

Estimasi Nilai Faktor Intensitas Tegangan (K_I) Tipe Center Crack Dengan Metode Numerik

Hendrix Noviyanto Firmansyah

Program Studi Teknik Penerbangan, Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto

Email: firmansyah.hendrix@gmail.com

Abstract

Crack on an aircraft structures is very dangerous and will lead to hazard if it's ignored. Crack will cause singularity and make the stress tend to infinity. Stress Intensity Factors (SIF) is the parameter that will determine the behavior of the cracked structure. SIF will be used to predict the crack growth and life cycle. There are many methods that can estimate the values of the SIF. Numerical methods such as displacement extrapolation and Virtual crack closure technique (VCCT) are the methods that used in this research. Those methods will estimate SIF Mode I (K_I) center crack type. Displacement extrapolation and VCCT need displacement nodal and nodal force to determine the SIF. in order to acquire displacement nodal and nodal force, modeling and analyzing using MSC Patran/Nastran is needed. The Result shows that the displacement extrapolation method have small error than the VCCT. Displacement extrapolation percentage error is 5.6 % and for the VCCT percentage error is 11.95. in this research, we suggest using the displacement extrapolation method is to estimate the SIF (K_I)

Keywords : center crack, displacement extrapolation, VCCT, FEM

1. Pendahuluan

Kerusakan struktur dapat terjadi karena berbagai proses. proses manufacturing, desain struktur yang cacat, atau saat operasi dapat menyebabkan kerusakan struktur. Retak yang terjadi pada material atau komponen struktur akan sangat berbahaya jika dibiarkan saja. Retak terjadi menyebabkan singularitas pada ujung retak yang mana nilai tegangan yang terjadi sangat tinggi atau mencapai tanpa batas (*infinity*). Nilai yang berpengaruh pada fenomena retak adalah faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*) dengan simbol (K). Nilai K akan berbeda untuk mode maupun letak retak yang terjadi pada material ataupun pada komponen. Terdapat 3 mode pada fenomena retak, yaitu mode I (*opening mode*), Mode II (*sliding mode*), dan Mode III (*tearing mode*).

Analisa tegangan yang dilakukan hanya pada daerah di sekitar ujung retak sangat penting untuk diketahui karena nilai tersebut menentukan laju rambat retak dan lama material atau komponen tersebut gagal. Beberapa metode numerik yang

dapat digunakan untuk mencari nilai K adalah dengan *displacement extrapolation*, dan *Virtual crack closure Technique (VCCT)*.

Pada kedua metode ini menggunakan perpindahan nodal (*displacement*) pada daerah sebelum ujung retak untuk memprediksi nilai K yang terjadi. Untuk mendapatkan *displacement* atau perpindahan tersebut dapat menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*). Pada penelitian ini akan menggunakan metode elemen hingga dan metode *displacement extrapolation* dan VCCT untuk mencari nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada plat tipis dengan retak tengah. Perhitungan nilai *Stress Intensity Factor* secara analitik digunakan sebagai pembandingan. Hasil perbandingan dapat memberikan pertimbangan dalam pemilihan metode untuk mencari nilai stress intensity factor.

2. Tinjauan Pustaka

Venkatesha B K, Prashanth K P dan Deepak Kumar T (2014), dengan penelitian yang berjudul *Investigation of Fatigue Crack Growth Rate in*

Fuselage of Large Transport Aircraft using FEA Approach. Menggunakan software CATIA V5 dan MSC Patran dengan metode *modified virtual crack closure integral (MVCCI)*. Analisis yang dilakukan yaitu perhitungan nilai *Stress Intensity Factor (SIF)* maksimum sehingga material tidak dapat menahan laju perambatan retak atau mengalami kegagalan, dengan lebar material yaitu 1000 mm. Ronald Krueger, (2004) dalam papernya menyebutkan bahwa penggunaan metode *virtual crack closure technique* dapat membantu analisa damage tolerant pada komposit, dengan bantuan penggunaan perangkat lunak.

