

KARAKTERISTIK PERAMBATAN RETAK AL 2024 T3

Oleh :

Anwar^{*}, Bagus H. Jihad^{**}

Abstrak

Konstruksi yang kuat namun ringan merupakan jenis konstruksi yang diidamkan dalam proses rancang bangun konstruksi ringan. Untuk mencapai maksud tersebut berbagai upaya dilakukan, salah satunya adalah dengan menerapkan konsep "damage tolerance" dalam perencanaannya. Dalam perencanaan dengan konsep ini, diperlukan data-data mekanika kerusakan, misalnya data sifat perambatan retak. Untuk mendapatkan data tersebut, dilakukan penelitian dengan cara menguji sejumlah sampel dengan beban dinamis amplitudo konstan.

Hasil pengujian yang berupa data pengukuran panjang retak pada setiap interval siklus tertentu, kemudian dievaluasi untuk mendapatkan sifat perambatan retak yang digambarkan dalam bentuk diagram da/dN vs ΔK .

1. PENDAHULUAN

Dalam proses rancang bangun konstruksi ringan, seperti konstruksi pesawat terbang atau konstruksi lainnya, ditentukan beberapa kriteria dalam perencanaannya. Salah satu kriteria yang sangat menonjol dibandingkan dengan perencanaan konstruksi pada umumnya adalah bahwa konstruksi harus mempunyai kekuatan yang tinggi namun dengan bobot konstruksi yang relatif ringan.

Untuk memenuhi kriteria tersebut, para perancang harus berupaya menggunakan sebanyak mungkin jenis material yang mempunyai kekuatan tinggi dan bobot ringan atau yang sering disebut dengan istilah material yang mempunyai *strength to weight ratio* yang tinggi.

Seiring dengan penggunaan jenis material diatas, konsep evaluasi atau perencanaan konstruksi juga mengalami perkembangan dari konsep perencanaan dengan kriteria *fail safe* atau *safe life* ke perencanaan dengan kriteria *damage tolerance*. Tujuan utama dari perubahan konsep perencanaan tersebut juga tidak terlepas dari tujuan perencanaan diatas, yaitu dalam rangka mendapatkan konstruksi dengan bobot yang ringan.

Dengan konsep perencanaan *damage tolerance* maka memungkinkan struktur atau bagian-bagiannya mengalami kerusakan yang diakibatkan oleh pembebanan terutama jenis beban dinamis. Kerusakan dari suatu material akibat beban dinamis, tidak terjadi sekaligus sebagaimana kerusakan akibat beban statis. Kerusakan akibat beban dinamis atau yang sering disebut dengan *fatigue failure* (rusak lelah) terjadi secara bertahap,

^{*} Peneliti Bidang Pengujian Komponen dan Konstruksi - Lab. Uji Konstruksi BPP-Teknologi

^{**} Peneliti Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN)

yaitu dimulai dengan terjadinya retak awal (crack initiation) kemudian dilanjutkan dengan proses perambatan retak (crack propagation) dan diakhiri dengan kerusakan akibat beban statis.

Mekanika kerusakan (fracture mechanics) akibat pembebanan dinamis seperti diatas, umumnya dinyatakan dalam bentuk diagram yang menggambarkan hubungan antara laju perambatan retak (da/dN) dengan faktor intensitas tegangan (K). Untuk mendapatkan diagram tersebut, dilakukan dengan cara menguji sampel dengan beban dinamis. Dengan melakukan pengamatan selama pengujian berlangsung, dapat ditentukan hubungan antara pertambahan panjang retak terhadap jumlah siklus pembebanan. Dari hubungan tersebut selanjutnya dapat ditentukan diagram perambatan retak.

Makalah ini membahas prosedur pengujian perambatan retak serta analisis hasil pengujian guna mendapatkan diagram perambatan retak. Jenis material yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan aluminium berkekuatan tinggi (high strength aluminium alloy) AL 2024 T3, yaitu jenis material yang banyak digunakan dalam rancang bangun konstruksi ringan.

2. MEKANIKA PATAH LELAH

Kekuatan lelah suatu konstruksi yang dinyatakan dengan besaran umur lelah, dapat dibagi menjadi 2 (dua) periode, pertama adalah umur lelah pada periode hingga terjadinya retak awal (crack initiation period), kedua adalah umur lelah pada periode perambatan retak (crack propagation period). Untuk menganalisis atau memprediksi umur lelah pada periode pertama, yaitu periode hingga terjadinya retak awal, digunakan pendekatan hubungan tegangan dengan umur lelah yang biasanya digambarkan dalam bentuk diagram Wohler atau diagram High. Sedangkan untuk menganalisis umur lelah pada periode kedua digunakan pendekatan mekanika kerusakan (fracture mechanics).

Perbedaan utama dari kedua metode analisis diatas, adalah bahwa untuk hubungan tegangan dengan umur lelah (analisis hingga terjadi retak awal), besaran tegangan yang digunakan adalah tegangan normal (normal stress). Sedangkan untuk pendekatan mekanika kerusakan besaran tegangan adalah berupa tegangan lokal (local stress) pada daerah dekat ujung retakan.

