

Prediksi Nilai Faktor Intensitas Tegangan dan Perambatan Retak Struktur Sayap Pesawat SF260 Marchetti

Andrian Permana^{1*}

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

*Penulis Korespondensi:

email: andrianpermana@mail.ugm.ac.id

Abstrak

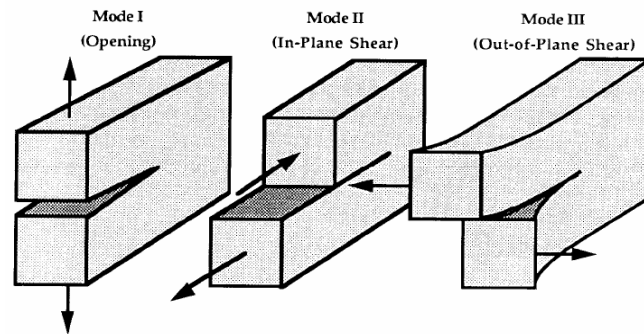
Retak yang terjadi pada material atau komponen struktur tentu akan berbahaya jika diabaikan atau tidak dilakukan analisis mengenai kemampuan material atau komponen struktur tersebut. Nilai yang berhubungan dengan fenomena retak salah satunya yaitu stress intensity factor (SIF). Beberapa metode numerik yang dapat digunakan untuk mencari nilai SIF adalah dengan Displacement Extrapolation dan Virtual Crack Closure. Dalam prediksi nilai SIF dan perambatan retak ini, penulis menggunakan FEM untuk mendapatkan perpindahan nodal (displacement) yang kemudian akan diselesaikan dengan metode Virtual Crack Closure untuk mendapatkan nilai stress intensity factor (SIF) pada struktur sayap Pesawat SF260 Marchetti. Hasil model yang menggunakan metode DE mendekati dengan nilai SIF secara analitik yaitu 3,045 MPa.mm^{1/2} dengan perbedaan sebesar 8,699%, sedangkan hasil yang menggunakan VCC sebesar 2,951 MPa.mm^{1/2} dengan perbedaan 11,504%. Adapun perbandingan hasil prediksi perambatan retak antara perhitungan numerical dan perhitungan menggunakan nilai B FEM adalah 31,396%.

Kata kunci: FEM; Perambatan retak; Stress intensity factor

PENDAHULUAN

Pada dasarnya suatu analisis struktur adalah suatu ilmu yang ditujukan untuk mempelajari fenomena struktur jika dikenai suatu pembebanan. Mekanika retak merupakan salah satu ilmu dasar untuk menentukan kemampuan struktur apakah masih mampu menahan beban jika terdapat kerusakan struktur. Kerusakan struktur dapat terjadi karena beberapa proses, misalkan pada saat pembuatan material, pembuatan desain atau bentuk struktur, ataupun kerusakan yang diakibatkan karena pembebanan (daerah operasi dimana struktur tersebut bekerja).

Retak yang terjadi pada material atau komponen struktur tentu akan berbahaya jika diabaikan atau tidak dilakukan analisis mengenai kemampuan material atau komponen struktur tersebut untuk dapat berfungsi secara normal. Retak yang terjadi menyebabkan singularitas pada ujung retak dimana nilai tegangan yang terjadi sangat tinggi atau mencapai tanpa batas (Firmansyah, 2018). Nilai yang berhubungan dengan fenomena retak salah satunya yaitu *stress intensity factor* (SIF), yang biasa disimbolkan dengan "K". Nilai K ini akan berbeda untuk mode atau letak retak yang terjadi pada material atau komponen struktur. Ada 3 jenis mode pada fenomena retak, yaitu mode I (*opening mode*), mode II (*sliding mode*), dan mode III (*tearing mode*).



Gambar 1. Mode Terjadinya Retak

Analisis 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 struktur tersebut gagal (Firmansyah, 2016). Untuk mengitung nilai K sangat tergantung pada letak dan mode yang terjadi. Seperti nilai K_I adalah nilai K untuk mode I, K_{II} untuk nilai K pada mode II, dan K_{III} untuk nilai K pada mode III. Salah satu metode yang digunakan untuk mencari nilai K adalah dengan metode numerik. Metode ini sangat membantu untuk mencari nilai K. Hal tersebut dikarenakan dengan perhitungan analitik pada kasus tertentu akan sangat sulit didapatkan. Selain itu, solusi analitik untuk mencari nilai K pada kasus nyata tidak ada.

