

Pengaruh Parameter DIC Terhadap Faktor Intensitas Tegangan Modus Gabungan I dan II Pada Spesimen *Three Point Bend*

Lenny Iryani^{a)}, Tatacipta Dirgantara^{b)}, Sandro Mihradi^{c)}, Ichsan S. Putra^{b)}

^{a)}Teknik Aeronautika, POLBAN, ^{b)}KK Struktur Ringan, FTMD, ITB

^{c)}KK Perancangan Mesin, FTMD, ITB

ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung

Telp.: (022) 2512971, Fax: (022) 2512971

Corresponding author: ^{b)}tdirgantara@ftmd.itb.ac.id

Abstrak

Salah satu parameter penting untuk mengevaluasi ketahanan struktur yang memiliki retak terhadap beban yang diterima struktur tersebut adalah faktor intensitas tegangan, K . Beberapa metode baik analitik, eksperimental maupun numerik telah banyak dikembangkan untuk menentukan nilai K . Metode eksperimental yang biasa dilakukan untuk menentukan nilai K adalah dengan menggunakan *strain gage*, baik T -gage maupun K -gage ataupun dengan fotoelastisitas. Namun teknik dengan menggunakan *strain gage* ini memiliki kelemahan yaitu hanya dapat mengukur nilai K pada satu titik di tempat dimana *strain gage* tersebut dipasang sedangkan dengan teknik fotoelastisitas, pengukuran K memiliki kendala pada saat membaca *fringe-pattern* yang mempengaruhi keakuratan hasilnya. Seiring dengan berkembangnya teknologi digital, berkembang pula metode eksperimental dalam menentukan nilai K , yaitu dengan teknik korelasi citra digital (*Digital Image Correlation*, DIC). Dengan menggunakan teknik DIC, medan perpindahan di sekitar daerah ujung retak dapat diperoleh. Dari data medan perpindahan ini, nilai K dapat ditentukan dengan menggunakan teknik *Nonlinear Least Square* dan ekspansi deret *Taylor*. Pada penelitian ini akan dianalisis pengaruh parameter DIC, yaitu rasio panjang subset dan template, terhadap keakuratan nilai K_I dan K_{II} . Spesimen yang digunakan pada analisis ini yaitu acrylic dengan geometri retak tepi membentuk sudut 45° dengan pembebanan *three point bend* pada level 200 N dan 250 N. Hasilnya menunjukkan bahwa parameter rasio panjang subset dan template akan memberikan nilai K_I dan K_{II} yang cukup akurat pada rasio antara 0.2 – 0.6, dengan perbedaan maksimum sekitar 1.9% untuk nilai K_I dan 4.6% untuk nilai K_{II} dibandingkan dengan hasil metode elemen hingga.

Keywords: K_I , K_{II} , DIC, spacing, rasio subset terhadap template, three point bend.

Pendahuluan

Analisis kekuatan struktur dengan retak tidak dapat lagi menggunakan konsep mekanika teknik tetapi dilakukan dengan menggunakan analisis mekanika retak. Parameter penting dalam menganalisis kekuatan struktur dengan retak pada konsep mekanika retak ini adalah faktor intensitas tegangan, K . Parameter ini menunjukkan besarnya tegangan di daerah sekitar ujung retak. Untuk kasus dengan geometri retak dan pembebanan yang sederhana, nilai K tersedia pada beberapa literatur, seperti pada *Handbook Rooke & Cartwright* [1] atau Murakami [2]. Untuk geometri retak dan pembebanan yang kompleks, metode yang dapat digunakan yaitu metode numerik, seperti metode elemen hingga [3] ataupun metode eksperimental, dengan menggunakan *strain gage* (T -gage atau K -gage) [4,5].

