic* Dengan Variasi Sudut Serang Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Menggunakan Metode *Computational Fluid Dynamics*.

Dari penelitian ini, ia dapat menyimpulkan bahwa penurunan *induced drag* pada sayap pesawat dengan *spiroid winglet* sebesar 6,66%. Selain itu, penggunaan *spiroid winglet* mampu menghemat bahan bakar hingga 8%.

Pada analisis struktur *wing*, tentunya terdapat metode perhitungan dan analisis yang sesuai dengan tujuan penelitian. Salah satu metode tersebut adalah Metode Elemen Hingga. Hal ini dikarenakan umumnya Metode Elemen Hingga biasa diaplikasikan pada analisis struktur rangka batang. Struktur *wing* Boeing 737-500 merupakan salah satu bentuk model yang menggunakan struktur rangka batang (Dapas, 2011).

Eva (2012) mengatakan dalam penelitiannya bahwa Aluminium merupakan unsur logam terbanyak di muka bumi, dimana hampir 8% berat dari kerak bumi adalah aluminium. Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy pada tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai suatu logam oleh H.C. Oersted pada tahun 1955. Material yang umumnya digunakan pada *wing* pesawat terbang merupakan Aluminium Alloy, yaitu Al Alloy 7178, Al Alloy 7055 dan Al Alloy 7075.

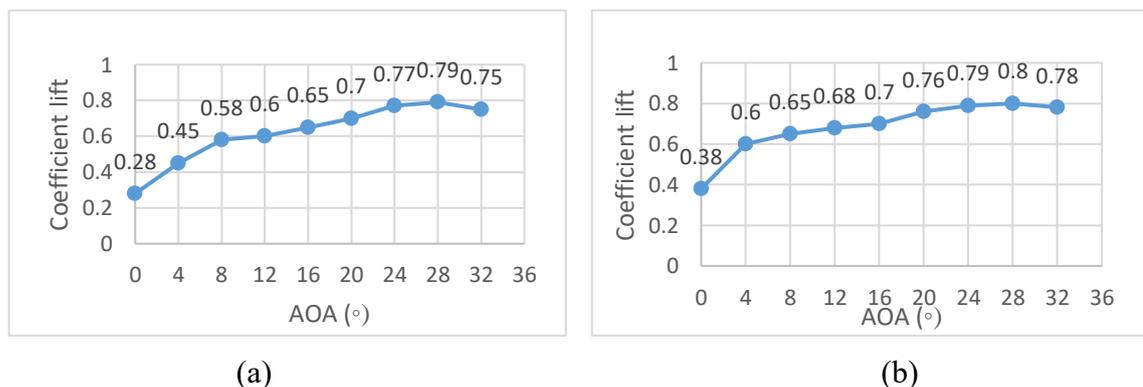
## METODE PENELITIAN

Pada proses rancangan penelitian, hal yang pertama dilakukan adalah mencari dimensi dari *wing* Boeing 737-500. Pada proses ini, maka dapat diketahui bahwa dimensi *wing* Boeing 737-500 dapat dilihat pada Tabel 1 (Arifin dan Yuniarti, 2019).

**Tabel 1. Dimensi *Wing* Boeing 737-500**

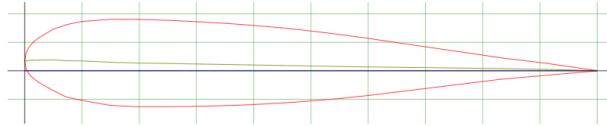
Spesifikasi	Dimensi
<i>Aspek Ratio</i>	9,17
<i>Teper Ratio</i>	0,240
<i>Root Chord</i> (m)	7,32
<i>Tip Chord</i> (m)	1,62
M.A.C (m)	3,41
<i>Dihedral</i> (°)	6
<i>¼ Chord Sweptback</i> (°)	25

Pada penelitian ini, beban yang dihitung merupakan beban yang dihasilkan oleh gaya angkat, sedangkan faktor – faktor aerodinamika lainnya diabaikan. Selain itu, data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan hasil simulasi peneliti sebelumnya yang kemudian diolah kembali. Variasi kecepatan yang digunakan adalah 210 knot, 230 knot dan 250 knot. Hal ini dikarenakan pada fase kecepatan tersebut merupakan fase efektif fungsi *wing* tanpa bantuan komponen flap dan slat. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, terdapat perbedaan koefisien lift yang dihasilkan oleh *wing* dengan *winglet* dan *wing* tanpa *winglet*. Data tersebut adalah sebagai berikut (Asmoro, 2019):

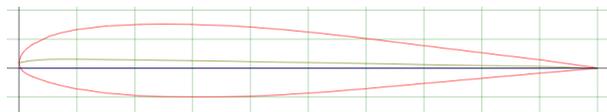


**Gambar 2 (a) Grafik CL tanpa *winglet* (b) Grafik CL dengan *winglet***

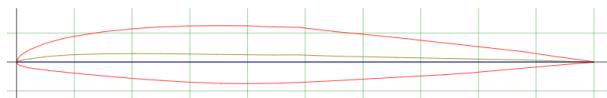
Adapun tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: Proses pembuatan model *wing* Boeing 737-500. Pada proses ini, dimensi yang di input adalah dimensi berdasarkan Aircraft Maintenance Manual (AMM) ATA 6 yang berisi tentang Dimension and Area dan jurnal yang diteliti oleh Mufti Arifin dan Endah Yuniarti pada tahun 2019. Spesifikasi tersebut tertera pada Tabel 1.