S.M.O. Tavares dkk (2008), pada penelitiannya membandingkan beberapa metode dalam mendapatkan stress intensitas factor yang relevan dengan teoritik. Metode yang dibandingkan adalah forced method, J-integral, compounding method, dan modivied *virtual crack closure technique*. Hasil penelitian menyimpulkan bahwa metode VCCT terbukti mampu mendapatkan nilai *Stress Intensity Factor* yang baik sesuai kasus yang diberikan.

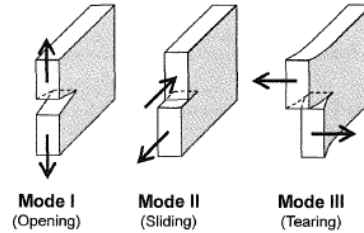
Gustavo V. Guinea (2000), bahwa penggunaan metode *displacement* ekstrapolasi memberikan nilai K_I yang baik, dengan perbedaan yang kecil. Pada penelitian ini juga memberikan penjelasan bahwa ukuran elemen, bentuk elemen, dan mesh yang digunakan dapat menentukan keakuratan data.

2.1. Stress Intensitas Factor

Di dalam *Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM)*, ketangguhan suatu komponen, atau umur dari pertumbuhan retak dikarakteristikkan dengan suatu parameter yang disebut dengan *Stress Intensity Factor* atau faktor intensitas tegangan, K_I . Nilai K menyatakan suatu ukuran dari besaran medan konsentrasi tegangan di sekitar ujung retak.

Dalam stress intensitas faktor terdapat 3 mode pergeseran permukaan retak yaitu *opening*, *sliding*, dan *tearing*. Mode 1 atau *opening* terjadi saat *tension load* tegak lurus terhadap arah pertumbuhan retak, mode yang paling umum dari kegagalan akibat *tension load*. Mode 2 atau *sliding* merupakan beban paralel dengan permukaan retak

ke arah lebar material, sehingga mengakibatkan *shear loading* di seluruh permukaan retak dan tegak lurus terhadap ujung retak. Mode 3 atau *tearing* merupakan beban paralel dengan permukaan retak ke arah tebal material mengakibatkan *shear loading* melintasi celah permukaan dan sejajar dengan ujung retak.



Gambar 1. Mode Retak

Secara umum, persamaan untuk menentukan nilai K pada *Stress Intensity Factor* yaitu.

$$K = \sigma \beta \sqrt{\pi a} \quad (\text{Finite Plate}) \quad (1)$$

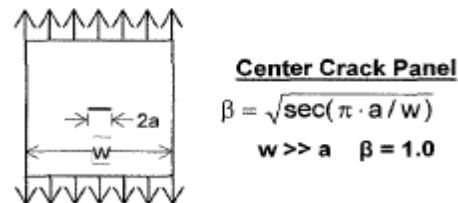
$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{Infinite Plate}) \quad (2)$$

Dimana : K : *Stress Intensity Factor* (MPa \sqrt{m})

σ : *Stress* (MPa)

a : *Initial Crack* (m)

Nilai *beta* pada persamaan di atas dapat diperoleh dengan metode numerik atau perhitungan. Ada beberapa persamaan untuk mendapatkan nilai *beta*, yaitu :



Gambar 2. Nilai faktor Geometri untuk *center crack*

2.2. Displacement extrapolation⁽⁶⁾

Metode ini digunakan untuk mengetahui singularitas tegangan pada ujung retak dan faktor intensitas tegangan yang hanya menggunakan perpindahan nodal (*nodal displacement*) di daerah sekitar ujung retak. Berikut adalah persamaan untuk menghitung perpindahan.

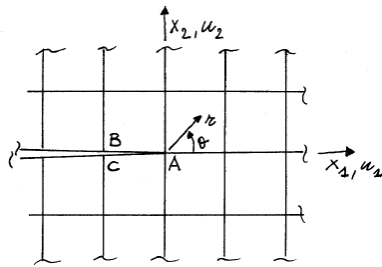
$$u_2 = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[(\kappa+1) - 2\cos^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (3)$$

$$- \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[(\kappa-1) - 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (4)$$

$$u_1 = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[(\kappa-1) + 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (5)$$

$$+ \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[(\kappa+1) + 2\cos^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (6)$$

