

LINEARISASI PERSAMAAN PERAMBATAN RETAK UNTUK MENDAPATKAN PARAMETER SIFAT MATERIAL DARI OBSERVASI UJI FATIK

Tungga Bhimadi ¹⁾

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Gajayana
Jl. Merjosari - Dinoyo, Kotak Pos 252, Malang
¹⁾tunggabhimadi@yahoo.com

Abstract—Sebagai gambaran yang akan diteliti adalah bagaimana variasi harga sifat fatik material dari uji fatik untuk spesimen yang berbeda. Sifat ini diperoleh dari penerapan matematika dalam teknik, yaitu regresi linearisasi logaritmik persamaan perambatan retak, untuk mendapatkan konstanta sifat fatik. Material logam yang digunakan adalah Stainless Steel 304 (SS-304). Metodologi yang digunakan adalah analisis dari hasil uji fatik dari 14 spesimen untuk beban fatik amplituda konstan dengan variasi rasio pembebanan, dan kasus retakan pada lubang rivet untuk variasi tebal dan diameter lubang. Hasilnya adalah beberapa sifat fatik SS-304 diperoleh yaitu, Faktor Intensitas Tegangan, kurva-S untuk 3(tiga) daerah keberlakuan dengan kesimpulan fokus pada kepentingan desain konstruksi, yaitu berdasar: fatigue life, damage tolerance, dan save life.

Keywords—karakteristik fatik, regresi logaritmik, perambatan retak, kepentingan desain

I. PENDAHULUAN

Salah satu tinjauan penerapan matematika sebagai latar belakang untuk teknik berawal dari sejarah pembebanan produk gabungan jenis beban. Pemilihan material produk yang tahan untuk semua jenis beban yang diterima, berdasarkan harga sifat material tersebut yang sudah *setting* sesuai jenis beban yaitu misalnya beban: statik, resonansi, *flutter*, fatik, getaran, impact, gempa, buckling, dan crippling. Permasalahan yang diselesaikan adalah analisa dari prosedur untuk mendapatkan harga sifat fatik dari data hasil uji fatik material SS-304.

Sifat fatik material antara lain terdiri dari: faktor intensitas tegangan, kekuatan patah, kekuatan threshold, dan faktor konsentrasi tegangan. Dalam setiap literatur, harga sifat material ini dinyatakan dalam satu nilai. Padahal untuk setiap spesimen dari material yang berbeda, repetisi percobaan dapat memberikan harga sifat material berbeda apalagi pengaruh variasi rasio beban dan dimensi.

Sebagai issue masalah tentunya, bagaimana perlakuan variasi hasil uji fatik memberikan satu harga sifat material dan dapat mewakili penggunaan

pada desain produk. Harga sifat fatik SS-304 diperoleh dari harga rata-rata 14 spesimen. Issue lain adalah penggunaan prosedur belum standar untuk mendapatkan harga sifat fatik.

Uji fatik memberikan harga panjang retak (a) untuk setiap jumlah delta siklus beban (dn). Plot hasil ini adalah parabola. Kurva ditransformasikan menjadi Kecepatan Perambatan Retak (da/dn) sebagai fungsi dari Delta Faktor Intensitas Tegangan (ΔK).

Materi yang disajikan ini adalah penelitian yang dilakukan untuk mendapatkan harga parameter sifat fatik material SS-304 terhadap data 14 spesimen uji fatik. Parameter sifat fatik ditunjukkan dari harga konstanta persamaan fatik 4(empat) pakar, yaitu: Paris, Forman, Wakter, dan Collipriest

II TINJAUAN PUSTAKA

Penggunaan material dalam teknik mempertimbangkan kondisi sifat misalnya dalam hal: fisik, kimia, dan mekanik. Sifat mekanik material dikelompokkan sesuai beban yang diterima. Jenis beban sertifikasi sampai saat ini adalah beban: statik, korosi, fatik, flutter, sistem, getaran, resonansi getaran, dinamik, impact, dan gempa, dalam table 1.1, pada halaman 14, dari (Bhimadi, 2010). Pilihan beban fatik yang dilakukan dalam materi yang disajikan ini, merupakan ketertarikan kami terhadap sifat material yang sederhana dan tertua atau awal muncul, yaitu kekuatan statik. Sifat ini ditunjukkan dengan harga dari: Modulus Elastisitas atau Modulus Young, 1725, Kekuatan Luluh, Kekuatan Tarik, dan Perpanjangan, dari olah data hasil uji tarik dari Coulumb, 1798, material yang bersangkutan.

