

15.049/H/02



**TUGAS AKHIR
(KP 1701)**

**"PENGARUH VARIABEL-VARIABEL PEMBEBANAN
TERHADAP PARAMETER-PARAMETER RETARDASI
PENJALARAN RETAK FATIGUE AKIBAT
KELEBIHAN BEBAN (OVERLOAD) PADA MATERIAL
HIGH TENSILE"**



RSPe
623.82
Sim
P-1
2001

Oleh :

SAUT SIMANJUNTAK
NRP. 4195 100 045

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2001**

PERPUSTAKAAN	
Tgl. Tampil	6/2/2001
Telp.	H
No. Agenda I.R.P.	L.2882

LEMBAR PENGESAHAN

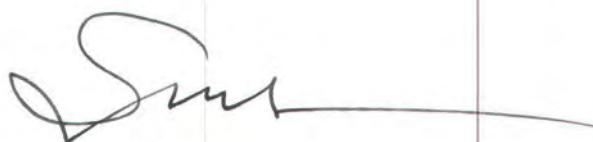
**“PENGARUH VARIABEL-VARIABEL PEMBEBANAN
TERHADAP PARAMETER-PARAMETER RETARDASI
PENJALARAN RETAK FATIGUE AKIBAT KELEBIHAN BEBAN
(OVERLOAD) PADA MATERIAL HIGH TENSILE”**

Laporan ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada :

**Jurusen Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya**

Surabaya, Januari 2001

Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing Tugas Akhir



Ir. Soeweify, M.Eng

NIP : 130 368 597

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER (ITS)

ABSTRAK

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

Sarjana Teknik (S1)

PENGARUH VARIABEL-VARIABEL PEMBEBANAN TERHADAP
PARAMETER-PARAMETER RETARDASI PENJALARAN RETAK
FATIGUE AKIBAT KELEBIHAN BEBAN (OVERLOAD) PADA
MATERIAL HIGH TENSILE

Oleh : Saut Simanjuntak

Pembimbing : Ir Soeweify, M.Eng

Penjalaran retak fatigue (kelelahan) struktur diketahui mengalami retardasi atau perlambatan pada penggunaan kelebihan beban (overload), pada struktur yang sebelumnya mengalami pembebahan amplitudo konstan. Retardasi dapat diketahui melalui jumlah seluruh putaran yang diperlambat (N_D) dan panjang retak yang diperlambat (a_D). Variabel-variabel pembebahan R (perbandingan tengangan minimum dengan tegangan maksimum), dan R_{OL} (perbandingan tegangan overload terhadap tegangan maksimum pada pembebahan amplitudo konstan) memberikan peranan penting mempengaruhi perilaku parameter-parameter retardasi N_D dan a_D . Dalam penulisan tugas akhir ini diharapkan dapat menyelidiki pengaruh variabel-variabel pembebahan R , R_{OL} yang berbeda terhadap parameter-parameter retardasi (N_D , a_D) penjalaran retak fatigue material High Tensile A 36.

Percobaan dilakukan dengan menggunakan mesin uji fatigue, dengan type retak spesimen adalah compact tension, C(T). Perpanjangan retak diukur selama putaran pembebahan pada saat amplitudo konstan dan pada saat keadaan overload dan hasilnya didapatkan laju penjalaran retak da/dN dari beberapa harga R , R_{OL} dan dengan menggunakan rumus empiris cacat tepi yang disyaratkan ASTM digunakan untuk mendapatkan rentang stress intensity faktor ΔK . Kemudian dibuat grafik antara da/dN terhadap ΔK . Hasil analisa percobaan menunjukkan bahwa penggunaan kelebihan beban (overload) pada pembebahan amplitudo konstan, menyebabkan retardasi (perlambatan) penjalaran retak fatigue pada material high tensile A 36.

SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY (ITS)

ABSTRACT

FACULTY OF MARINE TECHNOLOGY
DEPARTEMENT OF NAVAL ARCHITECTURE AND SHIPBUILDING

Degree in Engineering (S1)

THE EFFECT OF LOADING VARIABLES ON OVERLOAD INDUCED FATIGUE
CRACK GROWTH RETARDATION PARAMETERS ON MATERIAL
HIGH TENSILE

By : Saut Simanjuntak

Supervisor : Ir. Soeweify, M.Eng

Fatigue crack growth on the structure as known experienced retardation on using of overload that have experienced constant amplitude loading. Retardation can known by the number of whole delayed cycle (N_D) and cracking length that delayed (a_D). Loading variables R (ratio of minimum stress to maximum stress), and R_{OL} (ratio of overload stress to maximum stress on constant amplitude loading) given important affected to retardation parameters N_D and a_D behavior. These final project have ability-investigated influence of load variables R , R_{OL} , to parameters of retardation of fatigue crack growth (N_D , a_D) on material High Tensile A36.

This experiment performed on the fatigue test machine, with specimen crack type is compact tension, CT. The addition of growth cracking length measuring during loading cycle at constant amplitude and at overloading condition. The result is rate of crack growth da/dN from various value R , R_{OL} and empirical formulation of crack edge from ASTM requirement used to get range of stress intensity factor ΔK . Then graphics between da/dN to ΔK are picturing. The result of experiment analysis that refers to using of overload on the constant amplitude loading, cause of retardation of fatigue cracking growth on the material high tensile A36.

KATA PENGANTAR

Berkat rahmat Tuhan Yang Maha Esa, laporan Tugas Akhir berjudul “*Pengaruh Variabel-Variabel Pembebanan Terhadap Parameter-Parameter Retardasi Penjalaran Retak Fatigue Akibat Kelebihan Beban (Overload) Pada Material High Tensile*” telah dapat diselesaikan .

Penelitian Tugas Akhir ini merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di ITS Surabaya. Adapun bobot Tugas Akhir ini menurut kurikulum mempunyai bobot 5 satuan kredit semester (sks).

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih belum sempurna. Oleh karena itu segala kritik dan saran dari semua pihak dengan senang hati akan penulis terima. Dan pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Djauhar Marfaat, MSc, Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Perkapalan.
2. Bapak Ir. Soeweify, M.Eng selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Mahardjo Wartono selaku Dosen Wali.
4. Bapak Ir. IK. Ariya Pria Utama, M.Eng, Ph.D selaku Sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan.
5. Kedua orang tua, serta abang Martahan, kakak Marlina dan adik-adik saya Jepri, Anggiat, Liani yang telah memberikan semangat, dorongan, dan doa dalam menyelesaikan studi.
6. Teman – teman angkatan '95 (P35), khususnya Hot Pungka Purba (P'35), Nahason Patadungan (P'35), seta Toga R. Sitompul S.T (alumni T. Perkapalan).
7. B. Gunawan Situmorang (T.Kimia'96) yang memberikan fasilitas dalam penulisan.
8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dan tidak dapat disebut satu persatu.

Akhirnya penulis berharap semoga tulisan penelitian Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua, Amin.

Surabaya, Januari 2001

Penulis

DAFTAR ISI

Lembar Pengesahan	
Abstrak	i
Kata Pengantar	iii
Daftar Isi	iv
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	ix
Daftar Grafik	xi
Daftar Notasi	xii
BAB I . PENDAHULUAN	
I.1 LATAR BELAKANG	I-1
I.2 METODOLOGI PEMBAHASAN	I-3
I.3 TUJUAN PENULISAN	I-4
I.4 BATASAN MASALAH	I-5
BAB II PEMBEBANAN STATIS DAN DINAMIS	
II.1 UMUM	II-1
II.2 PEMBEBANAN STATIS	II-3
II.3 PEMBEBANAN DINAMIS	II-5
II.3.1 Amplitudo Pembebanan Konstan	II-6
II.3.2 Amplitudo Pembebanan Bervariasi	II-9
II.3.2.1 Single overload	II-9
II.3.2.2 Multiple overload	II-10
II.3.2.3 Block Programed Loading	II-11
II.3.2.4 Random (acak)	II-12
II.4 BENTUK GELOMBANG PEMBEBANAN	II-13
II.4.1 Sinusoidal (Sine wave form)	II-13
II.4.2 Segitiga (triangular wave form)	II-14
II.4.3 Persegi (Square wave form)	II-15
II.4.4 Gergaji positip (positive sawtooth wave form)	II-15
II.4.5 Gergaji negatip (negative sawtooth wave form)	II-16

II.5 RASIO TEGANGAN	II-17
II.5.1 Tegangan diatas sumbu nol.....	II-17
II.5.2 Tegangan melewati sumbu nol.....	II-18
II.5.3 Tegangan dibawah sumbu nol.....	II-19
BAB III MEKANISME RETAK FATIGUE	
III.1 UMUM.....	III-1
III.2 PENGERTIAN DASAR FATIGUE.....	III-2
III.3 PROSES FATIGUE DALAM BEBERAPA TAHAPAN.....	III-4
III.3.1 Cyclic Slip (Penggelinciran Berulang).....	III-4
III.3.2 Crack Nucleation (Inti Retak).....	III-5
III.3.3 Microcrack Growth (Perambatan Retak Mikro).....	III-5
III.3.4 Macrocrack Growth (Perambatan Retak Makro).....	III-7
III.3.5 Kegagalan Akhir	III-7
III.4 PERTUMBUHAN RETAK DAN KARAKTERISTIK FATIGUE	III-7
BAB IV RETARDASI PENJALARAN RETAK FATIGUE	
IV.1 UMUM	IV-1
IV.2 PENINGKATAN TEGANGAN SEPANJANG RETAK	IV-2
IV.3 ANALISA TEGANGAN DI UJUNG RETAK	IV-3
IV.4 FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN	IV-5
IV.5 UKURAN DAERAH PLASTIS DIUJUNG RETAK.....	IV-7
IV.5.1 Ukuran Daerah Plastis Untuk Tegangan Bidang	IV-8
IV.5.2 Ukuran Daerah Plastis Untuk Regangan Bidang	IV-9
IV.6 PEMBATASAN APLIKASI LINIER ELASTIC FRACTURE MECHANICS	IV-10
IV.7 LAJU PENJALARAN RETAK MENENGAH	IV-12
IV.8 TERJADINYA RETARDASI	IV-15
BAB V . PELAKSANAAN DAN HASIL PENGUJIAN	
V.1 UMUM	V-1
V.2 PERSIAPAN PENGUJIAN	V-3
V.2.1 Pembuatan spesimen uji	V-3
V.3 KALIBRASI.....	V-7

V.4 PELAKSANAAN PENGUJIAN	V-10
V.4.1 Uji tarik (tension test).....	V-10
V.4.2 UJI FATIGUE (KELELAHAN).....	V-13
V.4.2.1. Beban uji fatigue.....	V-13
V.4.2.2. Prosedur pelaksanaan uji fatigue.....	V-16
V.5 HASIL PENGUJIAN FATIGUE	V-18

VI . ANALISA DATA HASIL PENGUJIAN

VI.1 Langkah-langkah penganalisaan laju penjalaran retak.....	VI-1
VI.2 Pembuatan Grafik Penjalaran Retak a vs N.....	VI-2
VI.3 Perhitungan Rentang Faktor Intensitas Tegangan.....	VI-9
VI.4 Perhitungan Laju Penjalaran Retak.....	VI-13
VI.5 Analisa Data Perhitungan Dan Grafik.....	VI-19
V.5.1 Analisa grafik a vs N.....	VI-19
V.5.2 Analisa data perhitungan dan grafik da/dN vs ΔK	VI-20