Metode numerik adalah teknik yang digunakan untuk memformulasikan persoalan matematika sehingga dapat diselesaikan dengan operasi perhitungan aritmatika biasa atau cara berhitung dengan menggunakan angka-angka (Vulandari, 2017). Salah satu manfaat metode ini yaitu mampu menyelesaikan sistem persamaan besar, ketaklinieran dan geometri yang rumit, seperti dalam masalah rekayasa yang tidak mungkin dipecahkan secara analitik.

Beberapa metode numerik yang dapat digunakan untuk mencari nilai K adalah dengan *Displacement Extrapolation* dan *Virtual Crack Closure*. Pada kedua metode tersebut menggunakan perpindahan nodal (*displacement*) pada daerah sebelum ujung retak untuk memprediksi nilai K yang terjadi. Adapun untuk mendapatkan nilai *displacement* tersebut dapat menggunakan *Finite Element Method* (FEM).

Dalam prediksi nilai SIF dan perambatan retak ini, penulis menggunakan FEM untuk mendapatkan perpindahan nodal (*displacement*) yang kemudian akan diselesaikan dengan metode *Virtual Crack Closure* untuk mendapatkan nilai *Stress Intensity Factor* (SIF) pada struktur sayap Pesawat SF260 Marchetti.

METODE

A. Metode Pengumpulan Data

Dalam penelitian ini, penulis menggunakan beberapa metode dalam pengumpulan data, antara lain :

1. Metode Wawancara; yaitu mengumpulkan data dan informasi yang berkaitan dengan topik pembahasan dengan cara bertanya langsung kepada narasumber yang berkompeten dalam bidang yang akan dibahas yaitu dosen.

2. Metode Studi Pustaka; yaitu suatu metode penelitian untuk mendapatkan teori yang dibutuhkan dengan cara membaca dan mempelajari artikel, catatan kuliah, jurnal, serta bahan-bahan lainnya yang berkaitan masalah yang akan diteliti yaitu bahan yang tertulis pada literatur yang berupa buku referensi, buku panduan, maupun modul, untuk melengkapi dan menyempurnakan data-data yang kurang.

B. Pemodelan Struktur Sayap

Berikut ini pemodelan struktur sayap menggunakan finite element method (FEM) dengan model retak tepi.



Gambar 2. Model Retak Tepi

Pemodelan struktur sayap tersebut menggunakan pelat tipis dengan ketebalan 1 mm, panjang 200 mm, dan lebar 100 mm yang memiliki retak dan terletak di tengah pelat (*center crack*) dengan panjang retak 5 mm.

C. Pembebanan

Beban yang diaplikasikan yaitu beban tarik (*tension*) yang menyebabkan retak membuka, mode retak mode I (*opening mode*). Selanjutnya, untuk mendapatkan nilai K dengan metode numerik, dengan mendapatkan nilai *displacement* dari FEM.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Metode Numerik

Dalam menentukan nilai *stress intensity factor* (SIF), diperlukan data momen bending yang diterima oleh struktur sayap. Berikut ini data yang dibutuhkan untuk perhitungan K_I dengan metode numerik. Adapun untuk perhitungan momen bending pada struktur sayap didapat dengan Metode Schrenk.

$$\begin{aligned} M &= [(F+F_{i+1}) \times 1/2 (F_{i+1}-F)] + M_{i+1} & (1) \\ &= [(8172,21+7171,94) \times 1/2 (7171,94-8172,21)] + 8335,82 \\ &= 10253842,71 \text{ N.mm} \end{aligned}$$

1. Menghitung nilai tegangan

$$\sigma = \frac{M \times y}{I} = \frac{10253842,71 \times 91,92}{793227118,5} = 1,18822617 \text{ MPa} \quad (2)$$

