METODE ANALISIS PATAH LELAH BAJA CANTILEVER AKIBAT BEBAN LENTUR DINAMIS

Harkali Setiyono

Balai Besar Teknologi Kekuatan Struktur (B2TKS)

Abstrak

Masalah yang penting untuk dipertimbangkan dalam desain struktur baja akibat beban dinamis adalah ancaman terhadap patah lelah. Oleh karena itu perlu dipahami mengenai mekanisme patah lelah yang akan dialami oleh struktur baja beserta metode yang efektif untuk mengantisipasi jenis katastrofik ini. Didalam makalah ini diuraikan secara rinci mengenai pemanfaatan konsep Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) untuk menganalisis perilaku patah lelah dari model desain baja cantilever akibat beban lentur dinamis. Didalam pendekatan LEFM, mekanisme patah lelah cantilever dianalisis berdasarkan besaran faktor intensitas tegangan disekitar ujung retak lelah dan teori empiris dari Paris. Untuk memverifikasi pendekatan LEFM, maka desain baja cantilever juga diuji menggunakan beban lentur dinamis sampai patah lelah. Data hasil pengujian digunakan sebagai masukan dalam analisis LEFM untuk mengestimasi perilaku perambatan dan kecepatan perambatan retak lelah dari desain baja cantilever akibat beban lentur dinamis.

Kata kunci : Cantilever, baja, LEFM, retak lelah dan faktor intensitas tegangan

Abstract

The most important problem to be considered in the design of a steel structure affected by dynamic loading is the threat of fatigue fracture. It is therefore necessary to understand a fatigue fracture mechanism that will be undergone by the steel structure as well as an effective method to anticipate this type of catastrophe. This paper describes in detail the application of a concept of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM) to analyze fatigue fracture behaviour of a design model of cantilever steel subjected to a dynamic bending load. In the approach of LEFM, the fatigue fracture mechanism of the cantilever is analyzed according to the magnitude of stress intensity factor in the vicinity of the fatigue crack tip and an empirical theory of Paris. In order to verify the LEFM approach, the design of cantilever steel is also tested under the dynamic bending load to fatigue fracture. Data obtained from experiments is utilized as an input in the LEFM analysis to estimate the behaviour of fatigue crack propagation and its rate of the cantilever steel design affected by the dynamic bending load.

Keywords: Cantilever, steel, LEFM, fatigue fracture and stress intensity factor

1. PENDAHULUAN

Patah lelah dari desain struktur baja dapat terjadi akibat sistem pembebanan yang berfluktuasi dari nilai minimum ke maximum secara bergantian dalam waktu tertentu atau yang lebih dikenal dengan istilah beban dinamis. Tipe kerusakan struktur ini terjadi walaupun tegangan kerja yang didukungnya masih berada dibawah tegangan maksimum (*Ultimate stress*) yang dapat didukung oleh struktur. Jadi hal ini bukan diakibatkan oleh besarnya tegangan kerja yang melampaui batas tegangan maksimum melainkan akibat

pembebanan dinamis yang terjadi berulang-ulang se-hingga struktur mengalami kelelahan dan akhirnya patah lelah.

Berdasarkan pada fenomena kelelahan diatas maka dalam mendesain struktur baja akibat beban dinamis, salah satu kriteria yang penting untuk dipertimbangkan adalah kekuatan struktur baja terhadap kerusakan patah lelah. Untuk kepentingan desain patah lelah maka seorang desainer semestinya perlu memahami mengenai mekanisme patah lelah struktur baja akibat sistem pembebanan dinamis. Karena baja adalah sejenis material metalik maka proses

mekanisme patah lelah yang dialaminya dapat mengacu pada teori klasik dari mekanisme patah lelah yang secara skematis terlihat dalam Gambar 1^(1,2).

