

APLIKASI CFD DALAM PENENTUAN PERFORMA MESIN TURBOFAN MODEL CFM56-5B YANG MENGALAMI CACAT PADA KIPAS UNTUK KEPUTUSAN MAINTENANCE

CFD APPLICATION IN THE DETERMINATION OF TURBOFAN ENGINE MODEL CFM56-5B PERFORMANCE WHICH HAS FAN DEFECT FOR MAINTENANCE DECISION

Vicky Wuwung¹, Puspa Wandani, Carolus Bintoro

Program Studi Teknik Aeronautika, Jurusan Teknik Mesin

Politeknik Negeri Bandung

Jl. Gegerkalong Hilir, Desa Ciwaruga, Parongpong, Kabupaten Bandung Barat,
Jawa Barat 40012

¹e-mail: vicky_pn98@yahoo.com

Diterima 19 April 2016; Direvisi 27 Mei 2016; Disetujui 31 Mei 2016

ABSTRACT

This paper deals with the study of damage assessment that occurred on the fan blade of turbofan engine CFM 56-5B. The damage requires a maintenance decision, whether a fan blade is still capable to be used or needs to be repaired/replaced. Although regulations stipulate that such damage is still acceptable, but it should be studied in terms of performance, whether the fan still can give a good performance or not. The study was conducted by simulating CFM56-5B on CFD-Numeca software with the fan blade in good and defects conditions. The defects on all the blade is a dent lies on 70% span blade with 0.069" depth on the leading edge to simulate the damage caused by a bird strike. In Numerical simulation, the flow is modeled steady and Spallart- Almaras turbulent model is used. Numerical simulation result show engine performance is reduced in take-off condition for 14% for thrust and 16% for efficiency, and 55% for thrust and 54% for efficiency for cruise condition. This engine performance reduction in take-off condition based on AC 25-13 regulation is definitely save and there is no need of repair or replacement action. Meanwhile, for cruise condition, this engine performance reduction means much higher fuel consumption although safe condition is reached. Thus, based on AC 25-13, engine performance reduction in this case leads to a maintenance decision of no need to repair or replacement action.

Keywords: *CFM 56-5B Bilah kipas, Dent cacat, CFD Numeca, Efficiency Kipas, Performance*

ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai kajian kerusakan yang terjadi pada bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B. Kerusakan tersebut memerlukan adanya sebuah keputusan *maintenance*, apakah bilah kipas tersebut masih layak digunakan ataukah perlu di *repair* atau diganti. Meskipun regulasi menetapkan bahwa kerusakan tersebut masih dapat diterima, namun perlu ditinjau dari segi performanya, apakah kipas masih dapat memberikan performa yang baik atau tidak. Kajian dilakukan dengan menyimulasikan model bilah kipas CFM56-5B pada kondisi baik dan cacat pada perangkat lunak CFD-Numeca di kondisi *take-off* dan *cruise*. Cacat pada bilah berupa *dent* dengan kedalaman 0.069" dan terletak seragam di semua bilah pada 70% *span* bilah di bagian *leading edge* sebagai simulasi kerusakan akibat adanya *bird strike*. Simulasi numerik dilakukan dengan kondisi pemodelan aliran *steady*, dan menggunakan model turbulen Spallart-Allmaras. Hasil simulasi numerik menunjukkan adanya penurunan performa mesin pada *Thrust* di kondisi *take-off* sebesar 14% dan penurunan efisiensi sebesar 16%, sedangkan pada kondisi *cruise*, penurunan *Thrust* dan efisiensi berturut-turut adalah sebesar 55%, dan 54%. Penurunan *Thrust* pada saat *take-off* berdasarkan regulasi AC 25-13 adalah aman dan tidak perlu dilakukan *repair* atau *replacement*. Namun, meskipun aman, mesin akan boros bahan bakar ketika berada dalam kondisi *cruise* sehingga perlu dilakukan *repair* atau *replacement*. Penentuan keputusan *maintenance* jika didasarkan pada regulasi AC 25-13 pada akhirnya adalah tidak diperlukannya *repair* atau *replacement* pada bilah kipas.

Kata kunci: *Bilah kipas CFM56-5B, Kerusakan dent, CFD Numeca, Efisiensi Kipas, Performa mesin*

1 PENDAHULUAN

Foreign Object Damage atau disingkat dengan *FOD* merupakan kerusakan yang disebabkan oleh suatu *object/benda* yang terbawa masuk oleh aliran udara ke dalam mesin. *Object* yang dimaksud dapat berupa batu, hewan, benda metal, atau serpihan lainnya. *Object* tersebut dapat mengakibatkan *impact* yang cukup besar, sehingga dapat menyebabkan berbagai kerusakan pada *mesin*, terutama bilah kipas pada *turbofan*.

Kerusakan pada bilah kipas, umumnya dapat berupa *cracking*, *dent*, dll. Kerusakan akibat *FOD* umumnya terdistribusi sepanjang *leading edge* mulai dari *platform* hingga *tip*, sehingga dapat menyebabkan penurunan performa pada kipas. Besar kecilnya penurunan performa kipas tergantung pada tingkat kerusakannya.

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah untuk mengetahui seberapa besar penurunan performa pada kipas yang cacat akibat adanya *FOD* dengan cara membandingkan performa dua keadaan kipas yaitu tanpa cacat (*non-defect*) dan dengan cacat (*defect*) yang

sama pada setiap bilah kipas. Performa kedua keadaan kipas tersebut diperoleh dari simulasi numerik CFD. Dari hasil perbandingan performa kedua keadaan kipas tersebut maka kemudian dapat diperoleh sebuah keputusan *maintenance* apakah kipas tersebut perlu direpair atau tidak dengan mengacu pada regulasi yang berlaku (AC 25-13).

