

# Analisis Linear Statik Pada *Vertical Tail* dengan Variasi Defleksi *Rudder*

Syarifah Fairuza<sup>\*</sup>, Mufti Arifin, Bismil Rabeta

Prodi Teknik Penerbangan, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan, Universitas Suryadarma  
Komplek Bandara Halim Perdanakusuma, Jakarta 13610, Indonesia

<sup>\*</sup> *Corresponding Author* : fairuzalattas@yahoo.com

**Abstrak** – Desain ekor vertikal pada pesawat sangat beragam bentuknya, bergantung pada karakteristik dan fungsinya. Pada ekor vertikal tersambung rudder yang merupakan control surface pada sumbu vertikal dengan gerakan menggeleng (*yaw*). Penulisan tugas akhir ini bertujuan untuk menganalisa beban aerodinamis pada ekor vertikal dengan defleksi *rudder* yang berbeda. Material yang digunakan pada pemodelan adalah *aluminium alloy 7075-T6*, merupakan paduan dari *zinc* dan *copper*. Pemodelan ekor vertikal dan analisa perhitungan dilakukan menggunakan pendekatan elemen hingga dengan bantuan *software solidworks 2016*. Dengan menggunakan menu *flow simulation* dan *simulation* pada *solidworks*, dapat diketahui output berupa *stress*, *strain*, *displacement*, dan *safety factor*. Dari hasil yang didapat distribusi *stress* dan *strain* memiliki nilai maksimal pada daerah *hinge* dan nilai minimal terjadi pada *root leading edge* dari ekor vertikal. Nilai *stress* maksimal pada pemodelan semakin meningkat seiring bertambah besarnya *defleksi rudder* yang diberikan, tetapi tidak melebihi *yield strength* dari material yang digunakan.

**Kata Kunci** : *Ekor Vertikal, Stabilizer Vertikal, Rudder, Solidworks, Stress*

**Abstract** – The design of vertical tail on the aircraft is very diverse of its shape, depending on the characteristics and functions. On the vertical tail connected with rudder which is the surface control on the vertical axis with a yaw motion. The aim of this thesis is to analyze the aerodynamic load on the vertical tail with different rudder deflection. The material used is aluminum alloy which modeling on 7075-T6, it is an alloy of zinc and copper. The calculation and analysis of the vertical tail modeling is done by using finite element approach with the help of solidworks software 2016. By using flow simulation and stress simulation in solidworks, we know the output in the form of stress, strain, displacement, and the safety factor. The results obtained the distribution of stress and strain has a maximum value on the hinge area and the minimal value occurs at the root leading edge of vertical tail. The value of maximum stress in the modeling increased as long as the increasing of rudder deflection, but it does not exceed the yield strength of the material used.

**Keywords:** *Vertical Tail, Vertical Stabilizer, Rudder, Solidworks, Stress.*

## I. PENDAHULUAN

Pesawat udara sebagai alat transportasi pada umumnya tersusun oleh *fuselage*, *wing*, *empennage*, *landing gear*, dan *powerplant*. Gabungan dari vertikal dan horizontal stabilizer dikenal sebagai *empennage*. *Empennage* berfungsi untuk memberikan kestabilan pada pesawat dan mengendalikan dinamika terbang dari pesawat, dengan gerakan *pitch* dan *yaw*. *Vertikal stabilizer* menjaga stabilitas pesawat udara dengan tumpuan sumbu vertikal (*vertical axis*), yaitu untuk mempertahankan stabilitas arah (*directional stability*). Pada *trailing edge vertikal stabilizer* terdapat *rudder* yang dapat digerakkan untuk mengontrol sikap menggeleng (*yaw*), yang tersambung dengan menggunakan *engsel* diantara *vertikal stabilizer* dan *rudder*. Ketika *rudder* didefleksikan, terdapat berbagai gaya yang terjadi pada permukaan ekor. Gaya-gaya tersebut digunakan untuk mengontrol pergerakan menggeleng (*yaw*) pesawat.

Pada tahun 2001 terjadi kecelakaan penerbangan dari *American Airlines Flight 587* dengan pesawat Airbus a300-600, penerbangan 587 mengalami ketidakstabilan arah akibat terpapar *wake turbulence* dari penerbangan 747 yang terbang sekitar 1 menit 40 detik di depannya. First officer berusaha mengatasi keadaan tersebut dengan menginput rudder dengan begitu agresif dari kiri ke kanan dan sebaliknya. Mengakibatkan pesawat mengalami kegagalan mekanisme pada vertikal stabilizer dan terlepas dari pesawat.