Dengan berkembangnya teknologi digital, salah satu teknik yang dinamakan korelasi citra digital (*Digital Image Correlation*, DIC), dapat digunakan untuk mengukur vektor perpindahan di daerah sekitar

ujung retak. Data yang didapat tidak hanya pada satu titik saja, tetapi pada suatu daerah/medan, hal ini merupakan keunggulan dari teknik DIC. Selain itu keunggulan lain dari teknik DIC ini adalah hasil yang diperoleh cukup akurat dan peralatan yang dibutuhkan cukup sederhana, yaitu kamera digital yang harganya sekarang ini semakin terjangkau. Data medan perpindahan ini kemudian digunakan untuk menghitung nilai K .

Konsep DIC pertama kali dikembangkan oleh Sutton dkk [6,7] kemudian beberapa aplikasi DIC pada bidang mekanika retak telah pula dikembangkan [8,9]. Namun pada [8,9], informasi pengaruh parameter DIC terhadap keakuratan nilai K belum diberikan. Penelitian yang dilakukan [10] menunjukkan bahwa pemilihan parameter DIC yang tidak tepat akan mempengaruhi keakuratan nilai K .

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis efek parameter DIC, yaitu rasio panjang subset dan template terhadap keakuratan nilai K_I dan K_{II} . Spesimen yang digunakan yaitu spesimen *three point*

bend yang terbuat dari acrylic dengan geometri retak pinggir membentuk sudut 45° terhadap garis horisontal. Medan perpindahan di sekitar ujung retak diukur dengan teknik DIC dan nilai K_I dan K_{II} ditentukan menggunakan teknik *non-linear least square*, yaitu metode Newton-Raphson dan ekspansi deret Taylor pada berbagai harga rasio panjang subset dan template.

Perhitungan K Dengan Teknik Digital Image Correlation (DIC)

Konsep dasar teknik korelasi digital (DIC) adalah menentukan tingkat kemiripan dua citra yang dianalisis. Metode untuk menentukan tingkat kemiripan dua citra tersebut yaitu dengan menggunakan rumus korelasi [10]. Persamaan korelasi yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan oleh persamaan (1).

$$C_{(i,j)} = \frac{\sum_{m=0}^{M_{a-1}} \sum_{n=0}^{N_{a-1}} A(m,n).B(m+i,n+j)}{\sqrt{\sum_{m,n} A^2(m,n) \sum_{m,n} B^2(m+i,n+j)}} \quad (1)$$

dengan nilai A dan B adalah sebagai berikut.

$$A = S - \bar{S} \quad ; \quad B = T - \bar{T} \quad (2)$$

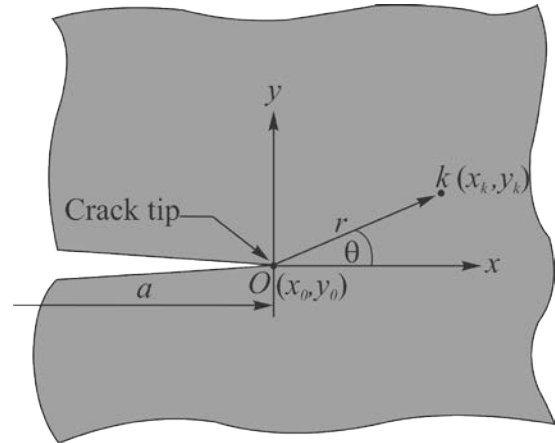
dimana S adalah skala intensitas warna dari citra yang pertama (*subset*) dan T adalah skala intensitas warna dari citra yang kedua (*template*). Nilai $C_{(i,j)}$ pada persamaan (1) menunjukkan tingkat kemiripan dari dua citra yang dianalisis pada posisi (i,j). Jarak dan arah dari titik pusat citra yang pertama ke titik dengan nilai C yang maksimum merupakan besarnya vektor perpindahan.

Dari medan perpindahan hasil pengukuran DIC akan ditentukan nilai K, dalam hal ini K_I dan K_{II} . Persamaan yang menghubungkan perpindahan dan K_I dan K_{II} ditunjukkan oleh persamaan (3) [9].