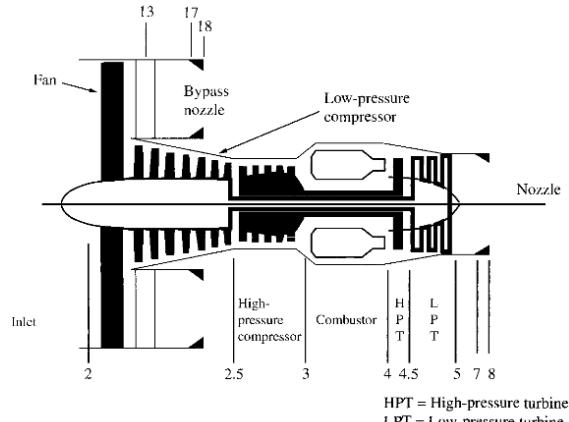
Selanjutnya, pada penelitian ini, kajian simulasi numerik performa kipas yang dilakukan adalah hanya pada bagian kipas mesin turbofan CFM56-5B dan mengacu pada saat kondisi *cruise* dan *take-off*. Selain itu, kajian ini hanya terfokuskan pada penurunan performa dari sisi aerodinamika saja, sehingga pengaruh deformasi struktur kipas terhadap performa kipas dapat diabaikan atau kipas dianggap *rigid body* dan pada akhirnya pengambilan keputusan *maintenance* dilakukan berdasarkan performa aerodinamika saja.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mesin Turbofan

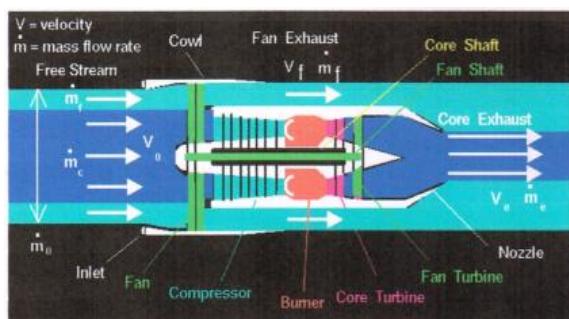
Mesin Turbofan merupakan variasi modern dari mesin turbin gas. Pada mesin turbofan, bagian *core*

dikelilingi oleh kipas pada bagian depan dan dilengkapi dengan turbin di bagian belakang mesin. Kipas dan turbin tersebut terdiri dari banyak bilah yang terhubung oleh sebuah *shaft* (Gambar 2-1).



Gambar 2-1: Diagram Skematik Mesin Turbofan (Mattingly, Ohain, 2006)

Pada mesin turbofan, aliran udara akan terbagi menjadi dua bagian setelah melewati kipas pada bagian depan, yaitu aliran panas (*hot flow*) dan aliran dingin (*cold flow*). *Hot flow* adalah aliran udara yang akan diteruskan menuju kompresor, kemudian ruang bakar, turbin serta *core exhaust* dengan temperatur tinggi. *Cold flow* adalah aliran yang langsung diarahkan untuk dilepaskan ke atmosfer melalui kipas *exhaust*. Kedua aliran tersebut akan meningkat kecepatannya setelah melewati *exhaust* yang mengakibatkan timbulnya gaya dorong atau *Thrust* (Gambar 2-2).



Gambar 2-2: Aliran udara pada turbofan (Hall, Nancy, 2015)

Gaya dorong pada mesin turbofan dapat dinyatakan dalam persamaan hukum kekekalan momentum sbb:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \mathbf{v} \, dV + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dS = \sum \mathbf{F} \quad (2-1)$$

Dengan asumsi *steady*, dan absennya *body force*, maka persamaan 2-1 dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} \, dS = \mathbf{T} \quad (2-2)$$

Atau dapat disederhanakan lagi menjadi :

$$T = \dot{m}_c (V_e - V_0) + \dot{m}_c (V_f - V_0) + A_e (P_e - P_0) \quad (2-3)$$

Untuk $P_e - P_0 = 0$, maka persamaan *thrust* mesin turbofan menjadi:

$$T = \dot{m}_c (V_e - V_0) + \dot{m}_c (V_f - V_0) \quad (2-4)$$

Dari persamaan 2-4, dapat dibuat suatu parameter yang disebut *bypass ratio* (λ) yang merupakan perbandingan antara laju aliran massa pada *cold flow* dengan *hot flow*. Semakin tinggi nilai *bypass ratio*, maka semakin tinggi efisiensi *turbofan* mesin tersebut (Wiranto, 2002).

Selanjutnya, gaya dorong (*thrust*) pada *turbofan* yang dihasilkan oleh *hot flow* berkisar antara 15%-25%, sedangkan gaya dorong yang dihasilkan oleh *cold flow* berkisar antara 75%-85% [Cohen, H and Saravanamuttoo, HIH., 1996]. Oleh karena itu, kerusakan pada permukaan kipas yang mengarah pada *cold flow* berperan besar dalam penurunan performa dari mesin turbofan (penurunan *thrust* dan efisiensi).

2.2 Cacat pada Kipas Mesin Turbofan

Kerusakan pada bilah kipas dapat disebabkan oleh beberapa hal diantaranya adalah adanya FOD, fenomena *icing*, dan *fatigue*. Pada saat pesawat udara terbang di daerah dengan kerapatan udara rendah, maka pesawat akan memerlukan daya yang lebih besar dari kondisi normalnya untuk mendapatkan *thrust* yang

dibutuhkan. Akibatnya, mesin pesawat harus bekerja lebih keras dan hal inilah yang menjadi salah satu faktor utama terjadinya cacat pada bilah kipas (James and Jonathan, 2004).

Selanjutnya, Winfrey (2013) mengatakan bahwa sebuah fenomena berupa *damaging vortices* yang mengakibatkan munculnya getaran pada kipas dan kompresor mesin pada saat pesawat terbang melakukan *taxing* dapat menyebabkan struktur bilah dari kipas dan kompresor mengalami *fatigue*.