Tegangan lokal pada daerah ujung retakan yang dinyatakan dengan besaran faktor intensitas tegangan (K), merupakan faktor penting dalam menganalisis mekanika kerusakan, khususnya analisis perambatan retak. Faktor intensitas tegangan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti jenis beban, ukuran, jenis dan bentuk retakan, bentuk benda uji, dan lain-lain. Secara umum harga faktor intensitas tegangan dapat dinyatakan dengan persamaan,

$$K = f(g) \cdot \sigma \cdot \sqrt{\pi \cdot 2a} \quad (2.1)$$

dimana :
 σ = tegangan normal
 $2a$ = panjang retak
 $f(g)$ = faktor koreksi sesuai dengan bentuk benda uji dan ukuran retak

Untuk benda uji berupa pelat dengan lebar terbatas dan terdapat retakan ditengan seperti yang digunakan dalam penelitian ini, besar faktor koreksi $f(g)$ adalah,

$$f(g) = \sqrt{\left(\sec\left(\frac{\pi \cdot 2a}{b}\right)\right)} \quad (2.2)$$

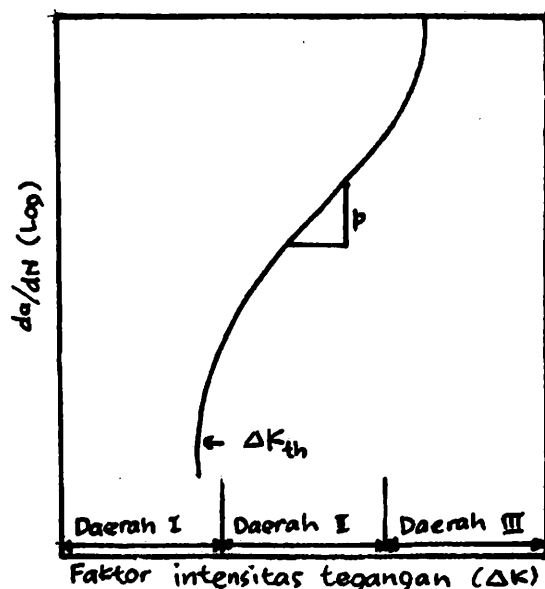
...

dimana b = lebar pelat, sehingga besar faktor intensitas tegangan untuk benda uji berupa pelat dengan lebar b dan panjang retak $2a$ adalah:

$$K = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot \sqrt{\left(\sec\left(\frac{\pi \cdot 2a}{b}\right)\right)} \quad (2.3)$$

Hubungan antara faktor intensitas tegangan terhadap laju perambatan retak yang digambarkan dalam bentuk diagram da/dN vs ΔK , pada umumnya mempunyai pola seperti ditunjukkan pada gambar 1. Dari gambar tersebut terlihat bahwa laju perambatan retak dapat dibagi menjadi 3 (tiga) daerah. Daerah I adalah daerah mulai terjadinya perambatan retak dari retak awal sampai daerah dengan laju perambatan retak yang stabil dan kurva menjadi linier. Daerah ini dimulai dari ΔK_{th} , yaitu batas dimana ΔK lebih kecil dari ΔK_{th} maka retak tidak akan merambat. Pada daerah ini perambatan retak relatif lambat dan bahkan dapat dikatakan tidak terjadi perambatan retak. Ciri lain dari daerah I ini adalah terlihat dari bentuk permukaan patahan (analisis fraktography) yang berupa patahan dengan butiran yang sangat halus serta arah patahan adalah tegak lurus terhadap sumbu pembebanan atau dikenal dengan istilah bentuk patah tarik (tension mode).

Daerah II atau yang sering disebut dengan daerah perambatan retak, retak akan merambat dengan laju perambatan yang stabil, sehingga kurva perambatan retak berupa garis linier. Bentuk permukaan patahan pada daerah ini adalah sama dengan bentuk patahan ada daerah I, yaitu bentuk patah tarik, namun umuran butir permukaan patahannya lebih kasar dibandingkan bentuk patahan pada daerah I.



Gambar 1. Bentuk diagram perambatan retak (da/dN vs ΔK).

Daerah III merupakan daerah dengan laju perambatan yang tidak stabil dan garis perambatan menjadi tidak linier. Apabila pembebanan terus dilanjutkan, hingga nilai faktor intensitas tegangan (K) mencapai harga *fracture toughness* (K_c) dari material, maka benda uji akan patah secara statis. Berlainan dengan bentuk patahan pada daerah I dan II, pada daerah III patahan berupa patah geser (shear mode), yaitu bentuk patahan dengan butiran yang kasar dan arah patahan tidak tegak lurus terhadap sumbu pembebanan.

Hubungan antara laju perambatan retak (da/dN) dengan faktor intensitas tegangan, menurut Paris dinyatakan dengan,

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (2.4)$$

dimana C dan n adalah konstanta yang tergantung dari jenis material.