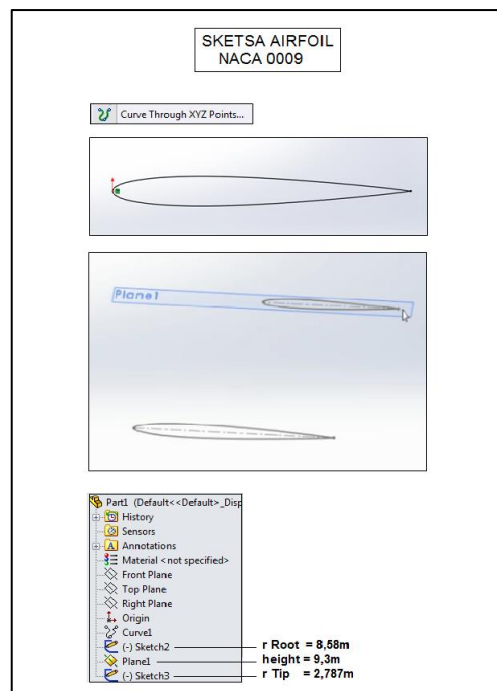
Dengan latar belakang kejadian penerbangan 587, penulis akan melakukan analisa beban aerodinamis yang terjadi pada ekor vertikal, dengan defleksi *rudder* yang berbeda pada satu model ekor vertikal yang sama. Pemodelan ekor vertikal dibuat dengan bantuan

*software solidworks 2015*. *Solidworks* juga digunakan untuk mendukung perhitungan analisis, karena merupakan *software* yang berbasis *computational fluid dynamics (CFD)*. *CFD* merupakan metode penghitungan dengan sebuah kontrol dimensi, luas dan volum dengan memanfaatkan bantuan komputasi komputer untuk melakukan perhitungan pada tiap-tiap elemen pembagiannya.

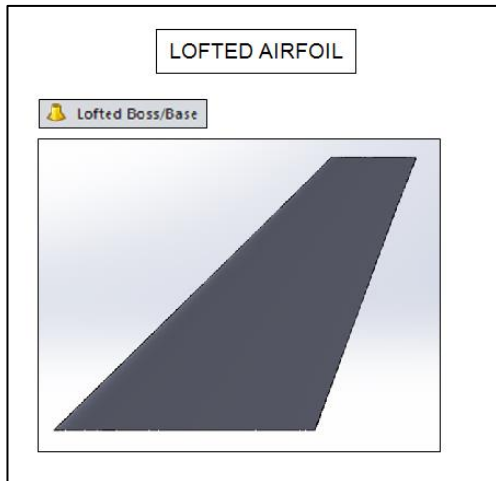
## II. METODE PENELITIAN

Objek dari penelitian ini adalah ekor vertikal pesawat transpor yang mengacu pada *geometry* dari pesawat airbus a330. Pemodelan ekor vertikal dibuat menggunakan airfoil simetris NACA 0009, dan aluminium alloy 7075-T6 sebagai materialnya.