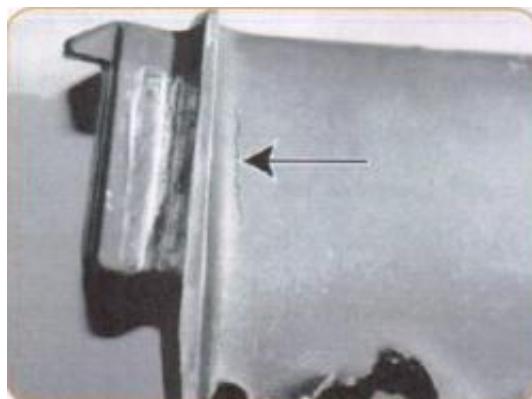
Gambar 2-3: Damaging Vortex [Winfrey, Ryan, 2013]

Selain itu, James A. Turso and Jonathan S. Lift, (2004), didalam investigasinya mendapatkan bahwa komponen yang sering rusak akibat adanya FOD adalah kipas dan kemungkinan terbesar kerusakan yang terjadi sebesar 44% diakibatkan oleh *bird strike* (Mabaso, 2011) (Gambar 2-4).



Gambar 2-4: Lokasi kerusakan pada pesawat udara akibat *bird strike* (Mabaso, 2011)

Bentuk-bentuk kerusakan yang timbul akibat adanya *bird strike* dapat berupa *crack* dan *dent* pada *leading edge* dari bilah kipas (Gambar 2-5 dan 2-6)



Gambar 2-5: *Crack* pada *root bilah kipas* akibat *Bird Strike* [Fischer Ulrich, 2010]



Gambar 2-6: *Dent* pada *Leading Edge* bilah kipas akibat *Bird Strike* (B763, 2013)

2.3 Computational Fluid Dynamics untuk Simulasi Aliran Pada Mesin Turbofan

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan sebuah sistem yang memodelkan dinamika fluida, perpindahan panas, dsb dalam sebuah persamaan matematik yang kemudian diselesaikan dengan metode komputasi numerik. Untuk dinamika fluida, persamaan pemodelan matematik yang digunakan adalah persamaan Navier-Stokes yang dimodifikasi menjadi persamaan *Reynolds Average Navier-Stokes* (RANS) untuk memodelkan aliran turbulen. Persamaan RANS dapat dituliskan sbb:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_S \vec{F}_I \cdot \vec{dS} + \int_S \vec{F}_V \cdot \vec{dS} = \int_{\Omega} S_T d\Omega \quad (2-5)$$

Dengan Ω menyatakan volume, dan S menyatakan permukaan dari *control volume*, kemudian U adalah vektor variabel konservatif, dan \vec{F}_I , \vec{F}_V , berturut turut adalah vektor flux dari *inviscid* dan viskos, serta, S_T merupakan *source term* yang dapat berupa gaya gravitasi dsb. Pada kasus *turbomachinery*, sangatlah perlu untuk mendeskripsikan aliran fluida dalam sistem relatif sehingga persamaan RANS harus dibuat dalam bentuk sistem relatif untuk mendapatkan solusi dalam kerangka acuan relatif. Pada kerangka acuan relatif, komponen – komponen U , \vec{F}_I , \vec{F}_V , S_T , $\bar{\tau}_{ij}$, \bar{q}_i , \bar{p}^* dan \tilde{E} dapat dinyatakan sbb:

$$U = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{p} \tilde{w}_1 \\ \bar{p} \tilde{w}_2 \\ \bar{p} \tilde{w}_3 \\ \bar{p} \tilde{E} \end{bmatrix} \quad \vec{F}_I = \begin{bmatrix} \bar{p} \tilde{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{1i} + \bar{p} \tilde{w}_1 \tilde{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{2i} + \bar{p} \tilde{w}_2 \tilde{w}_i \\ \bar{p}^* \delta_{3i} + \bar{p} \tilde{w}_3 \tilde{w}_i \\ (\bar{p} \tilde{E} + \bar{p}^*) \tilde{w}_i \end{bmatrix} \quad -\vec{F}_V = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\tau}_{11} \\ \bar{\tau}_{12} \\ \bar{\tau}_{13} \\ \bar{q}_i + \tilde{w}_i \bar{\tau}_{ij} \end{bmatrix} \quad (2-6a)$$

$$S_T = \begin{bmatrix} 0 \\ (-\bar{\rho})[2\vec{\omega} \times \vec{w} + (\vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{r}))] \\ \bar{\rho} \vec{w} \cdot \vec{V}(0.5 \omega^2 r^2) \end{bmatrix} \quad (2-6b)$$

$$\bar{\tau}_{ij} = (\bar{\mu} + \mu_t) \left[\frac{\partial \tilde{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{v}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \delta_{ij} \right] \quad (2-6c)$$

$$\bar{q}_i = (\bar{\kappa} + \kappa_t) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i}, \quad \bar{p}^* = \bar{p} + \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k},$$

dan $\tilde{E} = \tilde{e} + \frac{1}{2} \tilde{w}_i \tilde{w}_i + \tilde{k}$

$$(2-6d)$$

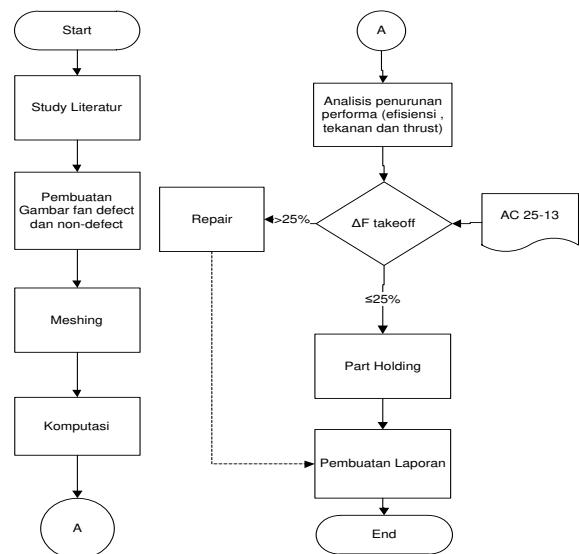
Persamaan-persamaan di atas selanjutnya diselesaikan dengan menggunakan metode numerik dengan metode diskritisasi domain fisik volume hingga (*finite volume method*), dan penerapan kondisi batas tertentu untuk kasus *turbomachinery*. [Numeca User Manual, 2015].