Persamaan diatas merupakan persamaan linier, sehingga persamaan Paris hanya berlaku pada daerah II, yaitu daerah perambatan retak. Apabila analisis dilakukan dengan memasukkan konsep *Crack Opening Displacement* (COD), maka persamaan 2.4 dapat dituliskan,

$$da/dN = \frac{(C(\Delta K)^n)}{E \cdot \sigma_{ys}} \quad (2.5)$$

dimana : E = modulus elastisitas
 σ_{ys} = tegangan luluh dinamis (cyclic yield stress).

Persamaan perambatan retak dengan memasukkan faktor ketangguhan material (fracture toughness, K_c) dikenalkan oleh Forman, yaitu :

$$da/dN = \frac{(C(\Delta K)^n)}{((1-R) \cdot K_c - \Delta K)} \quad (2.6)$$

atau,

$$da/dN = \frac{(C(\Delta K)^n)}{((1-R) \cdot (K_c - K_{max}))} \quad (2.7)$$

Persamaan 2.7, telah mencakup nilai ketangguhan material, sehingga persamaan tersebut selain berlaku untuk daerah II, juga berlaku untuk daerah III.

3. METODE PENELITIAN

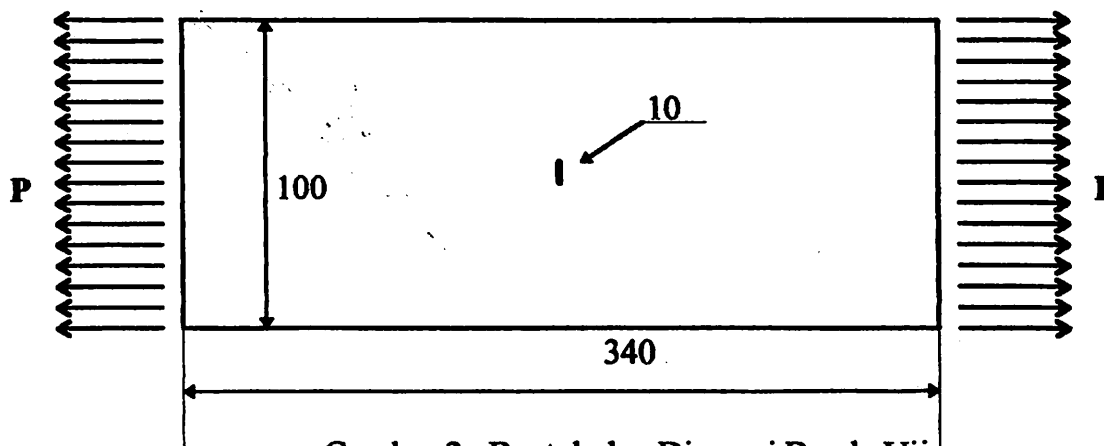
3.1 Benda Uji

Pada penelitian ini dipilih benda uji dari jenis material paduan aluminium berkekuatan tinggi AL 2024 T3. Pemilihan ini didasarkan bahwa material tersebut merupakan jenis material yang banyak digunakan dalam rancang bangun konstruksi ringan. Konstruksi mekanis serta komposisi kimia dari benda uji ini diberikan pada tabel 3-1.

Tabel 3-1. Karakteristik mekanis dan komposisi kimia benda uji.

Karakteristik mekanik (N/mm ²)			Komposisi Kimia (%)								
σ_{ult}	$\sigma_{0,2}$	E	Al	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Cr	lain
470	335	6,1.E4	93	3.8	1.2	0.6	0.5	0.5	0.25	0.1	0.05

Bentuk benda uji diperlihatkan pada gambar 2, berupa pelat dengan panjang 340 mm, lebar 100 mm dan tebal 5mm. Dibagian tengah benda uji dibuat retak awal (crack initiator) dengan panjang 10 mm. Bentuk benda uji ini dikenal dengan istilah *Center Crack tension Specimen (CCT-Specimen)*.



Gambar 2. Bentuk dan Dimensi Benda Uji.

3.2 Beban Uji

Pada penelitian ini, benda uji dibebani dengan jenis beban dinamis amplitudo konstan (constant amplitude fatigue testing). Untuk mengetahui pengaruh parameter beban uji seperti tegangan maksimum dan perbandingan tegangan, maka beban uji dilakukan berbagai variasi beban uji. Variasi beban uji tersebut terlihat pada tabel berikut.