Gambar 1 : Mekanisme patah lelah

Terlihat dalam Gambar diatas bahwa akibat tegangan kerja $\Delta\sigma$, proses patah lelah diawali dengan terbentuknya retak dipermukaan (*Initial crack stage*) yang diikuti perambatan retak akibat tegangan geser (*Micro crack growth stage*). Selanjutnya retak akan terus merambat akibat dominasi tegangan tarik (*Macro crack growth stage*) sampai sisa penampang komponen tidak mampu lagi mendukung tegangan kerja $\Delta\sigma$ dan akhirnya patah (*Final fracture*). Jadi teori ini menyatakan bahwa mekanisme patah lelah terdiri dari tahapan pembentukan retak dan tahapan perambatannya.

Metodologi yang dapat digunakan untuk menganalisis tahapan pembentukan retak lelah adalah melalui analisis regangan lokal ditempat kritis dimana awal retak mulai terbentuk. Sedangkan analisis tahapan perambatan retak dapat dilaksanakan melalui metode *Fracture Mechanics*. Didalam pemanfaatan metode ini, analisis umumnya dilaksanakan berdasarkan konsep *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM) dan teori empiris dari Paris.

Konsep LEFM tepat untuk digunakan kalau *local yielding* diujung retak masih berskala kecil. Hal ini ditandai dengan nilai *ligament yielding parameter* $L_r \leq 0.5$ ⁽³⁾. Parameter $L_r = \sigma_{net} / \sigma_Y$ dimana σ_{net} adalah tegangan kerja didaerah tanpa cacat retak (*Net stress*) dan σ_Y adalah *yield strength* material. Didalam makalah ini, konsep LEFM dan teori empiris Paris digunakan sebagai dasar untuk analisis perilaku perambatan retak lelah desain baja *cantilever* akibat beban dinamis lentur. Untuk memverifikasi konsep LEFM, desain baja *cantilever* juga diuji dinamis lentur sampai patah lelah.

Hasil pengujian kelelahan digunakan sebagai data masukkan dalam analisis LEFM. Dengan demikian dapat dilakukan evaluasi mengenai korelasi antara data hasil analisis LEFM dan data aktual yang terukur dalam pengujian. Data analitis dan aktual ditampilkan dalam bentuk kurva perilaku perambatan dan kecepatan perambatan retak lelah desain baja *cantilever* akibat beban dinamis lentur.

2. BAHAN DAN METODA

2.1 Metoda Analisis

Didalam metode analisis yang didasarkan pada konsep *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), suatu parameter sebagai penentu besar medan tegangan elastis dihadapan ujung retak merupakan kunci penyelesaian yang lazim digunakan dalam analisis komponen metallik dengan cacat retak. Parameter tersebut dikenal dengan sebutan *stress intensity factor* (K). Besar nilai K sangat bergantung pada besarnya tegangan kerja dan panjang retak itu sendiri,

Satu faktor lagi yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan besar nilai K, yaitu ukuran panjang retak dibanding dengan lebar komponen. Kalau panjang retak relatif kecil sekali dibanding lebar komponen (*Infinite width*) maka faktor koreksi bentuk dianggap tidak berpengaruh pada medan tegangan diujung retak. Tetapi kalau lebar komponen relatif sempit (*Finite width*) maka perlu dipertimbangkan besar faktor koreksi bentuk dalam penentuan besar nilai K.

Didalam pendekatan analisis, retak yang terbentuk pada baja *cantilever* akibat beban dinamis lentur berada disudut jepitan (*Corner crack*). Retak tersebut merambat searah lebar dan ketebalan *cantilever* sehingga membentuk seperempat ellips (Gambar 2). Jadi konsep LEFM digunakan untuk menganalisis perilaku perambatan retak lelah kearah lebar dan ketebalan *cantilever*. Terlihat dalam Gambar 2 bahwa akibat beban dinamis ΔF yang berfluktuasi dari 0 sampai F_{max} secara bergantian menyebabkan *cantilever* akan mendukung tegangan lentur dinamis. Permukaan atas *cantilever* berulang-ulang terbebani tarik dinamis dari 0 ke $(\sigma_{bt})_{max}$ secara bergantian sedang permukaan bawah terbebani tekan dinamis dari 0 ke $(\sigma_{bc})_{max}$. Mengacu pada teori klasik mekanisme patah lelah (Gambar 1) bahwa beban tarik sangat potensial

berpengaruh pada pembentukan awal retak, maka dalam kasus *cantilever* ini lokasi retak lelah lebih cenderung berada didaerah bertegangan tarik.