Pada penelitian ini, digunakan NUMECA sebagai perangkat lunak *solver* persamaan RANS dengan model fluida udara *perfect gas* dan dalam kondisi

steady. Selanjutnya, modul turbulen yang digunakan adalah spallart-almaras, metode diskritisasi yang digunakan adalah skema *central difference*, dan diselesaikan dengan menggunakan teknik *multigrid*.

3 METODOLOGI

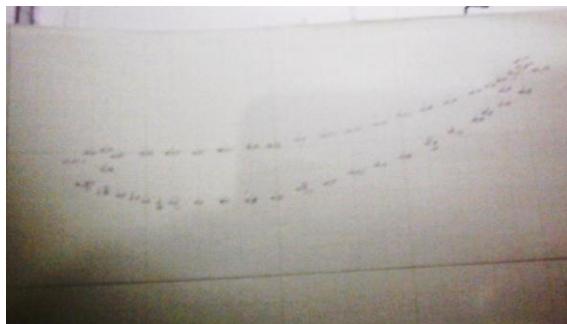
Metodologi penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3-1. Dari diagram alir pada Gambar 3-1 dapat dilihat bahwa studi literatur merupakan langkah awal dalam proses simulasi kelayakan bilah kipas oleh adanya cacat (*dent*). Pada kajian ini, diperlukan pemahaman mengenai konsep dasar, cacat yang kemungkinan terjadi, teori dasar mesin turbofan, regulasi dan *maintenance*. Berdasarkan pada pemahaman mengenai mesin turbofan tersebut, maka dilakukan kajian mengenai perihal yang perlu diketahui untuk mendapatkan performa dari kipas. Pada tahapan ini juga dilakukan pengumpulan data mengenai bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B berupa data geometri, jumlah bilah, dan data operasional pada kondisi *cruise* dan *take-off*.



Gambar 3-1: Diagram alir

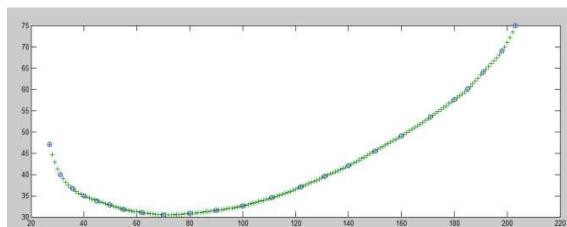
Data-data mengenai geometri bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B yang telah terkumpul meliputi geometri *airfoil* pada *root*, *midspan* dan *tip* bilah kemudian

menjadi acuan dalam penggambaran *geometry* model bilah kipas mesin turbofan CFM56-5B sebagai *input* simulasi numerik. Penggambaran geometri bilah kipas ini dimulai dengan membuat titik-titik koordinat dari *airfoil* bilah (*root*, *mid* dan *tip*) pada *millimeterblock* seperti diperlihatkan pada Gambar 3-2. Kemudian titik-titik koordinat tersebut menjadi *input* pada perangkat lunak Microsoft Excel.



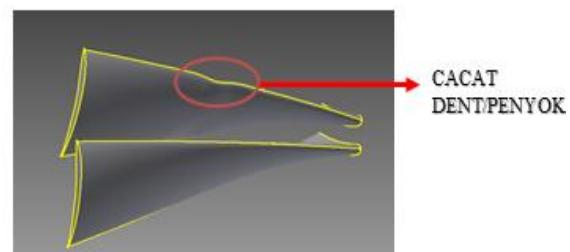
Gambar 3-2: Koordinat *airfoil* pada *millimeterblock*

Selanjutnya, untuk mendapatkan kurva *airfoil* dengan tingkat kehalusan yang baik, maka dilakukan *curve fitting* menggunakan fungsi *spline* pada perangkat lunak Matlab. Hasil dari *curve fitting* pada perangkat lunak Matlab diperlihatkan pada Gambar 3-3.



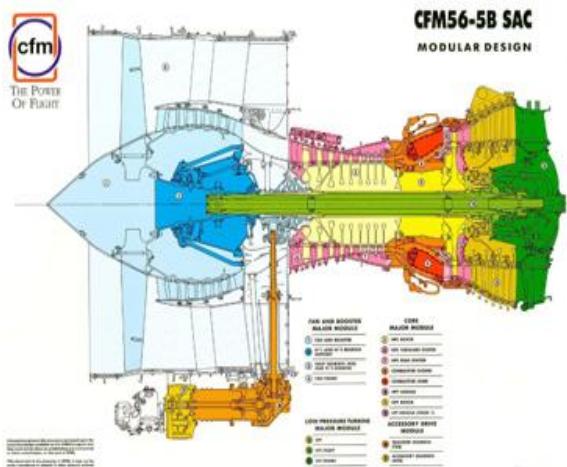
Gambar 3-3: Hasil curviting

Pada perangkat lunak inventor, titik-titik koordinat tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sebuah *airfoil* (*root*, *mid*, dan *tip*). Kemudian *airfoil* tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sebuah bilah kipas. Bilah dibuat dalam dua variasi, yaitu bilah dalam keadaan baik (*non-cacat*) dan bilah dalam keadaan rusak/cacat (*cacat*). Cacat pada bilah tersebut berbentuk *dent/penyok* sebesar 0.069" [CFM Maintenance Manual, 1999] seperti diperlihatkan pada Gambar 3-4.