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} u_k \\ v_k \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{A_{In}}{2G} r_k^{n/2} \left\{ \kappa \cos \frac{n}{2} \theta_k - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_k + \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta_k \right\} \\ \kappa \sin \frac{n}{2} \theta_k + \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_k - \left\{ \frac{n}{2} + (-1)^n \right\} \sin \frac{n}{2} \theta_k \end{Bmatrix} \\ &- \begin{Bmatrix} \sum_{n=1}^N \frac{A_{IIn}}{2G} r_k^{n/2} \left\{ \kappa \sin \frac{n}{2} \theta_k - \frac{n}{2} \sin \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_k + \left\{ \frac{n}{2} - (-1)^n \right\} \sin \frac{n}{2} \theta_k \right\} \\ -\kappa \cos \frac{n}{2} \theta_k - \frac{n}{2} \cos \left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta_k + \left\{ \frac{n}{2} - (-1)^n \right\} \cos \frac{n}{2} \theta_k \end{Bmatrix} \\ &+ \begin{Bmatrix} T_x - Ry_k \\ T_y + Rx_k \end{Bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

dimana u_k dan v_k masing-masing adalah perpindahan dalam arah x dan y untuk setiap titik k; G adalah modulus geser material; κ adalah konstanta $(3 - \nu)/(1 + \nu)$ untuk kondisi *plane stress* dan $(3-4\nu)$ untuk kondisi *plane strain*; ν adalah Poisson's ratio. Faktor pengaruh translasi dan rotasi ditunjukkan oleh simbol T dan R

sedangkan untuk r_k dan θ_k menunjukkan posisi titik k dari ujung retak, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Koordinat polar titik k dari ujung retak

Hubungan koordinat polar, r dan theta dengan koordinat Cartesian, x dan y dapat dituliskan dalam bentuk persamaan (4).

$$\begin{aligned} r_k &= \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} \quad , \\ \theta_k &= \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_0}{x_k - x_0} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

dimana x_0 dan y_0 adalah titik ujung retak. Sedangkan untuk nilai K_I dan K_{II} dihitung dengan menggunakan persamaan (5).

$$K_I = A_{II} \times \sqrt{(2\pi)} \quad \text{dan} \quad K_{II} = -A_{III} \times \sqrt{(2\pi)}. \quad (5)$$

Persamaan (3) merupakan persamaan linier jika koordinat ujung retak (x_0, y_0) diketahui. Namun pada teknik DIC, posisi ujung retak yang tepat tidak diketahui, karena pada teknik ini, perhitungan medan perpindahan hanya didasarkan pada nilai intensitas warna dari citra yang dianalisis. Dengan demikian koordinat ujung retak (x_0, y_0) menjadi salah satu parameter yang tidak diketahui.

Data medan perpindahan yang dihasilkan dari teknik DIC secara umum melebihi banyaknya parameter yang tidak diketahui, karena itu persamaan (3) menjadi persamaan yang *over-determined* dengan parameter yang tidak diketahui adalah $A_{In}, A_{IIn}, T_x, T_y, R, x_0$ and y_0 . Untuk dapat menentukan solusi dari persamaan (3) maka digunakan teknik *nonlinear least square* yaitu dengan metode Newton-Raphson dan ekspansi deret Taylor. Dengan teknik ini, persamaan (3) dapat dituliskan ke dalam bentuk persamaan (6).

$$\begin{aligned} h_{xk} &= \sum_{n=1}^N \frac{A_{In}}{2G} r_k^{n/2} f_{In}(\theta_k) - \sum_{n=1}^N \frac{A_{IIn}}{2G} r_k^{n/2} f_{IIn}(\theta_k) \\ &+ T_x + Ry_k - u_k \\ h_{yk} &= \sum_{n=1}^N \frac{A_{In}}{2G} r_k^{n/2} f_{In}(\theta_k) - \sum_{n=1}^N \frac{A_{IIn}}{2G} r_k^{n/2} f_{IIn}(\theta_k) \\ &+ T_y + Rx_k - v_k \end{aligned} \quad (6)$$

dimana h_x dan h_y adalah besarnya eror dan u_k & v_k adalah medan perpindahan hasil pengukuran DIC. Proses berikutnya, untuk dapat menghasilkan eror yang minimum, dilakukan proses iterasi dengan menggunakan ekspansi deret Taylor. Persamaan proses iterasinya dapat dituliskan seperti pada persamaan (7).