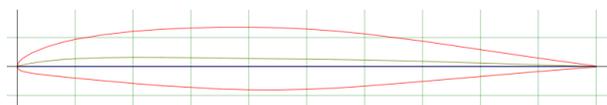
**Gambar 3 Airfoil B737a (Root)**



**Gambar 4 Airfoil B737b (Basic)**

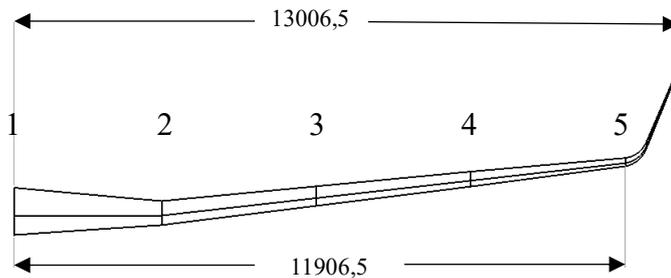


**Gambar 5 Airfoil B737c (Midspan)**

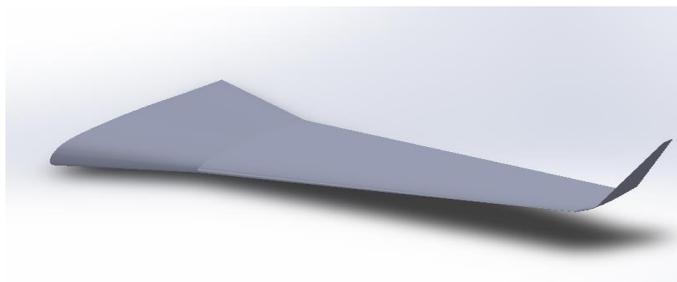


**Gambar 6 Airfoil B737d (Ourboard)**

Pada model *wing* Boeing 737-500, terdapat 4 jenis airfoil yang setiap jenisnya memiliki penggunaan pada posisi yang berbeda.



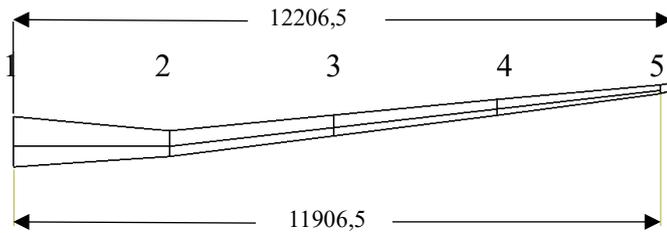
**Gambar 7 Desain Wing dengan Winglet**



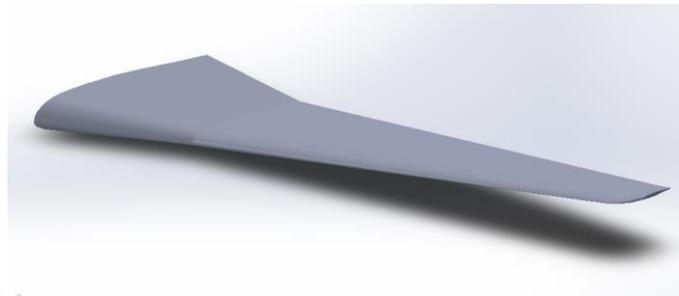
**Gambar 8 Wing Dengan Winglet**

Gambar di atas merupakan model dari *wing* Boeing 737-500 dengan pemasangan *winglet*. Sedangkan

model *wing* Boeing 737-500 tanpa pemasangan *winglet* dapat dilihat pada gambar berikut.



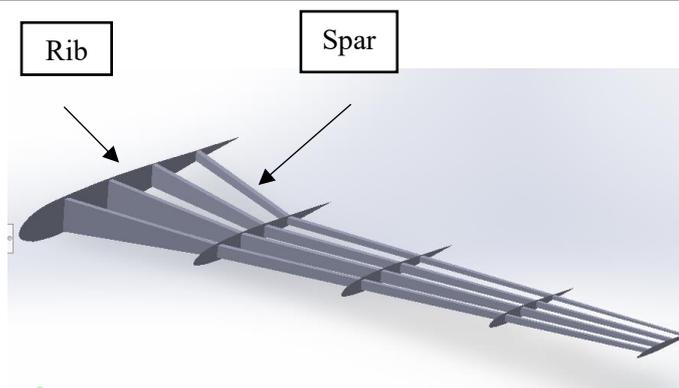
**Gambar 9. Desain Wing Tanpa Winglet**



**Gambar 10 Wing Tanpa Winglet**

**Tabel 2 Tabel Penggunaan Airfoil pada Wing**

Section	Airfoil
1	B737b / BAC450 ( <i>Basic</i> )
2	B737c / BAC451 ( <i>Midspan</i> )
3	B737c / BAC451 ( <i>Midspan</i> )
4	B737d / BAC442 ( <i>Midspan</i> )
5	B737d / BAC442 ( <i>Outboard</i> )