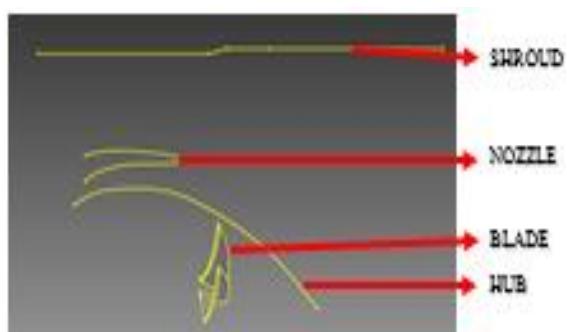
Gambar 3-4: Bilah *cacat* dan *non-cacat*

Pembuatan gambar lainnya seperti *hub*, *nozzle*, dan *shroud* didapatkan dengan mengacu pada Gambar 3-5 yang kemudian dibuat titik-titik koordinatnya pada *millimeterblock*.



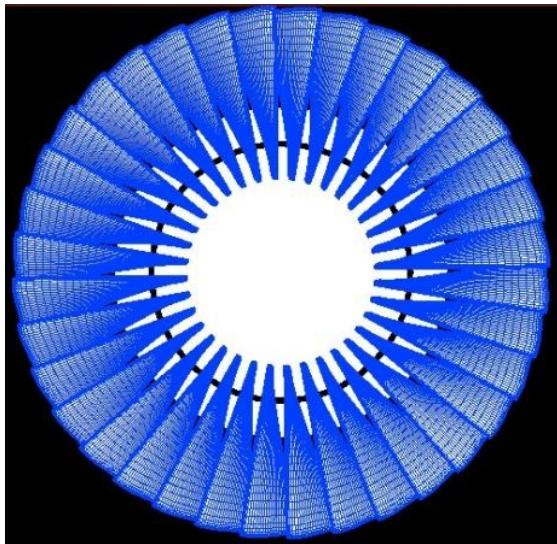
Gambar 3-5: Mesin CFM56-5B (CFM Mesin 56-5B Maintenance Manual, 1999)

Titik-titik koordinat tersebut selanjutnya diinputkan ke dalam perangkat lunak Microsoft Excel yang kemudian di *export* ke perangkat lunak inventor. Pada perangkat lunak inventor, titik-titik koordinat tersebut saling dihubungkan sehingga membentuk sketsa kurva dari *shroud*, *nozzle*, dan *hub* seperti diperlihatkan pada Gambar 3-6.



Gambar 3-6: Sketch *Shroud*, *nozzle* dan *hub*

Bilah yang telah dibuat di *input* ke dalam Numeca, kemudian dilakukan proses pembuatan domain *meshing*. Proses *meshing* ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Numeca IGG-Autogrid5 (64-bits). Hasil dari pembuatan domain *meshing* diperlihatkan pada Gambar 3-7.



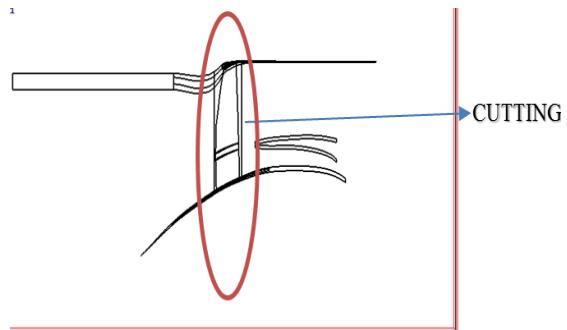
Gambar 3-7: Hasil *meshing*

Domain dari *geometry bilah kipas* yang telah berhasil di-*meshing* kemudian disimulasikan untuk mendapatkan karakteristik aerodinamika dari bilah kipas. Proses simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak CFD NUMECA FineTurbo 90_3. Parameter simulasi yang digunakan disesuaikan dengan kondisi terbang pesawat airbus A-320 yang menggunakan *mesin* CFM56 saat terbang dalam keadaan *economical cruise* dengan tinggi terbang 37.000 feet atau sekitar 11.300 m di atas permukaan laut dan kecepatan terbang 233 m/s, serta pada saat *takeoff* dengan tinggi terbang 0 meter di atas permukaan laut dan kecepatan 79.17 m/s. Properti udara (tekanan, temperatur, dan kerapatan udara) ditentukan dengan cara memasukan *input* dari kondisi terbang ke dalam perhitungan ISA.

Proses simulasi dilakukan dengan memvariasikan nilai dari *mass flow*. Variasi dari *mass flow* ini mulai dari 120

..., 165 dan 500 kg/s. Adapun *output* yang didapatkan, diantaranya *temperature*, *pressure*, *thrust* dan *power*.

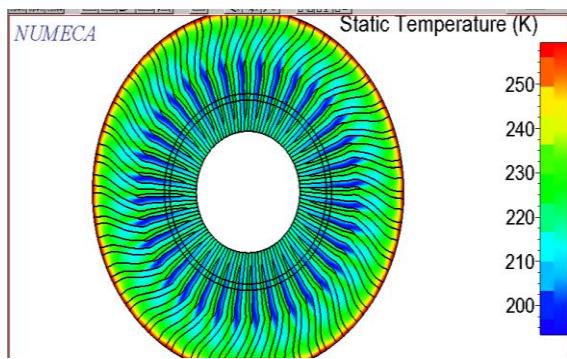
Untuk mendapatkan kurva performa dari pada kipas, maka setelah simulasi selesai, dilakukan pemotongan di sisi depan dan belakang kipas. Dari hasil pemotongan tersebut didapatkan nilai dari tekanan dan juga temperatur tepat sebelum dan sesudah kipas. Hasil dari pada CFView diperlihatkan pada Gambar 3-8.



Gambar 3-8: Hasil pemotongan

Setelah dilakukan pemotongan, nilai dari tekanan dan temperatur dapat diperlihatkan dengan menggunakan fungsi *contour* (ditunjukkan dengan gradasi warna) dan fungsi integral (untuk mendapatkan nilai rata-rata). Hasil dari penggunaan fungsi *contour* dan integral diperlihatkan pada Gambar 3-9.