2. Menghitung nilai β

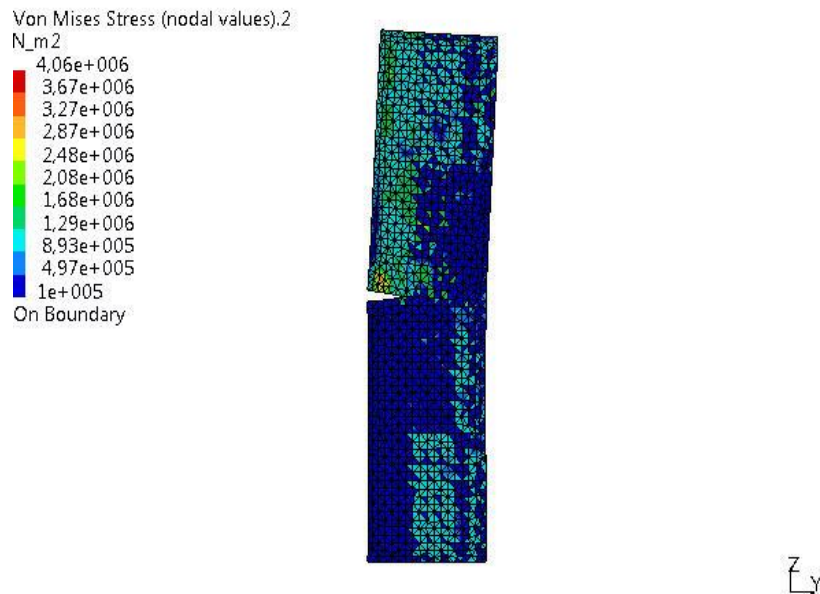
$$\beta = \left[\sec\left(\frac{\pi \times a}{2W}\right) \right]^{0,5} = \left[\sec\left(\frac{\pi \times 2,5}{100}\right) \right]^{0,5} = 1,00154491 \quad (3)$$

3. Menghitung nilai K_I

$$\begin{aligned} K_I &= \beta \times \sigma \times (\pi \times a)^{0,5} \\ &= 1,00154491 \times 1,18822617 \times (\pi \times 2,5)^{0,5} \\ &= 3,33514316 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \quad (4)$$

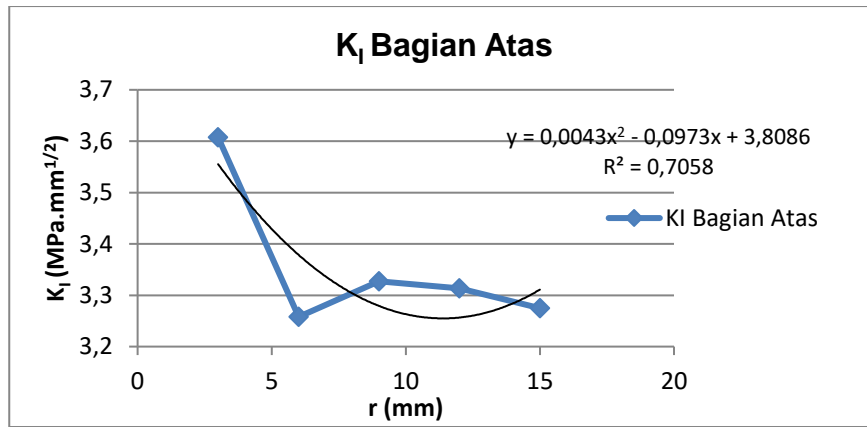
B. Metode Elemen Hingga (FEM)

Pada metode elemen hingga, dilakukan simulasi numerik dalam menentukan nilai K_I untuk dijadikan pembandingan hasil yang didapat.



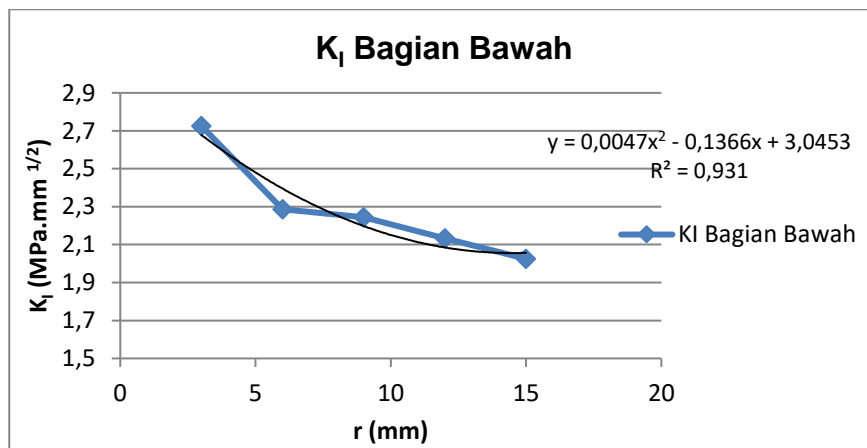
Gambar 3. Distribusi Tegangan Hasil Simulasi Numerik

Pada Gambar 3 menunjukkan distribusi tegangan pada model yang dibuat. Model tersebut dibuat dengan interval jarak (r) yang sama yaitu 3 mm. Terlihat bahwa tegangan maksimum terjadi di sekitar ujung retak.



