

ANALISIS NUMERIK BILAH KIPAS MESIN TURBOFAN TAY650-15 YANG MENGALAMI RETAK MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

Oleh:

Ade Irfansyah

Politeknik Penerbangan Surabaya

Jl. Jemur Andayani I, No. 73 Surabaya 60236

E-Mail: ade_irfansyah@dephub.go.id

Abstrak

Faktor Intensitas Tegangan (K) akibat adanya perambatan retak pada model bilah kipas mesin turbofan TAY 650-15 yang diperbaiki dengan teknik scallop dikaji secara komputasional. Perubahan harga K terhadap panjang retak diamati untuk memprediksi umur sisa dari bilah kipas. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa bilah kipas yang diperbaiki dengan teknik scallop yang melebihi kedalaman dalam SRM akan memiliki umur sisa yang jauh lebih pendek dari umur yang ditentukan oleh pabrik.

Abstract

The Stress Intensity Factor (K) caused by crack growth at fan blade model of turbofan engine TAY 650-15 which repaired using scallop technique was investigated computationally. The alteration of the K value toward crack length was examined to predict the life limit of the fan blade. The simulation indicate that fan blade was repaired using scallop technique with depth exceeds the SRM restrictions would have life limit much shorter than life limit was given by manufacture.

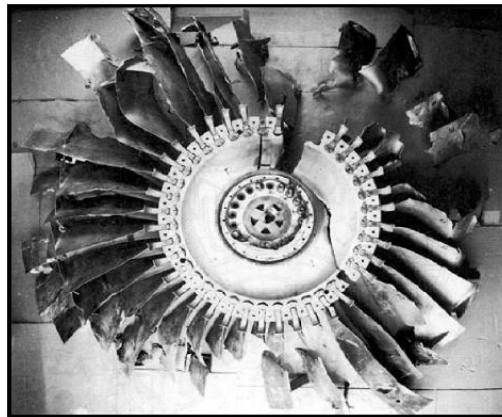
Keywords: *Finite Element Methods, Stress Intensity Factor, Fatigue Life.*

PENDAHULUAN

Jenis mesin yang banyak digunakan pada pesawat udara komersial adalah jenis mesin *turbofan*. Mesin *turbofan* merupakan salah satu jenis mesin turbin gas yang menggunakan udara sebagai fluida kerja, kemudian diproses untuk membangkitkan gaya dorong. Perbedaan mesin ini dengan jenis mesin turbin gas lainnya adalah penggunaan *fan* atau kipas sebagai *low pressure compressor* dan pembangkit gaya dorong (*thrust*). Penggunaan bilah kipas akan menurunkan efisiensi kerja jet sebagai pembangkit gaya dorong. Hal ini berdampak juga pada penurunan tingkat kebisingan yang ditimbulkan oleh semburan jet. Oleh karena itu mesin ini menjadi pilihan utama pesawat komersial berkecepatan *high subsonic* yang sangat memperhatikan kenyamanan penumpang. Bilah kipas berfungsi mengalirkan udara ke dalam mesin, yang selanjutnya digunakan sebagai bahan pembakar yang dapat menghasilkan energi. Energi ini digunakan untuk memutar kipas turbin yang menghasilkan gaya dorong pada pesawat, juga digunakan sebagai pembangkit listrik.

Dikarenakan fungsinya yang sangat penting didalam sistem *power plant*, maka bilah kipas harus dipastikan kondisinya tetap terjaga baik selama penerbangan berlangsung. Bilah kipas berada dibagian depan dari sistem, sehingga kondisinya bergantung dari beban-beban yang bekerja, dan juga akan bertumbukan dengan benda-benda yang mengalir bersama udara. Bilah kipas didesain dengan kriteria *Safe Life*, yang artinya bilah kipas tidak boleh mengalami kerusakan selama usia operasinya. Umur operasi untuk bilah kipas mesin TAY650-15 *Rolls Royce* menurut PT. NTP selaku perusahaan perawatan mesin pesawat udara, adalah sekitar 20.000 *cycle*. Dalam operasinya bilah kipas mengalami pengikisan dan tidak jarang menjadi cacat akibat tumbukan dengan benda-benda yang mengalir bersama udara. Jika hal ini tidak segera ditangani, maka bilah kipas akan patah dan juga akan menyebabkan kerusakan pada bagian yang lain dari mesin, seperti ditunjukkan dalam Gambar 1.

Kerusakan pada bilah kipas dapat diakibatkan oleh perambatan retak akibat beban *fatigue*. Parameter yang digunakan dalam menganalisis perambatan retak pada struktur adalah Faktor Intensitas Tegangan (*Stress Intensity Factor*, K). K didapatkan dari perhitungan Strain Energy Release (G) yang digunakan untuk membuka permukaan retak terhadap modulus elastisitas material (E). Sedangkan untuk mendapatkan G diperlukan besarnya gaya dan perpindahan pada setiap nodal, dari hasil analisis Metode Elemen Hingga.