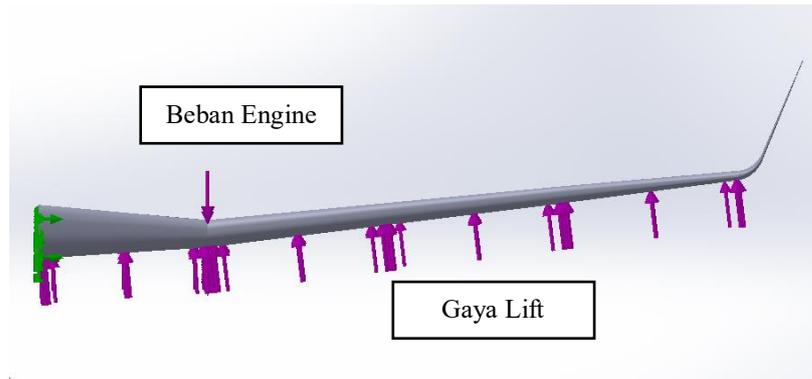
**Gambar 11. Struktur Wing Boeing 737-500**

Material *wing*, *wing* pada Boeing 737-500 menggunakan tiga kombinasi material, yaitu Al Alloy 7178, Al Alloy 7055 dan Al Alloy 7075. Penggunaan dan properties material tersebut adalah sebagai berikut. (Nagarjuna, 2018)

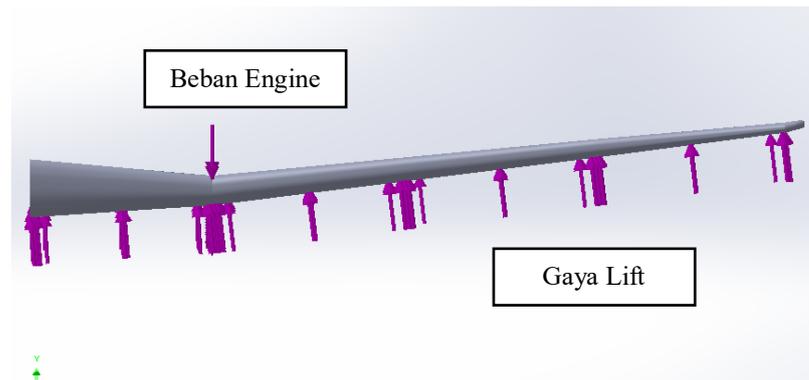
**Tabel 3 Tabel Pembagian Material**

Material	Penggunaan
Al Alloy 7178	<i>Upper skin dan spar wing</i>
Al Alloy 7055	<i>Wing Lower Surface Skin</i>
Al Alloy 7075	<i>Wing rib</i>

*Load* atau beban yang akan disimulasikan ditentukan melalui perhitungan beban rumus gaya angkat berdasarkan hukum Bernoulli.



**Gambar 12. Pemberian *Load* Pada *Wing* Dengan *Winglet***



**Gambar 13. Pemberian *Load* Pada *Wing* Tanpa *Winglet***

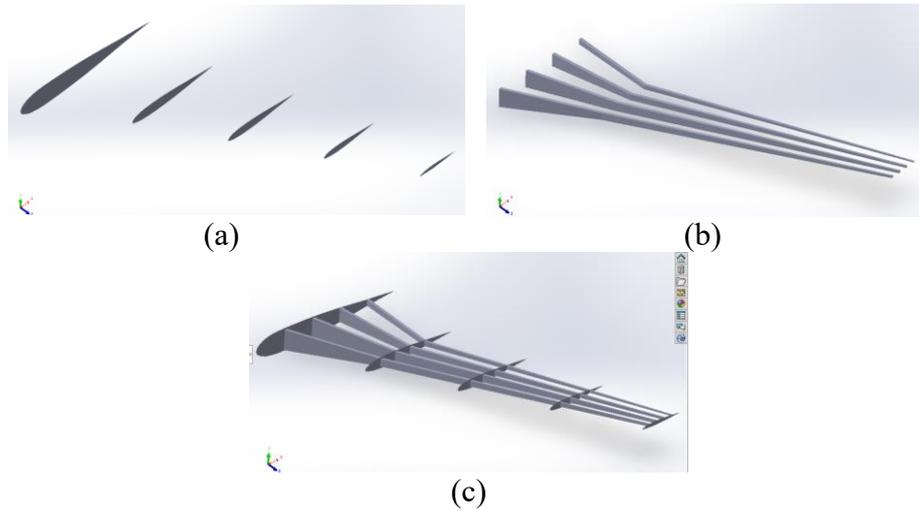
*Meshing* dan *Run* pada simulasi. Pada proses ini, tentunya jumlah elemen yang digunakan berbeda – beda, komponen yang merupakan tumpuan terbesar pada *wing* tentunya memiliki elemen yang lebih kecil dan lebih rapat untuk memastikan struktur *wing* kuat menahan gaya yang relatif besar.

