

## **PREDICTING STRESS INTENSITY FACTOR ( $K_I$ ) OF SINGLE EDGE CRACK USING DISPLACEMENT EXTRAPOLATION METHOD**

**Hendrix Noviyanto Firmansyah**  
Program Studi Teknik Penerbangan  
Sekolah Tinggi Teknologi Adisutjipto  
Jl. Janti Blok R Lanud Adisutjipto Yogyakarta  
Email: [Hendrix@stta.ac.id](mailto:Hendrix@stta.ac.id)

### *Abstract*

*Cracks that occur in the structure will be very dangerous if left alone. Cracks can propagate and will eventually cause the structure to fail. Cracks that occur will cause singularity at the end of the crack, and the stress level is very high or reaches without limit (infinity). Stress intensity factor (SIF) is used to determine behavior of structures with crack. One of method that can predict SIF is displacement extrapolation method. Displacement extrapolation methods predict SIF by nodal displacement near end of crack. This research is to predict SIF of a thin plate with a single edge crack of 1.27 mm. The crack mode used in this research is mode I (opening mode) with a tension stress of 60 MPa. Nodal displacement for calculating SIF is taken from result of analyzing the cracked model using Patran / nastran. SIF prediction result from displacement extrapolation then to be compared with the results of analytical calculation.*

*Key words : single edge crsck, displacement extrapolation method, Stress intensity factor, Patran.*

### **1. Pendahuluan**

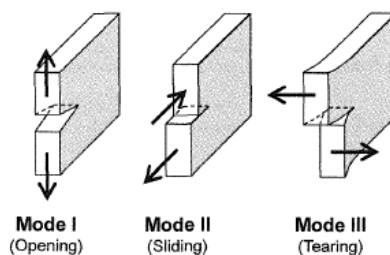
Retak yang terjadi pada material atau komponen struktur akan sangat berbahaya jika dibiarkan saja atau tidak dilakukan analisa mengenai kemampuan material atau komponen tersebut untuk dapat berfungsi dengan semestinya. Retak terjadi menyebabkan singularitas pada ujung retak yang mana nilai tegangan yang terjadi sangat tinggi atau mencapai tanpa batas (*infinity*). Nilai yang berpengaruh pada fenomena retak adalah faktor intensitas tegangan (*stress intensity factor*) dengan symbol ( $K$ ). 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*).

Nilai  $K_I$  pada mode retak I tergantung besarnya nilai tegangan yang terjadi dan bentuk geometri retak yang terjadi. Pada penelitian yang telah dilakukan sebelumnya [2], perbandingan penggunaan displacement extrapolasi dengan VCC menunjukkan metode displacement extrapolasi mendekati nilai  $K_I$  hasil teoritik. Perbedaan yang terjadi sebesar 5.634 %. Bentuk geometri yang dianalisis jenis retak tengah pada mode retak I. 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*). Metode ini juga digunakan untuk memprediksi nilai intensitas tegangan dengan retak tepi. Pada penelitian ini didapatkan hasil yang akurat dalam menghasilkan nilai SIF jika dibandingkan dengan perhitungan analitik [1]. Keakuratan semakin bagus jika nilai yang dihasilkan dengan menggunakan evaluasi pangkat 3. Bahwa penggunaan metode displacement ektrapolation memberikan nilai  $K_I$  yang baik, dengan perbedaan yang kecil [3]. Pada penelitian tersebut [3]

juga memberikan penjelasan bahwa ukuran elemen, bentuk elemen, dan mesh yang digunakan dapat menentukan keakuratan data.

Pada penelitian ini memprediksi nilai  $K_I$  untuk geometri retak tepi (*edge crack*) dengan metode *displacement extrapolation*. Data yang digunakan adalah nilai tegangan yang terjadi pada lower skin sayap N219 dengan asumsi panjang retak awal 1,27 mm. nilai  $K_I$  hasil metode ini akan dibandingkan dengan nilai  $K_I$  hasil teoritik dengan pendekatan nilai  $\beta$ .

Di dalam *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), ketangguhan suatu komponen, atau umur dari pertumbuhan retak dikarakteristikan 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 pergeseran permukaan retak [5]

Secara umum, persamaan untuk menentukan nilai  $K$  pada *stress intensity factor* yaitu.