Gambar 4. Grafik K_I (atas) $\frac{1}{2}$ model

Grafik K_I vs r pada gambar 4 menunjukkan bahwa secara umum nilai K_I (atas) akan membesar bila mendekati ujung retak. Namun, pada daerah yang dekat dengan ujung retak, nilai K_I akan bervariasi. Untuk nilai K_I (atas) pada ujung retak sebesar 3,808 MPa.mm^{1/2}.



Gambar 5. Grafik K_I (bawah) $\frac{1}{2}$ model

Grafik K_I vs r pada gambar 5 menunjukkan bahwa secara umum nilai K_I (bawah) akan membesar bila mendekati ujung retak. Namun, pada daerah yang dekat dengan ujung retak, nilai K_I akan bervariasi. Untuk nilai K_I (bawah) pada ujung retak sebesar 3,045 MPa.mm^{1/2}.

Adapun, untuk perhitungan nilai K_I menggunakan metode VCC adalah sebagai berikut.

1. Menghitung nilai *strain energy release rate mode I* (G_I)

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} Z_i (w_e - w_e^*) \tag{5}$$

$$G_I = -\frac{1}{2(3)} (-10)(7,15 \times 10^{-5})$$

$$G_I = 1,19 \times 10^{-4} \text{ MPa. mm}$$

2. Menghitung nilai *stress intensity factor* (SIF) - retak *opening mode* (*plane stress*)

$$E = 73100 \text{ MPa (Material Al-2024 T3)} \tag{6}$$

$$K_I = \sqrt{G_I E} \tag{7}$$

$$K_I = \sqrt{(1,19 \times 10^{-4}) \times 73100}$$

$$K_I = 2,9514 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$$

Berikut adalah perbandingan Nilai *Stress Intensity Factor* (K_I) dengan metode numerik ($3,335 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$).

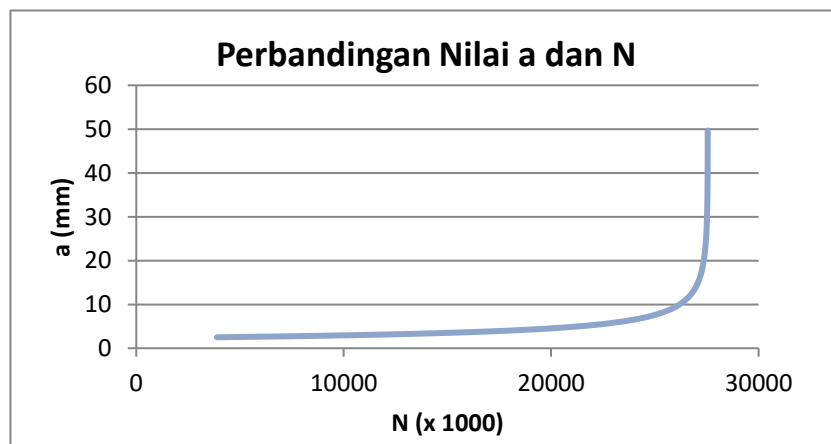
Tabel 1. Perbandingan Nilai *Stress Intensity Factor* (K_I)

No	Model	K_I	Persentase	Metode
1	$\frac{1}{2}$ model (atas)	3,808	14,178%	DE
2	$\frac{1}{2}$ model (bawah)	3,045	8,699%	
3	$\frac{1}{2}$ model	2,951	11,504%	VCC

Data perbandingan nilai K_I pada tabel 1 menunjukkan bahwa nilai yang didapat dengan metode *Displacement Extrapolation* (DE) dan *Virtual Crack Closure* (VCC) relatif mempunyai nilai yang sama.