**Tabel 4. Tabel Pembagian *Meshing***

Bagian <i>Wing</i>	Ketebalan	Ukuran Noda
Upper Surface	5 mm	100 mm
Lower Surface	10 mm	60 mm
<i>Spar</i>	20 mm	100 mm
<i>Wing Rib</i>	50 mm	75 mm

Hasil simulasi *wing* dengan *winglet* dan *wing* tanpa *winglet* dibandingkan dan perubahan yang terjadi dihitung. Tahap ini bertujuan untuk mencari persentase perubahan tekanan (*Stress*) pada *wing* Boeing 737-500.

Untuk mengetahui nilai persentase perubahan reaksi pada *wing*, maka dilakukan pengamatan melalui nilai yang dihasilkan oleh simulasi yang kemudian diolah dalam bentuk tabel. Melalui tabel tersebut, maka dapat diketahui berapa nilai perubahan yang terjadi pada model *wing* Boeing 737-500. Pada proses simulasi, pembacaan data dibedakan menjadi 2, yaitu pada *skin* dan *spar* sayap. Pembagian *spar* dan *rib* dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 14 (a) Rib, (b) Spar, (c) Struktur Wing

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Hasil dari analisis ini akan menghasilkan data *stress*, *displacement*, dan *strain* yang terjadi pada benda. Untuk melakukan perhitungan yang akurat, perlu adanya ketetapan dan konversi satuan sebagai berikut:

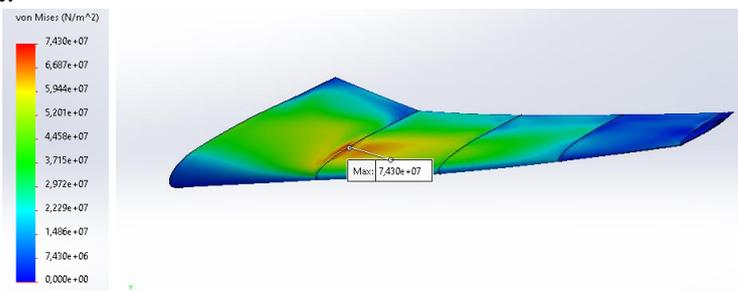
Tabel 5. Tabel Ketetapan

Parameter	Nilai
Massa Jenis Udara ( <i>sea level</i> )	1,225 kg/m <sup>3</sup>
CL Wing (Tanpa <i>Winglet</i> )	0,64
Berat Engine	1.950 kg
Kecepatan 210 knot	108,03 m/s
Kecepatan 230 knot	118,32 m/s
Kecepatan 250 knot	128,61 m/s

**Analisis Pada Wing Tanpa Winglet**

**Stress**

Proses analisis *stress* yang terjadi pada *wing*, dapat dilihat melalui hasil simulasi berdasarkan nilai input yang telah dihitung terlebih dahulu distribusi *stress* yang terjadi pada *wing* dapat dilihat melalui hasil simulasi berikut:

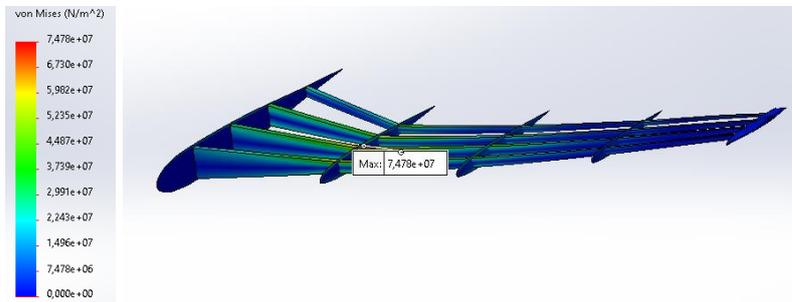


Gambar 15. Stress pada skin sayap

Berdasarkan hasil simulasi di atas, dapat diketahui bahwa *stress* dengan nilai terbesar pada *skin wing* Boeing 737-500 terletak tepat di atas airfoil ke 2 yang bertepatan dengan titik pemasangan *engine*. Titik *stress* yang terjadi pada *skin* pada setiap variasi kecepatan adalah sama namun terdapat perbedaan nilai. Untuk mengetahui nilai *stress* pada setiap variasi kecepatan dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6. Stress pada Skin Sayap**

Kecepatan	Nilai <i>Stress</i> (MPa)
210 knot	48,64
230 knot	60,89
250 knot	74,30



**Gambar 16. Stress pada Spar sayap**

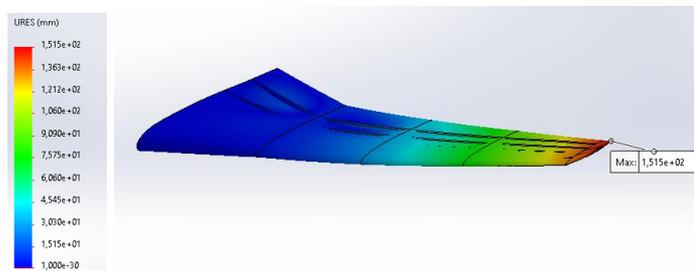
Simulasi ini menghasilkan data dimana titik *stress* dengan nilai terbesar terdapat pada *spar* yang bertepatan dengan titik pemasangan *engine*. Sama dengan pada *skin*, titik *stress* yang terjadi pada *spar* pada setiap variasi kecepatan adalah sama, namun terdapat perbedaan nilai. Untuk mengetahui nilai *stress* pada setiap variasi kecepatan dapat dilihat pada Tabel 7.