Kemudian ketertarikan kami terbawa pada penelitian untuk mendapatkan harga aspek sifat fatik SS-304 yang sudah dilakukan bersama 114 logam lain untuk kebutuhan analisa fatik pesawat ruang angkasa oleh (Hu, 1979), dalam (Shuttle Orbiter Division, 1979) tanpa menyertakan dalam laporan secara terbuka untuk prosedur dan banyak spesimen. Hal ini disebabkan, dari hasil bimbingan S1 kami terhadap uji sebuah specimen SS-304, yang menunjukkan harga jauh berbeda dengan Hu,

Hipotesa kami adalah, harga sifat fatik material adalah unik. Kami mengawali penelitian fatik 14 spesimen dengan variasi dimensi dan rasio beban.

Materi yang akan kami dapatkan untuk menunjang penelitian adalah rincian sifat fatik material. Sifat fatik material dinyatakan dari (Schijve, 1979) yang akan diuraikan sebagai berikut. K_{maks} atau *Maximum Stress Intensity Factor* (Faktor Intensitas Tegangan Maksimum) material patah diperoleh dari harga (Δk) saat material patah, sebagai input data hasil uji fatik regresi daerah-3. Harga K_{maks} merupakan koefisien regresi uji fatik persamaan perambatan retak Walker untuk menentukan periode inspeksi.

K_c atau *Plane Stress Fracture Toughness* yang merupakan koefisien regresi data uji fatik pada persamaan perambatan retak Forman atau Collipriest sebagai harga batas maksimum kondisi retakan plane stress. K_{ic} identik dengan K_c atau *Plane Strain Fracture Toughness* sebagai harga batas minimum kondisi retakan plane strain. Δk_0 atau delta faktor konsentrasi tegangan pada kondisi struktur mulus kemudian retak mulai merambat dan perhitungan teoritis harga Δk dengan asumsi retak awal 0.0125 inc sesuai regulasi.

Kemudian, Δk_{th} atau Faktor Intensitas Tegangan Threshold kondisi retak mulai merambat dan diperoleh dari regresi daerah-1 kurva asimtotik Δk konvergen dengan persamaan Collipriest. Bila retakan dengan harga $\Delta k < \Delta k_{th}$ maka retak tidak merambat, gunanya sebagai desain perbaikan jika diharuskan retak dipaksa untuk tidak merambat, misalnya dengan memasang *crack stopper* atau *stiffener*. C , dan n sebagai koefisien persamaan Paris pada daerah-2.

Sifat fatik material ini menjadi penelitian selanjutnya dari data uji fatik, karena parameter sifat material merupakan konstanta pada persamaan perambatan retak.

Empat persamaan perambatan retak sesuai daerah keberlakuannya adalah sebagai berikut (Dong, 1998),

1. Paris

$$da/dN = C (\Delta k)^n \quad (1)$$

dimana, C dan n konstanta Paris

$$\begin{array}{ll} da/dN & \text{Laju Perambatan Retak} \\ \Delta k & \text{kmaks. - kmin.} \end{array}$$

Paris belum melibatkan efek 'Stress Ratio' notasi- R , rambatan retak daerah-2, dan retak awal dan akhir diabaikan. Hu memberikan informasi harga $C = 5.262E-06$ dan $n = 2.891$, dan Fuchs (Hu, 1979) dengan $C = 5.60E-06$ dan $n = 3.25$, untuk SS-304.