C. Prediksi Perambatan Retak

Prediksi ini digunakan untuk memperkirakan waktu yang dibutuhkan sebuah pelat untuk bertahan, hingga akhirnya mengalami *fatigue*. Dalam prediksi ini digunakan persamaan Walker dengan nilai C, n, m diketahui dari *material properties*.



Gambar 6. Grafik Perbandingan nilai a dan N *numerical*

Grafik a vs N pada gambar 6 menunjukkan bahwa panjang retakan maksimum sebelum terjadinya kegagalan pada struktur ketika sudah mendekati 30000000 siklus. Berikut sampel langkah-langkah perhitungan estimasi retak pada retakan yang telah mencapai *maximum width* ($a = 49,9 \text{ mm}$).

1. Menghitung nilai beta faktor

$$\beta = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi a}{w}\right)} \quad (8)$$

$$\beta = \sqrt{\sec\left(\frac{\pi(49,9)}{100}\right)}$$

$$\beta = 17,8412$$

2. Menghitung nilai K_{max}

$$K_{max} = \sigma_{max} x \beta x \sqrt{\pi a} \quad (9)$$

$$K_{max} = 1,1882 x 17,8412 x \sqrt{\pi(49,9)}$$

$$K_{max} = 3323,341 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$$

3. Menghitung nilai da/dN

$$\frac{da}{dN} = C[(1 - R)^n K_{max}]^m \quad (10)$$

$$\frac{da}{dN} = 5x10^{-11} [(1 - 0)^{0,6291} 3323,341]^3$$

$$\frac{da}{dN} = 1,83524$$

4. Menghitung nilai dN

$$dN = \frac{a_i - a_{i-1}}{da/dN} \quad (11)$$

$$dN = \frac{49,9 - 49,7}{1,83524}$$

$$dN = 0,1089 \approx 0$$

5. Menghitung nilai $\sum N$

$$\sum N = N_{i-1} + dN \quad (12)$$

$$\sum N = 27546457,91 + 0,1089$$

$$\sum N = 27546458,02 \approx 27546458$$

Perambatan retak yang terjadi pada *plate* akan mengalami *fatigue* dimana retakan telah mencapai *maximum width* pada 27546458 *cycles*.

D. Prediksi Perambatan Retak menggunakan FEM

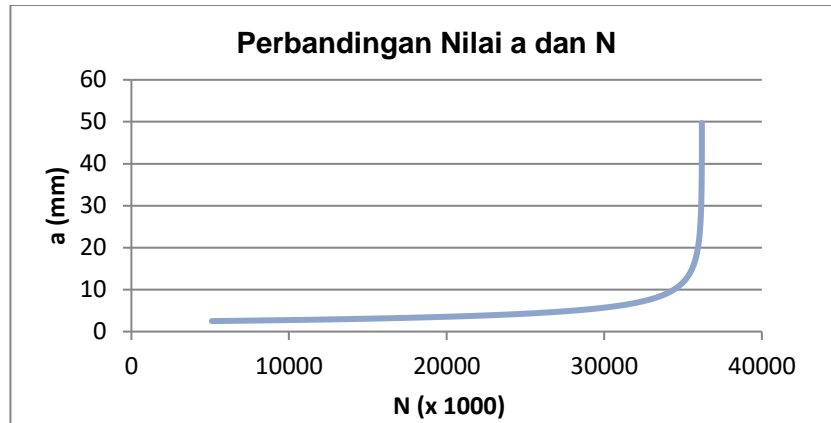
Pada prediksi *FEM* ini, perhitungan menggunakan nilai β yang dihasilkan dari perhitungan *FEM*. Nilai KI dari FEM yaitu 3,045 MPa $\sqrt{\text{mm}}$, sehingga nilai β dari permodelan FEM yaitu

$$\beta = \frac{KI}{\sigma \sqrt{a\pi}} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{3,045}{1,882261 \sqrt{2,5\pi}}$$

$$\beta = 0,913004286$$

Perbandingan nilai β dari *FEM* dengan perhitungan numerik yaitu 8,6995%, sehingga nilai β untuk perhitungan prediksi perambatan retak yaitu $\beta = \beta_{\text{numerik}}^* 91,3004286\%$.