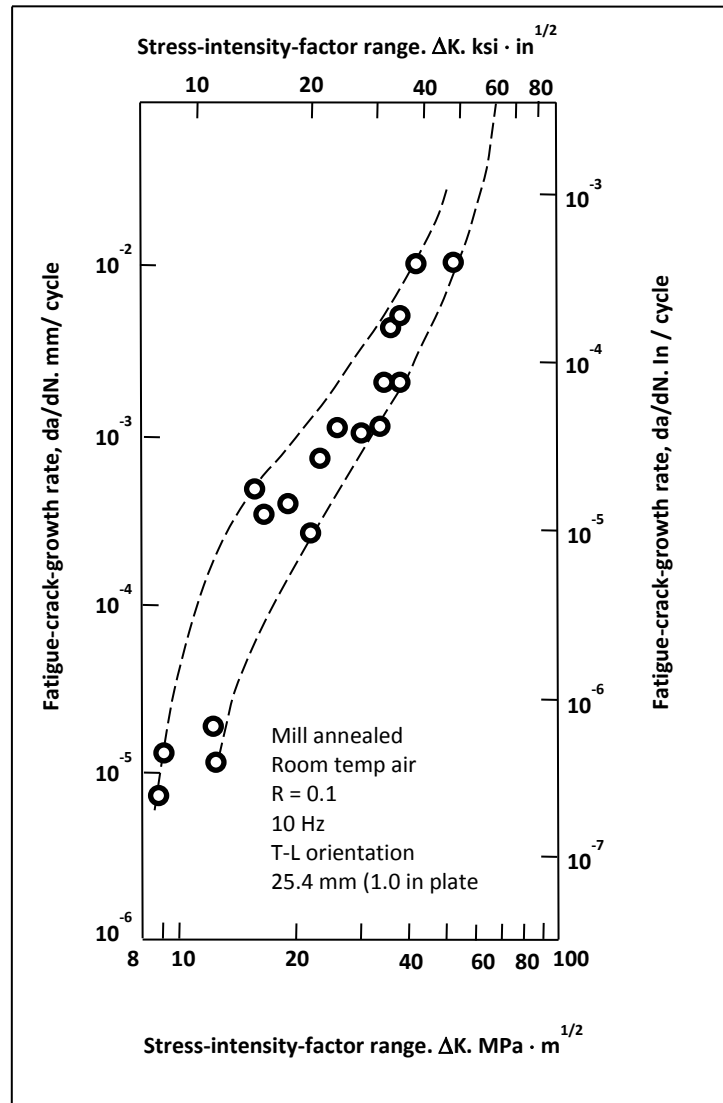
Gambar 1. Kerusakan pada bilah kipas

Bilah kipas yang mengalami retak dianalisis dengan menggunakan Metode Elemen Hingga. Pemodelan bilah kipas yang akan dianalisis adalah model bilah kipas 2D dan model solid 3D yang telah diperbaiki dengan teknik *scallop*.

Material yang digunakan dalam memodelkan bilah kipas adalah Titanium Alloy Ti6Al4V dengan modulus elastisitas 160 GPa. Nilai K yang didapatkan bervariasi berdasarkan panjang retak (a). Retak akan dimodelkan terus merambat dengan besaran Δa hingga mencapai a kritis. Panjang retak kritis (a_c) adalah panjang retak yang akan menyebabkan kegagalan pada struktur. Cara mendapatkan a_c adalah dengan membandingkan nilai K dengan nilai *fracture toughness* (K_c). Jika nilai K sama dengan atau lebih besar dari nilai K_c maka struktur akan gagal (patah).

Selain mendapatkan a_c analisis ini dilanjutkan hingga mendapatkan umur sisa dari bilah kipas hingga mengalami kegagalan. Umur sisa dari bilah kipas dapat ditentukan dengan merujuk pada data hasil pengujian *fatigue crack growth* dari material titanium alloy jenis Ti6Al4V, yang dapat dilihat pada Gambar 2.

Terdapat beberapa kasus yang sering ditemukan dalam proses perawatan bilah kipas mesin *turbofan*. Ketika mesin beroperasi, terdapat partikel-partikel padat yang terhisap ke dalam mesin. Partikel-partikel ini bertumbukan dengan bilah kipas yang berputar. Salah satu akibat dari tumbukan partikel dengan bilah kipas ini adalah *nicking*. *Nicking* merupakan salah satu jenis cacat berupa *notch* yang terjadi pada bilah kipas. Daerah yang sering mengalami *nicking* adalah *leading edge*.



Gambar 2. Grafik hasil pengujian *fatigue crack growth* pada material Ti6Al-4V

Pada saat mesin beroperasi, bilah kipas akan menerima beban putar (*rotation force*) dan beban aerodinamika. Respon tegangan yang terjadi akibat pembebanan pada bilah kipas yang mengalami cacat berbeda dengan bilah kipas yang ideal (tidak terdapat cacat). Perbedaan tersebut adalah terjadinya fenomena konsentrasi tegangan pada bagian di sekitar *nicking*. Konsentrasi tegangan merupakan respon tegangan yang terdistribusi tidak seragam akibat adanya *diskontinuitas* geometri. Jika tingkat konsentrasi tegangan melebihi kekuatan material, secara teoritis bilah kipas akan mengalami kegagalan. Oleh karena itu perusahaan pembuat mesin menetapkan prosedur perbaikan untuk mengatasi cacat ini. Prosedur yang dilakukan dalam mengatasi cacat ini adalah *scallop* dan *dressing*. *Scallop* adalah pengikisan pada daerah yang mengalami cacat agar *diskontinuitas* geometri tidak terlalu tajam sehingga konsentrasi tegangan dapat dikurangi. Sedangkan *dressing* adalah pengikisan pada seluruh permukaan *leading edge* atau *trailing edge* sehingga *chord* dari bilah kipas akan berkurang. *Scallop* dan *dressing* ini memiliki batas toleransi ukuran yang diperbolehkan. Apabila batas toleransi ini sudah dilewati, maka bilah harus diganti dengan yang baru (*discard*).