Gambar 2 : *Cantilever* dibebani lentur dinamis

Dimensi a_w dan a_t dalam retak seperempat elliptik (*Corner crack*) masing-masing adalah ukuran panjang retak searah lebar W dan tebal t . Pada dasarnya besar nilai *stress intensity factor* disekitar ujung retak a_w dan a_t ditentukan sebagai berikut^(4,5):

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} Y \quad (1)$$

ΔK dan $\Delta \sigma$ adalah *stress intensity factor range* dan tegangan kerja dinamis. Sedangkan a dan Y masing-masing adalah panjang retak dan faktor koreksi bentuk. Berdasar pada beban kerja ΔF , maka bentuk fluktuasi tegangan kerja $\Delta \sigma$ adalah :

Gambar 3 : Tegangan kerja dinamis

Untuk analisis retak a_w , permukaan *cantilever* diperlakukan sebagai *single edge crack plate* sehingga *stress intensity factor range* dapat diperoleh dari :

$$(\Delta K)_w = \Delta \sigma \sqrt{\pi a_w} F \left(\frac{a_w}{w} \right) ; \quad (2)$$

$$F \left(\frac{a_w}{w} \right) = 1.12 - 0.231 \left(\frac{a_w}{w} \right) + 10.55 \left(\frac{a_w}{w} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a_w}{w} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a_w}{w} \right)^4$$

Akibat pengaruh tegangan lentur yang terdistribusi searah ketebalan pelat maka dalam analisis retak a_t , faktor bentuk yang di-

gunakan mengacu pada bentuk *single edge crack plate* akibat *bending stress gradient*. Jadi *stress intensity factor* disekitar ujung retak a_t dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$(\Delta K)_t = \Delta \sigma \sqrt{\pi a_t} F \left(\frac{a_t}{t} \right) ; \quad (3)$$

$$F \left(\frac{a_t}{t} \right) = 1.12 - 1.39 \left(\frac{a_t}{t} \right) + 7.30 \left(\frac{a_t}{t} \right)^2 - 13.00 \left(\frac{a_t}{t} \right)^3 + 14.00 \left(\frac{a_t}{t} \right)^4$$

Berdasarkan rumus (2) dan (3), perilaku perambatan retak lelah baja *cantilever* searah lebar W dan tebal t dapat dianalisis dengan memanfaatkan teori empiris Paris berikut ini^(4,6).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n \quad (4)$$

Besaran da/dN menyatakan kecepatan perambatan retak lelah sedangkan C dan n adalah konstanta Paris perambatan retak material baja untuk rasio beban $R = 0$ dan ditentukan secara empiris melalui pengujian. Mensubstitusikan persamaan (2) kedalam persamaan (4) menghasilkan :

$$\frac{da_w}{dN} = C \left[\Delta \sigma \sqrt{\pi a_w} \left\{ 1.12 - 0.231 \left(\frac{a_w}{w} \right) + 10.55 \left(\frac{a_w}{w} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a_w}{w} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a_w}{w} \right)^4 \right\} \right]^n$$