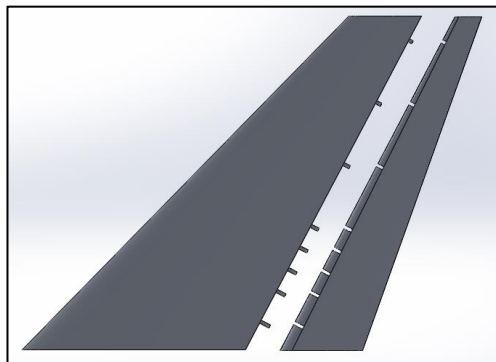
### 2.1 Pemodelan



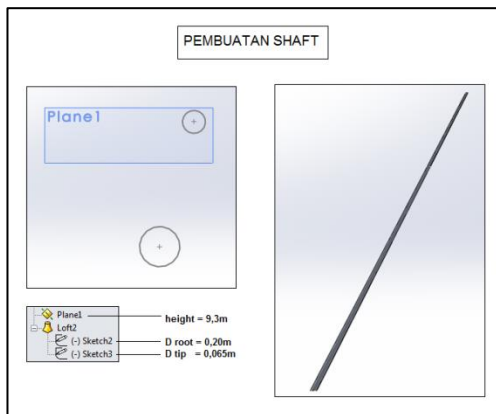
Gambar 3.4.a Sketsa airfoil Naca 0009



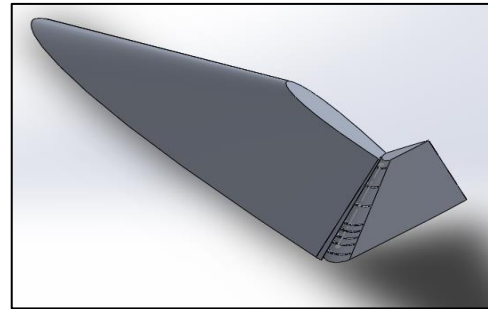
Gambar 3.4.b Lofted airfoil



Gambar 3.4.d Pemisahan vertikal stabilizer dan rudder



Gambar 3.4.e Pembuatan shaft



Gambar 3.4.h Assembly

## 2.2 Prosedur Simulasi

Prosedur simulasi analisis linear statik ekor vertikal ini menggunakan *software solidworks 2015* dengan membuat model solid ekor vertikal, melakukan *flow simulation* dengan menginput *static pressure, temperature, dan velocity*. Kemudian melakukan *static stress simulation* dengan menentukan material, menentukan *constraints* yang dilakukan dengan memilih *fixed constraints* pada tumpuan ekor vertikal. Beban didapatkan dari *flow simulation* pada defleksi rudder  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ . Proses *meshing*, dimana struktur objek yang akan dianalisa didiskritisasi sehingga struktur utama menjadi elemen-elemen yang memiliki ukuran lebih kecil, berjumlah tertentu dan berhingga. Proses *running program* dilakukan setelah proses pra-analisa dan *meshing* dilakukan, proses *running* tersebut berjalan dengan pembacaan proses perhitungan dengan *finite element method* (FEM). Proses *refinement meshing* adalah proses penghalusan jumlah *element* dan *nodes* pada bagian yang mengalami tegangan kritis. Pada bagian yang mengalami tegangan maksimum tersebut, dilakukan proses *refinement meshing* dengan menggunakan fitur *local mesh control*, proses ini dilakukan setelah proses *running* pertama selesai sehingga bisa didapat hasil yang akan lebih mendekati akurat, dan yang terakhir adalah *end simulation*, memuat hasil simulasi berupa distribusi *stress, strain, dan displacement*.

Tabel 3.4.b Properties material 7075-T6

| Properties                | Metric   | English                  |
|---------------------------|----------|--------------------------|
| Density                   | 2.81g/cc | 0.102 lb/in <sup>3</sup> |
| Modulus of Elasticity     | 71.7 GPa | 10400 ksi                |
| Shear Modulus             | 26.9 GPa | 3900 ksi                 |
| Poisson's Ratio           | 0.33     | 0.33                     |
| Ultimate Tensile Strength | 572 MPa  | 83000 psi                |
| Tensile Yield Strength    | 503 MPa  | 73000 psi                |
| Shear Strength            | 331 MPa  | 48000 psi                |

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Flow Simulation

*Solidworks flow simulation* menggunakan CFD untuk melakukan simulasi analisa fluida dan perpindahan panas yang efisien dan cepat. Pada tugas akhir ini hanya melakukan analisa fluida tanpa perpindahan panas. *Flow simulation* memudahkan menghitung gaya dan dampak dari fluida. Langkah pertama yang harus dilakukan yaitu, memasukkan data awal yang diantaranya:

Input Data

Initial Mesh Settings

Automatic initial mesh: On

Result resolution level: 5

Advanced narrow channel refinement: Off

Refinement in solid region: Off

Computational Domain

Default

Ambient Conditions

Thermodynamic parameters

Static Pressure: 30090.00 Pa

Temperature: 228.71 °K

Velocity in X direction: 241.994 m/s

Material Settings

Fluids

Air

Boundary Conditions

Type: Real wall

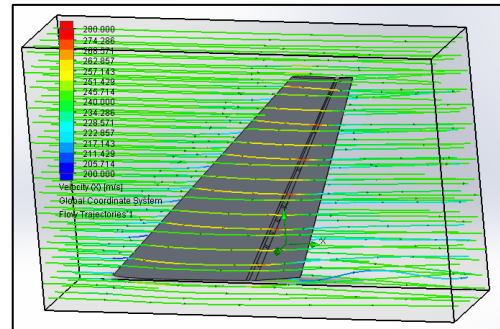
Goals

Global Goals

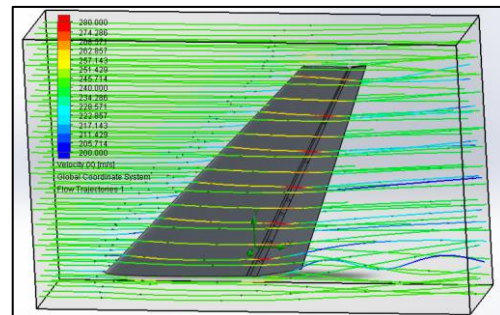
##### 3.1.1 Flow Trajectories

Gambar-gambar berikut merupakan hasil *flow simulation* dengan defleksi *rudder* 10,20,30

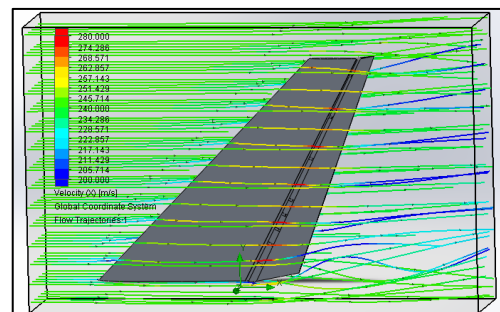
derajat. Menggunakan menu *flow trajectories* yang menggambarkan aliran udara di sekitar permukaan ekor vertikal.