Gambar 7. Grafik Perbandingan nilai a dan N FEM

Grafik a vs N pada gambar 7 menunjukkan bahwa panjang retakan maksimum sebelum terjadinya kegagalan pada struktur ketika sudah mendekati 40000000 siklus. Berikut sampel langkah-langkah perhitungan estimasi retak pada retakan yang telah mencapai *maximum width* ($a = 49,9$ mm).

1. Menghitung nilai beta faktor

$$\beta = \beta_{\text{numerik}} \times 91,3004286\% \quad (14)$$

$$\beta = 17,8412 \times 91,3004286\%$$

$$\beta = 16,2891$$

2. Menghitung nilai K_{max}

$$K_{\text{max}} = \sigma_{\text{max}} \times \beta \times \sqrt{\pi a} \quad (15)$$

$$K_{\text{max}} = 1,1882 \times 16,2891 \times \sqrt{\pi(49,9)}$$

$$K_{\text{max}} = 3034,225 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{\frac{1}{2}}$$

3. Menghitung nilai da/dN

$$\frac{da}{dN} = C[(1 - R)^n K_{\text{max}}]^m \quad (16)$$

$$\frac{da}{dN} = 5 \times 10^{-11} [(1 - 0)^{0,6291} 3034,225]^3$$

$$\frac{da}{dN} = 1,3967$$

4. Menghitung nilai dN

$$dN = \frac{a_i - a_{i-1}}{da/dN} \quad (17)$$

$$dN = \frac{49,9 - 49,7}{1,3967}$$

$$dN = 0,1431 \approx 0$$

5. Menghitung nilai $\sum N$

$$\sum N = N_{i-1} + dN \quad (18)$$

$$\sum N = 36194894,39 + 0,1431$$

$$\sum N = 36194894,53 \approx 36194894$$

Perambatan retak yang terjadi pada *plate* akan *fatigue* dimana retakan telah mencapai *maximum width* pada **36194894** *cycles*, sedangkan perbandingan hasil prediksi perambatan retak antara perhitungan *numerical* dan perhitungan menggunakan nilai β FEM adalah 31,396%.

KESIMPULAN

Hasil model yang menggunakan metode *displacement extrapolation* mendekati dengan nilai K_I secara analitik pada retak 5 mm adalah dengan $\frac{1}{2}$ model (bawah) yaitu 3,045 MPa.mm^{1/2} dengan perbedaan sebesar 8,699%, sedangkan hasil yang menggunakan metode *Virtual Crack Closure* (VCC) sebesar 2,951 MPa.mm^{1/2} dengan perbedaan 11,504%. Adapun hasil perhitungan numerik perambatan retak yang terjadi pada *plate* akan mengalami *fatigue* saat *crack* telah mencapai *maximum width* pada 27546458 *cycles* sedangkan untuk hasil perhitungan FEM perambatan retak yang terjadi pada *plate* akan mengalami *fatigue* saat *crack* telah mencapai *maximum width* pada 36194894 *cycles*. Perbandingan hasil prediksi perambatan retak antara perhitungan *numerical* dan perhitungan menggunakan nilai β FEM adalah 31,396%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dengan segala kerendahan hati, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Hendrix Noviyanto Firmansyah, S.T, M.T. yang telah membimbing penulis dalam mengumpulkan dan mengolah data yang dibutuhkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Broek. (1982). *Elementary Engineering Fracture Mechanics*. Martinus Nijhoff Publishers.
- Firmansyah, H. N. (2016). Estimasi Nilai Faktor Intensitas Tegangan (KI) Tipe Center Crack Dengan Metode Numerik. *Proceeding SENATIK (Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Kedirgantaraan)*. 2, 11-16
- Firmansyah, H. N. (2018). Predicting Stress Intensity Factor (KI) of Single Edge Crack Using Displacement Extrapolation Method. *Proceeding SENATIK (Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Kedirgantaraan)*. 4. 39-45
- Krueger, R. (2002). *The virtual crack closure technique: history, approach and applications*. NASA/CR-2002-211628 ICASE Report No. 2002-10. NASA Langley Research Center Hampton.

Vulandari, R. T. (2017). *Metode Numerik: Teori, Kasus, dan Aplikasi*. Mavendra Press.

Zafošnik, B. & Fajdiga, G. (2016). Determining stress intensity factor KI with extrapolation method. *Tehnicki Vjesnik*. 23(6), 1673-1678.