Untuk mendapatkan jumlah siklus perambatan retak lelah N , persamaan diatas diintegrasikan dari panjang awal retak a_{wi} sampai panjang akhir retak a_{wf} sebagai berikut :

$$N = C^{-1} \int_{a_{wi}}^{a_{wf}} F(a_w) da_w ; \quad (5)$$

$$F(a_w) = \Delta \sigma \sqrt{\pi a_w} \left\{ 1.12 - 0.231 \left(\frac{a_w}{w} \right) + 10.55 \left(\frac{a_w}{w} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a_w}{w} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a_w}{w} \right)^4 \right\}^n$$

Penyelesaian persamaan integral diatas menggunakan *exact integration* sangat sulit dilakukan karena kompleksitas

bentuk integrandnya. Oleh karena itu dalam penelitian ini, penyelesaian persamaan integral diatas diselesaikan menggunakan integral numerik berdasarkan metode aturan Simpson (Simpson's rule) ⁽⁷⁾. Pemanfaatan aturan ini terhadap retak yang searah lebar W akan menghasilkan penyelesaian integral diatas sebagai berikut :

$$\int_{a_{wi}}^{a_{wf}} F(a_w) da_w \approx \frac{h_w}{3} \left[F(a_{wi}) + 2 \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}-1} F(a_w)_{2j} + 4 \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} F(a_w)_{(2j-1)} + F(a_{wf}) \right] \quad (6)$$

$(a_w)_j = a_{wi} + jh_w \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, (m-1)$

Didalam persamaan (6), m adalah jumlah pembagian antara interval a_{wi} sampai a_{wf} dan nilai m harus selalu genap. Sedangkan h_w adalah besar tiap subbagian m dan diformulasikan dalam rumus (7).

$$h_w = \frac{(a_{wf} - a_{wi})}{m} \quad (7)$$

Jadi dengan mensubstitusikan persamaan (6) kedalam persamaan (5) dapat diperoleh besarnya siklus perambatan retak lelah N.

Untuk menganalisis perilaku perambatan retak lelah (a vs. N), maka rumus (5) dan (6) sedikit dimodifikasi dengan mengacu pada Gambar 4. N_j adalah jumlah siklus beban yang terkait dengan ukuran panjang retak ke j (a_{wj}). Analisis N_j dilaksanakan dengan membagi interval ($a_{wj} - a_{wi}$) menjadi m subinterval menggunakan rumus (7) dan m juga selalu genap. Analisis selanjutnya mengacu pada rumus (6) sehingga diperoleh modifikasi formulasi sebagai berikut :

$$\int_{a_{wi}}^{a_{wj}} F(a_{wj}) da_{wj} \approx \frac{h_{wj}}{3} \left[F(a_{wi}) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}-1} F(a_{wj})_{(2k)} + 4 \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} F(a_{wj})_{(2k-1)} + F(a_{wj}) \right]$$

$$h_{wj} = \frac{(a_{wj} - a_{wi})}{m}$$

$$(a_{wj})_k = a_{wi} + kh_{wj} \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, (m-1)$$

$$N_j = C^{-1} \int_{a_{wi}}^{a_{wj}} F(a_{wj}) da_{wj} \quad (8)$$

Penggunaan rumus (8) dapat menghasilkan data perambatan retak lelah a dan N yang ke j dimana $j = 1, 2, 3, \dots, (m-1)$. Data selanjutnya dapat digunakan sebagai dasar untuk menggambarkan perilaku perambatan

(a vs. N) dan kecepatan perambatan retak lelah (da/dN vs. ΔK). Mengacu pada rumus (5), $F(a_{wj})$ dalam rumus (8) diatas dapat dihitung dari :

$$F(a_{wj}) = \left[\Delta \sigma \sqrt{\pi a_{wj}} \left\{ \begin{aligned} &1.12 - 0.231 \left(\frac{a_{wj}}{w} \right) \\ &+ 10.55 \left(\frac{a_{wj}}{w} \right)^2 \\ &- 21.72 \left(\frac{a_{wj}}{w} \right)^3 \\ &+ 30.39 \left(\frac{a_{wj}}{w} \right)^4 \end{aligned} \right\} \right]^{-n} \quad (9)$$