Gambar 3.1.a Flow Trajectories Velocity (X) pada 10 Derajat Defleksi Rudder



Gambar 3.1.b Flow Trajectories Velocity (X) pada 20 Derajat Defleksi Rudder



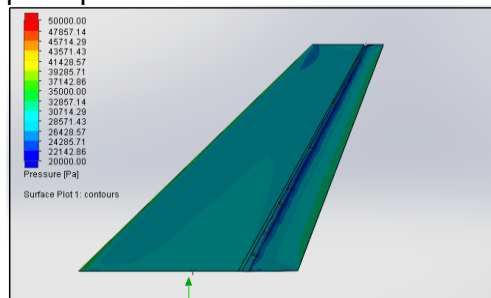
Gambar 3.1.c Flow Trajectories Velocity (X) pada 30 Derajat Defleksi Rudder

Pada gambar *flow trajectories velocity (x)* pada 10, 20, 30 derajat defleksi *rudder* diatas, terlihat aliran udara yang terjadi pada permukaan pemodelan yang dibatasi oleh *boundary condition*. Perubahan kecepatan terbesar ditunjukkan pada gradasi warna paling merah, terkecil adalah paling biru. Sedangkan area dengan kecepatan sedang adalah area dengan warna kuning-hijau. Degradasi warna menunjukkan perubahan kecepatan aliran yang

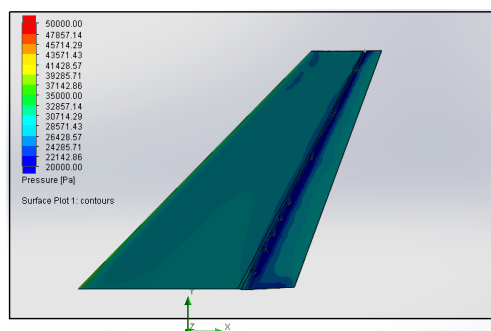
mulanya berwarna hijau, kemudian bertabrakan dengan *leading edge* ekor vertikal berubah menjadi biru, akibat bentuk melengkung dari airfoil aliran berubah warna menjadi kuning, pada permukaan *hinge* ekor vertikal kecepatan aliran mencapai puncaknya pada warna merah pada sisi kiri pesawat, dan pada sisi kanan pesawat aliran mengalami penurunan hingga berwarna biru, kemudian pada kedua sisi kecepatan aliran menurun hingga berwarna biru, dan terjadi *vortex* pada *root trailing edge* ekor vertikal. Pembentukan *vortex* semakin besar seiring besarnya defleksi *rudder*.

### 3.1.2 Surface Plots

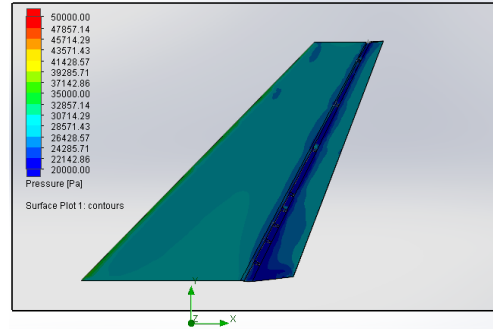
Gambar-gambar berikut merupakan hasil *flow simulation* dengan defleksi *rudder* 10,20,30 derajat. Menggunakan menu *surface plots*, yang menggambarkan beban pada permukaan model.



Gambar 3.1.d Surface Plots Pressure pada 10 Derajat Defleksi Rudder



Gambar 3.1.e Surface Plots Pressure pada 20 Derajat Defleksi Rudder



Gambar 3.1.f Surface Plots Pressure pada 30 Derajat Defleksi Rudder

Pada gambar *surface plots pressure* pada 10, 20, 30 derajat defleksi *rudder*, terlihat degradasi warna pada permukaan model yang berperan sebagai *pressure* akibat dialiri udara berkecepatan 241.706 m/s. Pada *leading edge* menampakkan permukaan berwarna hijau, *pressure* menurun pada lengkungan airfoil dengan warna biru, pada bagian engsel dari sisi kiri pesawat mengalami penurunan *pressure* hingga warna paling biru dan kembali menjadi biru pada bagian *rudder*. Sedangkan pada bagian engsel dari sisi kanan pesawat mengalami kenaikan hingga berwarna hijau dan mencapai *rudder* dengan warna yang sama.

### 3.1.3 Goal Plot

Hasil perhitungan *flow simulation* didapat dengan menggunakan *global goal* pada menu *goal plot*.

Tabel 3.1.a Goal Plots 30 Derajat Defleksi Rudder

| Hasil simulasi | Force (z)     |               |               |
|----------------|---------------|---------------|---------------|
|                | Averaged      | Minimum       | Maximum       |
| 10 Derajat     | 95117,3301 N  | 45793,5267 N  | 160741,3974 N |
| 20 Derajat     | 173112,8756 N | 172786,5068 N | 174884,9035 N |
| 30 Derajat     | 230763,2153 N | 229685,5258 N | 231350,0789 N |

### 3.2 Stress Analysis Simulation

*stress analysis* merupakan analisa yang menghitung tekanan dan deformasi geometri dari beban yang diberikan pada pemodelan. Perhitungan ini dibantu dengan menggunakan *Solidworks simulation* yang menggunakan metode *finite*

*element analysis* (FEA) untuk memecah suatu objek yang akan diuji menjadi menjadi elemen-elemen berhingga yang saling terhubung satu sama lain.