Tabel 3-2. Beban Uji

No.	Beban Uji		
	σ_{max} (N/mm ²)	σ_{min} (N/mm ²)	R
1.	100	80	0.8
2.	84	42	0.5
3.	100	30	0.3
4.	140	42	0.3

3.3 Peralatan dan Metode Pengujian

Benda uji dibuat dari material dasar berupa lembaran pelat dengan cara pemotongan diatur sedemikian rupa sehingga arah beban uji searah dengan arah pengerolan. Selanjutnya dibuat retak awal dengan cara dibor dengan diameter lubang 3 mm, dan kemudian digergaji dengan tebal 1 mm (tebal retak) dan panjang 2 mm ke arah kiri dan kanan, sehingga total panjang retak awal menjadi 10 mm. Untuk memudahkan dalam melakukan pengamatan dan pengukuran panjang retak, maka pada bagian arah retakan dibersihkan dan dipoles. Kemudian benda uji dipasang pada mesin uji Pulzer Type PVQ 250 dengan kapasitas 250 kN. Pemasangan benda uji pada mesin uji adalah dengan cara dijepit selebar benda uji, sehingga beban yang diterima benda uji merupakan beban terbagi rata. Selanjutnya benda uji dibebani dengan besar beban sesuai tabel 3-2 diatas.

Untuk mengetahui pertambahan panjang retak, maka selama pengujian berlangsung, dilakukan pengukuran panjang retak. Pengukuran dilakukan setiap interval jumlah siklus pembebanan tertentu, dengan menggunakan mikroskop yang mempunyai pembesaran 30 kali serta dilengkapi dengan skala pengukur panjang dengan ketelitian 0,01 mm.

Setelah benda uji patah, dilakukan pemeriksaan permukaan patahan dan pengukuran panang masing-masing jenis patahan.

4. HASIL UJI DAN PEMBAHASAN

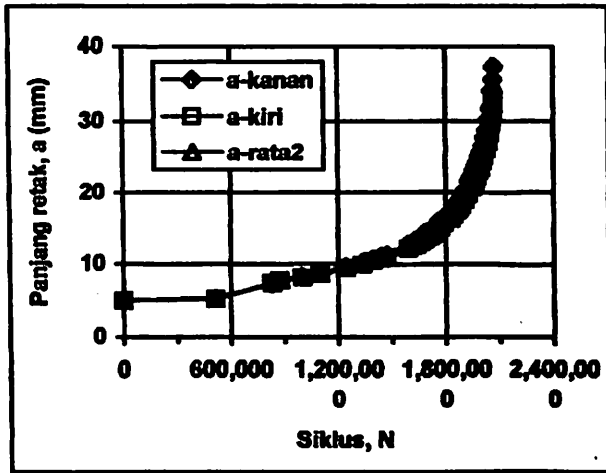
4.1 Hasil Uji

Hasil penelitian berupa data hasil pengukuran panjang retak setiap interval siklus pembebanan tertentu, untuk keempat jenis variasi beban uji disajikan dalam bentuk diagram panjang retak (a) sebagai fungsi dari siklus pembebanan (N). Gambar 3, 4, 5 dan 6 memperlihatkan diagram hasil pengujian tersebut. Dalam diagram tersebut digambarkan data hasil pengukuran panjang retak yang diukur dari sumbu ke sisi kiri (a-kiri), ke sisi kanan (a-kanan) serta panjang retak rata-rata dari kedua sisi tersebut (a-rata²). Untuk keperluan evaluasi guna pembuatan diagram perambatan retak, digunakan panjang retak rata-rata (a-rata²).

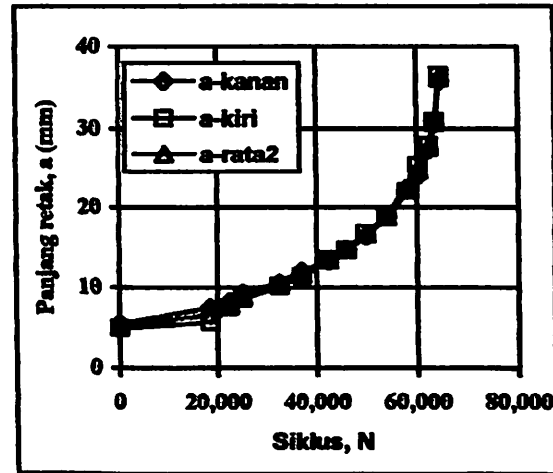
Data hasil pengujian disajikan pada tabel 4-1, 4-2, 4-3 dan 4-4.

4.2 Pembahasan

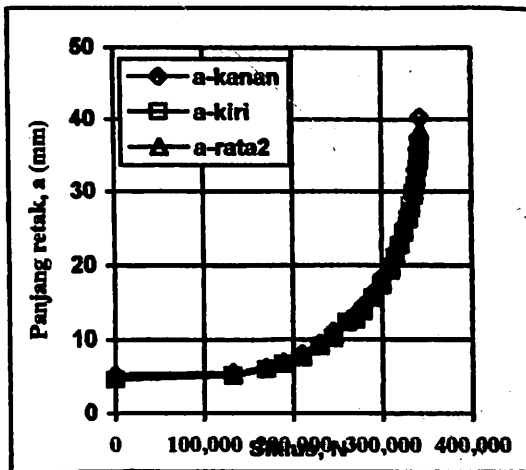
Dari data yang diperoleh dan disajikan pada tabel 4-1, 4-2, 4-3 dan 4-4, dilakukan perhitungan dan diperoleh hasil yang disajikan pada tabel 4-5, 4-6, 4-7 dan 4-8.