Gambar 4 : Analisis numerik aturan Simpson

Analisis perilaku perambatan retak lelah searah ketebalan *cantilever* dilaksanakan menggunakan metode yang sama yaitu berdasarkan integral numerik rumus (5) menggunakan aturan Simpson. Karena faktor bentuk retak searah ketebalan t berbeda dengan yang searah lebar W, maka integrandnya juga berbeda. Bentuk fungsi integrand kasus ini adalah :

$$N = C^{-1} \int_{a_{ti}}^{a_{tf}} F(a_t) da_t \quad ; \quad (10)$$

$$F(a_t) = \left[\Delta \sigma \sqrt{\pi a_t} \left\{ \begin{aligned} &1.12 - 1.39 \left(\frac{a_t}{t} \right) \\ &+ 7.30 \left(\frac{a_t}{t} \right)^2 \\ &- 13.00 \left(\frac{a_t}{t} \right)^3 \\ &+ 14.00 \left(\frac{a_t}{t} \right)^4 \end{aligned} \right\} \right]^{-n}$$

Mengintegrasikan integrand diatas dari panjang retak a_{ti} sampai dengan a_{tf} dapat diperoleh :

$$\int_{a_{ti}}^{a_{tf}} F(a_i) da_i \approx \frac{h_i}{3} \left[F(a_{ti}) + 2 \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}-1} F(a_i)_{2j} + 4 \sum_{j=1}^{\frac{m}{2}} F(a_i)_{(2j-1)} + F(a_{tf}) \right] \quad (11)$$

$$(a_i)_j = a_{ti} + jh_i \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, (m-1)$$

Nilai m juga selalu genap dan subdivisi h_i sama dengan yang dirumus (7) yaitu :

$$h_i = \frac{(a_{tf} - a_{ti})}{m} \quad (12)$$

Secara logika, jumlah siklus perambatan retak lelah N yang dihasilkan dari rumus (5) akan sama besar dengan yang dihasilkan dari rumus (10). Hal ini disebabkan karena perpanjangan retak searah lebar W dan searah tebal t terjadi dalam waktu yang bersamaan meskipun panjangnya tidak sama. Modifikasi rumus-rumus (10) dan (11) dengan cara yang sama seperti pada kasus retak searah lebar W , maka formulasi untuk mengestimasi data perambatan retak (a vs. N) searah ketebalan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\int_{a_{ti}}^{a_{tj}} F(a_{ij}) da_{ij} \approx \frac{h_{ij}}{3} \left[F(a_{ti}) + 2 \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}-1} F(a_{ij})_{(2k)} + 4 \sum_{k=1}^{\frac{m}{2}} F(a_{ij})_{(2k-1)} + F(a_{tj}) \right]$$

$$h_{ij} = \frac{(a_{tj} - a_{ti})}{m}$$

$$(a_{ij})_k = a_{ti} + kh_{ij} \quad ; \quad k = 1, 2, \dots, (m-1)$$

$$N_j = C^{-1} \int_{a_{ti}}^{a_{tj}} F(a_{ij}) da_{ij} \quad (13)$$

Proses integrasi numerik aturan Simpson dilaksanakan menggunakan program komputer yang khusus ditulis untuk kepentingan ini.

Disamping metode analisis diatas, penentuan *stress intensity factor* (K) juga dapat dilakukan melalui teori *energy release rate* dari Griffith dan Irwin⁽⁴⁾:

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (14)$$

G adalah *energy release rate* yaitu besarnya energi elastis per luas permukaan retak untuk setiap perpanjangan retak dan E adalah modulus elastisitas bahan. Ruas kiri

persamaan (14) dapat juga ditulis sebagai berikut :

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (15)$$

σ dan a masing-masing adalah tegangan kerja dan ukuran panjang retak. Jadi besar G tergantung pada ukuran panjang retak a .