Pada tugas akhir ini hanya dilakukan simulasi static stress dengan pemberian beban gaya (*force*) yang telah dihasilkan pada flow simulation. Langkah pertama yang harus dilakukan yaitu, memasukkan data awal diantaranya:

*Input data*

*Fixtures*

*Fixed Geometry : Face-Root of Vertical Stabilizer*

*Loads*

*Force : Face-Rudder*

Hasil simulasi *Force* (*z Maximum*)

10 Derajat

160741,3974 N

20 Derajat

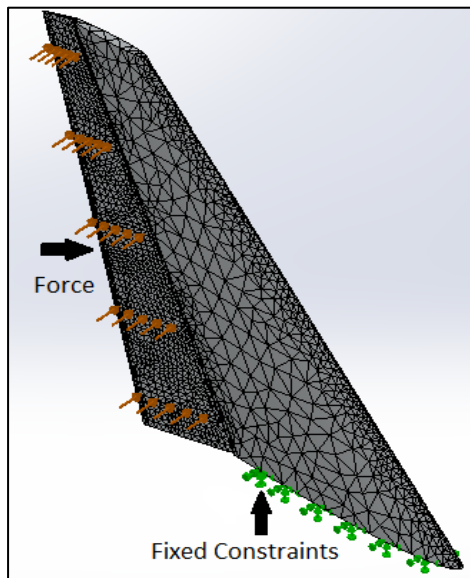
174884,9036 N

30 Derajat

231350,079N

*Mesh*

*Default*



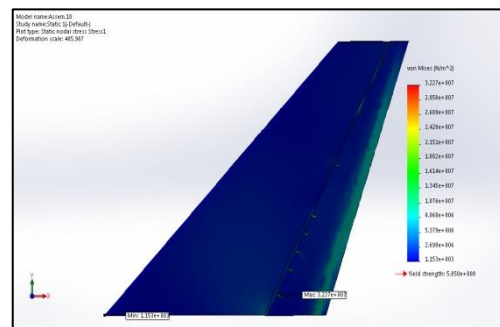
Gambar 3.2 Mesh Model

Proses *meshing* merupakan proses dimana struktur objek yang akan dianalisa didiskritisasi sehingga struktur utama menjadi elemen-elemen yang memiliki ukuran lebih kecil, berjumlah tertentu dan

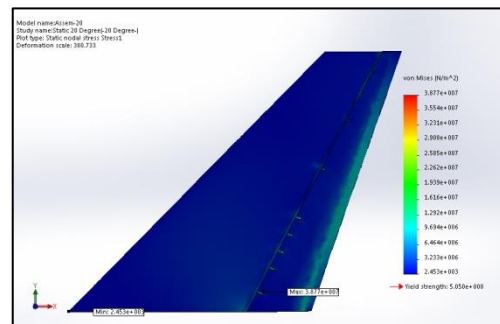
berhingga. Pada bagian yang mengalami tegangan maksimum, dilakukan proses refinement meshing dengan menggunakan fitur local mesh control. Proses refinement meshing adalah proses penghalusan jumlah element dan nodes pada bagian yang mengalami tegangan kritis. proses ini dilakukan setelah proses running pertama selesai sehingga bisa didapat hasil yang akan lebih mendekati akurat.

### 3.2.1 Stress Distribution

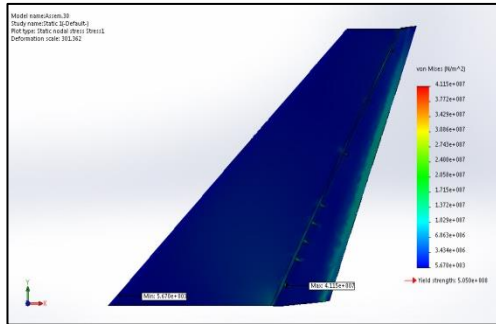
Merupakan hasil perhitungan hubungan *stress – strain* pada model benda, *strain* diperoleh dari *deformation* yang dialami model. *Stress* digunakan untuk memprediksi tingkat keluluhan material terhadap kondisi pembebanan. Material dikatakan mulai luluh ketika *stress* mencapai nilai kritis yang diketahui sebagai *yield strength*. Gambar-gambar berikut merupakan distribusi *stress* hasil dari *simulation static stress analysis* pada defleksi rudder 10, 20, 30 derajat.