$\kappa = 3-4\nu$ (plane strain)
 $\kappa = (3-\nu)/(1+\nu)$ (plane stress)



Gambar 3. Pure Mode I and plane stress:

$$u_2 = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{2}{1+\nu} - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (7)$$

$$u_1 = \frac{K_I}{G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{1-\nu}{1+\nu} + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (8)$$

Dengan asumsi $\theta = (+/-) \pi$ dan $r = r_{AB}$

Maka nilai K_I dapat didapatkan dengan persamaan berikut

$$K_I^* = \sqrt{\frac{2\pi}{r_{AB}} \frac{G(1+\nu)}{4} (u_{2B} - u_{2C})} \quad (9)$$

K_I = SIF mode I

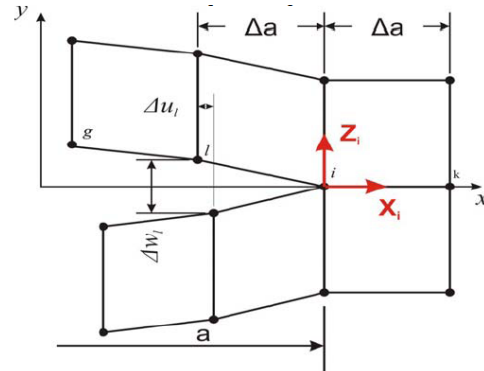
G = energy release rate

u = perpindahan

r = jarak

2.3. Virtual Crack Closure^[6]

Metode *Virtual crack closure* didasarkan atas *energy release rate* ketika retak merambat dengan increment yang kecil. Metode ini didasarkan atas perhitungan *strain energy release rate*.



Gambar 4. VCCT

Untuk perhitungannya

$$\Delta E = \frac{1}{2} (X_i \cdot \Delta u_l + Z_i \cdot \Delta w_l) \quad (10)$$

Dimana nilai X_i dan Z_i merupakan nodal forces pada point i , dan Δu_l dan Δw_l adalah perpindahan (*displacement*) pada node l .

Berikut ini adalah persamaan untuk mencari energy release rate

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} Z_i \Delta w_l = -\frac{1}{2\Delta a} Z_i (w_l - w_l') \quad (11)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} X_i \Delta u_l = -\frac{1}{2\Delta a} X_i (u_l - u_l') \quad (12)$$

G_I dan G_{II} = mode I dan II energy-release rate
 Sehingga nilai K dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut

$$K_I = \sqrt{G_I E^*} \quad (13)$$

$$K_{II} = \sqrt{G_{II} E^*} \quad (14)$$

$$E^* = E \text{ For plane-stress} \quad (15)$$

$$E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \text{ For plane-strain} \quad (16)$$

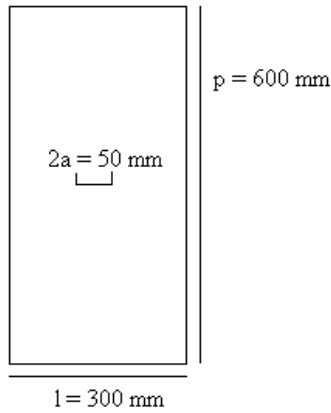
E = Young's modulus

ν = Poisson's Ratio

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan tahapan menentukan model pelat dengan retak tengah yang akan dianalisis untuk mendapatkan nilai SIF. Model yang dibuat adalah model pelat tipis seperti pada

gambar 1 dengan dimensi $p=600$ mm, $l=300$ mm, dan $t= 5$ mm.



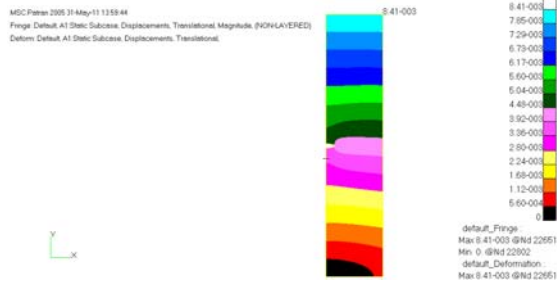
Gambar 5. Model Plat

Model tersebut diberikan retak tengah dengan panjang ($2a$) sebesar 50 mm, dengan tegangan yang diberikan pada plat sebesar 1 MPa.

