

# Laju perambatan retak plat aluminium 2024 T3 dengan beban fatigue uniaksial pada rasio beban dan jarak diameter lubang berbeda

Budi Luwar Sanyoto<sup>(1)</sup>, Wajan Berata<sup>(2)</sup>

<sup>(1),(2)</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri - ITS  
Jl. Arif Rachman Hakim, Surabaya 60111

---

## Abstrak

Pembuatan suatu komponen dengan proses pemesina dapat menghasilkan cacat pada komponen. Cacat tersebut berupa retak, meskipun kemungkinannya sangat kecil. Apabila cacat tersebut dikenai beban berulang dengan siklus tertentu, maka cacat yang ada akan merambat dengan laju perambatan tertentu sampai suatu batas dimana struktur tersebut tidak lagi mampu menahan beban yang mengenainya. Dalam penelitian ini digunakan spesimen plat Al 2024 T3 dengan lubang terbuka diameter konstan dengan jarak antar lubang berbeda. Pengujian dilakukan dengan memberikan beban fatigue dengan ratio 0,3 sesuai dengan standar ASTM E-647-93 (1994). Dari hasil pengujian didapatkan data panjang retak dan jumlah siklus pembebanan, kemudian dilakukan perhitungan untuk mendapatkan laju perambatan retak ( $da/dN$ ) terhadap faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kurva laju perambatan retak fungsi faktor intensitas tegangan dalam daerah Paris mempunyai harga konstanta Paris  $m = 1,163$  sampai dengan 4,2 sedangkan harga  $C = 1,69E-12$  sampai dengan 9, 34E-09.

*Kata Kunci:* Laju Perambatan Retak, Faktor Intensitas Tegangan dan Konstanta Paris

## Abstract

Producing of component by machining process can yield component defective. That defective in crack form, although it probably is very little. If that defective is applied by a cyclic load, the defective exist will propagate with a propagation rate until a limit where that structure is not able to restrain load applied to it. In this research, the specimen to be used was plat Al 2024 T3 with open hole, constant diameter and different distance between hole. Testing to be done by giving fatigue load with ratio 0,3, according to ASTM standard E-647-93 (1994). The data to be collected were crack length and the number of load cyclic. Further, it is calculated crack propagation rate ( $da/dN$ ) toward strength intensity factor ( $\Delta K$ ). The result of investigation shows that crack propagation rate curve of strength intensity factor function in the Paris area has Paris constant  $m = 1,163$  until 4,2, and value of  $C = 1,69E-12$  until 9, 34E-09

*Keywords:* Crack propagation rate, stress intensity factor, Paris constant.

---

## 1. Pendahuluan

Dalam suatu proses perencanaan, kegiatan rekayasa merupakan kegiatan untuk mendapatkan produk yang lebih baik. Dalam evaluasi biasanya hanya berdasarkan beban statis dalam analisa kegagalan dan hal ini sudah kurang sesuai, minimal juga harus sudah memperhitungkan beban dinamis (*fatigue*) dan pengaruh lingkungan jika perlu.

Analisa perambatan retak merupakan salah satu analisa kegagalan terhadap beban fatigue, terutama pada struktur sambungan yang banyak digunakan untuk konstruksi dibidang kelautan dan penerbangan. Dengan berkembangnya teknologi, jumlah angkutan udara di Indonesia semakin meningkat, dari seluruh angkutan udara yang didominasi oleh pesawat terbang, penggunaan sambungan pada struktur pesawat ini masih memegang peranan penting, terutama sambungan keling banyak dijumpai dibagian perut (*fuselage*), sayap (*wing*) dan ekor (*tail unit*) dari pesawat terbang. Beban dinamis yang terjadi pada fuselage paling kritis disebabkan adanya tabrakan turbulensi campuran gas dengan partikel udara terhadap

pesawat dan adanya perbedaan tekanan udara di dalam kabin terhadap tekanan udara di luar kabin kapal.

Penyambungan bagian satu dengan lainnya pada struktur pesawat terbang diperlukan rivet, struktur akan mengalami pengurangan luasan akibat lubang rivet. Pengaruh adanya lubang rivet menimbulkan konsentrasi tegangan yang menurunkan kekuatan struktur. Hasil inspeksi retak pada pesawat terbang banyak terlihat justru pada bagian sambungan keling ini, banyak ditemukan retak "*Multiple Site Damage*" (MSD) yang dapat didefinisikan sebagai terjadinya retak-retak yang berasal dari lubang paku keling akibat adanya beban dinamis.

Dalam operasinya rivet akan dilepas terlebih dahulu jika terjadi kerusakan, akibatnya konstruksi menjadi dalam keadaan plat berlubang yang akan mengalami cacat awal yang berupa takikan pada permukaan dalam dari diameter rivet. Sehingga kerusakan ini perlu ditinjau lagi apakah mengganggu fungsi struktur secara keseluruhan atau tidak. Hal ini menunjukkan perlunya mengetahui laju

perambatan retak pada material tertentu agar umur lelah bisa ditentukan (minimal bisa dipakai untuk memperkirakan umur lelah). Kajian fatigue pada struktur dapat juga dilakukan untuk tahap evaluasi re-desain. Hasil pengujian dianalisa secara grafik untuk mengetahui laju perambatan retak pada beban fatigue dan rasio tegangan tertentu.

Dari hal tersebut diatas yang ingin kami teliti adalah membandingkan laju perambatan retak yang terjadi pada lubang keling ke tepi serta jarak antara lubang terkecil bila dikenai beban fatigue. Sebab jarak antar lubang terdekat tidak hanya dipengaruhi oleh tegangan akibat gaya luar saja juga dipengaruhi oleh tegangan dari lubang sebelahnyanya sedangkan untuk jarak lubang ketepi hanya dipengaruhi oleh beban dari luar, dimana luasan spesimen dibuat sama.

## 2. Dasar Teori

Beberapa penelitian pernah dilakukan diantaranya yang dilaksanakan oleh Suarsana [17]. Dalam thesisnya yang menggunakan spesimen Aluminium Al 2024 T3, dimana Aluminium tersebut diberi beban fatigue uniaksial amplitudo konstan, variasi diameter lubang dengan pola lubang sejajar serta sigsag dan variasi Rasio (R) beban, diharapkan akan mendapatkan kurva laju perambatan retak  $da/dN$ . Untuk  $\Delta K$  yang sama serta makin besar ratio tegangan yang diberikan dengan diameter yang sama, laju perambatan retak makin cepat dimana kurva makin bergeser kearah kiri atas.

Retak yang berasal dari lubang merupakan penyederhanaan dari kasus retak yang berasal dari paku keling. Pada model yang disederhanakan ini tidak terjadi penerusan beban pada paku keling sehingga tegangan yang terjadi akan lebih sederhana. Untuk retak yang cukup panjang pengaruh penerusan beban paku keling ini telah jauh berkurang maka kelakuan retak pada lubang dapat mewakili retak pada paku keling [8].