BAB VII . KESIMPULAN DAN SARAN VII-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
Gbr II.1	Diagram benda bebas	II-1
Gbr II.2	pembebanan statis, hubungan tegangan vs regangan.....	II-2
Gbr II.3	Pembebanan dinamis amplitudo konstan	II-3
Gbr II.4	Pembebanan single overload one cycle.....	II-9
Gbr II.5	Pembebanan single overload multi cycle.....	II-10
Gbr II.6	Pembebanan multiple overload one cycle.....	II-9
Gbr II.7	Pembebanan multiple overload multi cycle.....	II-10
Gbr II.8	Block programed loading	II-11
Gbr II.9	Pembebanan acak (random).....	II-12
Gbr II.10	Bentuk pembebanan sinus	II-13
Gbr II.11	Bentuk pembebanan segitiga	II-13
Gbr II.12	Bentuk pembebanan persegi	II-14
Gbr II.13	Bentuk pembebanan gergaji positip	II-15
Gbr II.14	Bentuk pembebanan gergaji negatif.....	II-15
Gbr II.15	Pembebanan di atas sumbu 0 (nol).....	II-17
Gbr II.16	Pembebanan melewati sumbu 0	II-17
Gbr II.17	Pembebanan di bawah sumbu 0 (nol).....	II-18
Gbr III.1	Umur kelelahan dengan 3 tahap fatigue (Schjive).....	III-1
Gbr III.2	Model Wood untuk timbulnya microcruk pada slip band.....	III-2
Gbr III.3	Penajaman dan penumpulan ujung retak.....	III-11
Gbr IV.1	Lubang berbentuk elip yang mengalami tegangan jauh....	IV.1
Gbr IV.2	Mode pembebanan	IV.4
Gbr IV.3	Retak pada sebuah pelat tak hingga	IV-5
Gbr IV.4	Perkiraan ukuran daerah plastis untuk tegangan bidang, menunjukkan perkiraan pengaruh tegangan dibagi kembali	IV-8

kembali	IV-8
Gbr IV.5 Batas plastic zone pada ujung retak sebagai fungsi θ	IV-10
Gbr IV.6 K-field yang lebih besar dari plastic zone diperlukan agar LEFM dapat diaplikasikan	IV-11
Gbr IV.7 Kurva da/dN vs ΔK Paris Erdogan	IV-14
Gbr IV.8 Skema ilustrasi pengaruh overload terhadap perilaku penjalaran retak	IV-15
Gbr IV.9 Tegangan tekan sisa pada ujung retak akibat overload.....	IV-16
Gbr IV.10 Model Wheeler untuk retardasi fatigue.....	IV-18
Gbr V.1 Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Tarik	V-4
Gbr V.2 Bentuk dan ukuran spesimen type Compact Tension Standart ASTM	V-5
Gbr V.3 Proses penggerjaan spesimen fatigue	V-6
Gbr V.4 Bentuk dan ukuran spesimen type Compact Tension	V-7

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
Tabel V.1	Hasil kalibrasi beban mesin uji tarik vs mesin uji fatigue...	V-8
Tabel V.2	Hasil Pengujian Tarik	V-13
Tabel V.3	Beban Amplitudo Konstan.....	V-14
Tabel V.4	Beban single overload multi cycle.....	V-14
Tabel V.5	Besar beban pada strain indikator pada pembebangan amplitudo konstan.....	V-15
Tabel V.6	Besar beban pada strain indikator pada pembebangan single overload multi cycle.....	V-15
Tabel V.7	Hasil pengujian dinamis pembebangan amplitudo konstan (kondisi I).....	V-18
Tabel V.8	Hasil pengujian dinamis pembebangan single overload multi cycle (kondisi II).....	V-19
Tabel V.9	Hasil pengujian dinamis pembebangan single overload multi cycle (kondisi III).....	V-20
Tabel VI.1	Data pembuatan grafik a vs N pembebangan amplitudo konstan (kondisi I).....	VI-2
Tabel VI.2	Data pembuatan grafik a vs N single overload multi cycle (kondisi II).....	VI-4
Tabel VI.3	Data pembuatan grafik a vs N pembebangan single overload multi cycle (kondisi III).....	VI-6
Tabel VI.4	Perhitungan log(ΔK) pembebangan amplitudo konstan (kondisi I).....	VI-10
Tabel VI.5	Perhitungan log(ΔK) pembebangan single overload multi cycle (kondisi II).....	VI-11
Tabel VI.6	Perhitungan log(ΔK) pembebangan single overload multi cycle (kondisi III).....	VI-12

Tabel VI.7	Perhitungan $\log(da/dN)$ pembebanan amplitudo konstan (kondisi I).....	VI-14
Tabel VI.8	Perhitungan $\log(da/dN)$ pembebanan single overload multi cycle (kondisi II).....	VI-16
Tabel VI.9	Perhitungan $\log(da/dN)$ pembebanan single overload multi cycle (kondisi III).....	VI-18

DAFTAR GRAFIK

Grafik	Halaman
Grafik V.1 Hasil kalibrasi beban mesin uji tarik vs mesin uji fatigue.....	V-9
Grafik VI.1 a vs N, pembebahan amplitudo konstan (kondisi I).....	VI-3
Grafik VI.2 a vs N, pembebahan single overload multi cycle (kondisi II).....	VI-5
Grafik VI.3 a vs N, pembebahan single overload multi cycle (kondisi III).....	VI-7
Grafik VI.4 a vs N, pembebahan kondisi I, II, III	VI-8
Grafik VI.5 Laju penjalaran retak (da/dN vs ΔK) pembebahan amplitudo konstan (kondisi I)	VI-15
Grafik VI.6 Laju penjalaran retak (da/dN vs ΔK) pembebahan single overload multi cycle (kondisi II)	VI-17
Grafik VI.7 Laju penjalaran retak (da/dN vs ΔK) pembebahan single overload multi cycle (kondisi III).....	VI-19

DAFTAR NOTASI

a	:	Panjang retak
A	:	Luas penampang material
A_i	:	luas penampang awal material
a_n	:	Panjang retak
B	:	Tebal spesimen uji
c	:	Ukuran setengah panjang elip
C	:	Konstanta material
d	:	Ukuran setengah tinggi elip
da	:	Pertambahan panjang retak
$\frac{da}{dN}$:	Laju penjalaran retak
dN	:	Pertambahan siklus pembebangan
F	:	Faktor koreksi geometri tanpa dimensi
h	:	Setengah tinggi spesimen uji fatigue
K	:	Stress intensity faktor
K_I	:	Faktor intensitas tegangan pembelahan mode I .
K_{IC}	:	Fracture toughness
k_t	:	Faktor konsentrasi tegangan
ΔK_{th}	:	Ambang bawah grafik sigmoidal perambatan retak
L_f	:	Panjang setelah material mengalami patah pada uji tarik
L_i	:	Panjang pengukuran uji tarik
m	:	Konstanta material
N	:	Jumlah siklus pembebangan
P	:	Besar beban
P_f	:	Beban pada saat material mengalami patah pada uji tarik
P_{maks}	:	Beban terbesar yang terjadi saat pengujian
P_{Yield}	:	Beban pada saat terjadinya yield
R	:	Perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum atau perbandingan beban minimum terhadap beban maksimum dalam satu siklus pembebangan.

RA	:	Reduction in area (pengurangan luas setelah material mengalami patah pada uji tarik)
R_{OL}	:	Perbandingan antara tegangan maksimum pada waktu overload dengan tegangan maksimum pada pembebahan amplitudo konstan dalam satu siklus pembebahan.
$r_{o\sigma}$:	Ukuran daerah plastis
t	:	Waktu
W	:	Lebar spesimen pengujian fatigue
X	:	Beban statis dalam kilonewton
Y	:	Angka yang menunjukkan beban strain indikator
π	:	3,14
ε	:	Regangan (pertambahan panjang setelah material mengalami patah)
ε_A	:	Regangan di titik A
ε_B	:	Regangan di titik B
θ	:	Sudut
σ	:	Tengangan jauh (remote stress)
σ_A	:	Tegangan di titik A
σ_B	:	Tengangan di titik B
σ_f	:	Tegangan pada saat material mengalami patah
σ_{maks}	:	Tegangan terbesar yang terjadi saat pengujian tarik
σ_{Yield}	:	Tegangan pada saat terjadinya yield
E	:	Modulus elastisitas
σ_{max}	:	Tegangan yang mempunyai harga tertinggi dalam satu siklus beban uji fatigue.
σ_{min}	:	Tegangan yang mempunyai harga terrendah dalam satu siklus beban uji fatigue.
σ_m	:	Setengah dari penjumlahan tegangan maksimum dan tegangan minimum uji fatigue.
σ_{ij}	:	Besarnya tegangan pada seluruh bidang pelat tak berhingga yang mengalami retak

- σ_a : Setengah dari selisih tegangan maksimum dan tegangan minimum.
- $\sigma_{max CL}$: Tegangan yang mempunyai harga tertinggi pada saat overload dalam satu siklus beban.
- ΔK : Rentang stress intensity faktor
- ρ : Radius dari elip

BAB I

PENDAHULUAN

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Struktur-struktur sering kali mengalami beban-beban berulang (cyclic loads) atau dinamakan beban-beban dinamis pada waktu operasionalnya (life time), dan akibat penggunaan beban berulang dapat menyebabkan kerusakan mikroskopis secara fisik dari struktur meskipun beban yang dialami dibawah kekuatan tarik (ultimate strength) struktur. Kerusakan mikroskopis dapat bertumpuk sedikit demi sedikit akibat pembebanan yang terus menerus, sampai kerusakan mikroskopis berkembang menjadi retak dan kemudian menjalar, sampai retak mencapai ukuran kritis (critical crack size) yang akan menyebabkan kegagalan struktur.

Kegagalan struktur akibat penggunaan beban berulang seperti disebutkan diatas dinamakan kegagalan lelah atau sering dinamakan *kegagalan fatigue* (fatigue failure).

Dalam proses kegagalan fatigue pada struktur, yang mana dimulai dari kerusakan mikroskopis, dilanjutkan dengan timbulnya retak, penjalaran retak hingga retak mencapai retak kritis. Kegagalan fatigue ini dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain :

1. beban :
 - a. Jenis beban : uniaksial, lentur, puntir.
 - b. frekwensi siklus beban.
 - c. Pola beban : periodik, random.

- d. besar tegangan.
- 2. Kondisi material.
- 3. Proses pengerjaan.
- 4. Bentuk dan ukuran komponen.
- 5. Temperatur operasi.
- 6. Kondisi lingkungan.

Apabila pada struktur telah timbul retak, kemudian dilanjutkan dengan penjalaran retak, hingga retak mencapai panjang tertentu, yang sebelumnya mengalami pembebahan berulang tarik-tarik (tension to tension) dengan amplitudo pembebahan konstan dan apabila kemudian struktur secara tiba-tiba mengalami siklus kelebihan beban (overload), maka struktur akan mengalami perlambatan (*retardation*) laju penjalaran retak fatigue, bila dibandingkan dengan laju penjalaran retak struktur yang mengalami siklus pembebahan amplitudo konstan. Perlambatan (retardation) dapat diketahui melalui jumlah seluruh siklus pembebanan yang diperlambat (N_D) dan panjang retak yang diperlambat (a_D).

Untuk mendapatkan laju penjalaran retak fatigue dari struktur, dipakai pendekatan mekanika kepecahan (fracture mechanics). Pada mekanika kepecahan bentuk penjalaran retak pada struktur biasanya digambarkan dalam bentuk diagram yang menyatakan hubungan antara faktor intensitas tegangan (Stress Intensity Factor/SIF), ΔK , dengan laju penjalaran retak da/dN..

I.2. Metodologi Pembahasan

Untuk mendapatkan hasil analisa yang dapat mendasari pengambilan kesimpulan mengenai pengaruh variabel-variabel pembebanan terhadap parameter-parameter retardasi penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36, maka disusun metodologi :

1. Studi literatur mengenai kepecahan (fracture), kelelahan (fatigue), dan laju penjalaran retak (crack growth rate) yang diakibatkan oleh kelelahan.
2. Studi mengenai pengujian material terdiri dari uji tarik (statis) untuk penentuan mechanical properties (σ_{ULT} , σ_{YIELD}) dan uji kelelahan (dinamis) untuk mengetahui laju penjalaran retak (da/dN).
3. Penentuan material uji yaitu baja karbon (high tensile A 36) dan penentuan standart uji yang digunakan yaitu American Society for Testing and Material.
4. Persiapan pengujian
 - Pembuatan spesimen sesuai standart ASTM, untuk uji tarik (tension test) ASTM E8- M dengan type sheet dan uji fatigue ASTM E 647-93 dengan type spesimen Compact Tension (CT).
5. Pelaksanaan pengujian :
 - Pelaksanaan Uji tarik
Uji tarik dilakukan untuk mengetahui yield strength (kekuatan luluh) dan tensile strength (kekuatan tarik) dari material untuk kondisi standart, yang digunakan untuk menentukan kondisi pembebanan uji kelelahan dari material.
 - Pelaksanaan pengujian untuk laju penjalaran retak (crack growth rate test).

Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan data perambatan retak, pembebahan menggunakan kelebihan beban (overload) pada pembebahan amplitudo konstan, untuk beberapa harga R , R_{OL} . Dari pengamatan didapat : da, dN dalam satu interval pencatatan tertentu untuk menentukan da/dN untuk setiap harga R , R_{OL} tertentu.

6. Menganalisa hasil pengujian.

data-data hasil pengujian yang didapatkan adalah pertambahan ukuran panjang retak (Δa), untuk setiap selang siklus pembebahan (ΔN), selanjutnya dilakukan perhitungan :

- Laju penjalaran retak (da/dN).
- Penentuan rentang faktor intensitas tegangan (ΔK)

7. Kesimpulan dan saran.

I.3. Tujuan Penulisan

Tujuan penulisan ini adalah memberikan tinjauan akademis mengenai masalah seberapa besar pengaruh R , R_{OL} mempengaruhi parameter-parameter retardasi (N_D , a_D) penjalaran retak fatigue sewaktu penggunaan kelebihan beban (overload) pada pembebahan amplitudo konstan pada material high tensile A 36. Tinjauan dilakukan dengan menganalisa data-data yang akan diolah dan dianalisa dengan berdasarkan teori-teori kelelahan dan kepecahan.

Analisa data disusun menjadi diagram skematik yang bisa menunjukkan pengaruh R , R_{OL} terhadap laju penjalaran retak (da/dN).

hasil analisa tersebut diharapkan dapat memberikan masukan secara kualitatif dalam permasalahan peningkatan umur desain suatu struktur baja.

I.4. Batasan Masalah

Adapun batasan-batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini :

- Mode pembebanan yang dipakai adalah Mode I (arah pembebanan tegak lurus dengan arah penjalaran retak dan bidang retak).
- kondisi keretakan adalah dominan elastis sehingga dapat digunakan konsep linier elastic fracture mechanics (LEFM) untuk uji kelelahannya.
- Material yang diteliti adalah material high tensile steel A 36 yang banyak digunakan dalam pembuatan berbagai konstruksi.
- Standart pengujian yang dipakai adalah : Standart Uji ASTM E 647 dengan type spesimen yaitu Compact Tension Specimen, C(T), dengan retak ditepi (edge crack).
- Mode pembebanan pengujian fatigue menggunakan pembebanan tension to tension (mode pembebanan tarik-tarik) dengan frekwensi pembebanan 2 Hz.
- Pengaruh kondisi lingkungan (suhu, kelembaman, keasaman lingkungan dan lain-lain) dan pengaruh bending akibat bentuk cacat, juga tegangan sisa akibat pengaruh penggerjaan material diabaikan.
- Beban dinamis yang digunakan ada dua jenis adalah
 1. pembebanan dengan amplitudo konstan
 2. pembebanan amplitudo konstan, setelah retak menjalar dilanjutkan dengan pemberian kelebihan beban (overload) dan kemudian dilanjutkan

dengan kepembebanan amplitudo konstan seperti semula.

- Bentuk gelombang pembebanan adalah berbentuk sinusoidal
- Pengamatan pengujian dilakukan terhadap laju penjalaran retak setelah tahap inisiasi.

BAB II

PEMBEBANAN STATIS DAN DINAMIS

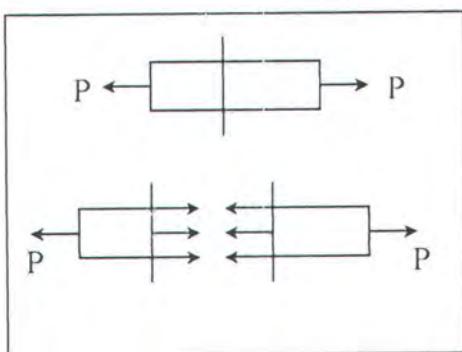
BAB II

PEMBEBANAN STATIS DAN DINAMIS

II.1. Umum

Suatu struktur atau material, baik pada kondisi mulus (tanpa cacat), atau pada kondisi cacat (seperti hadirnya retak pada struktur), yang mengalami beban luar (eksternal load), baik beban statis maupun beban dinamis, maka sesuai dengan prinsip kesetimbangan, struktur akan menahan reaksi beban luar dengan gaya dalam.

Jika dibuat diagram benda bebasnya (free body diagram), seperti gambar II.1, maka akan terlihat bahwa gaya-gaya luar yang terpakai pada sebuah sisi potongan tertentu akan diimbangi oleh gaya-gaya dalam yang terbentuk dalam potongan tersebut atau secara ringkas dikatakan gaya-gaya luar diimbangi oleh gaya-gaya dalam.



Gambar II.1. Diagram benda bebas

Gaya-gaya dalam ini perlu diketahui intensitasnya, karena gaya-gaya inilah yang akan memberi perlakuan terhadap terjadinya deformasi (*perubahan bentuk atau ukuran dari struktur yang dapat menghilangkan kegunaan dari struktur*) pada struktur akibat gaya-gaya luar yang bekerja. Jadi intensitas inilah

yang menentukan kemampuan dari struktur untuk menahan gaya atau beban yang bekerja.

Untuk struktur mulus (tanpa cacat), intensitas ini disebut dengan *tegangan* (stress) yang besarnya digambarkan sebagai intensitas dari gaya per unit area. Jika tegangan dilambangkan dengan σ , Gaya dengan P dan luasan dengan A , maka tegangan dirumuskan sebagai :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Akibat gaya atau beban yang bekerja, misalnya pada pengujian tarik di laboratorium, benda mengalami deformasi yaitu berupa perubahan dimensi bahkan penyusutan maupun perpanjangan ukuran. Selisih dimensi persatuan panjang ini disebut regangan (strain) yang dilambangkan dengan ε . Jika misalkan perubahan dimensi tersebut dilambangkan dengan ΔL , panjang awal dilambangkan dengan L maka regangan adalah :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

Apabila struktur pada kondisi cacat (misalnya retak), yang mengalami beban luar maka intensitas pembebahan struktur disebut dengan K yang dirumuskan dengan :

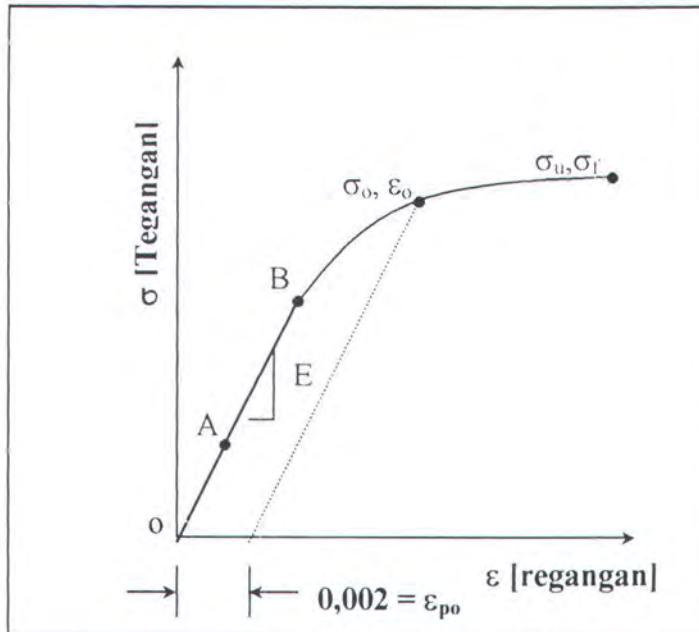
$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.3)$$

dimana K adalah faktor intensitas tegangan, σ adalah tegangan jauh (remote stress), a adalah panjang retak dan π adalah konstannta.

II.2. PEMBEBANAN STATIS

Pembebanan statis adalah pembebanan yang mana besar beban yang dialami oleh struktur adalah tetap, tanpa ada perulangan atau siklus dalam fungsi waktunya. Beban yang bekerja mencapai suatu harga tertentu dan kemudian harga beban dipertahankan sampai beberapa waktu tertentu. Pembebanan statis ini dijumpai misalnya pada *pengujian tarik, buckling* dan lain-lainnya. Suatu struktur mengalami pembebanan statis misalnya akibat gaya berat dari konstruksi yang didukungnya. Kondisi statis seperti demikian dalam perencanaan struktur digunakan untuk memperkirakan ukuran dari suatu konstruksi.

Sebagai gambaran, pada gambar II.2 ditunjukkan tentang pembebanan statis. Sumbu X menunjukkan regangan dan sumbu Y menunjukkan tegangan



Gambar II.2 Grafik Pembebanan Statis, Hubungan tegangan dan regangan

Seperti ditunjukkan pada gambar II.2, Pembebanan bertambah dengan teratur. Pada pengujian dalam hitungan menit atau detik beban bertambah sampai akhirnya terjadi kegagalan (patah). Sedang pada operasionalnya, beban dipertahankan setelah mencapai harga maksimum, sampai waktu yang tak terbatas. Contoh pembebanan statis jenis ini adalah pengujian untuk mendapatkan *sifat-sifat mekanis* material yaitu antara lain : ***kekuatan ultimate, elongation, yield point, reduction of area, modulus elastisitas***, yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_{yield} = \frac{P_{yield}}{A_i}; \quad \sigma_U = \frac{P_{ult}}{A_i}; \quad \sigma_f = \frac{P_f}{A_i}$$

$$\varepsilon_f = \frac{L_f - L_i}{L_i}; \quad RA = \frac{A_i - A_f}{A_i}; \quad E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\varepsilon_B - \varepsilon_A} \quad (2.4)$$

dimana :

σ_{yield} : tegangan pada saat terjadinya yield

P_{yield} : beban pada saat terjadinya yield

σ_{maks} : tegangan terbesar yang terjadi saat pengujian

P_{maks} : beban terbesar yang terjadi saat pengujian

σ_f : tegangan pada saat material mengalami patah

P_f : beban pada saat material mengalami patah

ε : elongation (pertambahan panjang setelah material mengalami patah)

RA : reduction in area (pengurangan luas setelah material mengalami patah)

A_i : luas penampang awal material

A_f : luas penampang material setelah patah

L_i : panjang pengukuran

L_f : panjang setelah material mengalami patah

E : modulus elastisitas

σ_B : tengangan di titik B

σ_A : tegangan di titik A

ϵ_A : regangan di titik A

ϵ_B : regangan di titik B

II.3. PEMBEBANAN DINAMIS.

Pembebanan dinamis adalah pembebanan-pembebanan yang dilakukan berulang-ulang dimana sebagian atau seluruhnya terulang sebagai fungsi waktu, t.

Jenis pembebanan ini (dinamis) meskipun pembebanannya relatif kecil jika terjadi dalam waktu yang relatif lama ataupun hanya beberapa kali tetapi nilainya relatif besar akan cukup berarti bagi suatu konstruksi. Suatu penomena yang dikenal dengan *fatigue* akan terjadi, dimana suatu material akan mengalami kegagalan atau kepecahan setelah sejumlah pembebanan berulang, walaupun beban tersebut jauh dibawah beban kepecahannya secara statis. Fatigue yang terjadi sering menyebabkan kegagalan struktur secara keseluruhan.

Ada beberapa macam type pembebanan dinamis yang terjadi pada struktur, type pembebanan dinamis yang dibedakan berdasarkan amplitudo pembebanannya.

Berdasarkan besarnya amplitudo, pembebanan dinamis dibedakan :

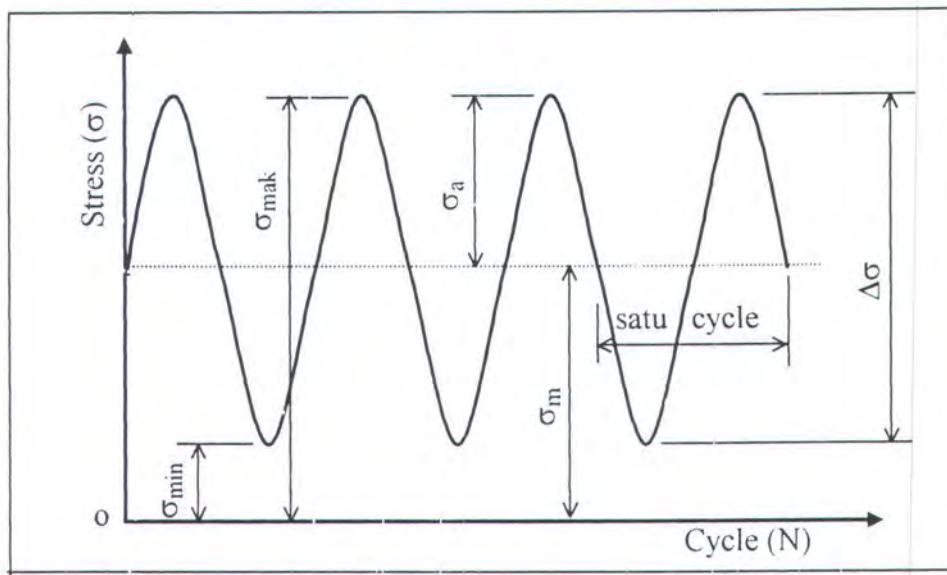
1. amplitudo pembebanan konstan (Constant Amplitude Loading)
2. Amplitudo pembebanan bervariasi (Variable Amplitude Loading)
3. Acak (Random)

II.3.1 Amplitudo Pembebanan Konstan (Constant Amplitudo Loading)

Pembebanan jenis ini adalah suatu pembebanan dimana harga tegangan maksimum dan tegangan minimumnya mempunyai suatu harga yang tetap, jadi pembebanan tersebut mempunyai suatu range (rentang) yang tetap. Pada gambar II.3. dapat dilihat suatu pembebanan dengan amplitudo konstan.