2.2 Pendekatan Eksperimental

Untuk memverifikasi metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini maka perlu menginvestigasi perilaku patah lelah baja *cantilever* akibat beban lentur dinamis. Suatu sistem pengujian relatif sederhana dengan menggunakan pelat baja berpenampang segi empat yang terbuat dari material *mild steel* (MS) digunakan sebagai model baja *cantilever* dan diuji lentur dinamis sampai patah.

Peralatan uji lentur dinamis terdiri dari:

- *Clamping device*
- *Loading device*
- *Recording system*
- *Power unit*

Clamping device digunakan untuk menjepit benda uji pelat baja berpenampang segi empat. *Loading device* terdiri dari poros baja yang salah satu ujungnya dipasang piringan eksentris (*Eccentric cam*) agar dapat menghasilkan beban transversal pada benda uji yang berfluktuasi sinusoidal dari 0 sampai maksimum. Sebagai *recording system*, pada ujung lain dari poros baja ini dipasang *mechanical counter* melalui roda gigi untuk menghitung jumlah siklus beban uji atau putaran poros. Sedangkan *power unit* merupakan motor listrik yang dilengkapi dengan peralatan reduksi kecepatan. Sistem peralatan uji ini dapat dilihat pada Gambar 5⁽⁸⁾.

Gambar 5 : Konfigurasi sistem pengujian baja *cantilever*

Benda uji (*Steel plate specimen*) dipotong langsung dari pelat komersial *mild steel* (MS) dan diberi takikan. Sebelum diuji, dilakukan uji retak awal (*Precracking test*) pada model desain pelat MS bertakikan untuk menghasilkan awal retak berbentuk eliptik berukuran $a_w = 3$ mm (Ukuran retak searah lebar pelat) dan $a_t = 0.5$ mm (Ukuran retak searah tebal pelat). Selanjutnya pelat MS diuji dengan memanfaatkan gerakan putar *eccentric cam* sehingga menghasilkan beban lentur dinamis yang berfluktuasi dari 0 sampai maksimum seperti yang terlihat dalam Gambar 3. Ukuran pertambahan panjang retak searah lebar (a_w) dan searah tebal (a_t) setiap interval pembebanan selalu dipantau dan dicatat. Hasil patahan tiap benda uji juga diobservasi dan Gambar 6 menunjukkan salah satu contoh bentuk patah leleh benda uji pelat MS ⁽⁸⁾.

Gambar 6 : Hasil observasi bentuk retak eliptik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Didalam penelitian ini, nilai *stress intensity factor* (ΔK) ditentukan berdasarkan *energy release rate* G yang besarnya dapat diketahui melalui analisis diagram beban-defleksi dalam Gambar 7. Diagram ini diperoleh dari pengujian kekuatan sisa pada beberapa interval pembebanan uji dari baja *cantilever*. Luasan yang diarsir diantara grafik beban-defleksi tanpa dan dengan retak menunjukkan besar energi elastis untuk perambatan retak seperempat eliptik (U). Besarnya nilai G ditentukan berdasarkan nilai energi elastis U dibagi dengan luas penampang retak seperti dalam rumus (16).

$$G = \frac{U}{0.25\pi a_w a_t} \quad (16)$$

Besaran a_w dan a_t dalam penyebut persamaan diatas, masing-masing adalah panjang retak seperempat eliptik searah lebar (W) dan tebal (t) pelat baja *cantilever*. Melalui pemanfaatan rumus (15) untuk panjang retak maksimal searah lebar sebelum patah leleh dapat diperoleh tegangan kerja dinamis ($\Delta\sigma$) dengan rasio tegangan $R = 0$. Tegangan kerja ini selalu

konstan selama pengujian lentur dinamis baja *cantilever*. Meskipun demikian, besar nilai G dan ΔK selalu berubah-ubah pada setiap panjang retak leleh a_w maupun a_t .