Analisa perambatan retak melibatkan amplitudo putaran beban konstan dari spesimen berlubang yang telah mengalami retak dalam. Panjang retak diukur, baik secara visual maupun dengan metoda numerik untuk mendapatkan rata-rata pertumbuhan retak. Rata-rata pertumbuhan retak dinyatakan sebagai fungsi jangkauan faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) yang dihitung dari pernyataan berdasarkan pada analisa tekanan elastik linier (ASTM, 1994).

Evaluasi perambatan retak yang sering dilakukan menggunakan persamaan Paris. Persamaan ini berlaku pada daerah II dari laju perambatan retak. Empat komponen persamaan Paris yaitu : laju perambatan retak ( $da/dN$ ), konstanta Paris (C dan m), dan harga K (faktor intensitas tegangan). Hasil studi tentang parameter ini dinyatakan menjadi 3 (tiga) bagian yaitu :

1. Pendekatan teoritis, untuk memperoleh harga  $\Delta K$  dilakukan dengan rumus empiris dari ASTM.
2. Pendekatan eksperimen untuk memperoleh harga dari C dan m.

3. Harga  $da/dN$  merupakan tujuan akhir dari pengolahan data eksperimen fatigue.

Harga C dan m diperoleh dari harga rata-rata C dan m dari setiap spesimen. Hal ini dimungkinkan karena secara teoritis harga konstanta Paris (m) bukan merupakan fungsi R.

Naiknya tegangan pada daerah tertentu dapat menimbulkan konsentrasi tegangan. Kemudian pada daerah tersebut (*local*) terjadi daerah plastis, yang pada akhirnya menimbulkan retak mikro di daerah I :

1. Retak mikro membesar serta terjadi pembebanan yang berulang ulang retak akan merambat yang disebut Crack Propagation, di daerah II.
2. Pada akhirnya logam akan mengalami patah static atau final fracture di daerah III. Daerah I dan III terjadi karena pengaruh tebal dan struktur mikro yang dominan, tetapi kedua pengaruh ini menjadi lemah pada daerah II. Pengaruh dominan pada daerah I dan III, menyebabkan mekanisme perambatan retak kedua daerah tersebut sukar diprediksi secara teoritis.

Pendekatan teoritis untuk menggambarkan fenomena fatigue dalam perambatan retak sesuai ahli yang mempopulerkan yaitu [15]

1. Persamaan Paris menggambarkan hanya pada daerah II yang didekati dengan bentuk linier dalam skala logaritmik,  $da/dN = f(\Delta K)$ . Pendekatan ini berguna untuk masalah desain dimana informasi yang dibutuhkan hanya kondisi perambatan retak dari yang sudah mempunyai retak awal sampai patah.
2. Persamaan Forman menggambarkan daerah II dan III. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan harga Fracture toughness (Kc) logam.
3. Persamaan Collipries menggambarkan semua daerah fatigue.

### 2.1 Mekanisme perambatan retak

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi tegangan maksimum pada ujung retakan berada diatas kekuatan material. Jika hal ini terjadi, maka konsentrasi tegangan pada ujung retakan akan meningkat, sehingga tegangan yang terjadi akan lebih besar lagi. Perambatan retak ada dua tingkatan pertumbuhan yaitu (*Forysth*):

1. Pertumbuhan retak tingkat pertama (*slip band crack growth*) meliputi inisiasi retak pada bagian tegangan geser maksimum.
2. Pertumbuhan retak tingkat kedua meliputi pertumbuhan retak dalam arah tegak lurus tegangan tarik maksimum.

### 2.2. Pendekatan faktor intensitas tegangan

Pada analisa kita gunakan ukuran plat tak berhingga dengan retak berada pada tengah plat. Pada plat terdapat retak 2a, pada posisi tak berhingga bekerja tegangan tarik. Besarnya tegangan disekitar ujung retak adalah :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_t}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_t}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[ 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2)$$

$$\tau_{yy} = \frac{K_t}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3)$$

$$\sigma_{zz} = \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0, \text{ untuk Plane stress} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \\ \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0 \end{aligned} \right\} \text{ untuk Plane strain} \quad (5)$$

Dari persamaan (1),(2),(3) terlihat bahwa distribusi tegangan disekitar ujung retak sangat ditentukan oleh suku

$$\sigma_{ij} = \frac{K_t}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (6)$$

Dan besarnya  $K_t$  adalah

$$K_t = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (7)$$

Dari persamaan (6) bahwa satuan faktor intensitas adalah satuan tegangan  $\sqrt{\text{satuan panjang}}$  yang dalam system SI adalah  $\text{Mpa} \sqrt{\text{m}}$  sedangkan dalam satuan British Coustemery Unit adalah  $\text{Psi} \sqrt{\text{inch}}$ .

Untuk bentuk lain yang berbeda besarnya  $K_t$  diberi suatu faktor koreksi geometri  $\beta$

$$K_t = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (8)$$

dimana

$$\beta = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{w}} \quad (9)$$

$\beta$  = faktor koreksi bentuk  
 $a$  = panjang retak  
 $w$  = lebar material

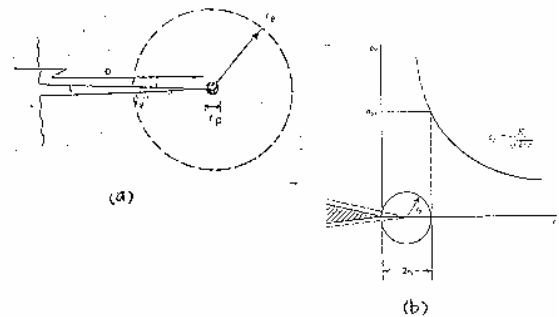
### 2.3. Retak awal dan retak kritis

Metode regangan tegangan local adalah untuk meramalkan saat timbulnya awal retak, dimana panjang awal retak tersebut adalah berkisar antara 0,001 hingga 0,2 inch. Panjang retak awal menurut SAE biasanya menggunakan panjang retak awal 0,1 inchi. Panjang retak kritis dari persamaan (7), harga  $K$  adalah sesuai dengan  $K_{IC}$ ,  $\sigma$  diambil pada harga maksimum, sehingga rumusan untuk panjang retak kritis adalah

$$a_c = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{K_{IC}}{\sigma_{mak} \beta} \right]^2 \quad (10)$$

### 2.4. Plastisitas pada ujung retak

Adanya daerah plastik akan mengubah distribusi tegangan didaerah elastis. Meskipun demikian distribusi tegangan tidak akan banyak berubah jika daerah plastik yang terjadi kecil dibandingkan dengan daerah elastis. Pada gambar 1.a ditunjukkan skematis daerah plastis  $r_p$  dan daerah elastis  $r$ .