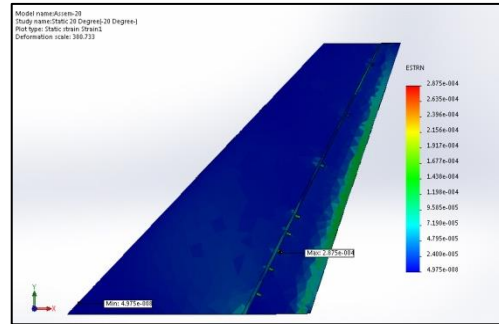
Gambar 3.2.a Distribusi Stress pada 10 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



Gambar 3.2.b Distribusi Stress pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

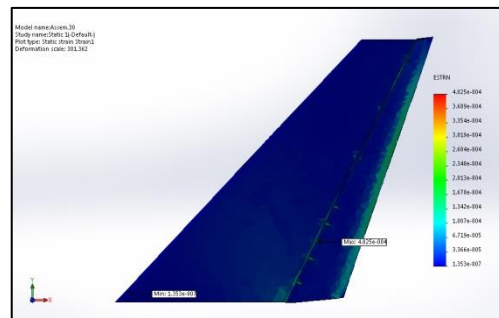


Gambar 3.2.c Distribusi Stress pada 30 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



Gambar 3.2.e Strain pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

Pada gambar distribusi stress pada 10, 20, 30 derajat defleksi rudder diatas, terlihat degradasi warna terjadi pada hinge dan rudder trailing edge, yang mana stress max terjadi pada hinge dan stress min terjadi pada root leading edge dari ekor vertikal. Nilai stress bertambah seiring bertambah besarnya defleksi rudder.



Gambar 3.2.f Strain pada 30 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

Tabel 3.2.a Hasil Simulasi Distribusi Stress

| Hasil simulasi   |         | Defleksi rudder |            |            | Units            |
|------------------|---------|-----------------|------------|------------|------------------|
|                  |         | 10 Derajat      | 20 Derajat | 30 Derajat |                  |
| Von mises stress | Maximum | 3,227E+07       | 3,877E+07  | 4,115E+07  | N/m <sup>2</sup> |
|                  | Minimum | 1,153E+03       | 2,453E+03  | 5,670E+03  | N/m <sup>2</sup> |

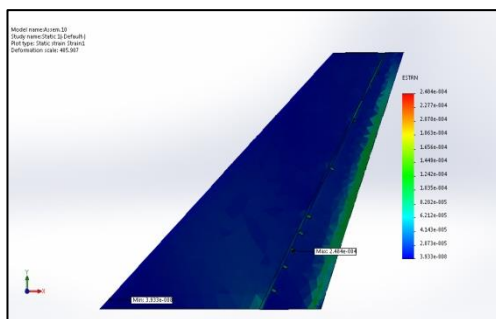
Pada gambar distribusi strain pada 10, 20, 30 derajat defleksi rudder diatas, terlihat degradasi warna terjadi pada hinge dan rudder trailing edge, yang mana strain max terjadi pada hinge dan strain min terjadi pada root leading edge dari ekor vertikal. Nilai strain bertambah seiring bertambah besarnya defleksi rudder.

### 3.2.2 Strain Distribution

Strain merupakan bagian dari deformasi yang dideskripsikan sebagai perubahan relatif dari partikel-partikel di dalam benda yang bukan merupakan benda kaku. Gambar-gambar berikut menunjukkan distribusi strain hasil dari simulation static stress analysis pada defleksi rudder 10, 20, 30 derajat.

Tabel 4.2.b Hasil Simulasi Strain

| Hasil simulasi |         | Defleksi rudder |            |            | Units |
|----------------|---------|-----------------|------------|------------|-------|
|                |         | 10 Derajat      | 20 Derajat | 30 Derajat |       |
| Strain         | Maximum | 2,484E-04       | 2,875E-04  | 4,025E-04  | -     |
|                | Minimum | 3,933E-08       | 4,975E-08  | 1,353E-07  | -     |

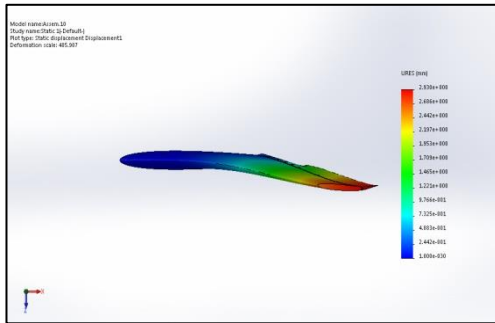


Gambar 3.2.d Strain pada 10 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