2. Walker

$$da/dn = C k_{maks}^m (\Delta k)^n \quad (2)$$

Ada k_{maks} ., dan masih di daerah-2.

3. Forman

$$da/dn = (C(\Delta k)^n) / ((1-R)kc - \Delta k) \quad (3)$$

memasukkan rumus R dan kc , menggambarkan daerah-2 dan daerah-3, dan bila $\Delta k = (1-R) kc$, masuk daerah-3.

4. Collipriest (rumus umum)

$$da/dn = C(kc \Delta k_0)^{n/2} \exp[\ln(kc / \Delta k_0)^{n/2} \text{arc tgh}(\ln(\Delta k^2 / ((1-R)kc \Delta k_0)) / (\ln(1-R)kc / \Delta k_0))] \quad (4)$$

Berlaku untuk daerah-1 sampai daerah-3.

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dibagi dalam dua tahapan yaitu: uji fatik dan penentuan koefisien 4(empat) persamaan perambatan retak. Sebagai tinjauan peralatan uji fatik, dilakukan pada sebuah mesin dari laboratorium Uji Material, Jurusan Konstruksi Kapal Fakultas Teknik Kelautan ITS.

Tujuh penyimpangan saat operasional uji fatigue terjadi hasil pengamatan, adalah (Bhimadi, 2004): pengukuran dimensi spesimen, pemilihan frekuensi percobaan, penyimpangan harga indikator ECU, penyimpangan pencatat defleksi aktuator, efek bending spesimen, pengukuran perambatan retak, dan pemilihan selang waktu pengamatan.

Rasio beban (R) sebagai perbandingan beban aplikasi terhadap beban ultimate yang digunakan adalah: 0.9 untuk spesimen-1 sampai dengan spesimen-5, dan 0.7 untuk spesimen-6 sampai spesimen 14. Tebal plat SS-304 (t) masing-masing spesimen adalah: 3 mm untuk spesimen (1, 2, 3, 11, dan 14), 6 mm untuk spesimen (5, 7, 9, dan 12), dan 8 mm untuk spesimen (4, 6, 8, 10, dan 13). Lebar spesimen bervariasi untuk: 60 mm pada spesimen (5 dan 14), 50 mm pada spesimen (1, 2, dan 3), 40 mm pada spesimen-9, 35 mm pada spesimen (7, 8, 11, 12, 13), dan 30 mm pada spesimen (4, 6, dan 10). Diameter rivet pada plat untuk 14 spesimen ditentukan yaitu: 20.75 mm untuk spesimen-3, 15 mm untuk spesimen (2, 5, 12, dan 13), 12 mm untuk spesimen (1, 7, 8, 9, dan 14), dan 9.5 mm untuk spesimen (4, 6, 10, dan 11), (Bhimadi, 2003).

Evaluasi awal hasil uji fatik terhadap 14 spesimen dengan variasi rasio beban, dimensi lubang rivet, dan tebal plat SS-304, mengikuti persamaan Paris untuk mendapatkan harga C , dan n (Bhimadi, 2003). Perambatan retak plat disimulasikan terjadi pada sambungan rivet bagian lubang rivet plat sesuai prosedur analisa transfer gaya sampai lubang rivet mengikuti dari, (Verduyn, 1986).

Linearisasi kurva dari logaritmik persamaan perambatan retak diperoleh dari pakar terkait yaitu:

1. Paris dengan linearisasi menjadi,

$$\ln(da/dn) = \ln C + n \ln(\Delta k) \text{ identik, } y = a + b x, \text{ dengan } y = \ln(da/dn), a = \ln C, b = n, \text{ dan } x = \ln(\Delta k)$$

Regresi linear dengan korelasi, $y = a + bx$ dan $a = \bar{y} - b \bar{x}$ (rata-rata)

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (5)$$

2. Walker memberi 4 konstanta, sehingga linearisasi $\ln (da/dn) = \ln (C (K_{max})^m (\Delta k)^n)$, menjadi $\ln C + m \ln (K_{max}) + n \ln (\Delta k)$, identik $y = a + b x$, atau $y = \ln (da/dn)$, $a = \ln C + m \ln (K_{max})$, $b = n$, $x = \ln (\Delta k)$, harga C dan m dicari untuk minimal hasil uji fatik, per dua spesimen.