**Gambar 1. (a) Skematik daerah Elastis dan daerah plastis, (b) Distribusi tegangan ke arah sumbu x**

Estimasi besarnya daerah plastis dilakukan dengan memperhatikan gambar 1. b. distribusi  $\sigma_y$  sepanjang sumbu x diperoleh dari persamaan dengan memasukkan  $\theta = 0$

$$\sigma_{iy} = \frac{K_t}{\sqrt{2\pi r}} \quad (11)$$

Sebagai estimasi awal harga  $r_p$  untuk kondisi tegangan bidang adalah :

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (12)$$

Dengan memasukkan pengaruh distribusi tegangan ( Irwin ), sehingga besarnya daerah plastis adalah dua kali estimasi :

$$r_p = \frac{1}{\pi} \left( \frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (13)$$

### 2.5. Propagasi Retak dan Faktor Intensitas Tegangan

Jika beban yang bekerja berupa beban yang berulang maka pada ujung retak faktor intensitas akan bervariasi antara  $K_{mak}$  dan  $K_{min}$  yang merupakan batas bawah dan batas atas intensitas tegangan pada ujung retak. Karena  $\Delta K = K_{mak} - K_{min}$  dan  $R = S_{min}/S_{mak}$  maka dapat dikatakan laju perambatan retak ( perambatan retak dalam satu siklus ) merupakan fungsi dari  $\Delta K$  dan  $R$ .

$$\frac{da}{dN} = f(\Delta K) \quad (14)$$

Harga range faktor intensitas tegangan dapat diperoleh dari ASTM E 647 tahun 1994

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W}} \sec \frac{\pi \alpha}{2} \quad (15)$$

dimana

$\Delta K$  = range faktor intensitas tegangan

$\Delta P = P_{mak} - P_{min}$

$B$  = tebal material

$W$  = lebar material

$$\alpha = \frac{2a}{W} \quad (16)$$

Kurva da/dN sebagai fungsi ΔK bila digambar sebagai fungsi log-log, pada umumnya berbentuk sigmoidal yang dapat dibagi menjadi tiga daerah. Pada daerah I yaitu pada harga ΔK rendah perambatan retak dipengaruhi suatu harga ambang ΔK<sub>th</sub>, didaerah ini retak tidak akan merambat. Pada daerah II hubungan da/dN terhadap ΔK mendekati linier. Pada ΔK tinggi daerah III, laju perambatan retak sudah sangat tinggi karena ΔK<sub>mak</sub> mendekati harga *fracture toughness* K<sub>c</sub>.

Untuk mempermudah pengolahan data, kurva da/dN – Δ K dapat digantikan dengan persamaan yang diperoleh dengan cara curve fitting terhadap data. Persamaan yang banyak dipakai adalah :

$$\text{Persamaan Paris : } \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (17)$$

Dimana :

da/dN = laju perambatan retak

C dan m = merupakan konstanta bahan

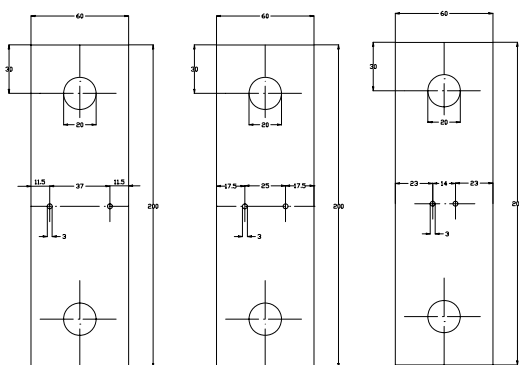
ΔK = range Intensitas Tegangan

### 3. Metode Penelitian

#### 3.1 Material uji dan spesimen uji

Spesifikasi yang didapat menyatakan bahwa material uji adalah aluminium 2024 T3. Menurut standar ASTM B221 dan ASME SB221, aluminium 2024 T3 adalah aluminium yang mengandung unsur tambahan Si 0,5% ; Fe 0,5% ; Cu 3,8-4,9% ; Mn 0,3-0,9% ; Mg 1,2-1,8% ; Cr 0,1% ; Zn 0,25% ; Ti 0,15% dan unsur-unsur lain 0,05-0,15%. Dimana menurut ASTM B221, spesifikasi mekanis dari bahan tersebut adalah

- Kekuatan luluh  $\sigma_y$  : 395 Mpa
- Kekuatan luluh offset 0,2 %  $\sigma_{ys}$  : 290 Mpa
- Elongasi : 12 %



Gambar 2. Bentuk Spesimen Uji Dinamis

Uji tarik dan uji kekerasan dilakukan untuk memverifikasi spesifikasi mekanis dari material uji. Uji tarik dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan, Jurusan Konstruksi Kapal, Fakultas Teknik Perkapalan, ITS, dengan menggunakan mesin uji statis MFL system. Pengujian dilakukan dengan mengikuti prosedur standar B557M-94 sebagaimana tercantum pada ASTM standard, 1994, volume 02.02. Rata-rata dari hasil pengujian adalah sebagai berikut :

- Kekuatan tarik  $\sigma_u$  = 525,4 MPa

- Kekuatan luluh  $\sigma_y$  = 406,26 MPa
- Elongasi = 15,4 %

Uji kekerasan dilakukan di Laboratorium Metallurgi, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, ITS. Uji kekerasan dilakukan pada 6 buah titik sepanjang elemen, dengan menggunakan satuan Brinell. Rata-rata hasil uji kekerasan adalah 0,245 Brinell atau 154,5 Vickers Bentuk dan ukuran dari spesimen yang digunakan dalam uji dinamis adalah seperti tertera dalam gambar 2.

#### 3.2 Alat uji dan prosedur uji

Uji dinamis (fatigue) dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan, Jurusan Konstruksi Kapal, FTK-ITS. Pengujian dilaksanakan mengikuti prosedur standar pengujian fatigue E647-93 ASTM Standard 1994, volume 03.01.