**Tabel 7. Stress pada Spar sayap**

Kecepatan	Nilai <i>Stress</i> (MPa)
210 knot	49,79
230 knot	61,74
250 knot	74,78

**Displacement**

Sama dengan nilai *stress*, nilai *displacement* didapatkan melalui hasil simulasi dengan menggunakan 3 variasi kecepatan yang telah di input melalui proses perhitungan excel. Nilai *displacement* yang dihasilkan dapat dilihat melalui hasil simulasi berikut:



**Gambar 17. Displacement sayap**

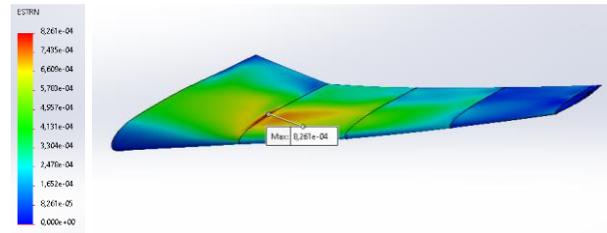
Titik *displacement* dengan nilai terbesar setiap variasi kecepatan memiliki titik yang sama dengan nilai yang berbeda. Perbedaan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 8.

**Tabel 8. Displacement sayap**

Kecepatan	Nilai <i>Displacement</i> (mm)
210 knot	151,5
230 knot	189,9
250 knot	231,7

## Strain

Nilai *strain* dapat diketahui melalui hasil simulasi yang dihasilkan oleh nilai input yang telah dihitung. Nilai *strain* dapat diketahui melalui hasil simulasi berikut:

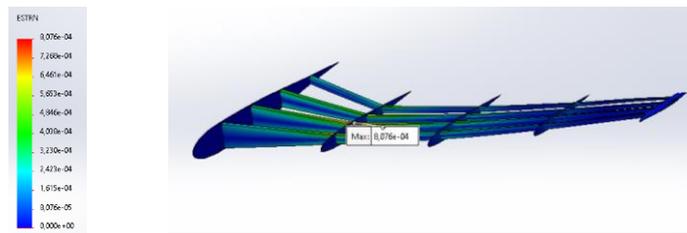


Gambar 18. *Strain Skin Sayap Kecepatan*

Titik *strain* dengan nilai terbesar terletak tepat di atas airfoil ke 2 yang bertepatan dengan titik pemasangan *engine*. Titik *strain* yang terjadi pada *skin* pada setiap variasi kecepatan adalah sama, namun terdapat perbedaan nilai. Untuk mengetahui nilai *strain* pada setiap variasi kecepatan dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. *Strain Skin Sayap Kecepatan*

Kecepatan	Nilai <i>Strain</i>
210 knot	0,0005424
230 knot	0,0006779
250 knot	0,0008261



Gambar 19. *Titik Strain Spar Sayap*

Titik *strain* yang terjadi pada *spar* pada setiap variasi kecepatan adalah sama, namun terdapat perbedaan nilai. Untuk mengetahui nilai *strain* pada setiap variasi kecepatan dapat dilihat pada Tabel 10.

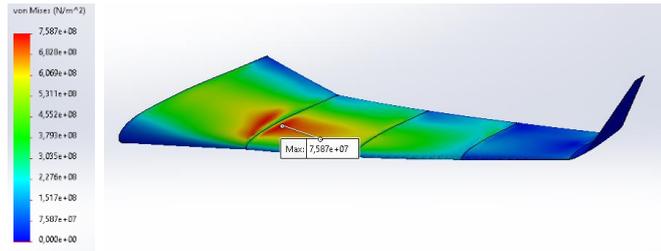
Tabel 10. *Titik Strain Spar Sayap*

Kecepatan	Nilai <i>Strain</i>
210 knot	0,0005378
230 knot	0,0006668
250 knot	0,0008076

## Analisis Pada *Wing* Dengan *Winglet*

### Stress

Perhitungan yang digunakan untuk menganalisa *wing* dengan pemasangan *winglet* umumnya sama dengan simulasi *wing* tanpa pemasangan *winglet*. Letak perbedaan simulasi ini adalah pada *coefficient lift* yang dihasilkan oleh *winglet*. Untuk mengetahui hasil *stress* pada *wing* dengan pemasangan *winglet* dapat dilihat melalui gambar berikut:

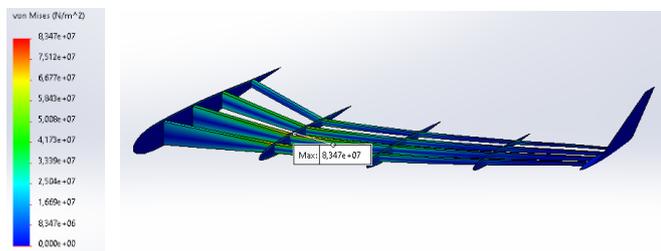


**Gambar 20. Stress Skin Sayap WL**

Pada hasil simulasi *skin* sayap Boeing 737-500 dengan pemasangan *winglet* di atas, dapat diketahui bahwa titik *stress* dengan nilai terbesar sama dengan *stress* pada *wing* tanpa pemasangan *winglet*, namun nilai yang dihasilkan berbeda. Perbedaan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 11. Nilai *stress* yang dihasilkan pada simulasi ini adalah 51,27 MPa, 63,03 MPa dan 75,87MPa.