3. Forman memberi 3 konstanta yang fokus fase-2 dan fase-3 dengan konstanta (C, n, dan Kc), jadi $\ln (da/dn) = \ln \{ C (\Delta k)^n / [(1-R) Kc - \Delta ko] \}$
 $= \ln C (\Delta k)^n - \ln [(1-R) Kc - \Delta ko]$
 $= \ln C - \ln [(1-R) Kc - \Delta ko] + n \ln (\Delta k) = y = a + b x$
 dimana, $y = \ln (da/dx)$, $a = \ln C - \ln [(1-R) Kc - \Delta ko]$, $b = n$, dan $x = \ln (\Delta k)$.

Apabila harga a dan b diperoleh, dengan C diketahui. Kemudian a diperoleh, maka Kc dan Δko diperoleh.

4. Collipriest berlaku pada semua fase, dengan 4 konstanta (C, n, Kc, Δko), $y = \ln (da/dn)$, dan $x = f(\Delta k)$. Linearisasi persamaan menjadi:

$$\ln (da/dn) = \ln \{ C (Kc \Delta k)^{n/2} \exp [\ln (Kc / \Delta ko)^{n/2} \operatorname{arctanh} \ln [\{ \Delta k^2 / \{ (1-R) Kc \Delta ko \} \} - \{ (1-R) Kc / \Delta ko \}]] \} \quad (6)$$

Hal ini identik dengan,

$$y = a + b x + c x^2 \quad (7)$$

dimana

$y = \ln (da/dn)$ dengan,

$a = \ln C + n/2 \ln Kc + n/2 \ln (e) \ln Kc - (n/2) \ln (e) \ln (\Delta ko) +$

$\operatorname{arctanh} \ln \frac{(2R^2 Kc^2 - R^2 Kc^2 - Kc^2) \ln (e)}{(1-R) Kc \Delta Ko}$

$b = n/2$

$c = \operatorname{arctanh} \ln \frac{\ln (e)}{(1-R) Kc \Delta Ko}$

Yang diperoleh dari uji fatik adalah harga panjang retak (a) untuk setiap jumlah delta siklus beban (dn). Bagaimana penelitian dilakukan berasal dari, plot hasil ini dalam kurva (a) sebagai fungsi dari (dn), yaitu satu spesimen satu kurva parabola. Kronologis prosedur penyelesaian kemudian, kurva ini ditransformasikan menjadi kurva dengan Kecepatan Perambatan Retak (da/dn) sebagai fungsi dari Delta Faktor Intensitas Tegangan (Δk).

Setelah harga (da/dn) diperoleh dari uji fatik, harga (Δk) ditentukan mengikuti prosedur dari (Rocke dan Cartwright, 1976). Kurva-S dari fungsi (da/dN) terhadap (Δk), dianalisa sesuai minat dan kepentingan oleh empat pakar tersebut.

Bentuk kurva (da/dn)=f(Δk) adalah kurva-S, dengan 3(tiga) pembagian kurva, Daerah-1 sebelah kiri, merupakan kondisi awal retakan sampai retakan panjang tertentu. Daerah-1 berlaku untuk operasional produk risiko tinggi karena harus tidak cacat sedikitpun, misalnya desain tali baja, gear, roda pendarat, dan rod pada baling-baling heli. Kriteria desain ini disebut kondisi *fatigue life*.