Mesin Uji Fatigue yang digunakan adalah ESH Universal Testing Machine, buatan Inggris, nomor seri 996285, dengan kapasitas :

- Beban fatigue maksimum 500 kN (50 ton)
- Beban statis maksimum 500 kN
- Langkah maksimum 460 mm
- Tekanan grip maksimum 250 bar
- Lebar bukaan grip maksimum 45 mm

Mesin dilengkapi dengan:

- Komputer digital dan software uji, yang menghasilkan instruksi pengendalian operasi ECU
- Hydraulic Power Unit ( HPU ), yang menghasilkan instruksi pengendalian operasi ECU secara manual ( digunakan sebagai pengganti bila komputer digital dan software uji mengalami gangguan )
- Peralatan bantu
- Mikroskop, dengan pembesaran maksimum 100 X, untuk mengamati panjang / perambatan retak
- Lampu

Tahapan untuk melaksanakan pengujian disusun dalam prosedur uji, sebagai berikut :

1. Penyiapan spesimen uji
2. Penyiapan mesin uji fatigue
3. Pemasangan spesimen uji
4. Pengesetan variabel uji
5. Pengoperasian mesin uji
6. Pengamatan dan pengukuran

#### 3.3. Variabel Penelitian

Sumber data dalam penelitian ini adalah spesimen uji dan alat pencatat jumlah siklus dan amplitudo (rasio) pembebanan pada mesin uji. Sedangkan variabel penelitian utama dapat dikelompokkan menjadi:

- Variabel yang diset : tebal spesimen (B), geometri crack ( $2a_{mula}$ ), rasio pembebanan (R)
- Variabel yang diamati : dimensi crack (2a), siklus pembebanan (N)
- Variabel yang dihitung : laju pertumbuhan retak (da/dN), rentang intensitas tegangan (ΔK)

### 3.4 Parameter Pengujian

Parameter dimensi material yang digunakan dalam pengujian dapat disusun sebagai berikut:

**Tabel 1. Pemilihan Parameter Pengujian Material**

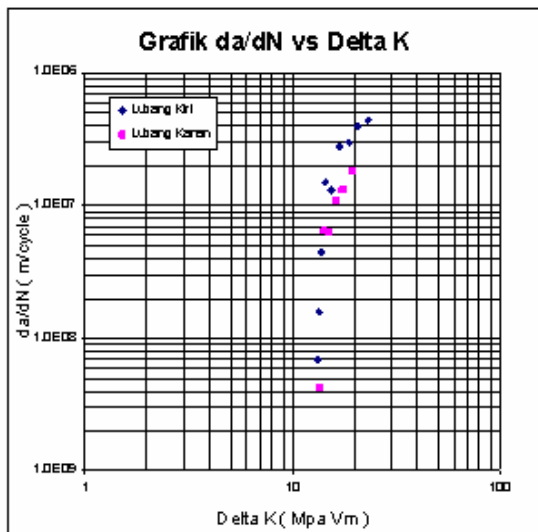
No.	Dimensi Spesimen	Diameter	Jarak Sumbu Lubang	Rasio beban
1	2 x 60 x 200	3 mm	37 mm	R 0,1
2	2 x 60 x 200	3 mm	25 mm	R 0,1
3	2 x 60 x 200	3 mm	14 mm	R 0,1
4	2 x 60 x 200	3 mm	37 mm	R 0,3
5	2 x 60 x 200	3 mm	25 mm	R 0,3
6	2 x 60 x 200	3 mm	14 mm	R 0,3

Dasar pemilihan parameter terutama besarnya jarak sumbu lubang pada penelitian ini adalah berdasarkan “Boing Riveting Manual”, dimana pendekatan besarnya jarak sumbu lubang ini banyak digunakan pada penyambungan struktur body pesawat terbang.

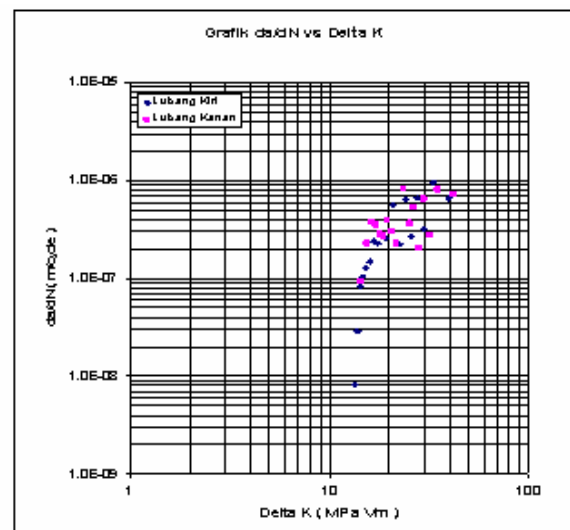
### 4. Data dan Analisa

#### 4.1. Data Hasil Pengujian Fatigue

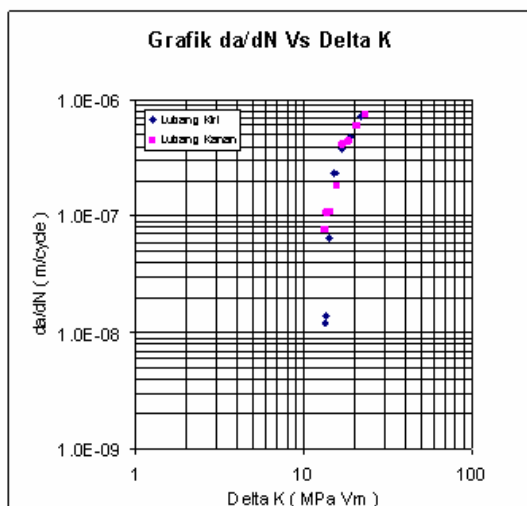
Data hasil pengujian fatigue dan perhitungan material Al 2024 T3 dengan beban uniaksial, disajikan dalam bentuk grafik dan dapat dilihat pada gambar-gambar berikut ini.



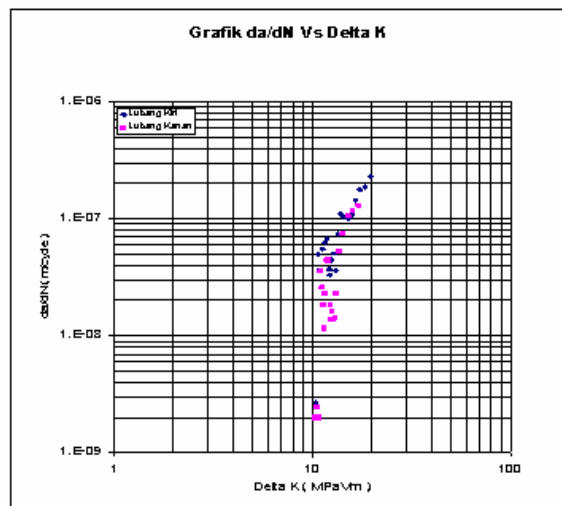
**Gambar 3. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 37 mm dan R 0,1**



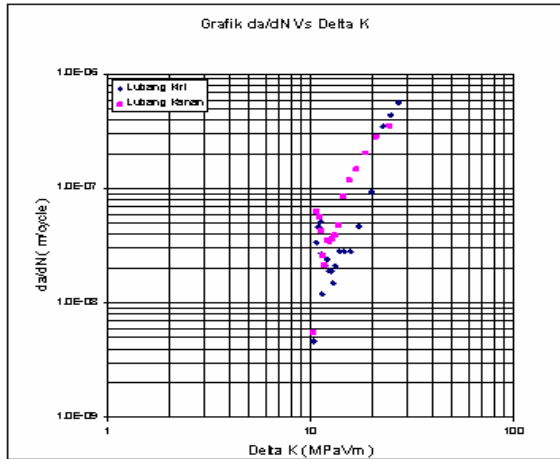
**Gambar 4. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 25 mm dan R 0,1**