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

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

Dimana :  $K$  : *Stress intensity factor* (MPa $\sqrt{m}$ )

$\sigma$  : Tegangan (MPa)

$a$  : panjang retak (m)

Nilai  $\beta$  pada persamaan di atas dapat diperoleh dengan metode numerik atau perhitungan.

Metode *displacement extrapolation* digunakan untuk mengetahui singularitas tegangan pada ujung retak dan faktor intensitas tegangan yang hanya menggunakan perpindahan nodal (*nodal displacement*) didaerah sekitar ujung retak. Berikut adalah persamaan untuk mengitung perpindahan

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

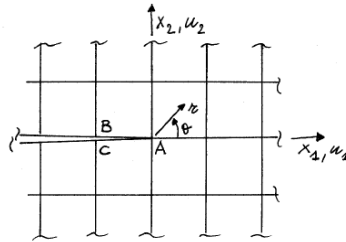
$$- \frac{K_{II}}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ (\kappa-1) - 2\sin^2 \frac{\theta}{2} \right] + \dots \quad (4)$$

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

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

$\kappa = 3-4\nu$  (plane strain)

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



*Pure Mode I and plane stress:*

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

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

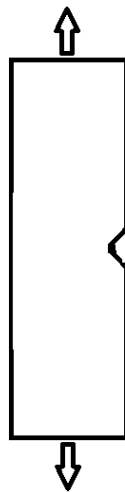
Dengan asumsi  $\theta = (+/-)\pi$  dan  $r = r_{AB}$

Maka nilai  $K_I$  dapat didapatkan dengan persamaan berikut

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

## 2. Metodologi Penelitian

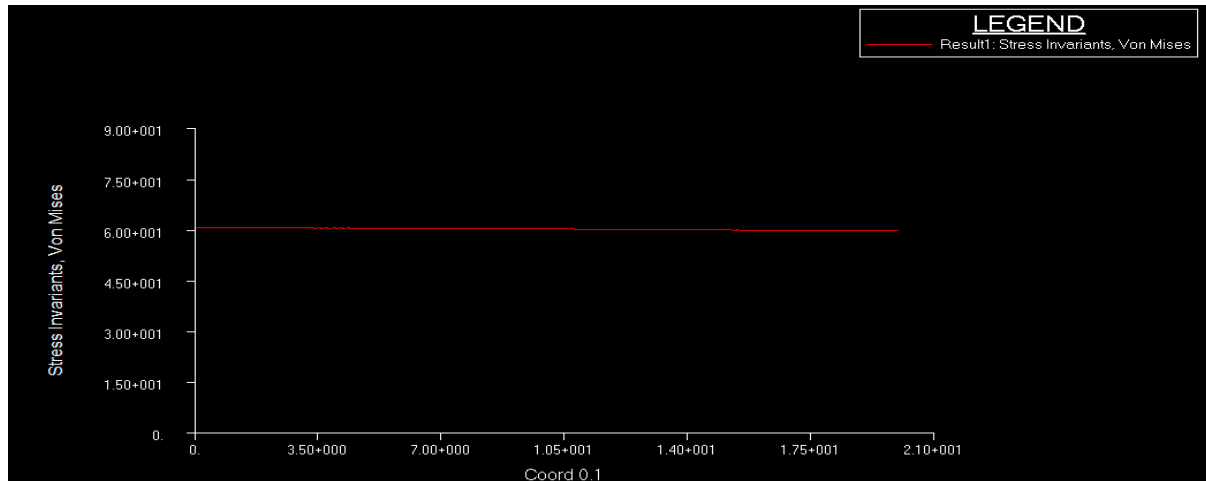
Penelitian ini dilakukan dengan menentukan model plat tipis dengan retak tepi. Model plat tipis dengan ketebalan 2 mm, panjang 600 mm, dan lebar 20 mm terdapat retak yang berlokasi pada tepi plat (*edge crack*) dengan panjang retak 1,27 mm. Bentuk model dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Mode retak tepi

Kemudian plat tersebut dikenakan beban tarik (*tension*) yang menyebabkan retak membuka, mode retak mode I (*opening mode*) dengan tegangan nominal yang terjadi sebesar  $60 \text{ N/mm}^2$ . Jenis material yang digunakan adalah Al 2024-T3.