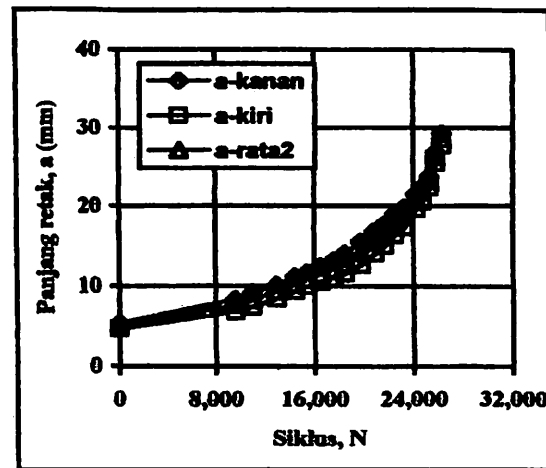
Gambar 3. Diagram panjang retak (a) Vs siklus (N), $\sigma_{\max} = 100 \text{ N/mm}^2$; $R = 0,8$.



Gambar 5. Diagram panjang retak (a) Vs siklus (N), $\sigma_{\max} = 100 \text{ N/mm}^2$; $R = 0,3$.



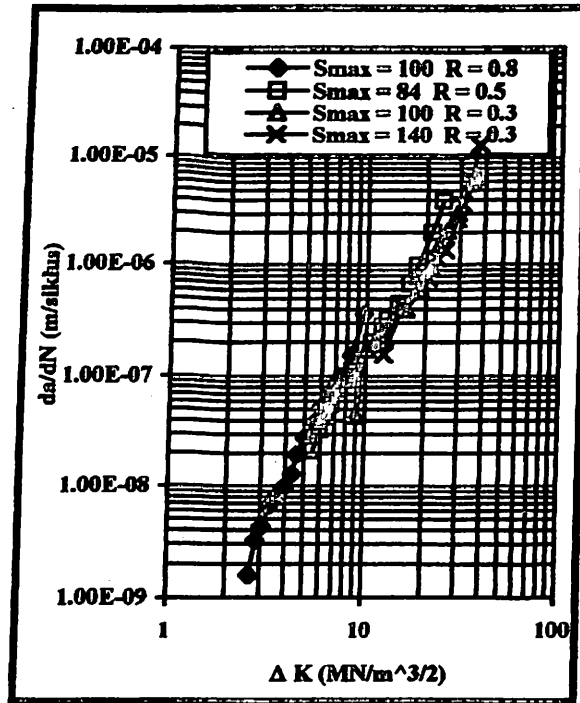
Gambar 4. Diagram panjang retak (a) Vs siklus (N), $\sigma_{\max} = 84 \text{ N/mm}^2$; $R = 0,5$.



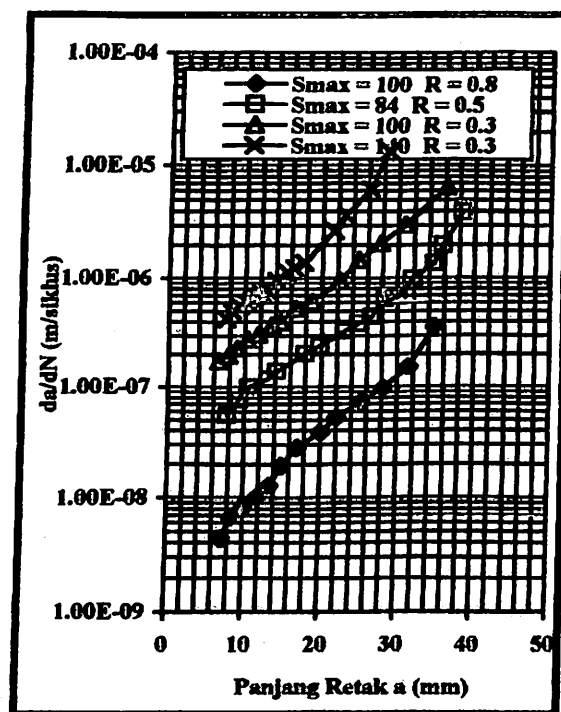
Gambar 6. Diagram panjang retak (a) Vs siklus (N), $\sigma_{\max} = 140 \text{ N/mm}^2$; $R = 0,3$.

Dari keempat diagram tersebut terlihat bahwa mulai terjadinya retak akibat pembebanan, diperlukan jumlah siklus pembebanan yang relatif besar. Hal ini disebabkan karena tebal retak awal (retak buatan) masih relatif tinggi (sekitar 1 mm) dibandingkan dengan tebal retak akibat pembebanan. Sehingga antara retak buatan dengan retak akibat pembebanan masih terjadi *crack initiation* akibat pembebanan. Pengamatan terjadinya *crack initiation* tersebut sangat sulit dilakukan, sehingga data

yang terukur adalah data setelah melewati periode crack initiation. Dengan demikian untuk keperluan evaluasi diagram perambatan retak, digunakan data setelah terjadinya perambatan retak. Akibatnya diagram perambatan retak yang diperoleh adalah diagram yang dimulai pada periode perambatan retak (daerah II hingga daerah III).