Pada grafik tersebut sumbu X menunjukkan waktu atau siklus pembebanan dan sumbu Y menunjukkan beban atau tegangan. Harga suatu tegangan yang bekerja akan berubah dari harga terendah (minimum), menjadi harga tertinggi (maksimum) dan kemudian harga tegangan akan turun lagi sampai mencapai harga minimum. Keadaan ini akan berulang lagi seperti dari awal dan berulang seperti membentuk suatu gelombang pembebanan tertentu. Keadaan suatu harga tegangan tertentu yang berubah kemudian kembali ke harga semula disebut dengan siklus (cycle), dan waktu yang dibutuhkannya disebut dengan satu periode.

Perilaku fatigue dari suatu material dalam praktek sering dilakukan dengan melaksanakan pengujian dengan menggunakan pembebanan dengan amplitudo beban konstan, meskipun dalam operasinya beban yang terjadi adalah beban acak. Untuk mengantisipasi hal tersebut dipakai pembebanan amplitudo konstan.



Gambar II.3. Pembebatan dinamis amplitudo konstan

Pada gambar II.3. memperlihatkan siklus pembebatan berulang amplitudo konstan. Sumbu X menunjukkan fungsi waktu sedangkan sumbu Y menunjukkan stress atau tegangan.

Pada pembebatan berulang amplitudo konstan terdapat beberapa istilah dan parameter yang perlu diketahui yaitu antara lain :

Tegangan Maksimum, σ_{max} , adalah tegangan yang mempunyai harga tertinggi dalam satu siklus beban.

Tegangan Minimum, σ_{min} , adalah tegangan yang mempunyai harga rendah dalam satu siklus beban.

Stress Range ($\Delta\sigma$) adalah rentang tegangan maksimum dengan tegangan minimum.

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (2.5)$$

Tegangan rata-rata, σ_m , adalah setengah dari penjumlahan tegangan maksimum dan tegangan minimum, tegangan ini berlambangkan σ_m , sehingga :

$$\sigma_m = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) \quad (2.6)$$

Amplitudo Tegangan, σ_a , adalah setengah dari selisih tegangan maksimum dan tegangan minimum. Tegangan ini berlambangkan σ_a , sehingga :

$$\sigma_a = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \quad (2.7)$$

Jumlah siklus pembebanan, Jumlah siklus pembebanan dilambangkan dengan N. dalam grafik biasanya digambarkan dalam bentuk log sehingga membentuk garis lurus.

satu siklus (cycle) adalah perubahan beban dari minimum ke maksimum dan kemudian ke beban minimum.

Laju pengulangan beban. yaitu banyaknya pembebanan yang terjadi dalam satuan waktu. Biasanya dinyatakan per detik atau disebut dengan frekwensi.

Rasio beban (stress ratio), R , yaitu perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum atau perbandingan beban minimum terhadap beban maksimum dalam satu siklus pembebanan.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \quad (2.8)$$

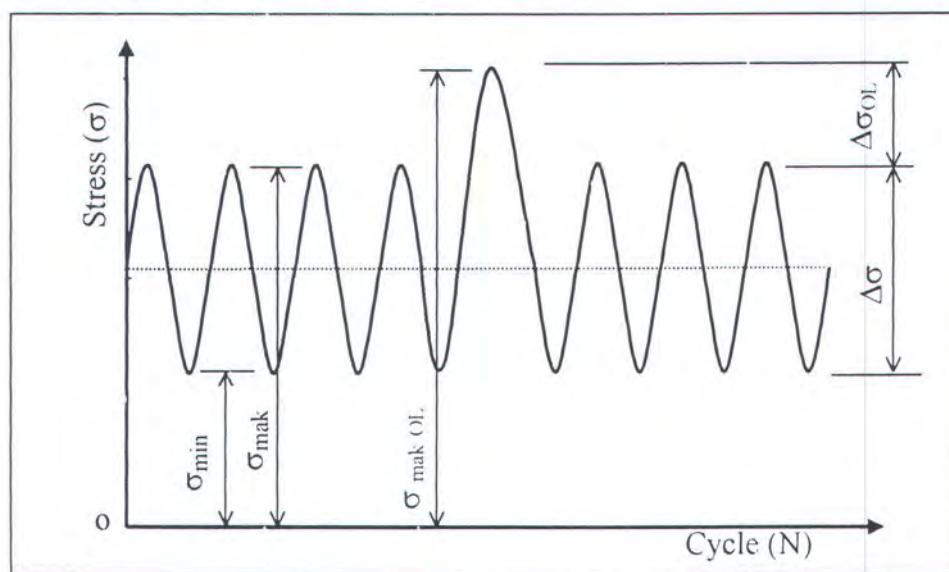
II.3.2 Amplitudo Pembebanan Bervariasi (Variable Amplitude Loading)

Pada kenyataannya pembebanan terjadi dengan beban amplitudo yang berubah-ubah sampai kepada acak atau random. Hal ini menyebabkan beberapa penelitian menggunakan pengideal-an-pengidealan yang ditempuh karena terbatasnya alat, atau untuk memudahkan aplikasi dan pemodelan dan lain-lain.

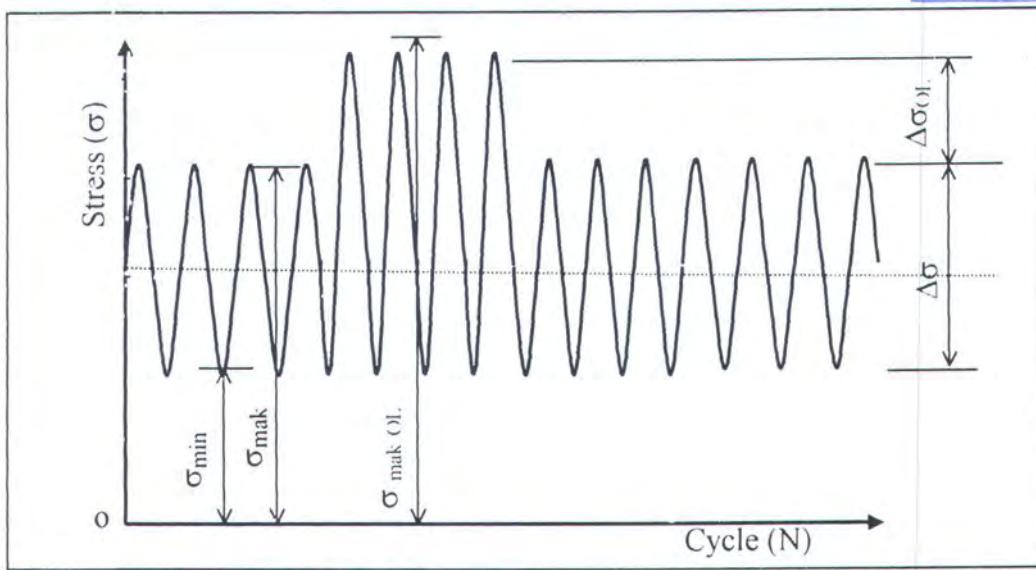
Secara mekanis di laboratorium telah dapat melakukan reproduksi ulang pembebanan acak tadi walaupun pengideal-an tetap dipakai. Misalnya variasi dari amplitudo pembebanan untuk beban acak sesungguhnya antara lain yaitu :

II.3.2.1. Single Overload

Jenis pembebanan single overload sebenarnya adalah pembebanan dengan amplitudo konstan, tetapi pada saat siklus tertentu, pembebanan yang dikenakan relatif besar. Pada pembebanan single overload, struktur atau material mendapat overload hanya satu kali selama umur operasionalnya (life time). Dan dikenal 2 jenis single overload, yaitu single overload one cycle dan single overload multi cycle, seperti pada gambar II.4 dan gambar II.5



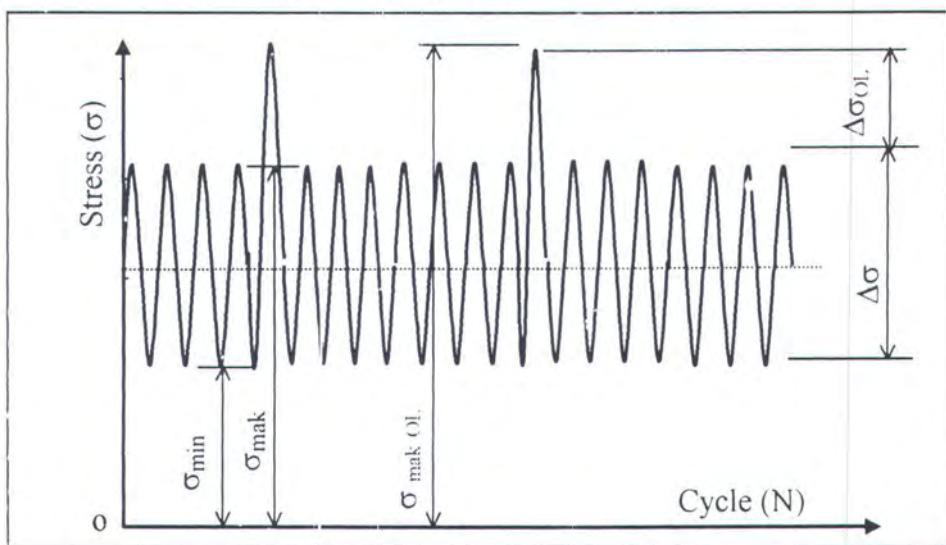
Gambar II.4 Pembebanan Single Overload One Cycle



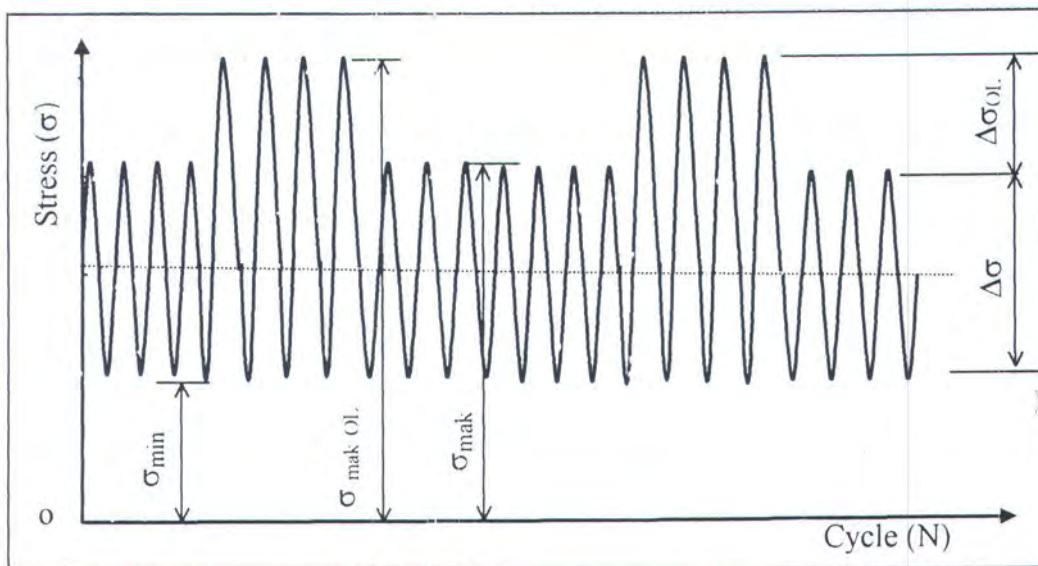
Gambar II.5 Pembebatan Single Overload Multi Cycle

II.3.2.2. Multiple Overload

Jenis pembebatan multiple overload sebenarnya adalah pembebatan dengan amplitudo konstan, tetapi pada saat siklus tertentu, pembebatan yang dikenakan relatif besar. Pada pembebatan multiple overload, struktur atau material mendapat overload lebih dari satu kali selama umur operasionalnya (life time). Dan dikenal 2 jenis multiple overload, yaitu multiple overload one cycle dan multiple overload multi cycle, seperti pada gambar II.6 dan gambar II.7



Gambar II.6 Pembebatan Multiple Overload One Cycle



Gambar II.7 Pernbebanan Multiple Overload Multi Cycle

Pada pembebanan berulang single dan multiple overload terdapat beberapa penambahan istilah dan parameter dari amplitudo pembebanan konstan yang perlu diketahui yaitu antara lain :

Tegangan Maksimum Overload, $\sigma_{max\text{ OL}}$, adalah tegangan yang mempunyai harga tertinggi pada saat overload dalam satu siklus beban.