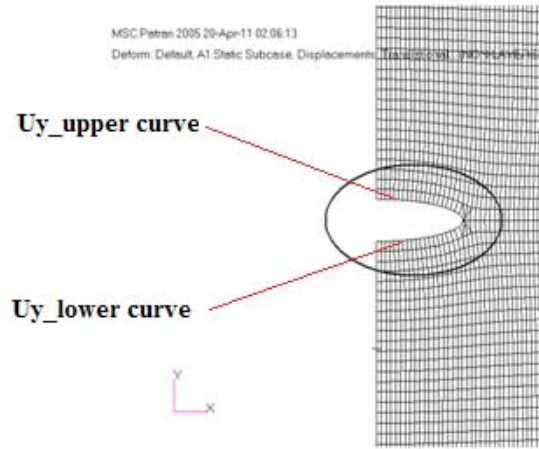
Langkah selanjutnya adalah memodelkan diprogram MSC Patran/nastran dan dilakukan analisis untuk mendapatkan perpindahan nodal (*displacement*). Perpindahan nodal tersebut kemudian digunakan dalam persamaan untuk mencari nilai SIF dengan metode *displacement extrapolation* dan VCCT. SIF hasil kedua metode tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil analitik.

4. Hasil Dan Pembahasan

Pemodelan dilakukan dengan menggunakan MSC Patran/Nastran dengan cara hanya memodelkan $\frac{1}{2}$ bagian. Pemodelan ini dilakukan untuk memudahkan dalam melihat CTOD (*crack tip opening displacement*).



Gambar 6. Displacement Result



Gambar 7. Posisi nodal

Data yang digunakan untuk perhitungan nilai K_I dapat dilihat dari tabel 1.

Tabel 1. Data Displacement

No	Id (node id)	$Ux_upper\ curve$ (mm)	$Uy_upper\ curve$ (mm)	r (mm)
1	2567	-0.000126	0.000466	9
2	2718	-0.000131	0.000442	8
3	2869	-0.000135	0.000414	7
4	3020	-0.000137	0.000384	6
5	3171	-0.000138	0.000349	5
6	3322	-0.000135	0.000309	4
7	3473	-0.000127	0.000262	3
8	3624	-0.000111	0.000204	2
9	3775	-0.000073	0.000144	1
10	3926	0	0	0

Ux adalah perpindahan arah x, Uy adalah perpindahan arah $y_upper\ curve$, dan r adalah jarak antar nodal.

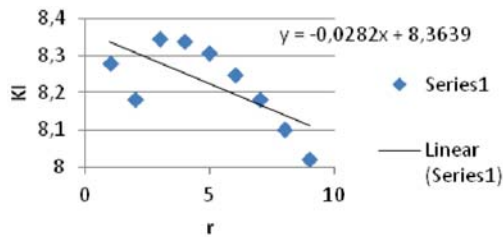
4.1. Perhitungan Nilai SIF Dengan Menggunakan Displacement Extrapolation.

Hasil perpindahan yang didapatkan hanya perpindahan pada arah y yang akan digunakan dalam perhitungan. Nilai perpindahan tersebut adalah nilai selisih perpindahan nilai nodal Uy pada upper curve dengan nodal yang pada lower curve. Nilai SIF Dengan menggunakan metode *displacement extrapolation* dapat dikelompokkan dalam tabel 2.

Tabel 2. Nilai SIF Berdasarkan r

No	Id (node id)	Delta_Uy (mm)	r (mm)	K _I (Mpa.mm ^{1/2})
1	2567	5.25E-04	9	8.02034
2	2718	5.00E-04	8	8.103622
3	2869	4.73E-04	7	8.181077
4	3020	4.41E-04	6	8.249997
5	3171	4.06E-04	5	8.306913
6	3322	3.64E-04	4	8.338327
7	3473	3.16E-04	3	8.344382
8	3624	2.53E-04	2	8.182092
9	3775	1.81E-04	1	8.28038
10	3926	0	0	0

Delta_Uy, merupakan perpindahan nodal pada arah y, r adalah jarak antar nodal dalam arah x. K_I adalah *Stress Intensity Factor* mode 1 hasil metode *extrapolation* pada daerah disekitar ujung retak.