Untuk mendapatkan sebuah keputusan *maintenance*, maka diperlukan sebuah analisis data. Analisis data dilakukan dengan membandingkan performa yang dihasilkan oleh kipas dalam keadaan cacat dan non-cacat. Dari hasil perbandingan performa kipas cacat dan non-cacat, didapat perubahan efisiensi, tekanan, *temperature*, *power*, dan juga *thrust* dari kipas. Perubahan nilai-nilai tersebut dibuat dalam bentuk persentase. Kemudian besar perubahan *thrust* dari kipas dibandingkan dengan regulasi AC 25-13 bagian 5.a.1 mengenai *reduce take-off thrust* yang menyatakan bahwa pesawat terbang dapat melakukan *take-off* apabila:



Gambar 3-9: Hasil fungsi contour

“Pengaturan reduce take-off thrust paling sedikit adalah 75 % dari maximum take-off thrust atau derated take-off thrust pada kondisi ambient.”[Federal Aviation Regulation CFR 14 , AC-25-13. 1988]

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

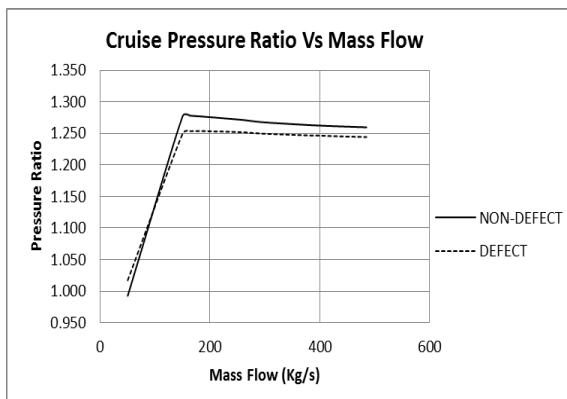
Dengan diketahuinya data-data kondisi terbang, maka *mass flow* dapat dihitung sehingga di dapat nilai *massflow* sebagai berikut:

$$\dot{m}_{Cruise} = 165.82 \text{ kg/s}$$

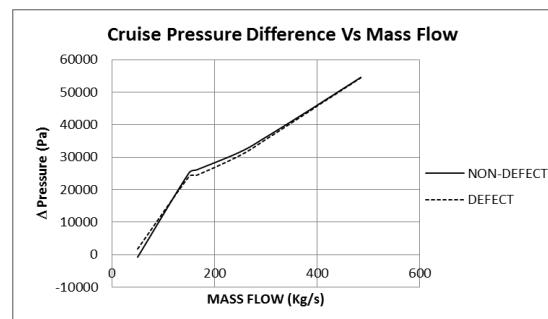
$$\dot{m}_{Takeoff} = 198 \text{ kg/s}$$

Dari komputasi yang dilakukan, didapat data-data hasil komputasi kipas cacat dan non-cacat pada kondisi *cruise* dan pada kondisi *take-off*.

Nilai dari ΔP dan *pressure ratio* dari kipas pada saat *cruise* menghasilkan grafik *pressure ratio* dan ΔP seperti diperlihatkan pada Gambar 4-1 dan Gambar 4-2.



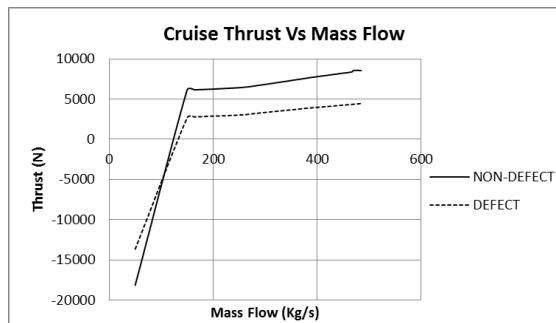
Gambar 4-1: Cruise pressure ratio vs mass flow



Gambar 4-2: Cruise pressure difference vs mass flow

Dari grafik *pressure ratio* dan ΔP dapat dilihat bahwa kurva kipas dengan kondisi cacat berada di bawah kurva kipas dengan kondisi non-cacat. Ini membuktikan bahwa cacat pada kipas tersebut menyebabkan terjadinya penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas.

Penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas berpengaruh pada *thrust* yang dihasilkan oleh kipas. Kurva dari *thrust* yang di plot bersama *mass flow* dapat dilihat pada Gambar 4-3.

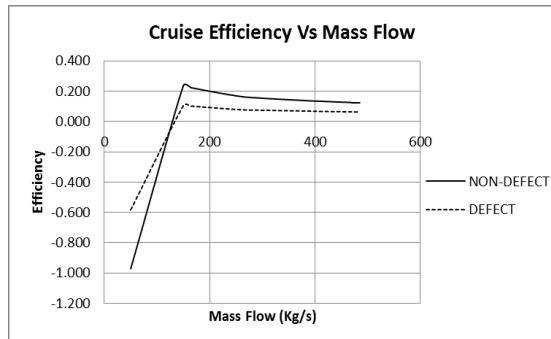


Gambar 4-3: Cruise thrust vs mass flow

Dari grafik *thrust*, dapat dilihat bahwa bilah kipas dalam kondisi cacat menghasilkan *thrust* yang lebih rendah dari pada bilah kipas dalam kondisi non-cacat. Besar penurunan dari *thrust* kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\begin{aligned} \Delta F &= \left(\frac{F_{non-defect} - F_{defect}}{F_{non-defect}} \times 100\% \right) \Delta F \\ &= \left(\frac{6153.4 - 2799.8}{6153.4} \times 100\% \right) \\ &\Delta F = 55\% \end{aligned}$$

Nilai efisiensi kemudian di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan Grafik efisiensi seperti diperlihatkan pada Gambar 4-4.