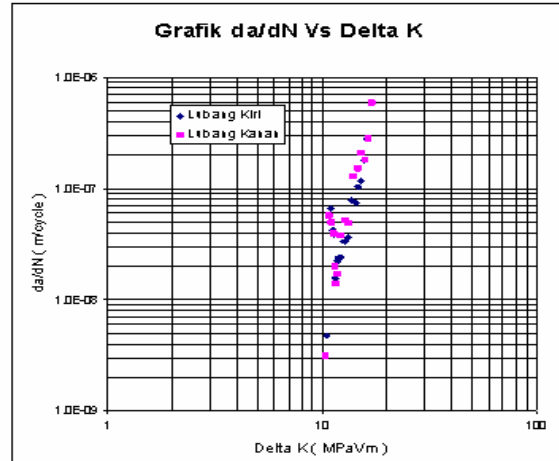
**Gambar 5. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 14 mm dan R 0,1**



**Gambar 6. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 37 mm dan R 0,3**



Gambar 7. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 25 mm dan R 0,3



Gambar 8. Kurva perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 14 mm dan R 0,3

4.2. Konstanta Paris sesimen

Untuk mendapatkan Konstanta Paris dapat dihitung dengan menggunakan perhitungan statistik dari setiap spesimen. Perhitungan ini dapat dilakukan sebagai berikut:

1. Linierisasi persamaan perambatan retak memberikan ekuivalen persamaan garis  $Y = ax + b$ , dimana :  $y = \log da/dN$ ,  $x = \text{Log} (\Delta K)$ ,  $a = m$  dan  $b = \log C$ .
2. Harga  $da/dN$  dan  $\Delta K$  diperoleh dari perhitungan data pengamatan uji fatigue.
3. Perhitungan Regresi Linier dapat dilakukan untuk mendapatkan harga Konstanta Paris (  $m$  dan  $C$  ) pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Konstanta Paris (  $m$  dan  $C$  )

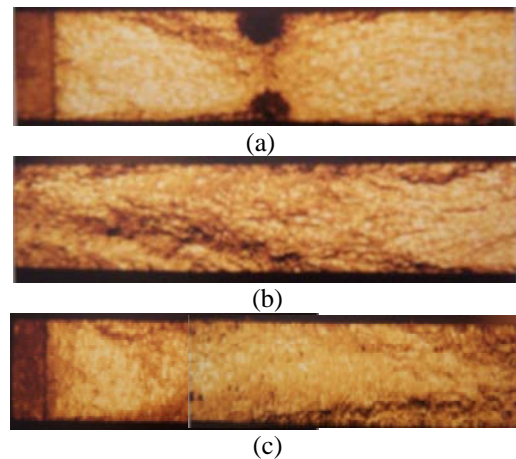
Range	Jarak	Konstanta Paris	D=3 mm				
			R				
1.0E-07	37	Lub Kiri	m	2.618	2.526		
			C	1.34E-10	1.19E-10		
		Lub Kanan	m	2.742	1.663		
			C	5.24E-11	1.14E-09		
		s/d	25	Lub Kiri	m	1.828	2.745
					C	1.08E-09	6.68E-11
	Lub Kanan			m	1.163	3.318	
			C	9.34E-09	1.23E-11		
	1.0E-06		14	Lub Kiri	m	2.933	11.176
					C	8.56E-11	8.29E-21
		Lub Kanan		m	4.2	7.051	
			C	1.68E-12	8.53E-16		
1.0E-09		37	Lub Kiri	m	50.18	5.47	
				C	4.10E-05	4.95E-14	
	Lub Kanan		m	26.486	0.75		
			C	6.62E-39	3.87E-09		
	s/d		25	Lub Kiri	m	39.696	1.996
					C	1.22E-53	1.55E-10
		Lub Kanan		m		3.459	
			C		6.45E-12		
		1.0E-08	14	Lub Kiri	m	26.928	4.747
					C	5.33E-39	2.22E-13
	Lub Kanan			m		5.765	
			C		1.18E-14		

Dasar Verifikasi Konstanta Paris adalah didekati dengan beberapa hasil pengujian yang

terdahulu dipilih konstanta Paris yang paling mendekati hasil pada tabel dan ada beberapa hasil uji material lain yang menunjukkan Konstanta Paris. Pada tabel 2 ditunjukkan hasil perhitungan Konstanta Paris (  $m$  dan  $C$  ) dari ASTM.

4.3. Bentuk patahan fatigue dari spesimen uji

Bentuk permukaan patahan fatigue dari spesimen Al 2024-T3 dengan jarak antar lubang 14 mm dengan Rasio beban  $R = 0,1$  dan  $R = 0,3$  ditunjukkan pada gambar 9.



Gambar 9. Bentuk perambatan retak spesimen dengan jarak lubang 14 mm dan R 0,1 , pembesaran 10 X

- (a) Bentuk patahan diantara lubang
- (b) Bentuk patahan pada lubang kiri sisi kiri lubang
- (c) Bentuk patahan pada lubang kanan sisi kanan lubang

Dari gambar 9 terlihat bentuk permukaan patahan dari spesimen yang di uji fatigue. Dari hasil foto makro terlihat bahwa ada dua daerah patahan yaitu daerah patahan fatigue ( ditandai dengan permukaan mengkilat ) dan daerah patahan statis ( ditandai dengan permukaan buram ). Pada daerah

patahan fatigue, laju perambatan retak akan merambat dengan cepat bila bentuk permukaan patahan rata, sedangkan bila kontur permukaan tidak rata laju perambatan retak akan lebih lambat dibandingkan dengan permukaan patahan yang rata, hal ini diakibatkan adanya percabangan retak atau retak sigsag yang merambat dari bukaan retak.

**5. Pembahasan dan Diskusi**

Hasil dari penelitian ini akan digambarkan dalam bentuk grafik untuk masing-masing spesimen. Beberapa grafik dari spesimen itu akan digabungkan untuk mengetahui adanya pengaruh variasi jarak sumbu lubang dan variasi rasio pembebanan terhadap rentang intensitas tegangan.