Daerah-2 posisi tengah kurva dimana kurva linear untuk desain struktur dinding yang menerima beban fatik dengan retakan yang tak dapat dideteksi, disebut kriteria desain *damage tolerance*, Dan daerah-3 posisi paling kanan, merupakan tinjauan untuk desain operasional produk dengan retakan dipermukaan atau yang dapat dideteksi sehingga dapat dijadwalkan perbaikannya, disebut kriteria desain *save life*.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Empat belas spesimen memberikan 4(empat) harga karakteristik sifat fatik SS-304 yaitu harga: kmaks, Kc, dan Δko, tabel-1. Empat persamaan perambatan retak mempunyai solusi apabila harga (C, m, dan n) yang sama digunakan pada semua persamaan.

TABEL 1. HARGA: KMAKS, KC, Kc, DAN ΔKO,

no	C	n	Kmaks	Kc	Δko
1	2.696901966	1.67101E-06	198.42	516.711485	49.51652933
2	3.431365733	3.40166E-06	239.66	506.191487	53.00661417
3	2.542007435	1.0044E-06	256.97	470.05905	24.82112994
4	2.31386157	3.70811E-06	203.99	450.50935	27.89359768
5	2.474430142	2.92805E-06	140.67	404.09958	24.82109892
6	2.196990334	1.17487E-06	244.33	526.47205	29.07971123
7	3.374338951	1.93729E-06	171.93	519.01066	32.42934061
8	3.34914544	3.38895E-06	163.63	430.91935	30.45702224
9	3.488906718	2.607E-06	240.73	454.70885	35.1885323
10	1.49696387	1.08612E-06	276.67	473.57377	23.92162886
11	3.904160506	3.85851E-06	172.09	564.740001	69.67854144
12	1.88819597	1.08144E-06	173.38	476.760001	37.97655403
13	2.767288625	2.74322E-06	162.93	495.513951	72.08695444
14	3.642688575	3.3934E-06	169.42	450.644128	24.61337826

Tujuh penyimpangan saat operasional uji fatik terjadi hasil pengamatan, misalnya adalah (Bhimadi. 2004): pengukuran dimensi spesimen (ukuran 3mm hasilnya menyimpang 0.04mm sampai 0.5mm), penyimpangan harga indikator ECU (diinginkan 275N sampai 2445N memberi penyimpangan 1.01N sampai 47N), dan pemilihan selang waktu pengamatan menimbulkan perbedaan harga siklus beban pada permukaan A-B-C-D (spesimen-6 dengan N masing masing 3200, 3200, 3000, 5500)

Dari uraian dimensi dan perlakuan beban fatik untuk 14 spesimen dan dengan mengikuti hasil perhitungan koefisien sifat material fatik sesuai tabel-1, makin lebar diameter rivet dari hasil uji spesimen-1 diameter 12mm sampai spesimen-3 diameter 20.75mm, diperoleh harga (C, n, dan Δko) naik kemudian turun, kecuali harga kc terus turun.

Pada spesimen-6 diameter 8mm dan spesimen-10 diameter 6mm, makin tebal plat diperoleh

penurunan harga untuk semua parameter sifat material. Perbedaan spesimen-5 lebar 60mm dan spesimen-12 lebar 35mm untuk parameter spesimen yang lain sama, menunjukkan harga C dan n turun, dan yang lainnya naik. Prosentase tegangan maksimum naik dari 0.7 untuk spesimen-6 dengan 0.9 untuk spesimen-4, memperoleh harga n turun dan harga yang lain naik.

Dari pengamatan, dapat dianalisa dalam hal, kecenderungan perubahan dimensi dan beban terhadap perubahan harga parameter material. Hasilnya adalah: pola perubahan 4(empat) harga parameter material yang naik kemudian turun merupakan penunjukkan untuk mendapat satu harga maksimum masing-masing yang digunakan sebagai harga referensi yang berlaku untuk kondisi yang sudah disebutkan dan diameter tertentu dimana harga parameter maksimum.

V. KESIMPULAN

Harga parameter fatik material SS-304 diperoleh dari linearisasi perambatan retak skala lon. Sehingga referensi harga C dan n material dari literatur harus dinyatakan berlaku pada kondisi uji fatik tertentu.