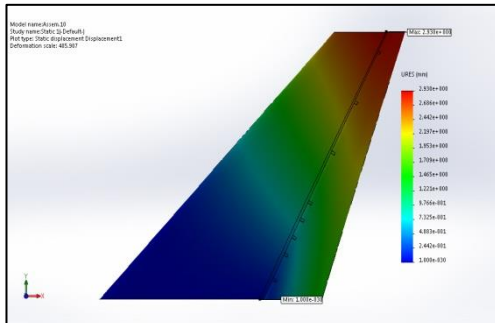
### 3.2.3 Displacement Distribution

Displacement merupakan transformasi sebuah benda dari kondisi semula ke kondisi terkini. Transformasi dalam kasus ini disebabkan oleh beban yang diberikan pada model. Total displacement dapat dijabarkan ke arah sumbu X, Y dan Z. Displacement terbesar terjadi pada sumbu Z, berkaitan dengan arah rudder didefleksikan. Gambar-gambar berikut menunjukkan

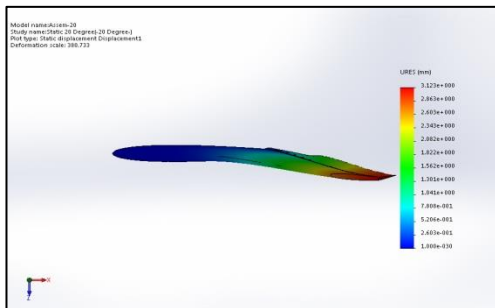
distribusi displacement hasil dari simulation static stress analysis pada defleksi rudder 10, 20, 30 derajat.



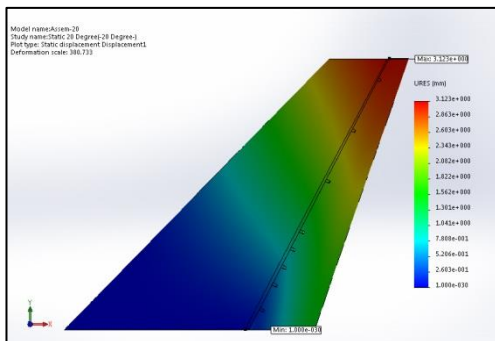
Gambar 3.2.g Displacement pada 10 Derajat Defleksi Rudder Tampak Atas



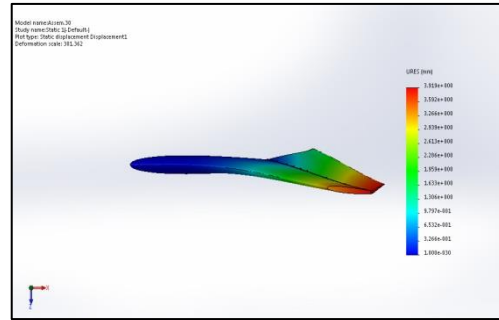
Gambar 3.2.h Displacement pada 10 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



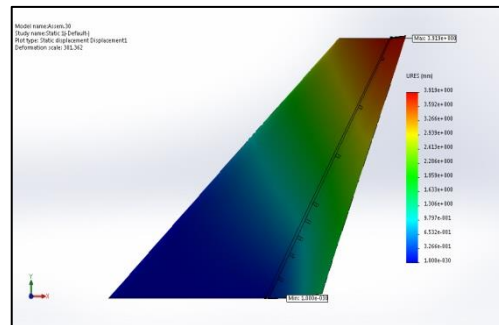
Gambar 3.2.i Displacement pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Atas



Gambar 3.2.j Displacement pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



Gambar 3.2.k Displacement pada 30 Derajat Defleksi Rudder Tampak Atas



Gambar 3.2.l Displacement pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

Pada gambar displacement pada 10, 20, 30 derajat defleksi rudder diatas, terlihat degradasi warna terjadi pada ekor vertikal, yang mana displacement max terjadi pada hingge tip ekor vertikal dan displacement min terjadi pada hingge root ekor vertikal. Displacement bertambah seiring bertambah besarnya defleksi rudder.

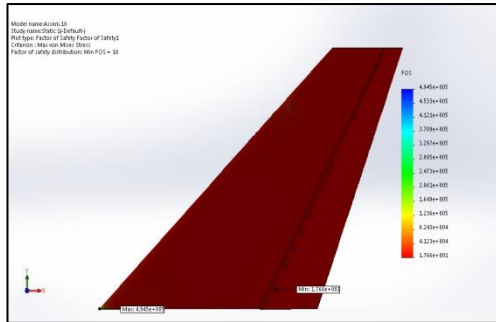
Tabel 3.2.c Hasil Simulasi Displacement

| Hasil simulasi |         | Defleksi rudder |            |            | Units |
|----------------|---------|-----------------|------------|------------|-------|
|                |         | 10 Derajat      | 20 Derajat | 30 Derajat |       |
| Displacement   | Maximum | 2,930E+00       | 3,123E+00  | 3,919E+00  | mm    |
|                | Minimum | 1,000E-30       | 1,000E-30  | 1,000E-30  | mm    |