**5.1. Variasi Jarak Sumbu Lubang**

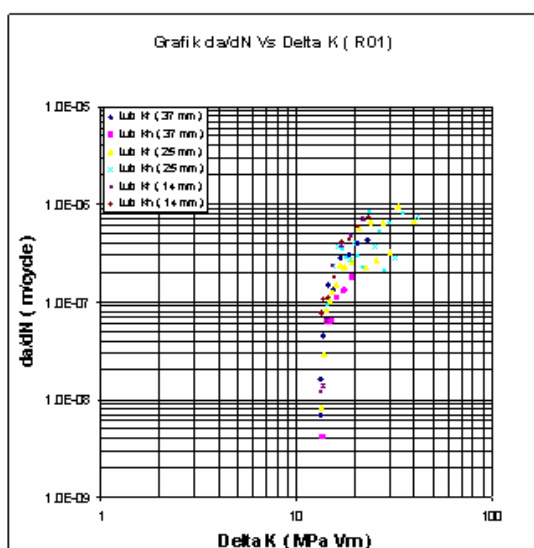
Adanya variasi jarak sumbu lubang akan mempengaruhi perambatan retak yang terjadi pada spesimen-spesimen. Hal disebabkan karena besarnya distribusi tegangan yang diterima masing-masing spesimen berbeda. Perubahan kecenderungan perambatan retak dapat dilihat pada gambar 10.

Dari gambar 10 terlihat grafik laju perambatan retak untuk jarak lubang 14 mm lebih cepat dibandingkan dengan perambatan retak untuk jarak lubang 37 mm dan 25 mm. Hal ini disebabkan adanya interaksi antara lubang kiri dan kanan dimana untuk jarak retakan tertentu ( $r_p$ ) dari ujung crack lubang kiri sebelah kanan tegangan yang terjadi adalah tegangan  $\sigma_{ys}$  dari lubang itu sendiri dan  $\sigma_{nom}$  akibat dari lubang sebelah kanan sehingga tegangan total yang terjadi merupakan penjumlahan dari  $\sigma_{ys}$  dan  $\sigma_{nom}$  demikian juga berlaku untuk lubang sebelah kanan sisi kiri, dengan semakin dekatnya jarak retak antar lubang, tegangan total yang terjadi juga semakin besar karena harga dari  $\sigma_{nom}$  semakin bertambah. Sedangkan untuk jarak lubang 37 mm tegangan yang terjadi pada lubang kiri dan kanan hanya dipengaruhi oleh jarak lubang ke tepi saja

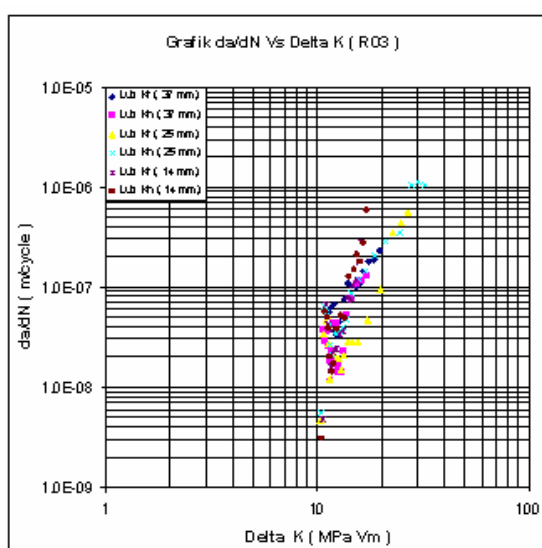
karena retak yang terjadi hanya dipengaruhi oleh beban dari luar saja. Untuk jarak antar lubang 25 mm laju perambatan retaknya agak lebih lambat dibandingkan dengan kedua jarak lubang tersebut diatas karena jarak lubang ketepi dan jarak antar lubangnya cukup besar dibandingkan dengan jarak lubang 14 mm dan jarak ketepi 11,5 mm untuk jarak lubang 37 mm. Perlu diketahui bahwa pada specimen dengan jarak lubang 25 mm, mempunyai jarak terhadap tepi sebesar 17,5 mm.

Pada gambar 11 menunjukkan laju perambatan retak agak lambat pada awalnya, ini terlihat pada grafik dimana titik yang menunjukkan laju perambatan retaknya berkumpul pada harga  $\Delta K$  tertentu (didaerah antara  $1.0E-08$  s/d  $1.0E-07$ ). Kurva yang terjadi agak sedikit bergeser ke kiri bila dibandingkan dengan kurva pada gambar 10 (dengan  $R = 0,1$ ) hal ini disebabkan karena rasio  $R = 0,3$  dengan laju perambatan yang sama faktor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) yang terjadi lebih kecil harganya, karena saat opening, crack belum membuka sepenuhnya, crack sudah menutup kembali.

Laju perambatan retak untuk jarak lubang 14 mm tetap lebih cepat dibandingkan dengan perambatan retak untuk jarak lubang 37 mm dan 25 mm, karena adanya interaksi antara lubang kiri dan kanan dimana untuk jarak retakan tertentu ( $r_p$ ) dari ujung crack lubang kiri sebelah kanan tegangan yang terjadi adalah tegangan  $\sigma_{ys}$  dari lubang itu sendiri dan  $\sigma_{nom}$  akibat dari lubang sebelah kanan sehingga tegangan total yang terjadi merupakan penjumlahan dari  $\sigma_{ys}$  dan  $\sigma_{nom}$  demikian juga berlaku untuk lubang sebelah kanan sisi kiri, dengan semakin dekatnya jarak retak antar lubang, tegangan total yang terjadi juga semakin besar karena harga dari  $\sigma_{nom}$  semakin bertambah.



**Gambar 10. Kurva perambatan retak untuk variasi jarak sumbu lubang dengan R 0,1**



**Gambar 11. Kurva perambatan retak untuk variasi jarak sumbu lubang dengan R 0,3**

Kurva perambatan retak untuk lubang kanan dengan jarak lubang 25 mm berimpit dengan lubang kiri dan kanan untuk jarak lubang 37 mm. Secara umum untuk jarak lubang 14 mm kurva perambatan retak bergerak lebih cepat dibandingkan dengan jarak lubang yang lain.

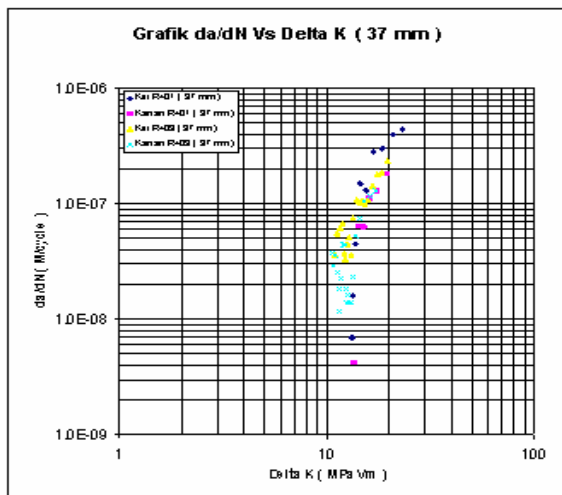
Pada gambar 12 menunjukkan bentuk kurva dengan jarak lubang 37 mm hampir yang sama, tetapi kurva yang dengan rasio  $R = 0,3$  agak bergeser kekiri, hal ini disebabkan dengan laju perambatan retak yang sama factor intensitas tegangan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan  $R = 0,1$ .