$$\begin{aligned}
 (h_{xk})_{i+1} &= (h_{xk})_i + \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial A_{In}} \right)_i \Delta A_{In} \\
 &+ \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial A_{In}} \right)_i \Delta A_{In} + \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial T_x} \right)_i \Delta T_x \\
 &+ \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial T_y} \right)_i \Delta T_y + \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial R} \right)_i \Delta R \\
 &+ \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial x_0} \right)_i \Delta x_0 + \left(\frac{\partial h_{xk}}{\partial y_0} \right)_i \Delta y_0.
 \end{aligned} \tag{7}$$

$$\begin{aligned}
 (h_{yk})_{i+1} &= (h_{yk})_i + \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial A_{In}} \right)_i \Delta A_{In} \\
 &+ \sum_{n=1}^N \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial A_{In}} \right)_i \Delta A_{In} + \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial T_x} \right)_i \Delta T_x \\
 &+ \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial T_y} \right)_i \Delta T_y + \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial R} \right)_i \Delta R \\
 &+ \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial x_0} \right)_i \Delta x_0 + \left(\frac{\partial h_{yk}}{\partial y_0} \right)_i \Delta y_0.
 \end{aligned}$$

dimana i menunjukkan iterasi yang ke- i dan ΔA_{In} , ΔA_{IIn} , ΔT_x , ΔT_y , ΔR , Δx_0 dan Δy_0 adalah koreksi nilai dari masing-masing parameter dengan nilai sebelumnya.

Dalam bentuk matriks, persamaan (7) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$[h] = [d][\Delta] \tag{8}$$

dimana

$$[h] = \begin{bmatrix} -h_{x1} \\ \vdots \\ -h_{xM} \\ -h_{y1} \\ \vdots \\ -h_{yM} \end{bmatrix};$$

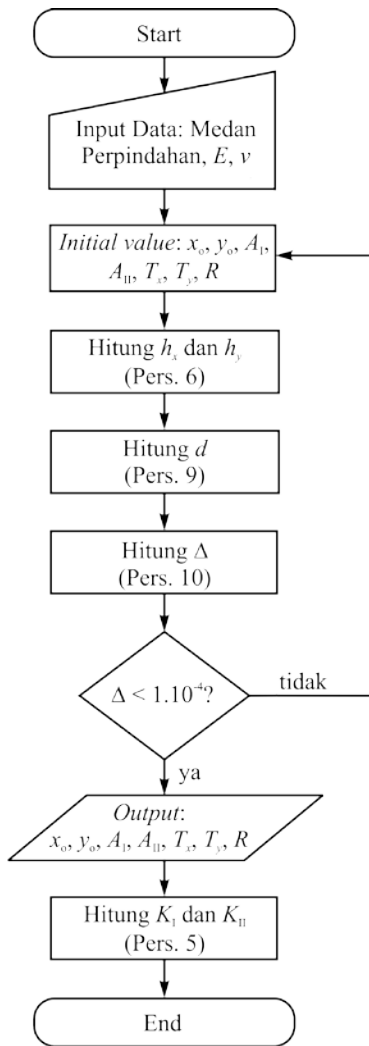
$$[d] = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{x1}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{x1}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{x1}}{\partial T_x} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_{xM}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{xM}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{xM}}{\partial T_x} \\ \frac{\partial h_{y1}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{y1}}{\partial A_{I1}} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial h_{yM}}{\partial A_{I1}} & \dots & \frac{\partial h_{yM}}{\partial A_{I1}} & \dots & 0 \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\text{dan } [\Delta] = \begin{bmatrix} \Delta A_{I1} \\ \vdots \\ \Delta A_{I11} \\ \vdots \\ \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta R \\ \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \end{bmatrix}$$