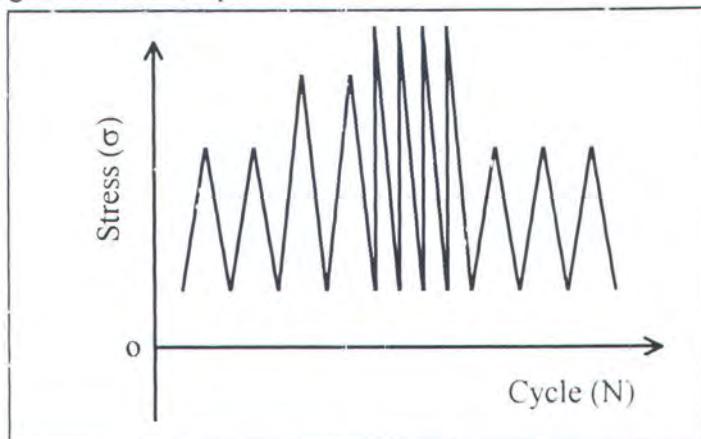
Rasio beban overload, R_{OL} , yaitu perbandingan antara tegangan maksimum pada waktu overload dengan tegangan maksimum pada pembebanan amplitudo konstan dalam satu siklus pembebanan.

$$R_{OL} = \frac{\sigma_{maksOL}}{\sigma_{maks}} = \frac{P_{maksOL}}{P_{maks}} \quad (2.9)$$

II.3.2.3. Block Programed Loading

Kemampuan mereproduksi suatu bentuk pembebanan membuat beberapa kondisi dimana dapat dibuat suatu bentuk pembebanan yang terprogram. Metode ini ditempuh agar dapat mereduksi jumlah sehingga didapatkan suatu

penyederhanaan baik analisa maupun eksperimennya. Seperti pada gambar II.8 tegangan minimumnya konstan sedangkan harga tegangan maksimumnya berulang setelah beberapa siklus.

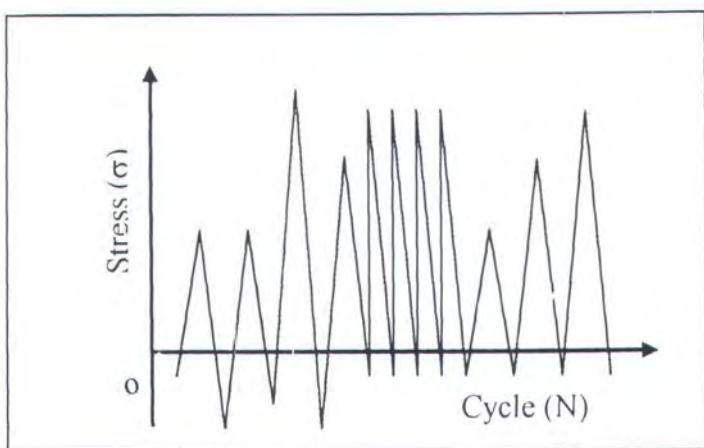


Gambar II.8 Diagram Block Programmed Loading

II.3.2.4. Random (acak)

Pembebanan random atau acak adalah pembebanan dimana beban yang bekerja benar-benar acak, yang pada kenyataannya beban inilah yang sesungguhnya bekerja dan diterima suatu struktur saat beroperasinya. Keadaan yang demikian menjadikan beban acak sulit untuk ditangani disebabkan karena sulitnya perulangan keadaan yang sudah berlangsung untuk mendapatkan keadaan yang persis sama dengan sampel yang dibutuhkan.

Beberapa teknik telah dikembangkan untuk mendekati keadaan acak dengan tujuan dapat dijadikan model untuk mendekati keadaan yang sebenarnya. Seperti telah dijelaskan sebelumnya, teknik untuk memproduksi suatu bentuk pembebanan untuk mendapatkan data yang lebih sederhana baik dalam jumlah maupun untuk mengadakan analisa. Demikian juga beberapa teknik statistik dipakai untuk menganalisa karakteristik dari pembebanan tersebut.



Gambar II.9 Pembebaan Acak (random)

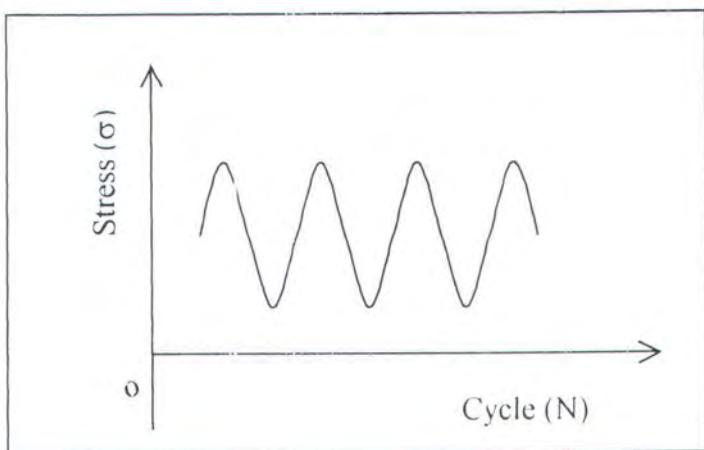
II.4. BENTUK GELOMBANG PEMBEBANAN

Mekanisme dari perubahan pembebaan dalam pembebaan dinamis ditentukan oleh jenis bentuk gelombang pembebanannya yang menyangkut kepada tegangan yang bekerja berdasarkan fungsi waktu t . Macam bentuk gelombang pembebaan adalah :

1. Sinusoidal (Sine wave form)
2. Segitiga (triangular wave form)
3. Persegi (Square wave form)
4. Gergaji positip (positive sawtooth wave form)
5. Gergaji negatip (negative sawtooth wave form)

II.4.1. Sinusoidal (Sine wave form)

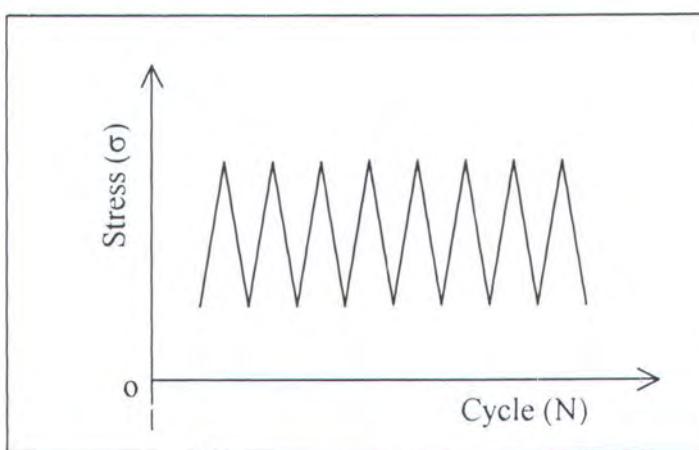
Bentuk pembebaan ini adalah bentuk sinus. Seperti terlihat pada gambar II.10 beban akan meningkat dari beban minimum ke beban maksimum dengan slope sesuai bentuk sinus, dan merupakan bentuk gelombang pembebaan dalam penulisan tugas akhir ini.



Gambar II.10. Bentuk Pembebanan Sinus

II.4.2. Segitiga (triangular wave form)

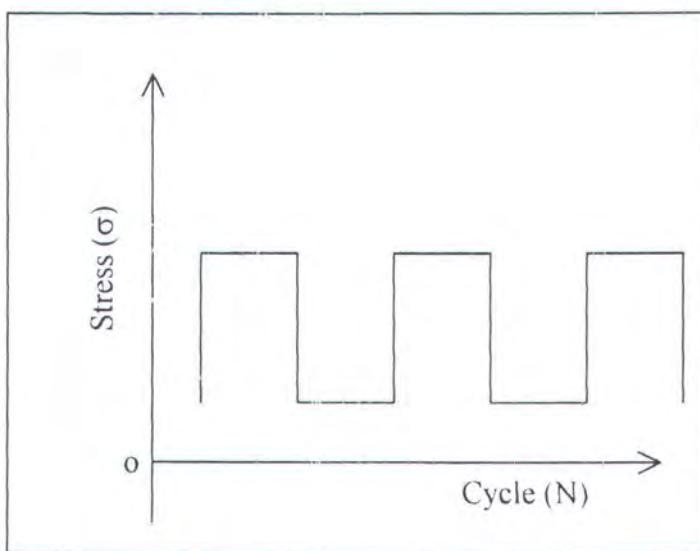
Pada bentuk pembebanan jenis ini terjadi perubahan tegangan yang tiba-tiba setelah mencapai harga maksimum atau minimum dari siklus pembebanannya. Perubahan ini terjadi dengan kemiringan yang tetap, dimana merupakan pencerminkan terhadap sumbu tegak pada setengah periode sebelumnya. Perubahan yang demikian terjadi berulang seperti siklus sebelumnya.



Gambar II.11. Bentuk Pembebanan Segitiga

II.4.3. Persegi (Square wave form)

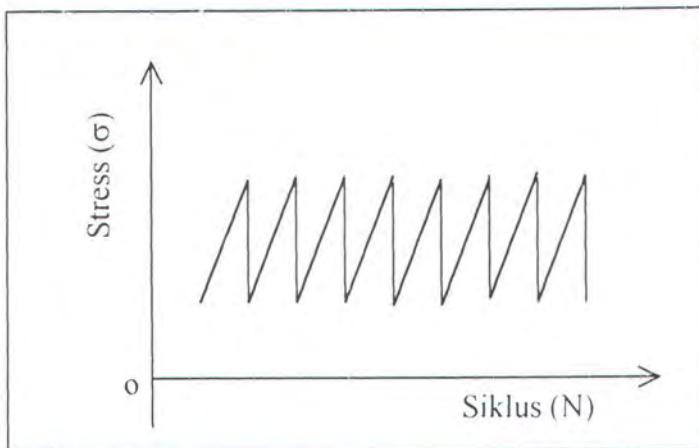
Mekanisme dari bentuk pembebanan jenis ini adalah suatu tegangan minimum tertentu secara statis konstan yang bekerja sampai setengah dari periode siklus kemudian berubah dengan cepat sampai harga maksimum tertentu yang bekerja sampai akhir dari setengah periode berikutnya dan kemudian berubah tiba-tiba ke harga tegangan minimumnya. Siklus akan berulang seperti sebelumnya.



Gambar II.12. Bentuk Pembebanan Persegi

II.4.4. Gergaji positif (positive sawtooth wave form)

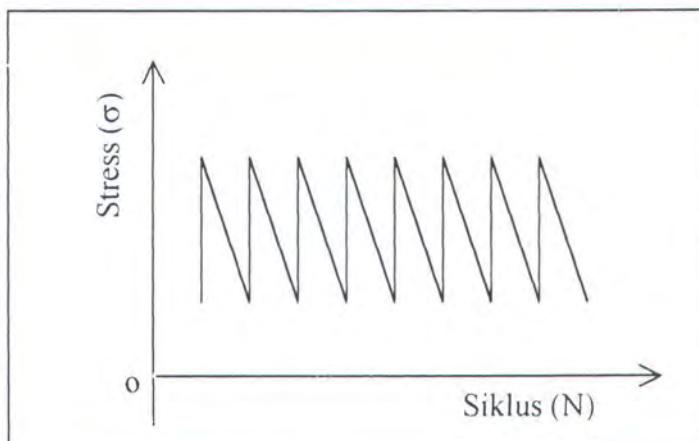
Pada pembebanan dengan bentuk gelombang gergaji positif suatu harga tegangan minimum tertentu akan meningkat dengan kemiringan tertentu sampai mencapai harga tegangan maksimumnya. Setelah harga maksimumnya tercapai tegangan tiba-tiba berubah dengan cepat sampai pada harga minimumnya, kemudian siklus terulang lagi sebagaimana sebelumnya.