PEMODELAN NUMERIK

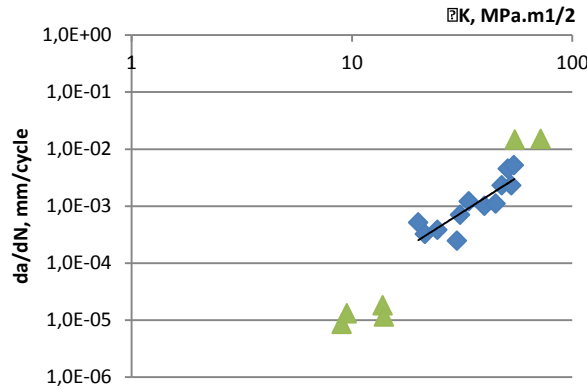
Bilah kipas mesin Turbofan TAY 650-15 memiliki panjang 400 mm dari pangkal penumpu hingga ujung tip bilah, serta memiliki lebar 180 mm dari *leading edge* hingga *trailing edge*. Tinggi bagian bilah kipas yang terkena aliran udara dari *root* ke *tip* adalah sekitar 380 mm. Bagian ini memiliki luas permukaan sekitar 0.132 m²

Structural Repair Manual (SRM) tidak menyebutkan secara langsung jenis material yang digunakan sebagai bahan dasar bilah kipas kompresor pada mesin pesawat TAY 650-15. Namun dari keterangan PT. NTP material yang biasa digunakan adalah Ti6Al4V dan Nimonic-75. Material Ti6Al4V merupakan kelompok paduan alpha-beta Titanium yang menggunakan Aluminum dan Vanadium sebagai bahan paduan. Data material properties dari Titanium alloy jenis Ti6Al4V dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data material properties Ti6Al4V

(E)	(ρ)	(ν)	(σ _y)	(σ _{ult})	(K _{IC})
160 GP a	4144 kg/ m ³	0.3	825 MPa	930 MPa	44 MPa. √m

Sedangkan data hasil pengujian *fatigue crack growth* pada material Ti6Al-4V yang telah ditunjukkan pada Gambar 2, dapat dibuat garis regresi pada daerah linear (*Region 2*) seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.



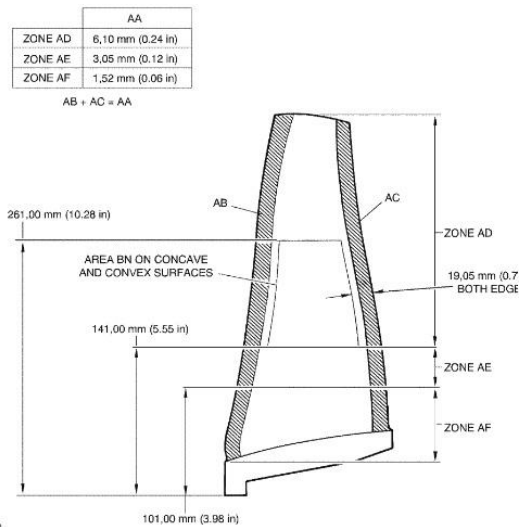
Gambar 3. Garis regresi pada daerah linear (*Region II*).

Garis regresi ini digunakan untuk mendapatkan persamaan garis seperti ditunjukkan dalam persamaan 1.

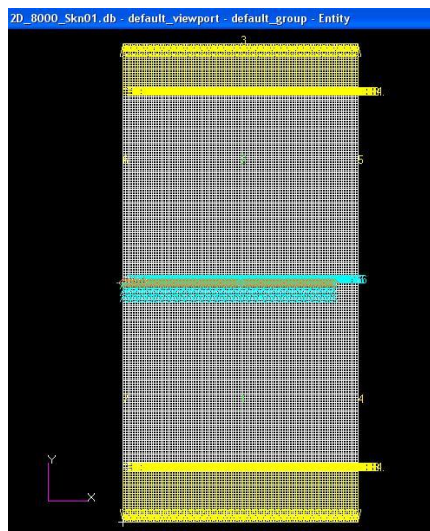
$$\frac{da}{dN} = 2 \cdot 10^{-7} (\Delta K)^{2.458} \quad (1)$$

Persamaan 1 digunakan untuk mendapatkan harga da/dN untuk setiap harga ΔK yang berubah terhadap panjang retak.

Dalam permodelan cacat, perlu diperhatikan beberapa hal yang telah ditentukan dalam manual perawatan bilah kipas TAY650-15 khususnya pada bagian yang membahas kasus *nicking* serta *scallop* seperti ditunjukkan didalam Gambar 4.