Langkah selanjutnya adalah memodelkan plat tersebut menggunakan patran/nastran. Pemodelan dimulai dengan membuat geometri, elemen, menentukan kondisi batas, memasukkan properties dan analisis. Jarak antar nodal yang dibuat pada model sebesar 0.2 mm, dan dikondisikan sesuai dengan kondisi rencana. Untuk memastikan nilai tegangan pada plat sesuai dengan kondisi, maka yang dilakukan adalah identifikasi nilai tegangan pada model. Identifikasi model dilakukan pada daerah yang cenderung jauh dari konsentrasi tegangan maupun aplikasi beban. Plot nilai tegangan pada model dapat dilihat pada gambar 3.

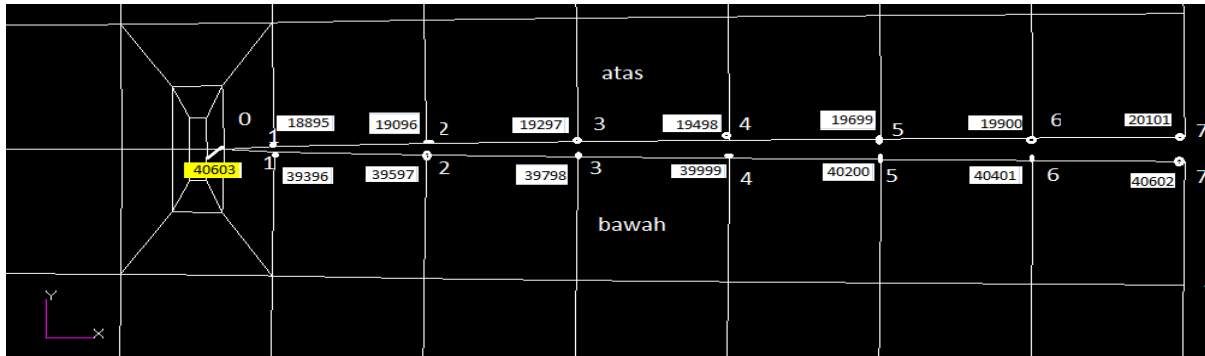


Gambar 3. Identifikasi nilai tegangan

Hasil identifikasi menunjukkan nilai tegangan model pada daerah yang dicek berkisar  $60 \text{ N/mm}^2$ , sehingga model dapat digunakan untuk diambil nilai perpindahan nodal. Hasil nilai perpindahan nodal yang digunakan adalah pada arah “y” atau searah dengan pembebanan. Nilai perpindahan nodal kemudian digunakan untuk mencari nilai *stress intensity factor* (SIF)  $K_I$ .

### 3. Hasil dan Pembahasan

Langkah prediksi untuk mencari SIF ( $K_{I_{\text{prediksi}}}$ ) dilakukan dengan menghitung terlebih dahulu nilai SIF pada daerah sebelum ujung retak ( $K_{I_{\text{perhitungan}}}$ ). Prediksi nilai SIF dilakukan dengan mengambil nilai perpindahan nodal pada daerah yang dekat dengan ujung retak. Perpindahan model akibat pembebanan yang digunakan dalam menghitung nilai  $K_{I_{\text{perhitungan}}}$  dapat dilihat pada gambar 4. Gambar 4 menunjukkan bahwa nodal yang jauh dari ujung retak memiliki perpindahan yang lebih besar dibanding pada nodal yang dekat dengan ujung retak. Posisi ujung retak dimodel ditunjukkan pada nodal 40603.