Gambar 7. Diagram perambatan retak (da/dN Vs ΔK).



Gambar 8. Diagram perambatan retak (da/dN Vs a).

5. KESIMPULAN

Dari pembahasan diatas, seta grafik yang diperoleh, dapat disimpulkan:

1. Mulai terjadinya retak akibat pembebanan dibutuhkan jumlah siklus pembebanan yang relatif besar. Untuk $\sigma_{\max} = 100 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,8$ dibutuhkan ± 600.000 siklus; $\sigma_{\max} = 100 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,3$ dibutuhkan ± 20.000 siklus, $\sigma_{\max} = 140 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,3$ dibutuhkan ± 10.000 siklus dan untuk $\sigma_{\max} = 84 \text{ N/mm}^2$, $R = 0,5$ dibutuhkan ± 120.000 siklus.
2. Data yang terukur adalah data setelah melewati periode crack initiation, hal ini diakibatkan oleh tebal retak awal yang masih tinggi.
3. Periode perambatan retak yang diperoleh berada pada daerah II dan daerah III dari diagram perambatan retak lelah logam.

6. DAFTAR PUSTAKA

Bannantine, Julie A., 1990, **Fundamentals of Metal Fatigue Analysis**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.

Dieter, George E., 1986, **Mechanical Metallurgy**, 3rd Edition, McGraw-Hill, Inc., New York.

Santika, Putu, 1985, **Karakteristik Pengujian Kelelahan Material**, Laboratorium Uji Konstruksi, BPPT, PUSPIPTEK, Serpong.

Surdia, Tata; Saito, Shinroku, 1985, **Pengetahuan Bahan Teknik**, Pradnya Paramita, Jakarta.

TABEL 4-1 HASIL PENGUJIAN PERAMBATAN RETAK BENDA UJI NO. 1Tegangan Maksimum, σ_{\max} = 100 N/mm²Tegangan Minimum, σ_{\min} = 80 N/mm²

Rasio Tegangan, R = 0.8

Dimensi : Tebal, t = 5mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	Siklus	a-kanan (mm)	a-kiri (mm)	a-rata ² (mm)	Keterangan
0	0	5,00	5,00	5,000	Retak awal
1	515200	5,30	5,20	5,250	
2	828300	7,30	7,40	7,350	
3	875000	7,74	7,80	7,770	
4	1000000	8,30	8,19	8,245	
5	1100000	8,70	8,65	8,675	
6	1242000	9,67	9,48	9,575	
7	1335000	10,31	9,95	10,130	
8	1395000	10,80	10,43	10,615	
9	1440000	11,16	10,76	10,960	
10	1470500	11,27	11,00	11,135	
11	1592000	12,78	12,12	12,450	
12	1617000	13,00	12,45	12,725	
13	1640000	13,40	12,69	13,045	
14	1658000	13,71	13,00	13,355	
15	1670000	13,95	13,24	13,595	
16	1685000	14,35	13,41	13,880	
17	1700000	14,50	13,68	14,090	
18	1715100	14,67	13,79	14,230	
19	1730000	14,95	14,00	14,475	
20	1746000	15,28	14,42	14,850	
21	1762000	16,00	14,81	15,405	
22	1775100	16,15	15,00	15,575	
23	1730000	16,34	15,60	15,970	
24	1829300	17,37	16,18	16,775	
25	1845000	18,00	16,80	17,400	
26	1861000	18,48	17,42	17,950	
27	1875000	18,90	17,73	18,315	
28	1890000	19,45	18,15	18,800	
29	1908500	20,36	18,92	19,640	
30	1928500	21,59	19,76	20,675	
31	1938000	21,91	21,12	21,515	
32	1948000	22,55	20,67	21,610	
33	1958000	23,15	21,05	22,100	
34	1968000	13,70	21,65	22,675	
35	1978000	24,31	22,33	23,320	
36	1988000	25,14	23,05	24,095	
37	1998000	25,84	23,50	24,670	
38	2008000	26,73	24,35	25,540	
39	2018000	27,75	25,10	26,425	
40	2028000	28,75	26,10	27,425	
41	2038000	30,24	27,15	28,695	
42	2048000	31,76	28,35	30,055	

43	2058000	34,05	29,83	31,940	
44	2064000	35,61	31,08	33,345	
45	2068000	37,29	32,32	34,805	
46	2070900				patah