Notasi M pada persamaan di atas menunjukkan banyaknya titik hasil pengukuran DIC. Nilai h_x dan h_y akan menjadi 0 dengan meminimalkan nilai Δ . Nilai Δ dihitung dengan menggunakan persamaan (10):

$$\Delta = \left[[d]^T [d] \right]^{-1} [d]^T [h] \tag{10}$$

Pada suatu nilai Δ yang cukup kecil, proses iterasi akan berhenti sehingga didapatkan parameter-parameter yang tidak diketahui, yaitu A_{In} , A_{IIn} , T_x , T_y , R , x_0 dan y_0 . Secara garis besar, proses untuk mendapatkan K_I dan K_{II} dengan algoritma yang dikembangkan ini ditunjukkan oleh Gambar 2.

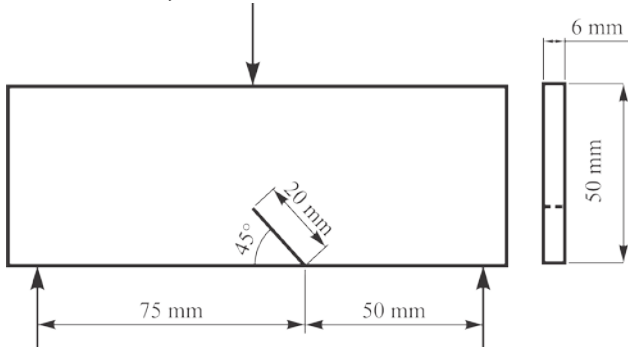


Gambar 2. Diagram alir proses menghitung K_I dan K_{II}

Eksperimen

Spesimen dan Material

Pada penelitian ini penentuan K dilakukan untuk kasus *three-point bend* dengan konfigurasi retak membentuk sudut 45° terhadap garis horizontal seperti ditunjukkan oleh Gambar 3. Pada Gambar 3, panjang spesimen antar tumpuan adalah 125 mm, lebar, $W = 50$ mm dan tebal, $t = 6$ mm.

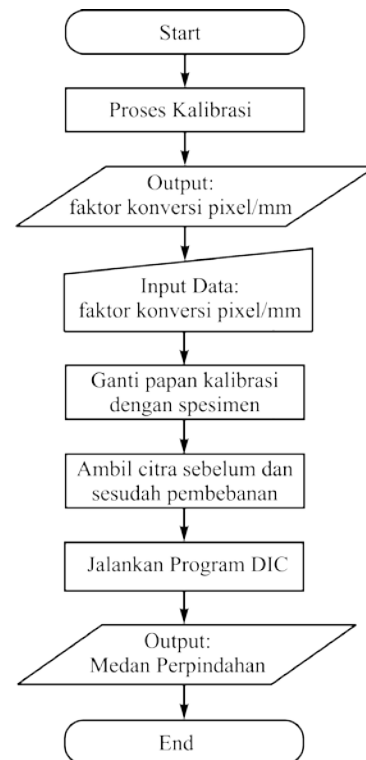


Gambar 3. Spesimen *three-point bend*

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah acrylic dengan modulus elastisitas $E = 2.896$ GPa dan poisson's ratio sebesar 0.402.

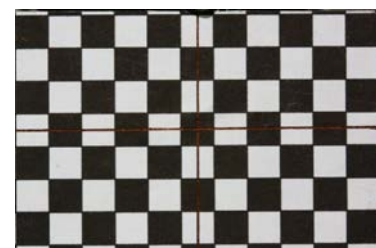
Prosedur Eksperimen untuk mengukur Medan Perpindahan dengan teknik DIC

Eksperimen pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan mesin uji Universal Testing Machine. Satu buah kamera digital digunakan untuk mengambil citra spesimen yang diletakkan dengan jarak 500 mm tegak lurus terhadap permukaan spesimen. Pada Gambar 4 dijelaskan diagram alir proses mengukur medan perpindahan dengan teknik DIC.