Gambar 4. Pembagian zona bilah kipas mesin TAY650-15



Gambar 5. Model elemen *shell* 2D

Dalam manual perawatan bilah kipas TAY650-15 daerah bilah kipas dibagi menjadi 3 bagian sebagai berikut:

- Zona *AF* : yaitu daerah yang berjarak 0mm s.d 101 mm dari tumpuan.
- Zona *AE* : yaitu daerah yang berjarak 101 mm s.d 141mm dari tumpuan
- Zona *AD* : yaitu daerah yang berjarak lebih dari 141 mm dari tumpuan

Setiap zona memiliki batasan toleransi maksimal kedalaman *scallop* yang diperbolehkan. Dalam tugas akhir ini, retak yang akan dimodelkan terletak pada zona antara *AD* dan *AE* yaitu 140 mm dari *Root*, seperti ditunjukkan dalam gambar 5.

Model Bilah Kipas 2D

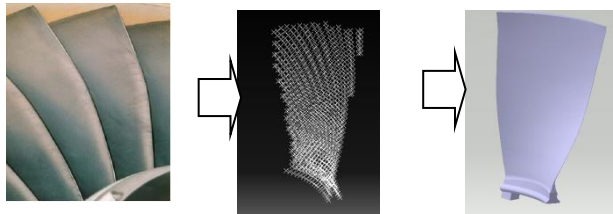
Model bilah kipas 2D dibuat menggunakan perangkat lunak Patran 2005 dan dianalisis menggunakan Nastran 2005. Model 2D dibuat dengan menggunakan elemen *shell* empat nodal. Bentuk geometri untuk model 2D berupa pelat persegi panjang dengan ketebalan seragam. Beban pada model 2D di modelkan dengan gaya tarik statik pada kedua ujung atas dan bawah, dan dibotong pada bagian tengah

untuk diletakkan penumpu, untuk lebih jelasnya lihat Gambar 5. Retak pada model 2D dibuat dengan cara memisahkan nodal pada elemen yang bersebelahan, sehingga membentuk sepasang permukaan retak

Model Bilah Kipas 3D

Model bilah kipas 3D dibuat menggunakan perangkat lunak Catia V5R18. Bilah kipas dimodelkan dengan elemen solid berbentuk *linear tetrahedron mesh*. Geometri model 3D memiliki bentuk yang sama dengan geometri bilah kipas sesungguhnya. Geometri model 3D dibuat oleh peneliti sebelumnya dengan menggunakan teknik *reverse engineering*, yang dilakukan di PT. NTP dengan cara melakukan *scanning* 3D sehingga mendapatkan *point clouds*. Setelah mendapatkan *point clouds* kemudian dibuat *outer surface* dan akhirnya mendapatkan model solid, seperti ditunjukkan dalam Gambar 6

Untuk model solid 3D, retak dibuat dengan cara membuat cacat yang berbentuk celah yang sangat tipis. Celah tipis ini ditempatkan pada jarak 205 mm dari pangkal bilah kipas, dengan cacat *scallop* pada bagian leading edge.



Gambar 6. Pembuatan model kipas 3D

Scallop dimodelkan dengan bentuk setengah *ellips* seperti ditunjukkan dalam Gambar 7. Cacat *scallop* dibuat berdasarkan data pada Tabel 2.



Gambar 7. Model 3D dengan *Scallop* untuk ukuran AA= 8mm

Tabel 2. Data panjang dan kedalaman *scallop* (dalam mm)

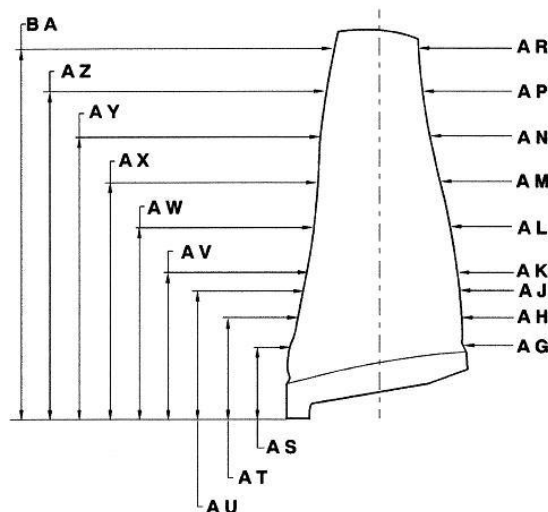
	AW	AL	AA	10A A
Dalam Manual	211	172.0 7	8	80
Model	211	170	10	100

Untuk kedalaman *scallop* (lebar chord minimum, AL) yang dibuat model adalah kedalaman yang melebihi ketentuan manual, yaitu sebesar 170 mm (selisih 2 mm dengan ketentuan dalam manual perawatannya). Hal ini dilakukan dikarenakan permintaan dari PT NTP yang ingin mengetahui hasil analisis jika bilah kipas TAY650-15 memiliki kedalaman *scallop* diluar ketentuan manual perawatannya yang ditunjukkan dalam Tabel 3 dan Gambar 8.