Gambar 4-4: *Cruise Efficiency Vs Mass Flow*

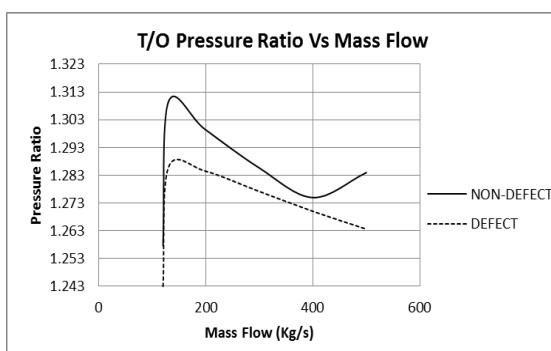
Dari grafik efisiensi, dapat dilihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi dari kipas. Besar penurunan dari efisiensi kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dapat dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\Delta\eta = \left(\frac{\eta_{\text{non-defect}} - \eta_{\text{defect}}}{\eta_{\text{non-defect}}} \times 100\% \right)$$

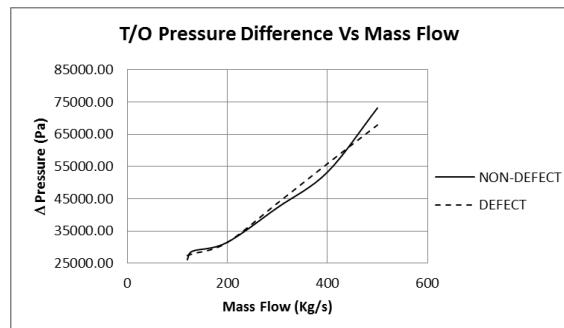
$$\Delta\eta = \left(\frac{0.223 - 0.102}{0.223} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = 54\%$$

Untuk kondisi *takeoff*, nilai dari ΔP dan *pressure ratio* dari kipas pada saat kondisi *take-off* di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan grafik *pressure ratio* dan ΔP seperti diperlihatkan pada Gambar 4-5 dan Gambar 4-6.

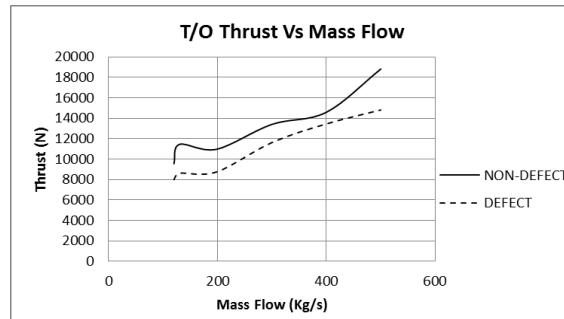


Gambar 4-5: *Take-off pressure ratio vs mass flow*



Gambar 4-6: *Take-off pressure difference vs mass flow*

Seperti pada kondisi *cruise*, penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas pada saat *takeoff* juga berpengaruh pada *thrust* yang dihasilkan oleh kipas. Kurva dari *thrust* pada saat *takeoff* yang di plot bersama *massflow* dapat dilihat pada Gambar 4-7.



Gambar 4-7: *Take-off thrust vs mass flow*

Dari grafik tersebut, kita dapat melihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan *thrust* dari kipas. Besar penurunan dari *thrust* kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) dapat dihitung dengan perhitungan berikut:

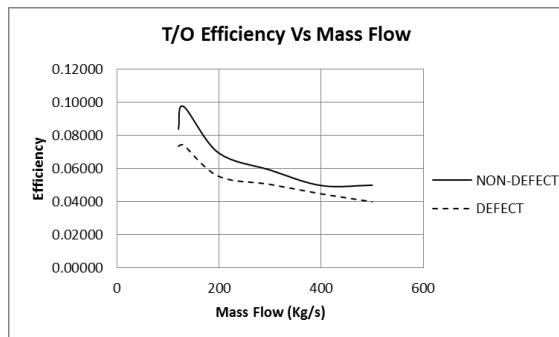
$$\Delta F = \left(\frac{F_{\text{non-defect}} - F_{\text{defect}}}{F_{\text{non-defect}}} \times 100\% \right)$$

$$\Delta F = \left(\frac{12369 - 10686}{12369} \times 100\% \right)$$

$$\Delta F = 14\%$$

Dari data *thrust*, *power* dan kecepatan, maka efisiensi dari kipas dapat dihitung. Nilai efisiensi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-5 yang terdapat pada sub bab 2-1. Nilai efisiensi dari kipas di plot bersama *mass flow* dan menghasilkan Grafik

efisiensi seperti diperlihatkan pada Gambar 4-8.



Gambar 4-8: Efisiensi *take-off* vs *mass flow*

Dari grafik tersebut, kita dapat melihat bahwa dengan adanya cacat pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi dari kipas. Besar penurunan dari efisiensi kipas (pada *mass flow* yang telah dihitung) pada saat *take-off* dihitung dengan perhitungan berikut:

$$\Delta\eta = \left(\frac{\eta_{non-defect} - \eta_{defect}}{\eta_{non-defect}} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = \left(\frac{0.077 - 0.064}{0.077} \times 100\% \right)$$

$$\Delta\eta = 16\%$$

Dari komputasi yang dilakukan, didapat *thrust* dan efisiensi dari kipas cacat dan non-cacat baik dalam kondisi *cruise* maupun kondisi *take-off*. Data-data *thrust* dan efisiensi diperlihatkan pada Tabel 4-1.

Table 4-1: THRUST DAN EFISIENSI

No.	Kondisi Terbang	$\Delta\eta$	ΔF
1	Cruise	54%	55%
2	Take-Off	16%	14%

Dari Tabel 4-1, kita dapat melihat bahwa terjadi penurunan *thrust* pada kipas yang diakibatkan oleh adanya *cacat* berupa *dent* pada bilah kipas. Penurunan *thrust* pada kipas tersebut diakibatkan oleh penurunan tekanan yang dihasilkan oleh kipas. Maka, sesuai dengan AC 25-13 yang telah dibahas pada sub bagian 2 bahwa apabila terjadi penurunan *thrust* pada sebuah mesin,

maka *thrust* yang dihasilkan tidak boleh kurang dari 75% *maximum take-off thrust*. Atau dengan kata lain, regulasi tersebut menyatakan bahwa penurunan *thrust* tidak boleh lebih dari 25% *maximum take-off thrust*.