Pada gambar 13 menunjukkan untuk  $R = 0,3$  laju perambatan retak agak sedikit lambat ditunjukkan oleh adanya titik titik yang menggerombol pada daerah  $1.0E-08$  s/d  $1.0E-07$  hal ini disebabkan adanya penjalaran retak yang bercabang sedangkan untuk  $R = 0,1$  laju perambatan retak didaerah paris bergerak tidak teratur hal ini juga disebabkan adanya penjalaran retak yang bercabang,

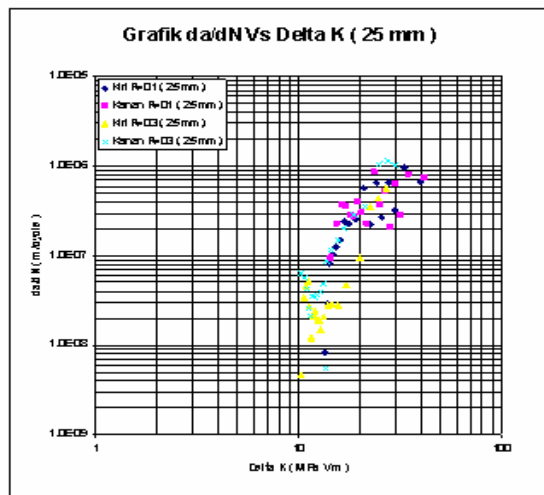
tetapi trend kurva hampir sama dan grafik laju perambatan retak untuk  $R = 0,3$  agak bergeser kekiri.

Pada gambar 14 grafik laju perambatan retak menunjukkan trend yang hampir sama, untuk  $R = 0,3$  kurvanya agak sedikit bergeser kekiri dibandingkan dengan  $R = 0,1$ . dimana dengan laju perambatan retak yang sama harga  $\Delta K$  yang terjadi lebih kecil.

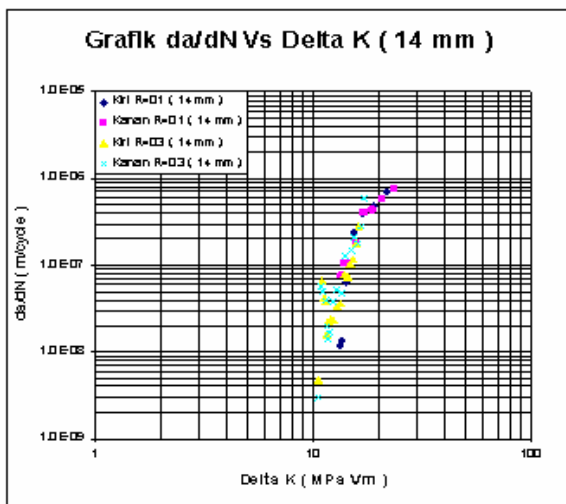
Dari gambar 15 terlihat adanya kemiringan kurva yang hampir sama, dan dengan rasio yang semakin besar ( $R = 0.3$ ) kurva agak bergeser ke kiri karena dengan laju perambatan retak yang sama factor intensitas tegangan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan rasio ( $R = 0,1$ ) Untuk  $R = 0.3$  dengan laju perambatan retak yang sama dengan  $R = 0.1$  dibutuhkan  $N$  ( cycle ) yang agak besar. Sedangkan bentuk grafik dengan jarak yang berbeda baik untuk  $R = 0.1$  dan  $R = 0.3$  secara garis besar hampir sama bentuknya.



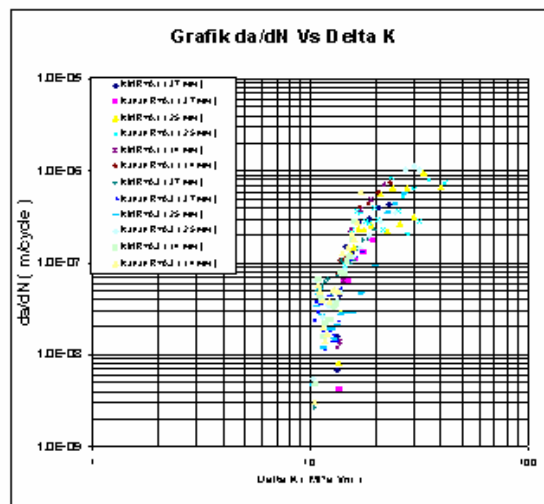
Gambar 12. Kurva perambatan retak untuk jarak sumbu lubang 37 mm dengan Rasio 0,1 dan R 0,3.



Gambar 13. Kurva perambatan retak untuk jarak sumbu lubang 25 mm dengan Rasio R 0,1 dan R 0,3



Gambar 14. Kurva perambatan retak untuk jarak sumbu lubang 14 mm dengan Rasio R 0,1 dan R 0,3.



Gambar 15. Kurva perambatan retak untuk variasi jarak sumbu lubang dengan R 0,1 dan R 0,3



### 5.3. Pembahasan Konstanta Paris

- Laju perambatan retak pada daerah Paris untuk jarak antar lubang 37 mm dengan rasio  $R = 0,1$  dan  $R = 0,3$  pada daerah  $1E-07$  sampai dengan  $1E-06$  untuk lubang kiri dengan  $R = 0,1$  dan  $R = 0,3$  laju perambatan retak hampir sama sedangkan untuk lubang kanan untuk  $R = 0,3$  laju perambatan retak agak lebih cepat dibandingkan dengan  $R = 0,1$  tetapi pada daerah  $1E-09$  sampai dengan  $1E-08$  yaitu daerah awal mulainya terjadinya retak untuk lubang sebelah kiri maupun lubang sebelah kanan dengan  $R = 0,1$  lebih lambat dibandingkan dengan harga  $R = 0,3$ .
- Laju perambatan retak pada daerah Paris untuk jarak antar lubang 25 mm dengan rasio  $R = 0,1$  dan  $R = 0,3$  pada daerah  $1E-07$  sampai dengan  $1E-06$  untuk lubang kiri perambatan retak dengan  $R = 0,1$  lebih cepat dibandingkan  $R = 0,3$  sedangkan untuk lubang kanan untuk  $R = 0,1$  laju perambatan retak agak lebih cepat dibandingkan dengan  $R = 0,3$ , tetapi pada daerah  $1E-09$  sampai dengan  $1E-08$  yaitu pada daerah awal mulai terjadinya retak untuk lubang sebelah kiri dengan  $R = 0,1$  lebih lambat dibandingkan dengan harga  $R = 0,3$ . Sedangkan untuk lubang sebelah kanan dengan  $R = 0,1$  sulit untuk dideteksi karena laju perambatan retaknya hanya didapatkan satu titik dibandingkan dengan harga  $R = 0,3$
- Laju perambatan retak pada daerah Paris untuk jarak antar lubang 14 mm dengan rasio  $R = 0,1$  dan  $R = 0,3$  pada daerah  $1E-07$  sampai dengan  $1E-06$  untuk lubang kiri maupun lubang sebelah kanan laju perambatan retak untuk  $R = 0,1$  lebih cepat dibandingkan dengan  $R = 0,3$  sedangkan pada daerah  $1E-09$  sampai dengan  $1E-08$  yaitu pada daerah awal mulai terjadinya retak untuk lubang sebelah kiri dengan  $R = 0,1$  lebih lambat dibandingkan dengan  $R = 0,3$  tetapi untuk lubang sebelah kanan dengan  $R = 0,1$  sulit untuk ditentukan karena hanya satu titik yang terdeteksi dibandingkan dengan  $R = 0,3$