Beban yang diterima oleh bilah turbin cukup rumit, antara lain beban akibat reaksi dari gaya sentripetal, beban termal dan beban aerodinamika. Pada penelitian ini hanya menggunakan beban akibat reaksi dari gaya sentripetal murni dikarenakan beban ini adalah yang paling dominan. Beban akibat reaksi dari gaya sentripetal adalah beban yang disebabkan adanya gaya akibat reaksi dari gaya sentripetal. Sedangkan gaya akibat reaksi dari gaya sentripetal adalah gaya axial berupa tarik yang disebabkan oleh massa benda tersebut, yang diputar dengan jarak r dari pusat massanya.

Tabel 3. Lebar minimum chord pada setiap daerah dari bilah kipas TAY 650-15

Height Letter	Section Height (Gauge)	Chord Letter	Minimum Chord Width
AS	81,00 mm (3.189 in)	AG	174,72 mm (6.879 in)
AT	101,00 mm (3.98 in)	AH	174,65 mm (6.876 in)
AU	141,00 mm (5.55 in)	AJ	173,46 mm (6.829 in)
AV	161,00 mm (6.34 in)	AK	171,13 mm (6.737 in)
AW	211,00 mm (8.31 in)	AL	172,07 mm (6.774 in)
AX	261,00 mm (10.28 in)	AM	173,55 mm (6.833 in)
AY	311,00 mm (12.24 in)	AN	177,13 mm (6.974 in)
AZ	361,00 mm (14.21 in)	AP	184,43 mm (7.261 in)
BA	401,00 mm (15.787 in)	AR	190,75 mm (7.510 in)



Gambar 8. Panduan *Scallop* dalam Manual Perawatan TAY650-15

Besarnya beban akibat reaksi dari gaya sentripetal pada model ditentukan dengan cara membagi model menjadi beberapa bagian (dalam hal ini adalah 19 bagian). Model dibagi menjadi beberapa bagian adalah dikarenakan gaya akibat reaksi dari gaya sentripetal adalah merupakan fungsi dari luas

penampang. Cara menentukan besaran dari beban akibat reaksi dari gaya sentripetal (F_s) adalah menurut Persamaan 2 dan Persamaan 3, dengan terlebih dahulu merubah satuan kecepatan sudut dari rpm menjadi rad/s menurut Persamaan 4 dan Persamaan 5.

$$\omega = 2\pi f \quad (2)$$

$$\omega = 2\pi \frac{n}{T} \quad (3)$$

$$F_s = \rho \omega^2 \int_r^t A r dr \quad (4)$$

$$F_s = \rho \omega^2 |0.5 A r^2|_r^t \quad (5)$$

Keterangan:

ω : Kecepatan sudut dengan satuan rad/sec

n : Jumlah putaran dalam satu menit (rpm)

T : Satuan waktu dalam detik

ρ : Masa jenis material

A : Luas penampang

Subscript r : Jarak *root* terhadap sumbu putar

Subscript t : Jarak *tip* terhadap sumbu putar

Hasil yang diperoleh dari perhitungan dengan Metode Elemen Hingga menggunakan perangkat lunak MSC Patran-Nastran 2005 adalah berupa *Displacement* (perpindahan tiap *nodal*), serta gaya pada *Nodal*, sedangkan pada CATIA V5R18 hasil yang diperoleh berupa *Strain Energy*.

Untuk menentukan besaran dari *Energy Release Rate* (G) diperlukan besaran gaya pada nodal sebelum retak membuka, dan perpindahan nodal setelah retak membuka dengan menggunakan Persamaan 6 sampai dengan Persamaan 9.

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot Z_i \cdot (w_l - w_{l*}) \quad (6)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot X_i \cdot (u_l - u_{l*}) \quad (7)$$

$$G_{III} = -\frac{1}{2\Delta a} \cdot Y_{Li} \cdot (v_{Li} - v_{Li*}) \quad (8)$$

$$G_T = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (9)$$

Setelah mendapatkan besarnya G , maka selanjutnya Faktor Intensitas Tegangan (K) ditentukan dari perhitungan energi semu yang diperlukan untuk mengatupkan permukaan retak disekitar ujung retak (*Virtual Crack Closure technique*) menggunakan persamaan 10. Besaran K akan bervariasi terhadap panjang retak.

$$K = \sqrt{G_T \times E} \quad (10)$$

Tegangan pada setiap elemen diperlukan untuk mendapatkan K_0 yang merupakan komponen yang dibutuhkan dalam menghitung faktor geometri (β).

Besarnya tegangan tiap elemen dapat dihitung dengan Persamaan 11.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad N/m^2 \quad (11)$$

K_0 adalah Faktor intensitas tegangan untuk konfigurasi keseluruhan model yang dapat dihitung menggunakan Persamaan 12.

$$K_0 = \sigma \sqrt{\pi \cdot a} \quad (12)$$

Setelah mendapatkan K_0 maka selanjutnya adalah menghitung Faktor Geometri (β) dengan menggunakan Persamaan 13.

$$\beta = \frac{K}{K_0} \quad (13)$$

Kekuatan sisa adalah kemampuan dari model didalam menahan beban yang nilainya akan turun disebabkan oleh pertambahan panjang retak. Jika kekuatan sisa yang ditunjukkan dengan besaran tegangan sudah berada dibawah tegangan operasinya maka struktur akan mengalami kegagalan. Tegangan sisa dapat dihitung menurut Persamaan 14.

$$\sigma = \frac{K_C}{\beta \cdot \sqrt{\pi \cdot a}} \quad (14)$$

K_C adalah *Fracture Toughness*, dan bilah akan gagal jika didapatkan $K \geq K_C$.