Semua parameter material, untuk kenaikan satu aspek dimensi atau satu aspek beban yang berurur, dan untuk aspek lain dengan harga sama dan dengan jumlah spesimen yang cukup, memberikan kondisi harga optimal pada harga dari aspek tertentu tersebut. Sehingga harga parameter material tidak bersifat umum, melainkan spesifik sesuai kondisi lingkungan dimana material digunakan.

Meskipun demikian, repetisi 14 spesimen SS-304 memberikan harga rata-rata dari data table-1, yaitu: $C=1.70425E-06$, $n=2.492558954$, $K_{maks}=177.319$, $K_c = 413.1225453$, dan $\Delta k_o = 31.34216434$. Hu (1979) memberikan informasi harga $C = 5.262E-06$ dan $n = 2.891$, dan Fuchs dengan $C = 5.60E-06$ dan $n = 3.25$, untuk SS-304.

DAFTAR PUSTAKA

- Bhimadi, T., 2003, "Perambatan Retak Amplituda Konstan Lubang Plat SS-304", Jurnal Seminar Nasional, Peran Riset dan Teknologi Bidang Teknik Mesin, dipresentasikan 11 Oktober di Universitas Brawijaya, ISBN : 979-9723-1-9, Malang
- Bhimadi, T., 2004, "Penyimpangan Uji Fatigue 14 Spesimen Plat Berlubang Lebar 50 mm dan Tebal sampai 8 mm SS-304 Beban Uniaksial", Jurnal Seminar Nasional, Rekayasa Aplikasi dan Perancangan Industri, Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah, Surakarta.
- Bhimadi, T., 2010, "Dasar Dasar Getaran Mekanis", Penerbit ANDI, Yogyakarta.
- Chermahini R., G., dan Sivakumar K., 1998, "Three Dimensional Finite Element Simulation of Fatigue Crack Growth and Closure", Journal of Mechanics of Fatigue Crack Closure, ASTM, September artikel no. 982, pp 982, pp 398-413.
- Dong, Z., J. 1998, "Modelisation Numerique de L'interaction Mecanique Entre Fissures Paralleles et Application en Fatigue", These Ecole Nationale Superiure des Sciences Fondamentals et Appliquees, Poitiers, France.
- Hu, T., 1979, "Advanced Crack Propagation Predictive Analysis Computer Program - IBM System", Journal of Cosmic NASA, Universitas Georgia.
- Josowidagdo, L., 1998, "Penentuan Faktor Pencar", Jurnal Simposium Nasional Metoda Numerik dalam Rekayasa Struktur, PAU(ITB)-BPPT-IPTN, Bandung.
- Khurmi, R. S., dan Gupta, J. K., 1982, *A Text Book of Machine Design*, Eurasia Publishing House, Ram Nagar, New Delhi.
- Rocke, D., P., and Cartwright, D. J., 1976, *Compendium of Stress Intensity Factor*, Her Majesty's Stationary Office, London.
- Schijve, J., 1979, "Four Lecture on Fatigue Crack Growth", Makalah Kuliah Tamu, Kelompok Bidang Keahlian Teknik Penerbangan, Jurusan Teknik Mesin, ITB, Bandung.
- Shuttle Orbiter Division, 1979, "Fracture Mechanics Properties of Materials Used in Space Shuttle Orbiter Structure", Journal of Rockwell International, SOD 79-0219.
- Soekarnapradja, E., 1995, "Teknik Analisa Perioda Uji Fatigue EMFT-235-100", Jurnal Simposium Nasional Teknik Analisis Komputasi dan Pengujian dalam System Aero-Servo-Elasto-Mechanics, PAU ITB-BPPT-IPTN, Bandung.
- Verduyn, W., D., 1986, "Joints", Makalah Kuliah Tamu, Kelompok Bidang Keahlian Teknik Penerbangan, Jurusan Teknik Mesin, ITB, Bandung.