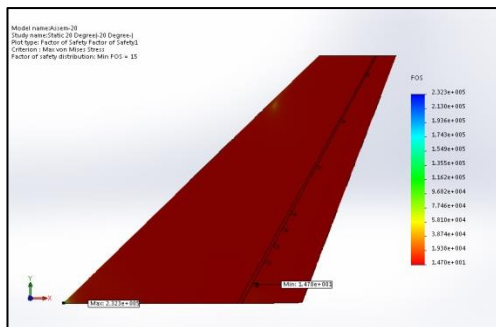
### 3.2.4 Safety Factor

Safety factor merupakan salah satu parameter penting untuk menentukan apakah suatu konstruksi itu aman atau tidak. Safety Factor merupakan perbandingan antara tegangan ijin bahan dengan tegangan yang terjadi. Konstruksi dinyatakan aman apabila angka keamanannya di atas satu. Gambar-gambar berikut menunjukkan distribusi safety factor hasil dari

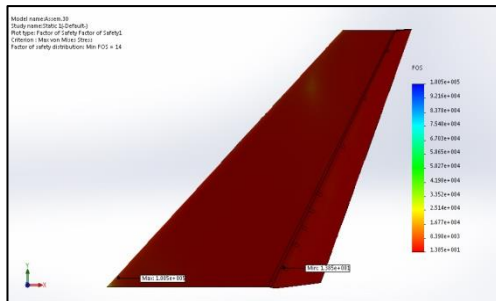
simulation *static stress analysis* pada defleksi *rudder* 10, 20, 30 derajat.



Gambar 3.2.m *Safety factor* pada 10 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



Gambar 3.2.n *Safety factor* pada 20 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri



Gambar 3.2.o *Safety factor* pada 30 Derajat Defleksi Rudder Tampak Kiri

Tabel 3.2.d Hasil Simulasi *Safety Factor*

| Hasil simulasi | Defleksi rudder |            |            | Units     |   |
|----------------|-----------------|------------|------------|-----------|---|
|                | 10 Derajat      | 20 Derajat | 30 Derajat |           |   |
| Safety factor  | Maximum         | 4,945E+05  | 2,323E+05  | 1,005E+05 | - |
|                | Minimum         | 1,766E+01  | 1,470E+01  | 1,385E+01 | - |

#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil analisa yang terlihat pada BAB IV, diambil beberapa kesimpulan yang dapat dijadikan hal pokok dari penulisan tugas akhir ini, antara lain:

Tabel 4.1.a Tabel hasil simulasi

| Hasil simulasi             | Defleksi rudder |            |            | Units            |                  |
|----------------------------|-----------------|------------|------------|------------------|------------------|
|                            | 10 Derajat      | 20 Derajat | 30 Derajat |                  |                  |
| Von mises stress           | Maximum         | 3,227E+07  | 3,877E+07  | 4,115E+07        | N/m <sup>2</sup> |
|                            | Minimum         | 1,153E+03  | 2,453E+03  | 5,670E+03        | N/m <sup>2</sup> |
| Strain                     | Maximum         | 2,484E-04  | 2,875E-04  | 4,025E-04        | -                |
|                            | Minimum         | 3,933E-08  | 4,975E-08  | 1,353E-07        | -                |
| Displacement               | Maximum         | 2,930E+00  | 3,123E+00  | 3,919E+00        | mm               |
|                            | Minimum         | 1,000E-30  | 1,000E-30  | 1,000E-30        | mm               |
| Safety factor              | Maximum         | 4,945E+05  | 2,323E+05  | 1,005E+05        | -                |
|                            | Minimum         | 1,766E+01  | 1,470E+01  | 1,385E+01        | -                |
| Yield strength of material | 5,050E+08       | 5,050E+08  | 5,050E+08  | N/m <sup>2</sup> |                  |

1. Distribusi *stress* dan *strain* memiliki nilai maksimal pada daerah *hinge* dan nilai minimal terjadi pada *root leading edge* dari ekor vertikal.
2. Distribusi *displacement* memiliki nilai maksimal pada *hingge tip* ekor vertikal dan nilai minimal terjadi pada *hingge root* ekor vertikal.
3. *Safety factor* maksimal terjadi pada daerah yang memiliki *stress* minimal, dan *safety factor* minimal terjadi pada daerah yang memiliki *stress* maksimal.
4. Nilai *stress* maksimal pada pemodelan semakin meningkat seiring bertambah besarnya defleksi rudder yang diberikan, tetapi tidak melebihi *yield strength* dari material yang digunakan.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. National Transportation Safety Board, 2004, In-Flight Separation of Vertical Stabilizer American Airlines Flight 587, Aircraft Accident Report, National Transportation Safety Board, Washington, D.C.
2. Sadraey M, 2012, *Aircraft Design*, Chapter 6 Tail Design, Daniel Webster College, Nashua, New Hampshire.
3. Sadraey M, 2012, *Aircraft Design*, Chapter 5 wing Design, Daniel Webster College, Nashua, New Hampshire.
4. Airbus Training & Flight Operations Support and Services, 2006, A330-200/300 TECHNICAL TRAINING MANUAL, 51 – STRUCTURE, Airbus, <http://docslide.us/documents/a330-ata-chap-51-structures.html>, 14 April 2017.