Gambar II.13 Bentuk Pembebanan Gergaji Positif

II.4.5. Gergaji negatif (negative sawtooth wave form)

Pembebanan ini merupakan kebalikan dari jenis pembebanan gergaji positif. Setelah mencapai suatu harga tegangan minimum tertentu terjadi perubahan yang tiba-tiba sampai dicapai harga maksimum tertentu dan kemudian turun dengan kemiringan tertentu relatif lebih lambat sampai pada harga tegangan minimumnya. Siklus seperti sebelumnya terulang lagi.



Gambar II.14 Bentuk Pembebanan Gergaji Negatif

Dari beberapa penelitian yang dilakukan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa bentuk pembebanan yang mempunyai perbandingan laju tegangan tarik

yang maksimum lebih merusak daripada siklus tegangan yang mempunyai waktu tenggang (hold time) pada tegangan yang konstan atau periode timbul yang sangat cepat pada sebarang periode siklus yang diberikan. Bentuk pembebanan gergaji bersifat paling merusak sedangkan bentuk persegi yang paling tidak merusak, hal ini berpengaruh juga pada laju perambatan retak. Sedangkan pada kenyataannya bentuk pembebanan sinusoidal paling banyak digunakan dalam eksperimen atau pengujian dinamis suatu material. Hal ini karena lebih mudah untuk melakukan baik proses percobaan maupun untuk pengamatan dan kestabilan mesin uji relatif lebih baik daripada bentuk pembebanan yang lain.

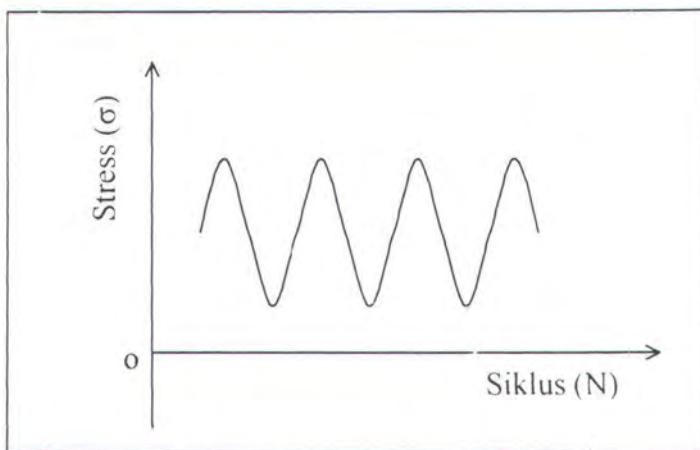
II.5. RASIO TEGANGAN

Seperti disebutkan dimuka, dalam suatu pembebanan berulang, harga perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum yang bekerja disebut dengan pebandingan siklus, atau stress ratio yang dilambangkan dengan R .

Berdasarkan harga R dan tegangan rata-rata pembebanan dengan amplitudo konstan dapat dibedakan dalam beberapa jenis, yaitu :

II.5.1. Tegangan diatas sumbu nol.

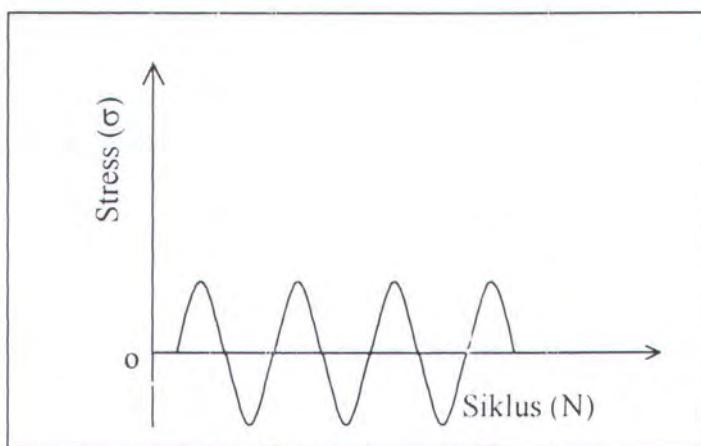
Hal yang demikian menunjukkan bahwa harga tegangan minimum dan tegangan maksimumnya adalah positip atau disebut juga tegangan tarik. Pembebanan jenis ini merupakan pembebanan tarik yang bekerja membesar dan mengecil dan berulang-ulang, atau disebut juga tension to tension loading. Dan harga rasio tegangan, R , pada kondisi ini adalah $0 < R < 1$.



Gambar II.15 Pembebanan di Atas Sumbu 0 (nol)

II.5.2. Tegangan melewati sumbu nol.

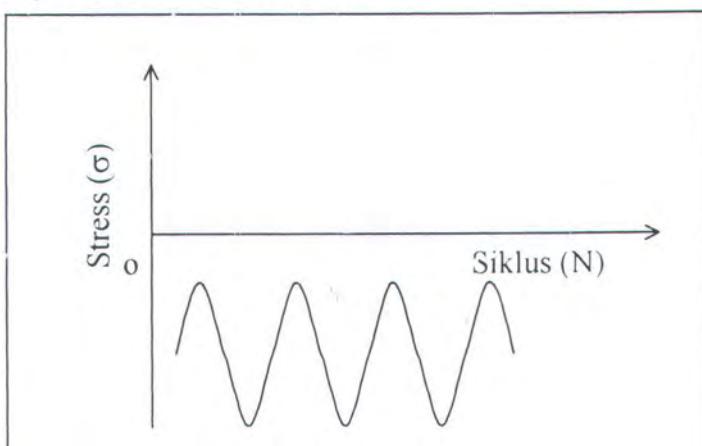
Pada pembebanan jenis ini tegangan minimum yang bekerja adalah tegangan negatif atau tegangan tekan sedangkan tegangan maksimumnya adalah tegangan positif atau tegangan tarik. Dan harga rasio tegangan, R, pada kondisi ini adalah $R = -1$.



Gambar II.16 Pembebanan Melewati Sumbu 0

II.5.3. tegangan dibawah sumbu nol.

Hal yang demikian menunjukkan bahwa tegangan maksimum dan tegangan minimum adalah tegangan negatif atau tegangan tekan. Dan harga rasio tegangan, R, pada kondisi ini adalah $R > 1$.



Gambar II.17 Pembebanan Di Bawah Sumbu 0 (nol)

BAB III

MEKANISME RETAK FATIGUE

BAB III

MEKANISME RETAK FATIGUE

III.1. Umum

Retak fatigue, yang dialami suatu struktur, terjadi pada kondisi pembebangan yang berada dibawah beban kepecahan statis dari struktur tersebut. Jadi suatu pertimbangan yang teliti diperlukan untuk mendesain suatu struktur agar tidak terjadi suatu kegagalan yang tidak diinginkan pada saat beroperasinya. Dalam perencanaan kelelahan suatu struktur, dua hal yang dipertimbangkan : bahaya yang ditimbulkan kerusakan fatigue dan mengetahui faktor-faktor yang bisa menambah dan mengurangi bahayanya. Selain kerusakan fatigue ada beberapa macam jenis kegagalan yang perlu juga dipertimbangkan. Beberapa jenis kegagalan yang terjadi pada suatu struktur, selain akibat proses kimiawi lingkungan yang korosif dapat dibedakan :

1. kegagalan karena buckling
2. kegagalan karena jamming
3. kegagalan karena yielding
4. kegagalan karena necking
5. kegagalan karena cracking



Dalam tulisan ini hanya dibahas mengenai cracking, sedangkan selainnya diluar pembahasan penulisan ini. Permasalahan utama adalah kegagalan yang disebabkan oleh keretakan (cracking) ini. Sebagai salah satu penyebab terjadinya keretakan adalah karena kelelahan struktur (fatigue). Keretakan berawal dari kelelahan struktur dan selanjutnya terjadi perambatan retak yang tergantung juga

oleh tegangan yang bekerja pada pembebanannya. Permasalahan ini dapat diperjelas dengan memahami definisi dan proses kelelahan (fatigue) struktur.

III.2. PENGERTIAN DASAR FATIGUE

Fatigue adalah salah satu mode kegagalan yang harus dipertimbangkan dalam mendesain suatu struktur, bahkan beberapa literatur menyebutkan bahwa 50-90 % dari seluruh kegagalan mekanis disebabkan oleh fatigue. Fatigue adalah mekanisme yang terjadi sebagai suatu hasil dari sejumlah pembebanan yang terjadi berulang-ulang. Suatu siklus pembebanan tunggal akan tidak mempengaruhi kekuatan suatu struktur, bila pembebanan yang terjadi jauh di bawah beban kerusakan statisnya. Tetapi jika pembebanan tersebut terjadi berulang-ulang, maka kegagalan fatigue akan terjadi.

Defenisi fatigue atau kelelahan ini, menurut ASTM (American Society for Testing and Material) E206 hal 364 adalah :

Suatu *proses progresif* yang terjadi *pada suatu area* struktur permanen dimana terjadi perubahan pada material yang disebabkan suatu kondisi yang menghasilkan fluktuasi tegangan dan regangan pada suatu atau beberapa titik yang dapat memuncak menjadi *retak* atau *kepecahan* atau *kegagalan struktur* secara keseluruhan setelah sejumlah fluktuasi tertentu.

Terdapat empat kata penting dari definisi diatas yang dapat menjelaskan tentang pengertian kelelahan atau fatigue. Dapat juga dikatakan bahwa keempat kata tersebut menjelaskan tahapan terjadinya suatu kelelahan. Keempat hal tersebut yaitu :

Kata “**progresif**”, yang menjelaskan bahwa proses fatigue terjadi pada suatu periode waktu dan pemakaian tertentu. Kegagalan fatigue sering terjadi secara mendadak tanpa ada perigatan sebelumnya. Walaupun demikian mekanisme ini mungkin melibatkan sejak awal beroperasinya suatu komponen atau struktur.

Kata “**terjadi pada suatu area**”, menjelaskan bahwa proses fatigue berlangsung pada suatu bagian tertentu dari suatu struktur, bukan secara keseluruhan pada komponen atau struktur. Bagian lokal ini dapat mengalami tegangan atau regangan yang tinggi disebabkan beban eksternal, perubahan geometris, perbedaan temperatur atau ketidak sempurnaan material.

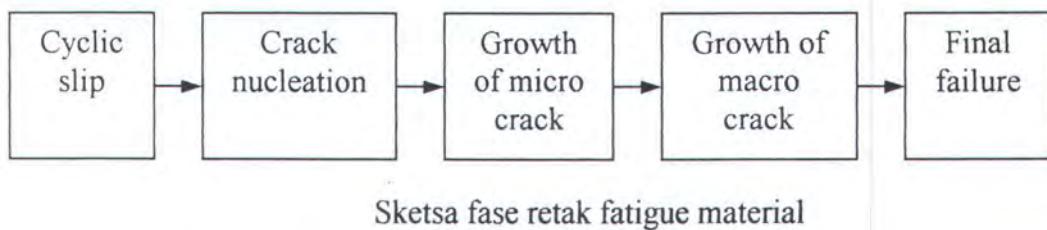
Kata “**retak**”, akibat utama dari seluruh kegagalan fatigue adalah retak yang merambat sampai pada suatu titik dimana material tidak sanggup lagi menahan tegangan atau regangan dan kegagalan strukturnya terjadi.

Kata “**kepecahan/kegagalan struktur**”, menjelaskan bahwa kondisi terakhir dari suatu proses fatigue adalah pemisahan dari komponen atau struktur menjadi dua bagian atau lebih. Mekanisme perambatan retak secara umum dapat diasumsikan bahwa jika tegangan (stress) yang terjadi pada ujung retak melampaui suatu harga kritis tertentu. Mekanika kepecahan (Fracture mechanics) dipakai menjelaskan tentang suatu kriteria kepecahan untuk menjelaskan stress dan strain yang terjadi pada ujung retak atau notch, meskipun untuk kondisi dibawah keadaan tegangan (stress) dan regangan (strain) yang menyebabkan penjalaran retak belum dapat dijelaskan dengan baik.