## 6. Kesimpulan dan Saran

### 6.1 Kesimpulan

Dari hasil analisa data penelitian dapat disimpulkan bahwa:

1. Pola perubahan parameter jarak terhadap kurva perambatan retak:

- Jarak yang kecil antara dua lubang dan antara lubang dan tepi specimen akan menimbulkan distribusi tegangan yang besar, sehingga laju perambatan retak yang terjadi lebih besar
  - Pengujian Fatigue dengan rasio tegangan  $R = 0,3$ , siklus yang dibutuhkan untuk memulai terjadinya retak awal lebih banyak dibandingkan  $R = 0,1$ .
  - Dengan semakin besarnya rasio beban ( $R$ ), kurva semakin bergeser ke arah kiri dimana dengan factor intensitas tegangan ( $\Delta K$ ) yang sama laju perambatan retak ( $da/dN$ ) yang terjadi untuk  $R = 0,3$  lebih besar dibandingkan dengan  $R = 0,1$
2. Konstanta Paris dari uji fatigue Plat Aluminium 2024-T3 adalah sebagai berikut : Hasil penelitian dengan pendekatan dari ASTM 1994 menunjukkan harga pada range  $10^{-6}$  sampai  $10^{-7}$  ( daerah Paris ) harga  $da/dN$  :  
Untuk  $R = 0.3$  dengan:
    - Jarak antar lubang 37 mm:  
harga  $m = 1,663$  sampai  $2,526$  dan harga  $C = 1,19E-10$  sampai  $1,14E-09$
    - Jarak antar lubang 25 mm:  
harga  $m = 2,745$  sampai  $3,318$  dan harga  $C = 1,23E-11$  sampai  $6,68E-11$
    - Jarak antar lubang 14 mm:  
harga  $m = 7,051$  sampai  $11,176$  dan harga  $C = 8,29E-21$  sampai  $8,53E-16$

### 6.2. Saran

Sebagai saran yang dianjurkan untuk penelitian berikutnya adalah :

1. Saat pengujian dilakukan harus diperhatikan alat-alat yang mempengaruhi variable penelitian, misalnya penjepit, mikroskop, ketegak lurus dan dimensi specimen, sehingga laju perambatan retak untuk lubang kiri dan kanan akan sama.
2. Untuk mendapatkan laju perambatan retak fatigue pada daerah II yang optimal, perlu diperhatikan ratio beban yang dipergunakan sebaiknya dibawah  $0,5$  agar didapatkan data yang cukup banyak untuk mengidentifikasi daerah Paris dan waktu pengujian yang tidak terlalu lama

### Daftar Pustaka

1. Annual Book of ASTM Standards ( 1994 ), *Metal test Methods and Analytical Procedures*, 1916 Race Street Philadelphia.
2. Broek, David (1978) *Elementary Engineering Fracture Mechanics*, Battele, Columbus Laboratoris, Ohio, USA, Sijthoff & Noordhoff.

3. Edwalds, H.L. (1984 ) *Fracture Mechanics*, USA by Routledge, Chapman and Hal, Inc. 29 west 35<sup>th</sup> Street, New York.
4. ESDU ( Mei 1983 ) *Fatigue Fracture Mechanics Data*, Journal Aluminium Alloy Crack Propagation vol.2
5. Fuchs, H.O. and Stephen, RI, [1980], *Metal Fatigue in Engineering*, Toronto, A. Wiley Inter science Publication, John Wiley & Sons.
6. Hetzberg Richard, W. ( 1989 ), *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, Third Ed., John Wiley & Sons, Canada
7. Harris, C.E., Piascik, R.S., Newman Jr, J.C., *A Practical Engineering Approach To Predicting Fatigue Crack Growth in Riveted Lap Joints*, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, USA
8. Ichsan S. Putra, Harsono W., [1997], *Analysis and Predictive of Crack Starting from Open Hole*, *Journal Experimental Verification using K-gage* submitted for presentation in Experimental and Theoretical Mechanics 1997, 18 – 21 March 1997, Bandung
9. Ichsan S. Putra, Yuda P. and Tata C.D. [ 1986 ], *Stress Intensity Factor of Multiple Crack Emanating from Open Hole*, The Heds Seminar on Science and Technology 1986, 14 –16 November 1986.
10. Ichsan S. P., M. Djunaidi, [ 1997 ], *Experimental Verification of The Swift Link-up Criterion*, submitted for presentation in journal Experimental and Theoretical Mechanics, 18 – 21 March 1997, Bandung.
11. Khurmi, R. S., and Gupta, J.K., *A Texts Book of Machine Design*, Eurasia Publishing House, Ram Nagar, New Delhi.
12. Mochajan, M. et al [1991], *Tinjauan Aspek Perancangan dalam Pembuatan Struktur N259*, Journal Experimental Mechanics-91, ITB, Bandung.
13. Muh. Lutfi [ 1995], *Pengaruh Proses Peregang terhadap sifat Statik dan Fatigue Material 2024-T3 Cladding*, Journal Simposium Nasional, Departemen Pengembangan Bahan Logam, Pusat Pengembangan Metoda Teknologi dan Produksi, PT. IPTN Bandung.
14. Rustianto, B. et al [1984] Makalah Seminar Nasional Mekanika Bahan, *Karakteristik lelah sambungan keling lap-joint pada struktur fuselage pesawat terbang*, UPT LUK BPPT, Jakarta.
15. Schijve, J. [1982] *Lecture Notes on Fatigue*, Static Tensile Strength and Stress Corrosion of AirCraf Material and Structure, Delft University of Technology.
16. Schijve, J. [1992], *Multiple Site Damage Fatigue of Riveted Joint*, International Workshop on Structural Integrity Aging Airplane, Atlanta.
17. Suarsana, I K. [2000], *Crack Propagation of Aluminium 2024 T3 Plate with Hole Patterns on Fatigue Load of Constant Uniaxial Amplitude*, Thesis, Program Pasca Sarjana, ITS Surabaya.
18. Utama H. Padmadinata, Kirman, *Prediksi Perambatan Retak Pada Beban Amplitudo Bervariasi Sederhana Menggunakan Model Strip Yield NASA-FLAGRO*, UPT LUK BPPT, Jakarta.