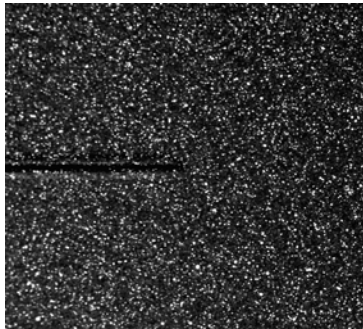
Gambar 4. Prosedur pengukuran medan perpindahan dengan teknik DIC

Tahap pertama pada diagram alir tersebut adalah proses kalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan menggunakan papan kalibrasi (*checkerboard pattern*) dengan ukuran 5 mm seperti ditunjukkan oleh Gambar 5. Hasil dari kalibrasi ini adalah faktor konversi dari pixel ke mm yang akan digunakan pada proses selanjutnya yaitu pada proses mengukur medan perpindahan.



Gambar 5. *Checkerboard pattern* yang digunakan pada proses kalibrasi

Setelah selesai proses kalibrasi, maka berikutnya adalah mengganti papan kalibrasi dengan spesimen *three point bend* tanpa mengubah pengaturan kamera, lampu, mesin uji dan sebagainya. Gambar 6 menunjukkan citra yang dihasilkan kamera pada saat spesimen belum diberikan beban.

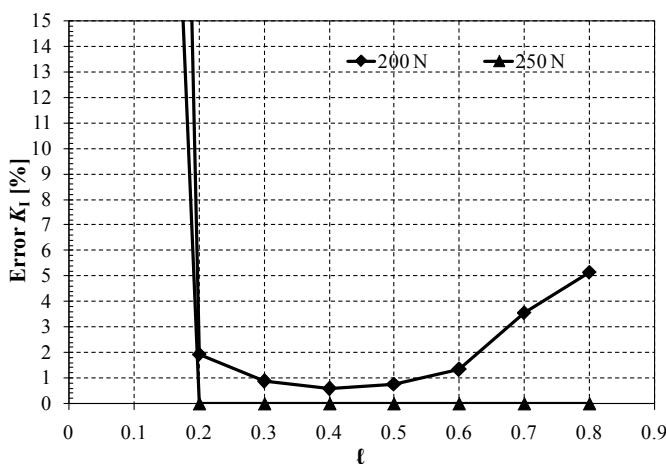


Gambar 6. Citra yang dihasilkan kamera (152×139 pixels²)

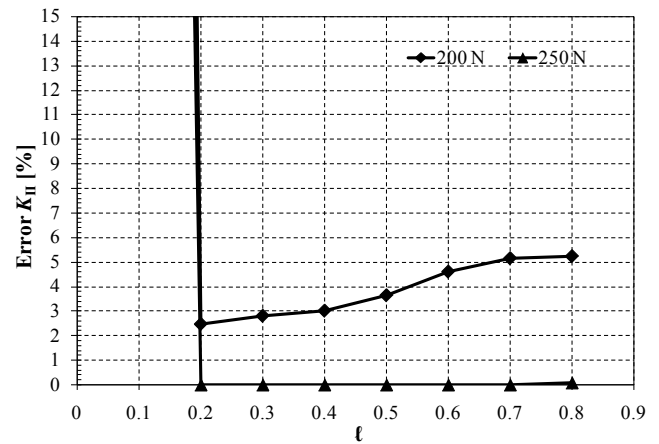
Hasil dan Pembahasan

Dengan menggunakan data medan perpindahan hasil pengukuran dengan teknik DIC, nilai K_I dan K_{II} dapat ditentukan. Nilai K_I dan K_{II} hasil perhitungan ini kemudian dibandingkan dengan hasil simulasi metode elemen hingga [11]. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengaruh parameter DIC yaitu rasio subset dan template. Daerah yang dianalisis pada citra sebelum dan sesudah pembebanan (*subset* dan *template area*) berukuran persegi. Pada analisis ini, rasio subset dan template dilakukan hanya terhadap ukuran panjangnya. Citra yang digunakan yaitu pada tiga level pembebanan, 0 N, 200 N dan 250 N.