Panjang retak kritis (a_c) didapatkan dengan cara membandingkan nilai K untuk panjang retak tertentu dengan nilai K_C . Jika Nilai K untuk panjang retak tertentu lebih besar atau sama dengan nilai K_C maka bilah kipas akan gagal dikarenakan panjang retak sudah mencapai a_c .

Untuk dapat menghitung umur sisa dari bilah kipas, diperlukan satu data hasil pengujian material berupa da/dN versus ΔK . Data ini telah ditunjukkan oleh penulis dalam tabel 3.2.

Prosedur yang dilakukan oleh penulis hingga mendapatkan umur sisa dari bilah kipas adalah sebagai berikut:

1. Menghitung ΔK yang merupakan suatu nilai perubahan K berdasarkan panjang retak menurut Persamaan 15.

$$\Delta K = K_n - K_{n-1} \quad (15)$$

2. Selanjutnya adalah mendapatkan nilai da/dN untuk setiap ΔK yang telah dihitung pada langkah satu dengan menggunakan Persamaan 1.

3. Setelah mendapatkan da/dN untuk setiap ΔK , selanjutnya adalah menentukan pertambahan panjang retak (Δa) menurut Persamaan 16.

$$\Delta a = a_n - a_{n-1} \quad (16)$$

4. Selanjutnya menentukan ΔN dengan menggunakan Persamaan 17.

$$\Delta N = \frac{\Delta a}{da/dN} \quad (17)$$

5. Setelah menghitung ΔN , maka N (umur) dapat dihitung dengan cara menjumlahkan umur awal (0 cycle) dengan ΔN , menurut Persamaan 18 sebagai berikut:

$$N_m = N_{m-1} + \Delta N \quad (18)$$

Pemodelan bilah kipas pada penelitian ini telah dilakukan uji konvergensi untuk mendapatkan jumlah minimum dari elemen yang digunakan. Uji konvergensi pada analisis menggunakan metode elemen hingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat pada jumlah elemen tertentu. Pada uji konvergensi ini suatu kasus dimodelkan dengan jumlah elemen yang berbeda-beda. Semakin tinggi jumlah elemen yang digunakan, maka hasil yang didapatkan akan semakin akurat. Uji konvergensi digunakan untuk mendapatkan hasil yang akurat, dan untuk memilih jumlah elemen paling sedikit yang hasilnya tetap akurat. Pada analisis struktur, jumlah elemen yang sedikit dapat digunakan untuk menganalisis kasus-kasus sederhana dengan akurat. Namun pada kasus analisis struktur dengan geometri dan pembebanan yang kompleks diperlukan jumlah elemen yang banyak untuk mendapatkan pemodelan yang akurat.

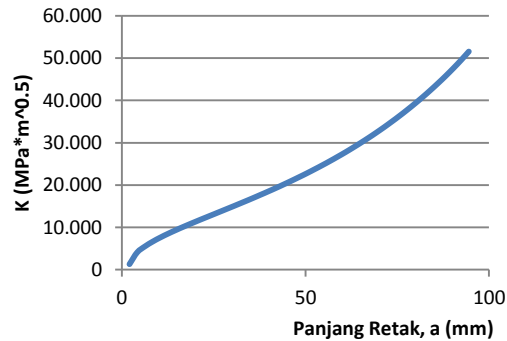
Hasil yang didapat dari uji konvergensi untuk model 2D dan solid 3D dapat dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Hasil uji konvergensi

	Jumlah Elemen
Model 2D tanpa <i>scallop</i>	140.000
Model 2D dengan <i>scallop</i>	230.000
Model 3D dengan <i>scallop</i>	397.000

HASIL DAN DISKUSI

Panjang a_c untuk model 2D tanpa *scallop* didapatkan sebesar 86 mm pada harga Faktor Intensitas Tegangan (K) sebesar $44.036 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Panjang retak kritis sebesar 86 mm didapatkan ketika harga K mencapai harga *Fracture Toughness* (K_c) dari material Titanium TI6Al4V sebesar $44.000.000 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, seperti ditunjukkan dalam Gambar 9.