**Tabel 11. Stress Skin Sayap WL**

Kecepatan	Nilai <i>Stress</i> (MPa)
210 knot	51,27
230 knot	63,03
250 knot	75,87



**Gambar 21. Stress Spar Wing WL**

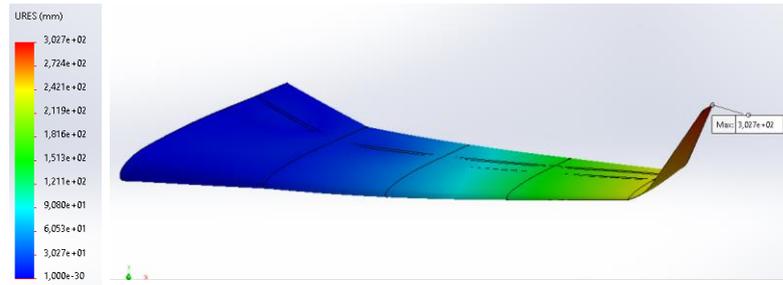
Dari simulasi di atas, dapat diketahui bahwa *stress* yang dihasilkan oleh *wing* memiliki nilai terbesar yang terletak pada *spar* sayap. Hal ini sama dengan hasil simulasi *stress* pada *wing* tanpa pemasangan *winglet*. Namun pada hasil simulasi dengan pemasangan *winglet* memiliki nilai yang cenderung lebih besar dibandingkan nilai pada *wing* tanpa *winglet*. Nilai yang dihasilkan pada *spar* sayap dapat dilihat pada Tabel 12.

**Tabel 12. Stress Spar Wing WL**

Kecepatan	Nilai <i>Stress</i> (MPa)
210 knot	56,75
230 knot	69,52
250 knot	83,48

**Displacement**

Nilai *displacement* yang terbentuk dari simulasi pada *wing* dengan pemasangan *winglet* sama halnya dengan *stress*. Tekanan yang dihasilkan oleh gaya lift mengakibatkan perubahan posisi pada sebagian besar komponen *wing*. Untuk mengetahui nilai *displacement* dapat dilihat pada gambar berikut:



**Gambar 22. Displacement Wing WL**

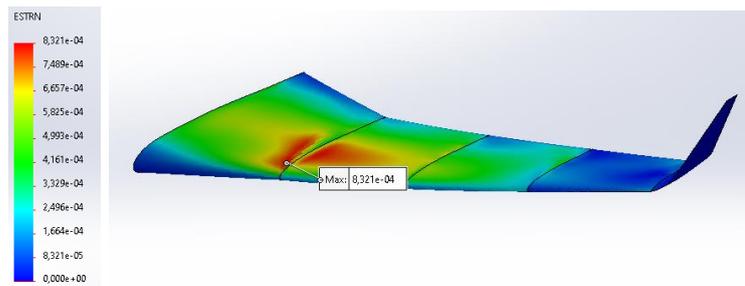
Dari simulasi di atas, dapat diketahui nilai *displacement* terbesar terletak pada ujung *winglet*. Hal ini dikarenakan titik tersebut merupakan titik terjauh dari titik *root*. Selain itu, *winglet* juga merupakan komponen dengan ketebalan terkecil pada *wing*. Nilai yang terbentuk pada masing – masing variasi kecepatan tersebut dapat dilihat pada Tabel 13.

**Tabel 13. Displacement Wing WL**

Kecepatan	Nilai <i>Displacement</i> (mm)
210 knot	203,2
230 knot	250,8
250 knot	302,7

**Strain**

Sama halnya dengan *stress* dan *displacement*, nilai *strain* atau regangan di input sama halnya dengan simulasi *wing* tanpa pemasangan *winglet*, namun memiliki perbedaan nilai *coefficient lift* yang di input. Untuk mengetahui hasil simulasi *strain*, perhatikan gambar berikut:

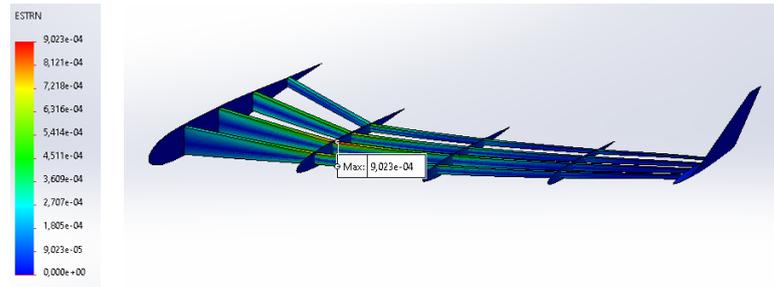


**Gambar 23 Strain Skin Wing WL**

Berdasarkan hasil simulasi *strain* di atas, dapat diketahui bahwa *strain* atau regangan yang terjadi pada *skin* sayap Boeing 737-500 dengan pemasangan *winglet* dengan nilai terbesar relatif sama dengan titik *strain* yang terjadi pada *skin* sayap tanpa pemasangan *winglet*. Terdapat perbedaan nilai yang dihasilkan oleh *wing* dengan pemasangan *winglet*. Perbedaan nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 14.