III.3. PROSES FATIGUE DALAM BEBERAPA TAHAPAN

Kelelahan atau fatigue dalam prosesnya, mengalami beberapa fase yang terjadi selama umur kelelahan material, beberapa fase atau tahapan tersebut adalah :

1. Cyclic slip (penggelinciran berulang).
2. Crack nucleation (inti retak).
3. Growth of microcrack (perambatan retak mikro).
4. Growth of macro crack (perambatan retak makro).
5. Final failure (kegagalan akhir).



III.3.1. Cyclic Slip (Penggelinciran Berulang).

Pada siklus beban yang relatif kecil (yang hampir sama dengan beban kegagalan statis (static failure) akan terjadi *cyclic slip* di sejumlah kecil butiran material *polycrystalline*, butiran-butiran ini mempunyai fenomena lokal yang berbeda-beda, karena butiran-butiran ini hanya terkonsentrasi pada beberapa lapisan saja. Alasannya adalah karena pada lapisan ini akan terjadi *cyclic shear stress* yang cukup tinggi yang mengakibatkan pergeseran/perubahan dari pola kristal bahan dan bentuk dari butiran kristal.

Bila cyclic slip terjadi, maka ditinjau dari skala mikro akan terdapat deformasi. Bila cyclic slip berkelanjutan akan terjadi kelelahan (fatigue).

III.3.2. Crack Nucleation (Inti Retak)

Setelah sejumlah siklus pembebanan, retak mikro dapat ditemukan dalam slip bands (pita-pita penggelinciran). Fase selanjutnya adalah pembentukan crack nucleation (inti retak). Pembentukan ini terjadi pada awal dari fatigue life (umur kelelahan) dan dari observasi diketahui bahwa pembentukan ini adalah suatu fenomena permukaan dari material.

Masalah crack nucleation dapat dijelaskan pada 2 aspek utama, yaitu :

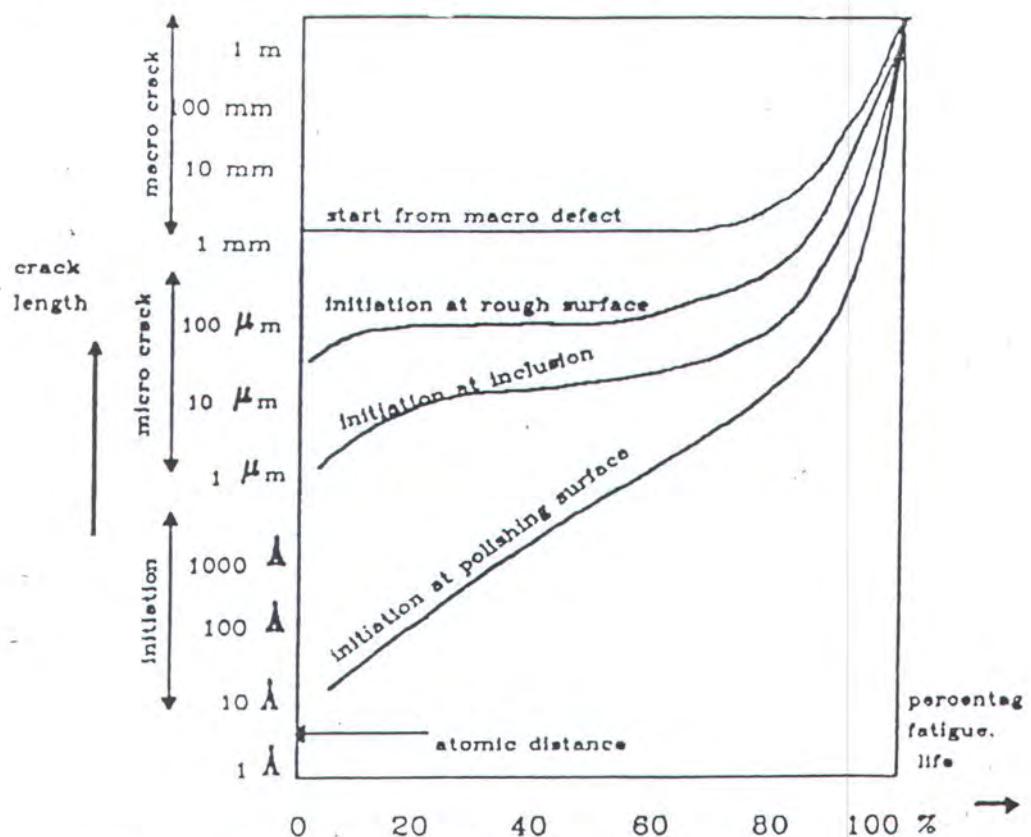
1. butiran-butiran pada permukaan material tidak selalu dikelilingi oleh butiran material tersebut. Butiran-butiran ini pada salah satu sisinya bersinggungan dengan lingkungan yang non solid (permukaan bebas). Hal ini mengaplikasikan tahanan yang lebih rendah pada microplasticity. Pada permukaan yang bebas, slip dapat lebih rendah terjadi, karena tahanan dari butiran-butiran material solid dikelilinginya tidak ada.
2. permukaan butiran-butiran kristal berhubungan dengan lingkungan. Kandungan oksigen dan uap air dalam udara bersama-sama dengan cyclic slip akan menghasilkan crack nucleation.

Pada kondisi dimana terjadi ketidakmurnian material, slip akan terjadi diluar permukaan. Tetapi pada dasarnya slip akan selalu terjadi didaerah permukaan. Hal ini sesuai dengan aspek pertama, yaitu terdapat tahanan yang lebih rendah didekat permukaan bebas.

III.3.3. Microcrack Growth (Perambatan Retak Mikro).

Tumbuhnya retak mikro menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan pada ujung retak. Gelinciran berulang akan terkonsentrasi pada ujung retak yang

menyebabkan penjalaran retak selanjutnya. Penelitian mikroskopis menunjukkan bahwa perambatan retak mikro dapat meliputi sebagian besar dari umur fatigue/kelelahannya. Dengan kata lain, pada saat terakhir dari umur kelelahannya retak menjadi dapat dilihat dengan mata telanjang, kemudian disebut dengan retak makro. Seperti pada gambar III.1 yang menunjukkan bahwa setelah retak terlihat 1mm hanya tinggal beberapa persen dari umur kelelahannya sampai akhirnya terjadi kegagalan struktur. Hasil ini terjadi pada spesimen tanpa takikan dan kondisi yang lain, retak makro dapat terjadi lebih awal. Dengan kata lain bahwa bagian besar dari umur kelelahan adalah retak mikro pada atau dekat dengan permukaan material. Pernyataan ini berarti bahwa kondisi lokal pada permukaan material dan kualitas material pada permukaan adalah hal yang penting pengaruhnya bagi umur kelelahan.



Gambar III.1 Umur Kelelahan Dengan 3 Tahap Fatigue (Schijve)

III.3.4. Macrocrack Growth (Perambatan Retak Makro)

Perpindahan dari microcrack growth ke macrocrack growth tidak dapat didefenisikan secara kualitatif. Defenisi secara nominal dari macrocrack adalah retak yang dapat dilihat dengan mata. Macrocrack growth terjadi bila tingkat pertumbuhan retak tidak bergantung lagi pada kondisi lokal permukaan dan kondisi material yang sangat menentukan terjadinya *crack nucleation* dan *microcrack growth*.

Macrocrack dapat terjadi lebih awal, bila retak tersebut timbul akibat cacat awal pada permukaan material. Tetapi sebaliknya **macrocrack** terjadi lebih lambat bila permukaan material berkualitas tinggi. Kerusakan pada permukaan material dapat menyebabkan macrocrack growth pada awal umur servis.

III.3.5. Kegagalan Akhir.

Apabila macrocrack terus berkembang, maka bagian yang belum mengalami retak menjadi lebih kecil. Akhirnya penampang yang terlalu kecil tidak dapat menahan siklus beban maksimum. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya final failure yang merupakan siklus terakhir dari umur kelelahan.

Final failure memperlihatkan macroplastisitas, seperti kegagalan akibat beban statis pada pengujian material.

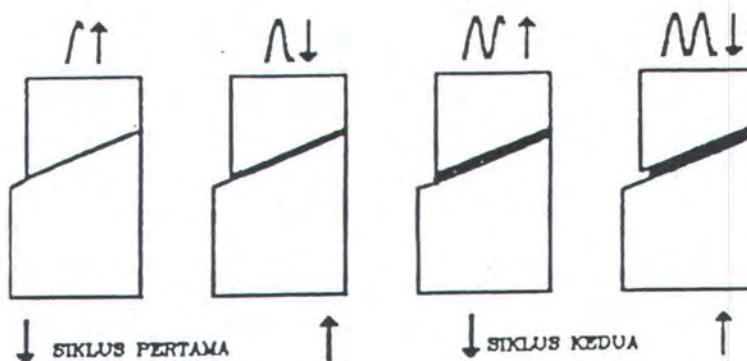
III.4. PERTUMBUHAN RETAK DAN KARAKTERISTIK FATIGUE.

Retak inti pada “microcrack” yang pertama dikembangkan oleh Wood (1958). Hal ini dapat dilihat pada gambar III.2. Pembebanan kearah atas yang pertama akan menghasilkan slip pada tahap permukaan, diikuti dengan

pembebanan kebawah akan menyebabkan slip pada arah berlawanan (tidak tepat pada bidang slip yang sama).

Ada 2 alasan yang mendasari kenaikan tegangan geser pada daerah ini. Pertama, pada level mikro terdapat konsentrasi tegangan geser dalam butiran pada bidang geser yang pararel. Ini ditunjukkan selama pembebanan keatas yang pertama.

Kedua, plastisitas mikro dari pembebanan keatas akan menimbulkan micro residual stress (tegangan sisa mikro) yang akan membantu untuk menyebabkan reversed plasticity (plastisitas terbalik) yang disebut efek Bauschinger lokal pada tingkat mikro.



Gbr III.2. Model Wood untuk timbulnya microcrack pada slip band

Bila hal ini terjadi, situasi tanpa kerusakan akan diperbaiki yang menyebabkan retak tidak terdeteksi , dua alasan yang dapat disebutkan :

1. pembalikan keadaan plastis melibatkan suatu pergerakan perpindahan dari sudut “strain hardening”, ini adalah suatu keadaan yang tidak diharapkan atau dapat dikatakan suatu bidang yang telah mengalami slip sekali, tidak dapat mengalami lagi slip kembali pada arah berlawanan sehubungan dengan strain hardening.
2. berhubungan dengan lingkungan, dimana slip pada tahap pertama menunjukkan material, yang masih baru berhubungan dengan lingkungan. Dan semua material teknis beroksidasi sangat cepat sekali dan lapisan oksida menempel pada “base metal”. Plastisitas terbalik menghasilkan lapisan oksida tersebut dihilangkan, tetapi itu tidak terjadi dengan adanya pergeseran terbalik. Dalam keadaan vacum alasan ini tidak dapat dipakai, meski pada keadaan ini kelelahan masih mungkin terjadi. Pada gambar III.2 apa yang terjadi pada siklus pertama.

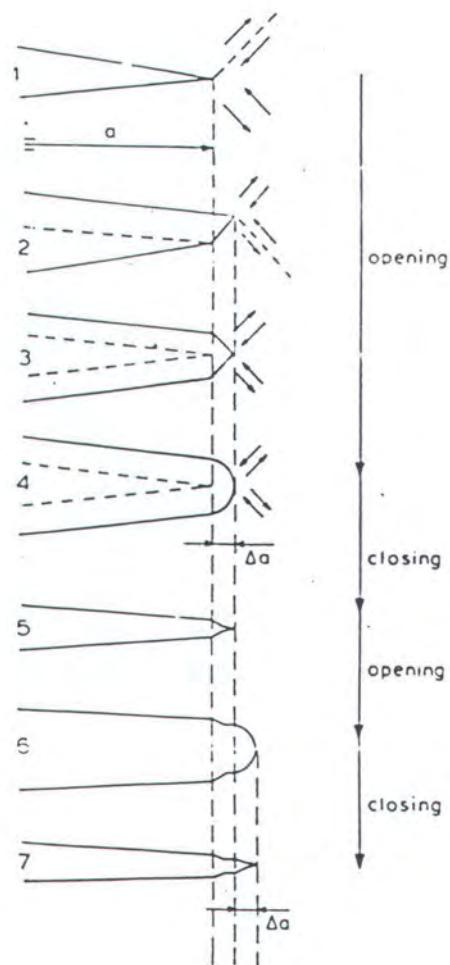
Microcrack terbentuk sebagai suatu gangguan pada material. Dari pemodelan ini dapat diterangkan hal-hal sebagai berikut :

1. crack nucleation dapat terjadi pada siklus pertama.
2. perpanjangan retak dapat terjadi pada setiap siklus beban.
3. bagian pertama dari perambatan microcrack biasanya terjadi sepanjang slip bands.