Gambar 4. Lokasi nodal

Nilai perpindahan nodal pada gambar 4 dapat dilihat pada tabel 1 kolom “uy”. Nilai perpindahan yang diambil adalah 6 titik sebelum ujung retak. Nilai perpindahan nodal kemudian digunakan dalam perhitungan mencari nilai  $K_{I\_perhitungan}$ . Nilai  $K_{I\_perhitungan}$  didapat dengan menggunakan persamaan displacement extrapolation dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Nilai  $K_I$  (stress intensity factor) hasil perhitungan

| No | Nodal | uy<br>(mm) | r<br>(mm) | $K_{I\_perhitungan}$<br>MPa (mm) <sup>0.5</sup> |
|----|-------|------------|-----------|---|
| 1  | 20101 | 0.00386913 | 1.26667   | 157.4813  |
| 2  | 19900 | 0.00351621 | 1.06667   | 155.9578  |
| 3  | 19699 | 0.00316066 | 0.86667   | 155.5243  |
| 4  | 19498 | 0.00277578 | 0.66667   | 155.7316  |
| 5  | 19297 | 0.00232125 | 0.46667   | 155.6554  |
| 6  | 19096 | 0.00173431 | 0.26667   | 153.8462  |

Pada tabel 1, Nomor 1 menunjukkan nodal yang terjauh dari ujung retak dan nomor enam adalah nodal yang paling dekat dengan ujung retak. Dari tabel 1 juga ditunjukkan nilai  $K_{I\_perhitungan}$  cenderung menurun seiring mendekati ujung retak. Untuk mengetahui apakah nilai  $K_{I\_perhitungan}$  benar, maka langkah yang harus dilakukan adalah membandingkannya dengan nilai  $K_I$  hasil perhitungan analitik ( $K_{I\_analitik}$ ). Nilai  $K_{I\_analitik}$  untuk retak tepi sebagai berikut:

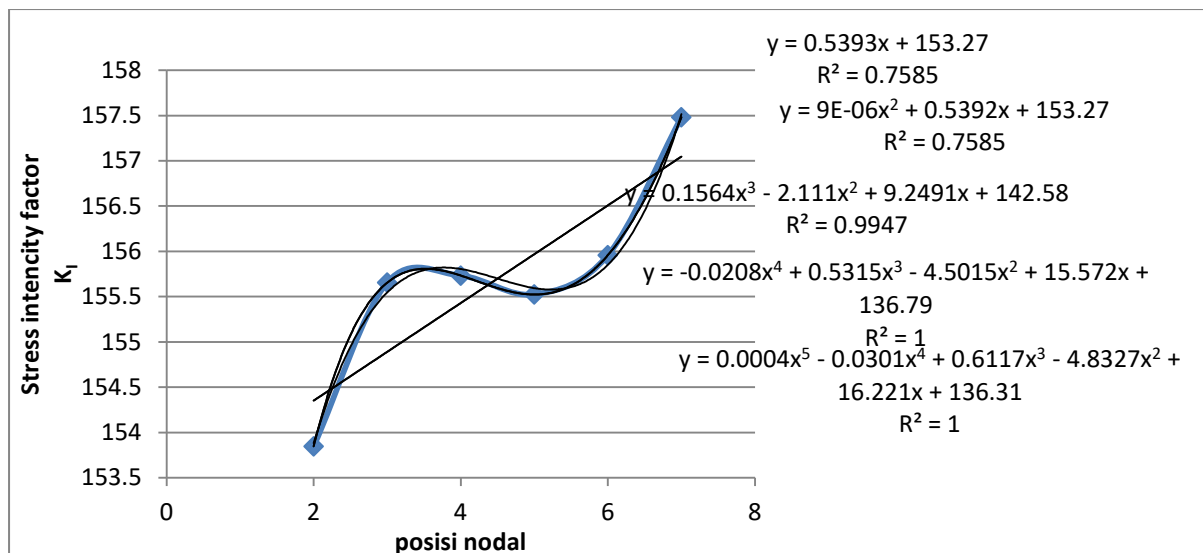
$$\sigma : 60 \text{ MPa}$$

$$a : 1.27 \text{ mm}$$

$$\beta : 1.1427 \text{ D.P Rooked and J.D Cartwright (single edge crack)}$$

$$K_{I\_analitik} : \sigma \beta \sqrt{\pi a}$$

$$: 136.949 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$$



Gambar 5. Plot nilai  $K_{I\_perhitungan}$  dan persamaan untuk memprediksi nilai  $K_{I\_prediksi}$

Sebelum membandingkan dengan hasil analitik, yang dilakukan adalah memprediksi nilai  $K_I$  pada ujung retak ( $K_{I\_prediksi}$ ). Untuk mengetahui nilai  $K_I$  prediksi pada ujung retak ( $K_{I\_prediksi}$ ) dilakukan dengan membuat plot nilai  $K_I$  hasil perhitungan dan selanjutnya memunculkan persamaan yang bisa memprediksi nilai  $K_I$ . Pada gambar 5 dapat dilihat plot dan persamaan prediksinya. Untuk melihat nilai tegangan pada ujung retak, yang dilakukan adalah dengan memasukkan nilai 0 pada persamaan yang ada. Berikut adalah tabel nilai  $K_{I\_prediksi}$  dan persentase perbedaan dengan  $K_{I\_analitik}$  hasil analitik.