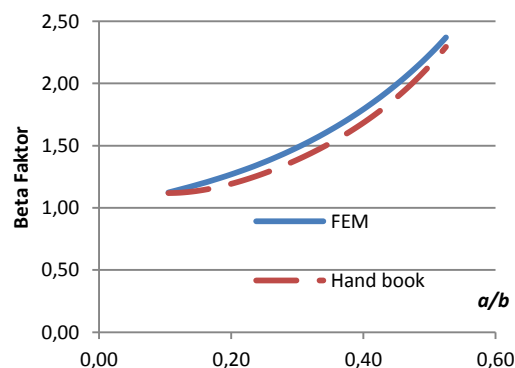


Gambar 9. K versus a pada model 2D dengan *scallop*

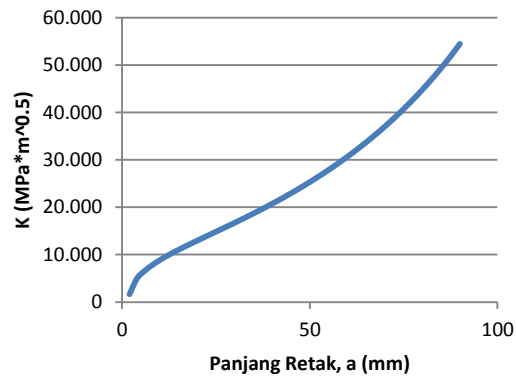
Selain mendapatkan harga K analisis menggunakan Metode Elemen Hingga juga mendapatkan harga faktor geometri (β). Faktor geometri (β) didapatkan dari perbandingan K terhadap K_0 . Grafik β terhadap a/b dapat dilihat dalam Gambar 10. Notasi a/b adalah perbandingan panjang retak a mm dengan lebar dari bilah kipas b mm.

Grafik β dalam gambar 10 menjelaskan nilai yang didapat dari perhitungan MEH dan nilai yang diambil dari data *hand book*. Tampak bahwa nilai keduanya hampir berhimpit dengan perbedaan sekitar 3%.

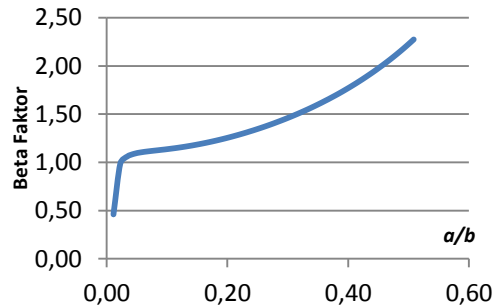
Berbeda dengan model 2D tanpa scallop, model dengan *scallop* memiliki panjang retak kritis yang lebih pendek yaitu sebesar 80 mm dengan Faktor Intensitas Tegangan (K) sebesar $44.813 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, seperti ditunjukkan dalam Gambar 11. Sedangkan grafik β terhadap a/b untuk model 2D dengan *scallop* ditunjukkan dalam Gambar 12. Jadi model 2D dengan *scallop* memiliki panjang retak kritis yang lebih pendek dari pada model 2D tanpa *scallop*, sehingga *scallop* mempengaruhi panjang retak kritis.



Gambar 10. Grafik β terhadap a/b untuk model 2D tanpa *scallop* yang didapat dari metode Numerik dan *Hand book*

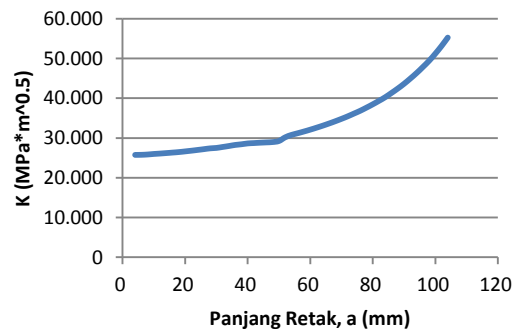


Gambar 11. Grafik K versus panjang retak untuk model 2D dengan *scallop*

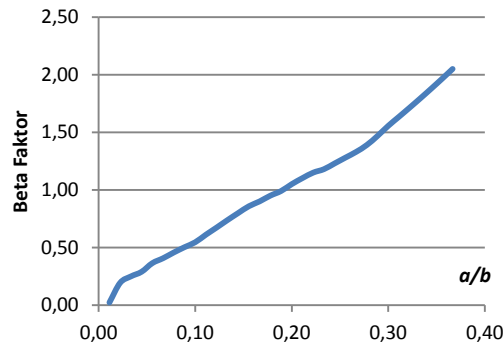


Gambar 12. Grafik Faktor geometri (β) terhadap a/b untuk model 2D dengan *scallop*

Retak kritis yang didapatkan pada model solid 3D adalah sebesar 92 mm dengan Faktor Intrensitas Tegangan (K) sebesar 44,9 MPa√m, seperti ditunjukkan dalam Gambar 13. Model solid 3D dengan *scallop* memiliki nilai dari panjang retak kritis terbesar dibandingkan dengan model 2D tanpa dan dengan *scallop*. Grafik β terhadap a/b ditunjukkan dalam Gambar 14

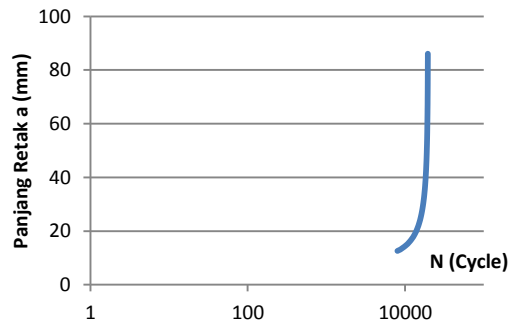


Gambar 13. Grafik K versus panjang retak untuk model solid 3D dengan *scallop*

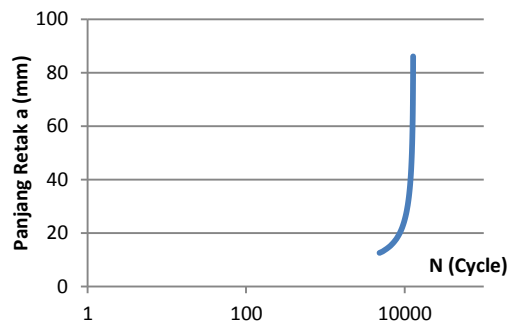


Gambar 14. Grafik faktor geometri (β) terhadap a/b untuk model solid 3D dengan *scallop*