Gambar 7 : Beban-defleksi baja *cantilever*

Besarnya nilai G dan ΔK pada setiap pertambahan panjang retak searah lebar W maupun tebal t ditentukan dengan menggunakan rumus (14) dan (15). Kecepatan perambatan retak leleh (da/dN) hasil pengujian secara umum ditentukan dari :

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{N_{Pi} - N_{P(i-1)}} \quad (17)$$

Persamaan diatas menyatakan kecepatan perambatan retak leleh yang ke i dimana a dan N_P masing-masing panjang retak dan jumlah siklus pembebanan yang ke i . Data eksperimental pertambahan panjang retak yang terukur pada setiap interval beban uji digunakan sebagai masukan dalam rumus (15) dan (17) untuk menghasilkan data grafik perilaku kecepatan perambatan retak leleh berikut ini.

Gambar 8 : Perilaku kecepatan perambatan retak leleh

Terlihat bahwa regresi linier dari data logaritmik kecepatan perambatan retak dan *stress intensity factor* dalam Gambar 8 menghasilkan konstanta Paris $C = 1 \times 10^{-9}$ dan $n = 1.97$. Konstanta ini untuk perambatan retak lelah kearah lebar *cantilever* dan dengan cara yang sama juga akan diperoleh konstanta Paris perambatan retak searah tebalnya. Estimasi data perilaku perambatan retak lelah searah lebar dan tebal dilakukan dengan integrasi persamaan (4) sebagai berikut :

$$\left(\frac{dN}{da} \right)_j = C^{-1} \int_{a_i}^{a_j} \Delta K_j^{-n} da \quad (18)$$

Karena rasio tegangan kerja $R = 0$, maka nilai ΔK_j akan sama dengan $(K_{I\max})_j$ yang dapat dihitung menggunakan rumus (14) dan (15).

Integrasi persamaan (18) menghasilkan jumlah siklus perambatan retak yang ke j . Estimasi kecepatan perambatan retak ke j juga dapat diperoleh dengan cara yang sama yaitu :

$$\left(\frac{da}{dN} \right)_j = C \Delta K_j^n \quad (19)$$

Verifikasi data analitis yang diperoleh dari rumus (18) dan (19) terhadap data hasil eksperimen ditampilkan dalam Gambar 9 dan 10.

Gambar 9 : Perilaku perambatan retak lelah searah lebar

Gambar 9 menunjukkan bahwa data analitis memiliki korelasi dengan data eksperimen dan cenderung konsisten terhadap perilaku aktual yang terukur dalam eksperimen. Konsistensi perilaku ini sedikit agak terkoreksi dalam grafik kecepatan perambatan

an retak lelah yang ditunjukkan dalam Gambar 10. Pada kecepatan perambatan retak lebih kecil dari 5 mm/cycle, data analitis dan eksperimen masih berimpit. Setelah itu data analitis cenderung sedikit menyimpang dari data eksperimen meskipun derajat penyimpangannya masih tergolong kecil dan tidak berarti. Jadi secara umum dapat dikatakan bahwa prediksi analitis masih sangat teliti.

Gambar 10 : Perilaku kecepatan perambatan retak lelah searah lebar

Analisis estimasi perilaku perambatan dan kecepatan perambatan retak searah tebal juga dengan memanfaatkan rumus (18) dan (19). Verifikasi data analitis yang terlihat dalam Gambar 11 menyatakan bahwa retak secara analitis merambat dengan perilaku

Gambar 11 : Perilaku perambatan retak lelah searah tebal

yang sama dan mendekati berimpit dengan perilaku hasil eksperimen. Sedangkan grafik kecepatan perambatan retak searah tebal yang ditunjukkan dalam Gambar 12 jelas mengungkapkan bahwa perilaku analitis tepat berimpit dengan perilaku yang terukur dalam eksperimen. Jadi dapat disimpulkan bahwa metode pendekatan Griffith dan Irwin yang digunakan dalam kajian ilmiah perilaku patah lelah baja *cantilever* akibat beban lentur dinamis dapat memberikan ketelitian hasil yang memuaskan dibanding dengan hasil aktual dari eksperimen.