Rasio panjang subset dan template pada analisis ini dilakukan pada berbagai harga dari 0.1 – 0.8 dengan panjang template 100 pixels. Perbedaan nilai K_I dan K_{II} terhadap variasi rasio panjang subset dan template ditunjukkan oleh Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 7. Error K_I terhadap berbagai harga rasio panjang subset dan template



Gambar 8. Error K_{II} terhadap berbagai harga rasio panjang subset dan template

Berdasarkan Gambar 7 dan 8, nilai K_I dan K_{II} yang dihasilkan dari teknik DIC dibandingkan dengan hasil metode elemen hingga [11] menunjukkan hasil yang cukup baik. Rasio panjang subset dan template pada nilai 0.2 – 0.6 menghasilkan maksimum error K_I kurang dari 3% dan maksimum error K_{II} kurang dari 5%. Hal ini menunjukkan bahwa penentuan parameter DIC, dalam hal ini ukuran subset dan template mempengaruhi keakuratan nilai K_I dan K_{II} .

Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dilakukan studi parameter DIC, yaitu rasio panjang subset dan template terhadap keakuratan nilai K_I dan K_{II} . Dari hasil analisis diperoleh bahwa rasio panjang subset dan template antara 0.2 – 0.6 dengan panjang template 100 pixels memberikan nilai K_I dan K_{II} yang akurat dibandingkan dengan metode elemen hingga [12]. Perbedaan maksimum nilai K_I sekitar 1.9% dan nilai K_{II} sebesar 4.6%.

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini terselenggara berkat dukungan dana dari Program Riset dan Inovasi ITB Tahun 2012, untuk itu para penulis mengucapkan terima kasih.

Referensi

- [1] D.P. Rooke, D.J. Cartwright: “Compendium of Stress Intensity Factors”, 1st edition, The Hillingdon Press (1974).
- [2] Murakami, Y: “Stress Intensity Factors Handbook”, Vol.2, Pergamon Books Ltd. (1987).
- [3] Milne, I, Ritchie, R.O., Karihaloo, B: “Comprehensive Structural Integrity”, Vol. 3, Numerical and Computational Method, Elsevier (2003).

- [4] I.S. Putra: "Some experience in using the K-gage to measure stress intensity factors", Proceedings of Damage and Fracture Mechanics, Montreal, Canada (2000).
- [5] M.J. Maleski, M.S. Kirugulige and H.V. Tippur, "A Method For Measuring Mode I Crack Tip Constraint Under Static And Dynamic Loading Conditions", Society for Experimental Mechanics, Vol. 44, No. 5 (October 2004).
- [6] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson, and S. R. Mc. Neill: "Determination of Displacement Using an Improved Digital Image Correlation Method", Image Vis. Comput., 1:133 (1983).
- [7] M. A. Sutton, M. Cheng, S. R. Mc. Neill, Y. J. Chao, and W. H. Peters: "Application of an Optimized on Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis", Image Vis. Comput., 4:143 (1988).
- [8] S. Roux, F. Hild, "Stress intensity factor measurements from digital image correlation: post-processing and integrated approaches", Int. J. Fract., 140, p. 141-157 (2006).
- [9] S. Yoneyama, T. Ogawa, and Y. Kobayashi, "Evaluating Mixed-Mode Stress Intensity Factors from Full-Field Displacement Fields Obtained by Optical Methods". Engineering Fracture Mechanics, p. 1399-1412 (2007).
- [10] T. Dirgantara, A. Sukmajaya, I.S. Putra, "Performance Evaluation of The Correlation and Smoothing Methods of The Digital Image Correlation and Its Application to The Opening Specimens", Fourth International Conference on Experimental Mechanics, Singapore, Proceeding SPIE, Vol. 7522, 75224J, editor: C. Quan, K. Qian, Anand K. Asundi, F. S. Chau (2010).
- [11] I. Sutowo, D. Widagdo, T. Dirgantara, I. S. Putra, "Perhitungan Numerik Faktor Intensitas Tegangan Modus III menggunakan Teknik Pengatupan Retak Maya", Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin X, Nov, Malang (2011).