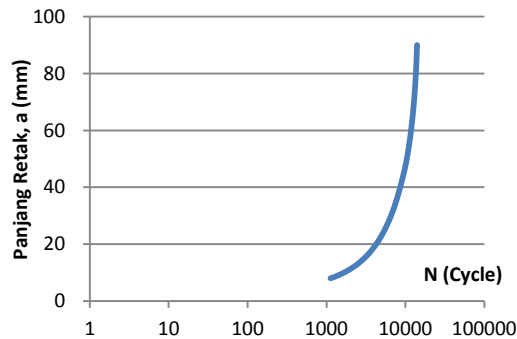
Umur bilah kipas saat mencapai a_c untuk model 2D tanpa *scallop* adalah 21.700 cycle, seperti ditunjukkan dalam Gambar 15. Untuk model 2D dengan *scallop* umur bilah kipas saat mencapai a_c adalah 17.600 cycle, seperti ditunjukkan oleh Gambar 16. Dan untuk model solid 3D dengan *scallop* umur bilah kipas saat mencapai a_c adalah 16.300 cycle, seperti ditunjukkan dalam Gambar 17. Umur *design goals* bilah kipas tanpa retak menurut data dari PT. NTP adalah sebesar 20.000 cycle.



Gambar 15. Grafik a versus N model 2D tanpa *scallop*



Gambar 16. Grafik a versus N model 2D dengan *scallop*



Gambar 17. Grafik a versus N model 3D dengan *scallop*

KESIMPULAN

Metode Elemen Hingga dan Teori Virtual Crack Closure dapat digunakan untuk menghitung Faktor Intensitas Tegangan (K) dan Faktor Geometri (β) sebagai metode Numerik disamping menggunakan data pada Hand Book. Model 2D dengan *scallop* akan memiliki a_c yang lebih pendek dari pada model 2D tanpa *scallop*.

Tindakan perbaikan dengan kedalaman *scallop* yang melebihi ketentuan dari pabrik dalam Repair Manual akan menyebabkan umur bilah kipas akan lebih pendek sekitar 5.043 cycle dibandingkan dengan umur yang ditentukan oleh pabrik yaitu 20.00 cycle.

Untuk penelitian selanjutnya terdapat beberapa saran diantaranya adalah beban yang digunakan adalah beban pada kondisi sebenarnya, yaitu memperhitungkan juga beban akibat gaya aerodinamika. Selanjutnya analisis struktur bilah kipas pada bagian tumpuan (*support*) karena daerah ini merupakan daerah yang menerima beban paling tinggi. Disarankan juga untuk menggunakan data material properties sesuai dengan spesifikasi pabrik pembuat. Untuk mendapatkan G (Laju Pelepasan Energi) yang akurat makad disarankan untuk menggunakan G total (G_T) yang didapatkan dari penjumlahan G_I , G_{II} , dan G_{III} pada modus I, II dan III untuk model solid 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- ARISMUNANDAR, WIRANTO, Pengantar Turbin Gas dan Mesin Propulsi, Penerbit ITB, Bandung, 2002
- KNIGHT, CHARLES E., The Finite Element Method in Mecanical Design, PWS-KENT Publishing Company, Boston, 1993
- PICKARD, A.C., ROLL-ROICE LTD., The Application of 3-Dimensional Finite Element Methods to Fracture Mechanics and Fatigue Life Prediction, The Chameleon Press LTD, London, 1986
- HERTZBERG, RICHARD W. (1995-12). Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials (4 ed.). Wiley. ISBN 0471012149.
- Edited by MATTHEW J. DONACHIE, JR., Metals Handbook, Ninth edition, Volume 3. Properties and selection: Stainless Steel. Tool Materials and Special-Purpose Metals. The Hartford Graduate Center
- ANDERSON, t.l, Fracture Mechanics – Fundamental and Aplications, CRC Press Inc., U.S.A., 2000
- PUTRA, ICHSAN S., Diktat Kuliah Damage Tolerance Analysis. Institut Teknologi Bandung, 2004
- CRAIG, ROY R. JR., John Wiley & Sons, Mechanics of Materials, Canada, 1996.
- E.F.RYBICAKNI DM.F.KANNINEAN, Finite Element Calculation of Stress Intensity Factors by a Modified Crack Closure Integral, Eng. Fracture Mech., Vol. 9, pp. 931-938, 1977.
- INGRAFFEA AND P. WAWRZYNEK, FRANC2D: A Case Study in Transfer of Software Technology, in Research Transformed into Practice: Implementations of NSF Research, J. Colville and A. Amde, Eds.: ASCE Press, New York, 1995, pp. 233-344.