TABEL 4-2 HASIL PENGUJIAN PERAMBATAN RETAK BENDA UJI NO. 2

Tegangan Maksimum, σ_{max} = 84 N/mm²

Tegangan Minimum, σ_{min} = 42 N/mm²

Rasio Tegangan, R = 0.5

Dimensi : Tebal, t = 5mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	Siklus	a-kanan (mm)	a-kiri (mm)	a-rata ² (mm)	Keterangan
1.	0	5,27	4,63	4,950	Retak awal
2.	132600	5,63	5,18	5,405	
3.	170000	6,25	6,01	6,130	
4.	190000	6,96	6,69	6,825	
5.	210000	8,11	7,51	7,810	
6.	230000	9,48	9,06	9,270	
7.	245000	11,04	10,14	10,590	
8.	260000	12,33	12,28	12,305	
9.	270000	13,47	12,62	13,045	
10.	279000	14,61	13,66	14,135	
11.	290000	16,31	15,58	15,945	
12.	300000	18,41	17,33	17,870	
13.	305000	10,01	18,24	14,125	
14.	310000	20,24	19,32	19,780	
15.	315000	21,78	21,01	21,395	
16.	320000	23,21	22,67	22,940	
17.	325000	25,23	24,32	24,775	
18.	330000	27,01	26,12	26,565	
19.	333000	28,95	27,63	28,290	
20.	336000	30,62	29,39	30,005	
21.	339000	33,01	30,85	31,930	
22.	341000	35,87	33,21	34,540	
23.	342000	37,41	34,15	35,780	
24.	343000	40,31	36,27	38,290	
25.	343500				Patah

TABEL 4-3 HASIL PENGUJIAN PERAMBATAN RETAK BENDA UJI NO. 3Tegangan Maksimum, σ_{max} = 100 N/mm²Tegangan Minimum, σ_{min} = 30 N/mm²

Rasio Tegangan, R = 0.3

Dimensi : Tebal, t = 5mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	Siklus	a-kanan (mm)	a-kiri (mm)	a-rata ² (mm)	Keterangan
1.	0	5,49	4,94	5,215	Retak Awal
2.	18500	7,51	5,72	6,615	
3.	22500	8,28	7,46	7,870	
4.	27500	9,33	8,59	8,960	
5.	32500	10,58	10,13	10,355	
6.	37500	12,05	11,37	11,710	
7.	42000	13,31	13,48	13,395	
8.	46000	14,71	14,61	14,660	
9.	50000	16,36	16,71	16,535	
10.	54000	18,81	18,71	18,760	
11.	58000	22,51	22,11	22,310	
12.	60300	24,08	15,41	24,745	
13.	62300	27,27	27,98	27,625	
14.	63600	30,61	30,94	30,775	
15.	64500	35,77	36,51	36,140	
16.	64800				Patah

TABEL 4-4 HASIL PENGUJIAN PERAMBATAN RETAK BENDA UJI NO. 4Tegangan Maksimum, σ_{max} = 140 N/mm²Tegangan Minimum, σ_{min} = 42 N/mm²

Rasio Tegangan, R = 0.3

Dimensi : Tebal, t = 5mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	Siklus	a-kanan (mm)	a-kiri (mm)	a-rata ² (mm)	Keterangan
1.	0	5,36	4,69	5,025	Retak awal
2.	9600	8,30	6,85	7,575	
3.	11000	9,14	7,41	8,275	
4.	13000	10,10	8,48	9,290	
5.	14500	11,15	9,37	10,260	
6.	15500	11,58	10,00	10,790	
7.	16500	12,41	10,49	11,450	
8.	17600	13,14	11,00	12,070	
9.	18500	14,00	11,56	12,780	
10.	19800	15,42	12,57	13,995	
11.	20900	16,72	14,00	15,360	
12.	21700	17,60	15,00	16,300	
13.	22500	19,00	16,26	17,630	
14.	23300	19,82	17,24	18,530	
15.	24200	21,44	19,57	20,505	

16.	24700	22,36	20,57	21,465
17.	25300	23,77	22,37	23,070
18.	25800	26,83	25,44	26,135
19.	26300	29,31	27,70	28,505
20.	26700			Patah

Tabel 4-5. PERHITUNGAN HASIL PENGUJIAN BENDA UJI NO.1

Tegangan Maks (σ_{maks}) : 100 N/mm²
Tegangan Min (σ_{min}) : 80 N/mm²
Perbandingan Tegangan (R) : 0.8
Dimensi : tebal, t = 5 mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	a (mm)	ΔK (MN/m ^{3/2})	ΔK_{eff} (MN/m ^{3/2})	da/dN (m/siklus)
1.	5.450	2.636	2.636	1.59E-09
2.	6.320	2.845	2.845	3.22E-09
3.	7.240	3.055	3.055	4.34E-09
4.	8.420	3.310	3.310	6.74E-09
5.	10.110	3.656	3.656	8.23E-09
6.	11.790	3.986	3.986	1.04E-08
7.	13.470	4.307	4.307	1.30E-08
8.	14.950	4.589	4.589	1.95E-08
9.	17.050	4.990	4.990	2.84E-08
10.	20.000	5.572	5.572	3.87E-08
11.	22.110	6.011	6.011	5.31E-08
12.	25.260	6.725	6.752	7.37E-08
13.	28.210	7.484	7.484	9.73E-08
14.	31.370	8.442	8.442	1.54E-07
15.	34.740	9.721	9.721	3.61E-07