Gambar 12 : Perilaku kecepatan perambatan retak lelah searah tebal

4. KESIMPULAN

Kajian ilmiah dalam makalah ini diarahkan pada pemanfaatan konsep *Linear Elastic Fracture Mechanics* untuk analisis perilaku patah lelah baja *cantilever* akibat beban lentur dinamis. Didalam pendekatan analisis, perilaku patah lelah diestimasi berdasarkan parameter yang menentukan besar medan tegangan elastis disekitar ujung retak dimana parameter tersebut dikenal dengan istilah *stress intensity factor*. Nilai parameter ini ditentukan berdasarkan metode *energy release rate* dari Griffith dan Irwin. Hasil pemanfaatan metode ini dinyatakan dalam bentuk grafik perilaku perambatan dan kecepatan perambatan retak lelah baja *cantilever* yang diinvestigasi.

Untuk mengukur ketelitian metode Griffith dan Irwin, data hasil analitis diverifikasi menggunakan hasil pengujian lentur dinamis baja *cantilever* dengan cacat retak awal berbentuk eliptik. Beban uji lentur

dinamis merupakan beban yang berfluktuasi beramplitudo konstan dengan rasio pembebanan sama dengan nol. Dari hasil verifikasi terungkap bahwa metode energi dari Griffith dan Irwin dapat mengestimasi perilaku patah lelah baja *cantilever* akibat lentur dinamis dengan ketelitian yang memuaskan dibanding dengan perilaku aktual yang terukur dalam eksperimen.

DAFTAR PUSTAKA

1. Duggan, T.V and Byrne, J., "Fatigue as a Design Criterion", The MacMillan Press Ltd., pp. 65-92, 1979.
2. Schijve, J., "Fatigue of Structures and Materials", Academic Publishers, pp. 7-12, 2001.
3. Zerbst, Uwe et.al, "Fracture and Damage Mechanics Modelling of Thin-Walled Structures – an Overview", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 76, pp. 5-43, 2009.
4. Ewalds, H.L and Wanhill, R.J.H, "Fracture Mechanics", Edward Arnold (Publishers) Ltd., pp. 28-54, 1986.
5. Hellan, K., "Introduction to Fracture Mechanics", International Student Edition – Mc Graw-Hill Book Co., pp. 143-147, 1985.
6. Liu, Alan F., "Structural Life Assessment Methods", ASM International, July, pp. 65-103, 1998.
7. Wikipedia, "Simpson's Rule", The Free Encyclopedia, May, 8, pp. 1-6, 2010.
8. Shine, U.P and Nair, E.M.S, "Fatigue Failure of Structural Steel", World Academy of Science, Engineering and Technology, 46, pp. 616-619, 2008.

RIWAYAT PENULIS

Harkali Setiyono lahir di Surabaya, menamatkan pendidikan S1 (Ir) bidang Teknik Mesin dari ITS. Tahun 1981-1982 melaksanakan *advanced training* dalam bidang *fatigue tests* pada Fa. Daimler Benz A.G di Stuttgart-Jerman. Pendidikan selanjutnya dilaksanakan pada *University of Strathclyde* di Glasgow – Scotland – Inggris dalam bidang *Mechanical Engineering* dan tamat program S2 (MSc) tahun 1986-1987 kemudian tamat program S3 (PhD) tahun 1991-1994. Diangkat kedalam jabatan Ahli Peneliti Utama pada tahun 2003. Sebagai Peneliti Utama sejak tahun 2005 dan dikukuhkan oleh LIPI menjadi Profesor Riset pada 5 Januari 2006. Sampai saat ini masih bekerja sebagai peneliti di B2TKS-BPPT (d/h UPT-LUK BPPT).