Tabel 2. Perbandingan nilai  $K_{I\_prediksi}$  vs  $K_{I\_analitik}$

| No | $K_{I\_prediksi}$<br>MPa.mm <sup>1/2</sup> | $K_{I\_analitik}$<br>MPa.mm <sup>1/2</sup> | %<br>perbedaan | persamaan |
|----|--|--|----------------|-----------|
| 1  | 153.2                                      | 136.949                                    | 11.866         | linier    |
| 2  | 153.2                                      | 136.949                                    | 11.866         | orde 2    |
| 3  | 142.5                                      | 136.949                                    | 4.053          | orde 3    |
| 4  | 136.7                                      | 136.949                                    | -0.182         | orde 4    |
| 5  | 136.3                                      | 136.949                                    | -0.474         | orde 5    |

Hasil prediksi menunjukkan nilai  $K_{I\_prediksi}$  semakin akurat mendekati perhitungan analitik seiring naiknya orde persamaan yang digunakan. Pada prediksi menggunakan persamaan linier menunjukkan perbedaan 11.866 % lebih besar daripada nilai  $K_{I\_analitik}$ . Untuk persentase perbedaan terkecil didapat dari persamaan orde 4 yaitu sebesar 0.182 % lebih kecil dari nilai  $K_{I\_analitik}$ .

#### 4. Kesimpulan

Prediksi nilai *stress intensity factor* (SIF) dengan metode displacement extrapolation dimulai dengan memodelkan benda dengan kondisi yang sudah ditentukan ke dalam program Patran/nastran. Hasil pemodelan didapatkan nilai perpindahan arah ‘Y’ yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai  $K_{I\_perhitungan}$ . Langkah selanjutnya adalah memprediksi nilai  $K_I$  pada ujung retak dengan cara membuat plot dari nilai  $K_{I\_perhitungan}$  dan memunculkan persamaan prediksinya. Hasil prediksi didapatkan semakin tinggi orde persamaanya nilai  $K_{I\_prediksi}$  akan mendekati nilai  $K_{I\_analitik}$ . Pada penelitian ini nilai  $K_{I\_prediksi} = 136.3 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$  (orde 5) memiliki persentase perbedaan dengan  $K_{I\_analitik}$  ( $136.949 \text{ MPa}\cdot\text{mm}^{1/2}$ ) sebesar 0.474%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *displacement extrapolation* dapat memprediksi nilai  $K_I$  dengan keakuratan yang baik.

#### Ucapan terimakasih

Penulis sampaikan ucapan terimakasih kepada P3M STT Adistutjipto yang telah memberikan bantuan dana dalam penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- [1] B. Zafošnik, G. Fajdiga (2016, December). *Determining stress intensity factor KI with extrapolation method*, Tehnicki Vjesnik, 23(6):1673-1678.
- [2] Firmansyah, Hendrix N (2016, November), *Estimasi Nilai Faktor Intensitas Tegangan (KI) Tipe Center Crack Dengan Metode Numerik*, In *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta* (Vol. 2, pp. 11-16)
- [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] Beatrin S, Anika, (2018), *Analisis damage tolerance dan crack growth pada aluminium 2024-T3 dan Aluminium 7075-T7351 menggunakan perangkat lunak Matlab*, skripsi, STT Adisutjipto, Yogyakarta.
- [5] D.P.Rooke F.I.Baratta;D.J.Cartwright, (1981) *Simple methods of determining stress intensity factors*, *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 14, Issue 2, Pages 397-426
- [6] Broek,( 1982), *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers
- [7] <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma2024t3>
- [8] BOEING, 2009, *Structur Repair For Engineering Part 3*