**Tabel 14. Strain Skin Wing WL**

Kecepatan	Nilai <i>Strain</i>
210 knot	0,0005563
230 knot	0,0006879
250 knot	0,0008321



Gambar 24. Strain Spar Wing WL

Untuk nilai *strain* yang terjadi pada *spar* sayap dengan pemasangan *winglet* juga memiliki titik yang relatif sama dengan *wing* tanpa pemasangan *winglet*. Namun terdapat perbedaan nilai pada setiap variasi kecepatannya. Nilai tersebut dapat dilihat pada Tabel 15.

Tabel 15. Strain Spar Wing WL

Kecepatan	Nilai Strain
210 knot	0,0006133
230 knot	0,0007522
250 knot	0,0009023

**Perubahan Tekanan Maksimum Pada Perbandingan Wing**

**Stress**

Proses perbandingan hasil simulasi *stress* pada *wing* dilakukan dengan membandingkan nilai yang dihasilkan pada simulasi berdasarkan masing – masing variasi kecepatan. Pada analisis *stress*, nilai maksimal didapatkan pada *stress* yang terjadi pada *spar*. Hal ini dikarenakan *spar* merupakan komponen penyangga utama pada *wing*. Berikut merupakan hasil perbandingan nilai *stress* pada *wing* tanpa pemasangan *winglet* dan *wing* dengan pemasangan *winglet*. Untuk mengetahui seberapa besar persentase perubahan *stress* maksimal yang disebabkan oleh pemasangan *winglet* dapat diketahui melalui tabel berikut.

Tabel 16 Perbandingan Stress Maksimal

No	Kecepatan	Stress max		Perubahan (%)
		Tanpa Winglet	Dengan Winglet	
1	210 knot	49,79 MPa	56,75 MPa	14%
2	230 knot	61,74 MPa	69,52 MPa	13%
3	250 knot	74,7 MPa	83,47 MPa	12%

Dari hasil perbandingan di atas, dapat diketahui bahwa nilai *stress* pada masing – masing komponen *spar* meningkat dengan jenis tegangan lengkung dan arah tegangan tegak lurus dengan *wing*. Hal ini disebabkan oleh *coefficient lift* yang dihasilkan oleh pemasangan *winglet* lebih besar. Akibatnya nilai *stress* yang terjadi pada komponen *spar* meningkat hingga 15%. Namun nilai *stress* maksimal yang terbentuk pada pemasangan *winglet* masih dapat dikatakan aman dimana berdasarkan grafik kekuatan material, letak nilai *stress* yang terbentuk masih di dalam daerah linear. Hal ini dapat diketahui melalui *factor of safety* yang terbentuk pada simulasi *wing* dengan pemasangan *winglet* yaitu 1,3.

**Displacement**

Proses perbandingan hasil simulasi *displacement* pada *wing* dilakukan dengan membandingkan nilai yang dihasilkan pada simulasi berdasarkan masing – masing variasi kecepatan. Berikut merupakan hasil perbandingan nilai *displacement* maksimal pada *wing* tanpa pemasangan *winglet* dan *wing* dengan pemasangan *winglet*.

**Tabel 17. Perbandingan *Displacement* Maksimal**

No	Kecepatan	<i>Displacement max</i>		Perubahan (%)
		Tanpa <i>Winglet</i>	Dengan <i>Winglet</i>	
1	210 knot	151,5	203,2	34%
2	230 knot	189,9	250,8	32%
3	250 knot	231,7	302,7	31%

***Strain***

Proses perbandingan hasil simulasi *strain* pada *wing* dilakukan dengan membandingkan nilai yang dihasilkan pada simulasi berdasarkan masing – masing variasi kecepatan. Berikut merupakan hasil perbandingan nilai *strain* pada *wing* tanpa pemasangan *winglet* dan *wing* dengan pemasangan *winglet*.

**Tabel 18. Perbandingan *Strain* Maksimal**

No	Kecepatan	<i>Strain max</i>		Perubahan (%)
		Tanpa <i>Winglet</i>	Dengan <i>Winglet</i>	
1	210 knot	$5,34 \times 10^{-4}$	$6,13 \times 10^{-4}$	14%
2	230 knot	$6,67 \times 10^{-4}$	$7,52 \times 10^{-4}$	13%
3	250 knot	$8,08 \times 10^{-4}$	$9,02 \times 10^{-4}$	12%

**Perbandingan Fungsi *Winglet* Terhadap Efek Negatif *Winglet***

Seperti yang kita ketahui berdasarkan penelitian sebelumnya, fungsi dari *winglet* adalah untuk memperkecil *vortex* sehingga gaya hambat yang dihadapi oleh pesawat cenderung lebih kecil. Hal terbukti menghasilkan konsumsi bahan bakar yang lebih efisien. Namun selain menghemat bahan bakar, *winglet* juga dapat menghasilkan gaya lift yang lebih besar, sehingga hal ini mengakibatkan beban kerja yang lebih besar terhadap struktur *wing* pesawat khususnya pada titik pemasangan *engine* yang merupakan titik *stress* dengan nilai tertinggi.