Gambar 8. SIF vs r

Untuk nilai K_I pada ujung retak diperkirakan bernilai 8.363 MPa.mm^{1/2}

4.2. Perhitungan Nilai SIF Dengan Menggunakan VCCT

Untuk metode *virtual crack closure* ilustrasinya dapat dilihat pada gambar 4. Pada metode ini membutuhkan nilai gaya (*nodal forces*) pada titik ujung retak untuk digunakan dalam mencari nilai K_I

Tabel 3. Gaya pada Ujung Retak

No	Fx (N)	Fy (N)	Fxy (N)
1	7.25E-04	5.05E+00	-5.78E+00

Langkah selanjutnya adalah mencari nilai G (energy strain release) yaitu dengan persamaan (13) Dan nilai K_I=(G*E)^{0.5}

Tabel 4. Nilai SIF dengan Metode VCCT

No	Δ a	G	K _I
1	1.25	-0.00083	7.802589

Untuk metode analitik pada kasus center crack adalah sebagai berikut

$$K_I = 1*(25*3.14)^{0.5}*(\sec((3.14*25)/300))^{0.5}$$

$$K_I = 8.862316 \text{ Mpa } /(\text{mm}^2)$$

Perbandingan hasil dapat dilihat pada tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan SIF

No	Metode	K _I MPa.mm ^{1/2}	%
1	Analitik	8.862	
2	<i>Displacement Extrapolation</i>	8.363	-5.634
3	VCCT	7.803	-11.958

Nilai K_I yang dibandingkan dari kedua metode dengan perhitungan analitik menunjukkan metode *displacement extrapolation* memiliki keakuratan yang baik karena persentase perbedaan dibawah 10%.

5. Kesimpulan

Hasil perhitungan nilai K_I yang dilakukan dengan menggunakan metode *displacement extrapolation* menunjukkan keakuratan yang baik dibanding dengan metode VCCT. Terlihat pada persentase perbedaan 5.6 % untuk metode *displacement extrapolation*, dan 11.95% dengan menggunakan VCCT. Pada proses perhitungan untuk mendapatkan K_I dengan metode *displacement extrapolation* juga relatif lebih mudah untuk dilaksanakan jika dibandingkan dengan metode VCCT.

6. Saran

Saran yang bisa disampaikan adalah sebagai berikut:

1. Analisis nilai K untuk variasi jenis retak
2. Remeshing untuk mendapatkan hasil yang lebih baik.
3. Perlu dilakukan percobaan pada nilai K untuk mode II dan mode III

7. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto yang telah memberikan dukungan finansial pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Broek, *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, 1982
- [2] Chan, Tuba and Wilson, *Eng. Fract. Mech.*, 2(1), 1970
- [3] G. V. Guinea, J. Planas, and M. Elices, 2000. KI evaluation by the *displacement extrapolation* technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 66(3), pp. 243-255.
- [4] Krueger R and O'Brien TK , 2001, A shell/3D modeling technique for the analysis of delaminated composite laminates, NASA/TM- 2000-210287, ARL-TR-2207.
- [5] Krueger R, 2004 , The Virtual crack closure Technique: History, Approach and Applications, *Applied Mechanics Reviews*, Vol. 57, pp. 109-143.
- [6] S. M. O. Tavares, P. M. G. P. Moreira, S. D. Pastrama, P. M. S. T. de Castro, 2008, Stress intensity factors by numerical evaluation in cracked structures”, 11th Portuguese Conference on Fracture, Lisbon (Caparica), February 13-15.
- [7] Venkatesha B K, Prashanth K P & Deepak Kumar T, 2014, Investigation of Fatigue Crack Growth Rate in Fuselage of Large Transport Aircraft using FEA Approach, *Global Journal of Researches in Engineering, Mechanical and Mechanics Engineering*, Volume 14 Issue 1 Version 1.0 Year 2014.