Dengan adanya ketentuan AC 25-13 tersebut, maka dengan menghitung presentase penurunan *thrust* antara mesin dalam kondisi *non-cacat* dengan mesin dalam kondisi *cacat* pada saat *take-off*, dapat diketahui keputusan *maintenance* yang tepat bagi mesin tersebut.

Kerusakan atau cacat pada kipas terdapat pada daerah sekitar *tip* dari bilah kipas. Dengan demikian, diasumsikan bahwa kerusakan atau *cacat* tersebut hanya mempengaruhi performa pada bagian *cold flow* saja sehingga, penurunan performa yang dihasilkan oleh kipas atau disebut dengan performa kipas sama dengan penurunan performa mesin secara keseluruhan.

Dari hasil perhitungan tersebut, didapat bahwa presentase penurunan *thrust* yang dihasilkan oleh mesin pada saat *take-off* sebesar 14%. Oleh karena penurunan presentase *thrust* tidak melebihi 25%, maka keputusan *maintenance* yang tepat bagi bilah kipas mesin tersebut adalah *part holding*. Oleh karena itu, berdasarkan regulasi tersebut maka bilah kipas tidak diganti dan tidak dilakukan *repair*.

Apabila ditinjau dari kondisi pada saat pesawat melakukan *cruising*, penurunan *thrust* sebesar 55% dan efisiensi 54%. Angka penurunan tersebut merupakan angka yang cukup besar. Penurunan tersebut dapat mengakibatkan konsumsi bahan bakar yang lebih banyak atau dapat dikatakan bahwa konsumsi bahan bakar akan lebih boros. Karena dengan RPM yang sama, bilah yang *cacat* hanya mampu menghasilkan

kurang lebih 55% dari *thrust* yang seharusnya. Konsumsi bahan bakar yang berlebih ini akan menyebabkan *cost* yang lebih tinggi, sehingga menimbulkan kerugian bagi perusahaan. Oleh karena itu, berdasarkan persentase penurunan *thrust* tersebut, maka bilah kipas tersebut lebih baik dilakukan *repair/replacement*. Hal tersebut dilakukan untuk menghindari kerugian *financial* bagi perusahaan pemilik pesawat terbang.

Berdasarkan dua pertimbangan tersebut, untuk menjaga mesin tetap memenuhi *safety*, maka keputusan *maintenance* tetap mengacu pada regulasi, sehingga keputusan *maintenance* yang tepat untuk bilah tersebut adalah tidak dilakukan *repair (part holding)*.

5 KESIMPULAN

Dari hasil kajian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kerusakan *dent* sebesar 0.069 inchi yang terjadi pada bilah kipas menyebabkan turunnya performa pada mesin, diantaranya terjadi penurunan efisiensi dan *thrust* mesin. Saat kondisi *cruise*, kerusakan *dent/penyok* pada bilah kipas menyebabkan penurunan efisiensi sebesar 54% dan penurunan *thrust* sebesar 55%. sedangkan untuk kondisi *take-off*, penurunan efisiensi sebesar 16% dan penurunan *thrust* sebesar 14%.

Berdasarkan AC 25-13 yang menyatakan bahwa apabila terjadi penurunan *thrust* pada sebuah mesin, maka penurunan *thrust* tidak boleh lebih dari 25% *maximum take-off thrust*. Dengan mengacu pada regulasi tersebut, dengan penurunan *take-off thrust* sebesar 14% (kurang dari 25%) maka bilah kipas mesin tersebut masih layak digunakan dan tidak perlu dilakukan *repair/replacement*.

Apabila ditinjau dari segi performa mesin pada saat terbang *cruise*, didapatkan bahwa penurunan *thrust* sebesar 55%. Penurunan sebesar 55%

tersebut dapat menyebabkan mesin tidak efisien sehingga menjadikan mesin lebih boros saat beroperasi. Dengan alasan tersebut, maka bilah kipas perlu di-*repair* ataupun *replacement*.

Dari hasil pertimbangan di atas, untuk menjaga mesin tetap memenuhi *safety*, maka keputusan *maintenance* tetap mengacu pada regulasi. Berdasarkan regulasi tersebut, dengan adanya penurunan *thrust* sebesar 14% pada saat *take-off*, maka keputusan *maintenance* yang dipilih yaitu bilah kipas tidak perlu di-*repair/replacement*.

DAFTAR RUJUKAN

- B763 , 2013. *Melbourne Australia*, 2006 (BS LOC), skybrary, www.skybrary.aero/index.php/b763, Melbourne_Australia_2006_(BS_LOC).
- CFM Mesin 56-5B Maintenance Manual, 1999. *CFM International*.
- Cohen, H.R. and HIH. Saravanamutto, 1996. *Gas Turbine Mesin*, Longman Group Limited, England.
- Federal Aviation Regulation CFR 14 , AC-25-13, 1988, *FAA*.
- Fischer, U., 2010. *Mechanical and Metal Trades Handbook 2nd*, S.l: Verlag Eropa-Lehrmittel.
- Hall, Nancy., 2015. "Turbofan Engine". Glenn Research Center. *NASA*.
- James A.T. and S.L. Jonathan, 2004. *Foreign Object Damage Event Detector Data Fusion System for Turbofan Mesin*, *NASA Technical Report*, NASA/TM—2004-213192.
- Mabaso, A., 2011. *Mesin safety : bird be gone*, *Flight Global*, <http://www.flighthglobal.com/news/articles/mesin-safety-birds-be-gone-354209>.
- Mattingly, J. D. and Hans von Ohain, 2006. *Elements of Propulsion: Gas Turbines and Rockets*, AIAA Education Series, Reston, Virginia, USA
- Numeca User Manual, 2015. *Fine Turbo User Manual*, Numeca International.
- Winfrey, R.W., 2013. *The Application of Computational Fluid Dynamics to Jet Mesin Inlet Flow Quality*, Undergraduate Thesis, Ohio State University.
- Wiranto, A., 2002. *Pengantar Turbin Gas dan Motor Propulsi*, Jakarta.