Tetapi fenomena ini tidak menjadi masalah bagi jenis pesawat yang lebih modern. Hal ini dikarenakan adanya perubahan susunan struktur sayap yang lebih tepat, sehingga masalah yang terjadi pada Boeing 737-500 tidak terjadi pada jenis pesawat yang lebih baru, misalnya Boeing 737NG. Untuk menghasilkan performa yang baik pada struktur Boeing 737-500, maka perlu adanya perbandingan antara struktur Boeing 737 *classic* dengan struktur Boeing 737NG khususnya pada sayap sehingga pemasangan *winglet* tidak menghasilkan dampak negatif pada Boeing 737 *classic*.

**KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, maka dapat diketahui bahwa pemasangan *winglet* dapat mempengaruhi performa dan keandalan *wing*, sehingga dapat dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

*Wing* tanpa pemasangan *winglet* memiliki titik *stress* maksimal pada *spar* nomor 2 dengan nilai 74,7 MPa, titik *displacement* dengan nilai tertinggi pada *wingtip* dan titik *strain* dengan nilai tertinggi pada *spar* sayap tepatnya pada titik pemasangan *engine*.

*Wing* dengan pemasangan *winglet* memiliki distribusi *stress*, *displacement* dan *strain* yang hampir sama dengan *wing* tanpa pemasangan *winglet*, namun terdapat beberapa perbedaan, yaitu letak titik *stress* dan *strain* cenderung lebih ke depan dan titik *displacement* terbesar terdapat pada ujung *winglet*.

Pemasangan *winglet* pada *wing* Boeing 737-500 mengakibatkan peningkatan beban pada *skin* dan *spar* sayap. Beban tersebut antara lain adalah perubahan *stress* maksimal hingga 14%, *displacement* maksimal hingga 34% dan *strain* hingga 14%.

## DAFTAR PUSTAKA

- Arifin Mufti dan Yuniarti Endah. (2019). Estimasi Distribusi Berat Sayap Dan Distribusi Lift Untuk Optimasi Bending Moment Dengan Sistem Fuel Transfer Pada Pesawat Boeing 737-500. *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, 4(4). <https://doi.org/10.35894/jtk.v4i2.310>
- Asmoro Anggito Bagus Satrio. (2019). Analisa Pengaruh Variasi Sudut dan Luas Penampang *Winglet* terhadap Sayap NACA Airfoil 2412 Pada Pengujian Low Subsonic Wind Tunnel. Seminar Nasional Sains Teknologi dan Inovasi Indonesia (SENASTINDO AAU), 1, 27-34.
- Brady Chris. (1999). The 737 Information Site. Di akses pada 10 Maret 2022 pukul 09.10, <http://www.b737.org.uk/production.htm>.
- Dapas Servie O. (2011). Aplikasi Metode Elemen Hingga Pada Analisis Struktur Rangka Batang. *Jurnal Ilmiah Media Engineering*. Universitas Sam Ratulangi Manado. 1(2).
- Eva Azis Nur, Masyrukan, Hariyanto Agus. (2012). Analisis Sifat Fisis dan Mekanisme Aluminium Paduan AL-SI-CU dengan Menggunakan Cetakan Pasir. Tesis. Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah. Surakarta.
- Hanif Ibrahim, Jatisukamto Gaguk. (2017). Pengaruh Sudut Tekuk (*Cant*) *Winglet* Menggunakan Airfoil NACA 2215 pada Aerodinamika Sayap Pesawat. Tesis. Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember. Jember.
- Nagarjuna, (2018). Experimental Investigation of Mechanical Properties of AL 7178 Metal Matrix Reinforced with Silicon Carbide. *International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM)*. 4(9).
- Randis dan Maulana Nugroho. (2021). Perancangan dan Simulasi Struktur Rangka Overhaul Stand untuk Penggunaan Assembly dan Disassembly Hydraulic Cylinder Menggunakan Software Solidworks. *Jurnal Teknik Mesin*. 10(1).
- Sormin Muhammad Randy, Permatasari Rosyida. (2020). Analisis Spiroid *Winglet* pada Pesawat Subsonic dengan Variasi Sudut Serang Terhadap Konsumsi Bahan Bakar Menggunakan Metode Computational Fluid Dynamics. *Jurnal Penelitian Dan Karya Ilmiah Lembaga Penelitian Universitas Trisakti*. 5(1).
- Wahyudi Yudi, Agung Muhammad, Muhsin. (2021). Pengaruh Distribusi Tekanan Terhadap Gaya Lift Airfoil NACA 23012 pada Berbagai Variasi Angle of Attack. Tesis. Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Makassar. Makassar.