Tabel 4-6. PERHITUNGAN HASIL PENGUJIAN BENDA UJI NO.2

Tegangan Maks (σ_{maks}) : 84 N/mm²
Tegangan Min (σ_{min}) : 42 N/mm²
Perbandingan Tegangan (R) : 0.5
Dimensi : tebal, t = 5 mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	a (mm)	ΔK (MN/m ^{3/2})	ΔK_{eff} (MN/m ^{3/2})	da/dN (m/siklus)
1.	5.405	5.511	4.798	2.13E-08
2.	6.130	5.882	5.120	3.32E-08
3.	6.825	6.220	5.415	4.29E-08
4.	7.810	6.678	5.813	5.56E-08
5.	9.270	7.321	6.373	7.63E-08
6.	10.590	7.878	6.857	1.00E-07
7.	12.305	8.578	7.467	1.12E-07
8.	13.045	8.875	7.726	1.19E-07
9.	14.135	9.311	8.105	1.40E-07
10.	15.945	10.034	8.734	1.65E-07

11.	17.870	10.812	9.412	2.03E-07
12.	14.125	9.307	8.102	2.18E-07
13.	19.780	11.607	10.104	2.38E-07
14.	21.395	12.305	10.711	2.82E-07
15.	22.940	13.002	11.318	3.27E-07
16.	24.775	13.879	12.082	3.84E-07
17.	26.565	14.799	12.883	4.42E-07
18.	28.290	15.762	13.721	6.45E-07
19.	30.005	16.811	14.634	6.83E-07
20.	31.930	18.129	15.781	9.88E-07
21.	34.540	20.234	17.613	1.37E-06
22.	35.780	21.405	18.633	1.99E-06
23.	38.290	24.265	21.123	3.97E-06

Tabel 4-7. PERHITUNGAN HASIL PENGUJIAN BENDA UJI NO.3

Tegangan Maks (σ_{maks}) : 100 N/mm²
Tegangan Min (σ_{min}) : 30 N/mm²
Perbandingan Tegangan (R) : 0.3
Dimensi : tebal, t = 5 mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	a (mm)	ΔK (MN/m ^{3/2})	ΔK_{off} (MN/m ^{3/2})	da/dN (m/siklus)
1.	5.215	9.018	7.568	4.46E-08
2.	6.615	10.199	8.559	1.75E-07
3.	7.870	11.175	9.378	1.96E-07
4.	8.960	11.979	10.053	2.27E-07
5.	10.355	12.967	10.882	2.75E-07
6.	11.710	13.895	11.661	3.07E-07
7.	13.395	15.026	12.610	3.74E-07
8.	14.660	15.867	13.316	4.01E-07
9.	16.535	17.118	14.365	5.30E-07
10.	18.760	18.632	15.636	6.11E-07
11.	22.310	21.190	17.782	9.46E-07
12.	24.745	23.108	19.392	1.48E-06
13.	27.625	25.635	21.513	2.07E-06
14.	30.775	28.865	24.223	3.04E-06
15.	36.140	36.286	30.286	6.56E-06

Tabel 4-8. PERHITUNGAN HASIL PENGUJIAN BENDA UJI NO.4

Tegangan Maks (σ_{maks}) : 140 N/mm²
Tegangan Min (σ_{min}) : 42 N/mm²
Perbandingan Tegangan (R) : 0.3
Dimensi : tebal, t = 5 mm; lebar, l = 100 mm; luas, A = 500 mm²

No.	a (mm)	ΔK (MN/m ^{3/2})	ΔK_{eff} (MN/m ^{3/2})	da/dN (m/siklus)
1.	5.025	12.387	10.395	1.58E-07
2.	7.575	15.331	12.866	4.27E-07
3.	8.275	16.069	13.485	4.99E-07
4.	9.290	17.103	14.353	5.56E-07
5.	10.260	18.061	15.157	5.99E-07
6.	10.790	18.574	15.587	6.38E-07
7.	11.450	19.206	16.118	6.90E-07
8.	12.070	19.794	16.611	7.29E-07
9.	12.780	20.461	17.171	7.78E-07
10.	13.995	21.595	18.123	9.57E-07
11.	15.360	22.866	19.189	1.14E-07
12.	16.300	23.744	19.926	1.25E-07
13.	17.630	25.000	20.980	1.39E-07
14.	18.530	25.862	21.704	1.68E-07
15.	20.505	27.806	23.335	2.18E-07
16.	21.465	28.783	24.155	2.67E-06
17.	23.070	30.479	25.578	3.69E-06
18.	26.135	34.001	28.533	6.23E-06
19.	28.505	37.072	31.111	1.33E-05