Retak fatigue yang telah berjalan juga dapat berkembang dengan mekanisme pembalikan pergeseran. Retak yang berujung tajam yang terjadi pada saat diberikan pembebanan tarik akan menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan di ujung retak tersebut, sehingga akan mudah terjadi pergeseran. Material yang terdapat diatas retak akan mengalami slip menurut bidang yang mengalami tegangan geser yang maksimum. Akibat pergeseran tersebut, retak akan membuka dan menjalar dengan jarak tertentu (Δa). Pergeseran juga dapat terjadi pada bidang geser yang lain seperti ditunjukkan pada periode penjalanan retak yang berikutnya. Pengerasan (hardening) dan tegangan yang bertambah kemudian juga mengaktipkan bidang-bidang pergeseran pararel lainnya sehingga akan terjadi penumpulan pada ujung retak. Kemudian pada saat dikenakan pembebanan maksimum retak akan kembali menjalar sebesar Δa .

Deformasi plastis yang terjadi pada daerah ujung retak berada pada posisi di tengah-tengah material yang masih bersifat elastis. Pada saat pembebanan dilepaskan, bagian elastis ini akan mengalami penyusutan dan bagian plastis yang telah berdeformasi tersebut akan tidak berada dalam kondisi yang bersesuaian lagi dengan daerah disekelilingnya. Hal ini menyebabkan timbulnya tegangan konpressif oleh bagian elastis dari material terhadap bagian plastis pada saat pembebanan yang terjadi menuju minimum. Tegangan yang terjadi pada ujung retak ini akan mencapai tingkat diatas titik luluh sehingga deformasi plastis pada arah sebaliknya akan terjadi dan ujung retak tersebut akan kembali menutup dan mengalami penajaman.

Secara skematis mekanisme retak fatigue dapat diringkas seperti pada gambar III.3 dibawah. Pertama-tama pergeseran akan terjadi dan diikuti oleh retak halus yang dapat dilihat dengan tingkat pembesaran yang tinggi. Setelah diamati dengan mata biasa dan akan berkembang sedemikian sehingga hanya beberapa retak utama saja yang terus merambat. Pertumbuhan retak yang terus berlanjut akan berakhir dengan timbulnya fracture yang mengakibatkan kegagalan pada spesimen. Proses yang sama akan berlangsung lebih cepat dengan semakin besarnya tegangan yang diberikan.



Gbr III.3. Penajaman dan penumpulan ujung retak

BAB IV

RETRADASI PENJALARAN RETAK FATIGUE

BAB IV

RETARDASI PENJALARAN RETAK FATIGUE

4.1. UMUM

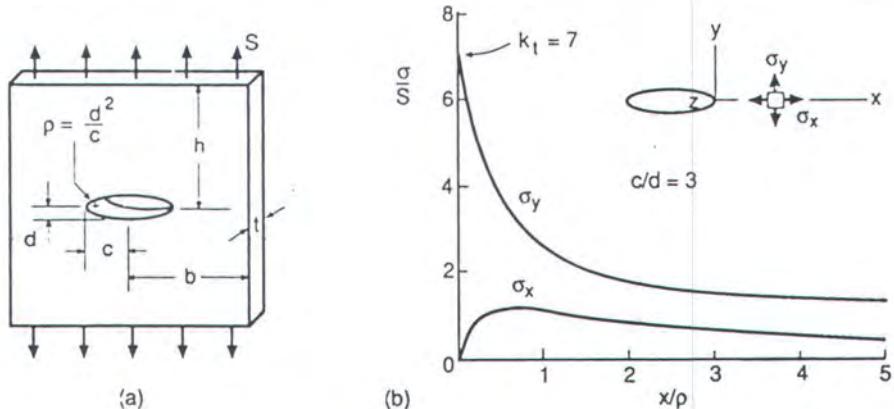
Sebagaimana telah disebut dalam bab sebelumnya, struktur-struktur yang mengalami pembebanan dinamis pada suatu keadaan tertentu akan mengalami kegagalan oleh sebab kelelahan (fatigue) struktur. Dalam proses fatigue itu sendiri umur kelelahan material tersebut menjadi hal yang sangat penting disebabkan hal tersebut menentukan umur pemakaian dari material tersebut. Dan tahap yang terpenting dari proses fatigue adalah tahap penjalaran retak (crack growth), dimana pada bagian ini dapat dipakai untuk menentukan umur pemakaianya untuk perencanaan struktur.

Salah satu metode analisa yang dipakai dalam permasalahan penjalaran retak adalah dengan menggunakan Mekanika Kepecahan (Fracture Mechanics). Suatu hubungan antara faktor intensitas tegangan, K , dan laju penjalaran retak, da/dN , adalah formulasi mendasar dari mekanika kepecahan untuk menjelaskan fenomena penjalaran retak. Beberapa variabel yang menentukan laju penjalaran retak antara lain adalah variabel pembebanan, bentuk geometri spesimen, kondisi lingkungan.

4.2 PENINGKATAN TEGANGAN SEPANJANG RETAK

Inglis [1], merupakan orang yang pertama kali menunjukkan pengaruh peningkatan tegangan sepanjang retak, Inglis menganalisa lubang berbentuk elip pada pelat datar yang mengalami beban uniform (seragam), seperti ditunjukkan pada gambar IV.1a.

Dalam analisa ini, ukuran lubang berbentuk elip dianggap kecil dibandingkan lebar pelat dan lubang sejajar dengan sumbu x serta tegak lurus terhadap tegangan seragam (uniform), σ , yang digunakan jauh dari retak. Medan tegangan uniform berubah dekat lubang elip, seperti ditunjukkan pada gambar IV.1b.



Gambar IV.1 Lubang berbentuk elip yang mengalami tegangan jauh (a), dan distribusi tegangan sepanjang sumbu x dekat lubang pada satu keadaan khusus (b).

Akibat yang paling besar karena adanya lubang pada pelat datar tersebut adalah pengaruhnya terhadap tegangan arah sumbu y, σ_y , yang sejajar dengan tegangan uniform, σ , yang digunakan jauh dari lubang elip.

Jika dianalisa besar tegangan σ_y sepanjang sumbu x dimulai dari b , maka terjadi peningkatan tegangan dekat lubang dan mempunyai nilai yang paling besar

pada ujung lubang elip, nilai maksimum ini tergantung dari besarnya lubang elip dan radius dari elip, ρ , Inglis merumuskan sebagai berikut :

$$\sigma_y = \sigma \left(1 + 2 \frac{c}{d} \right) = \sigma \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) \quad (4.1)$$

sebuah faktor konsentrasi tegangan untuk lubang elip dapat difenisikan sebagai perbandingan tegangan maksimum, σ_y , dan tegangan uniform jauh, σ , dirumuskan sebagai berikut :

$$k_t = \frac{\sigma_y}{\sigma} = 1 + 2 \frac{c}{d} = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (4.2)$$

Jika ukuran setengah tinggi elip, d , sangat kecil atau mendekati nol ($d \approx 0$), sehingga radius diujung elip mendekati nol ($\rho \approx 0$) yang sesuai dengan belahan ideal seperti retak, pada keadaan ini, tegangan σ_y menjadi tak berhingga, demikian juga halnya dengan faktor konsentrasi tegangan k_t , oleh karena itu, sebuah retak runcing menyebabkan konsentrasi tegangan yang besar dan khusus untuk retak runcing, secara teoritis tegangan diujung retak adalah tak hingga.

4.3 ANALISA TEGANGAN DI UJUNG RETAK

Untuk menganalisa tegangan di ujung retak suatu material atau struktur, dapat dianalisa dengan menggunakan konsep teori elastisitas. Dengan menggunakan metode analitis yang dibuat oleh Westergaard, Irwin.

Irwin dan Westergaard [2], telah menerbitkan pemecahan masalah distribusi tegangan diujung retak yang dihubungkan dengan tiga mode pembebanan utama, seperti pada gambar dibawah, yaitu :

- Mode I (opening atau tensile mode)

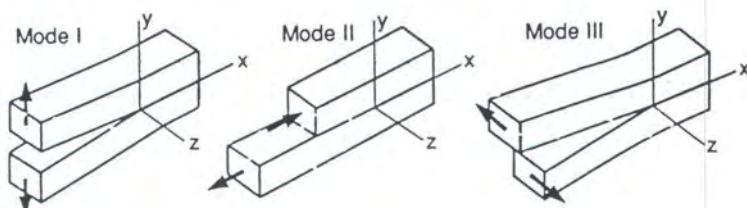
Dimana perpindahan atau perpanjangan permukaan retak tegak lurus bidang retak

- Mode II (shear mode)

Dimana perpindahan atau pertambahan panjang retak tegak lurus terhadap ujung utama dari retak

- Mode III (tearing mode)

Dimana perpindahan atau pertambahan panjang retak sejajar dengan ujung utama retak.



Gbr IV.2 mode pembebahan

Mode I disebabkan oleh beban tarik sedangkan mode yang lainnya disebabkan oleh beban geser dengan arah yang berbeda seperti terlihat pada gambar diatas.

Dari ketiga mode pembebahan diatas mode I, merupakan mode yang paling berpengaruh secara teknis terhadap kekuatan struktur, dimana arah pembebahan tegak lurus dengan bidang retak. Mode ini sering dijumpai dalam kejadian dilapangan dan juga lebih mudah dalam menganalisa dalam pelaksanaan pengujinya, oleh karena itu mode I dipakai sebagai mode pembebahan dalam pengujian dan juga dalam penulisan ini dengan alasan-alasan diatas

Dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Westergaard dan Irwin, maka tegangan disekitar ujung retak pada mode I (gambar IV.3), secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut :

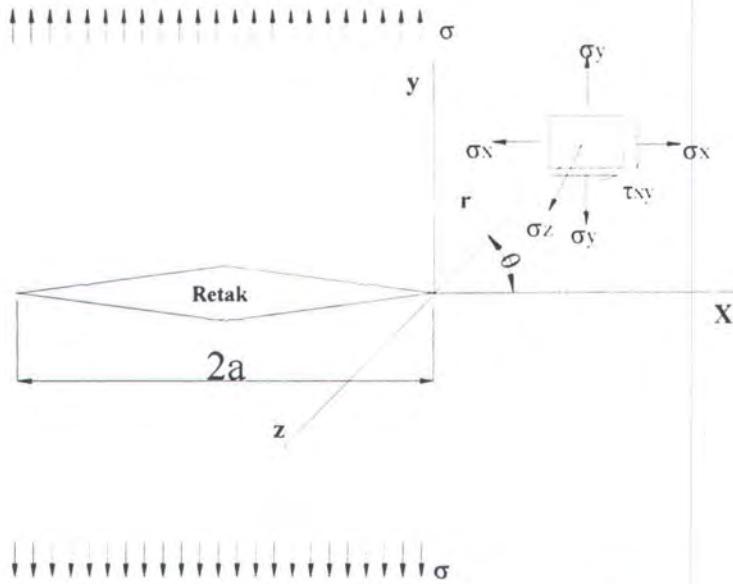
$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.3)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4.4)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (4.5)$$

atau

$$\sigma_{IJ} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (4.6)$$



Gambar IV.3 Retak pada sebuah pelat tak hingga

4.4 FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN

Salah satu parameter yang penting dalam menggambarkan besar (intensitas) tegangan disekitar ujung retak runcing adalah faktor intensitas

tegangan. Faktor intensitas tegangan dalam pembahasan ini adalah untuk pembebanan mode I, dilambangkan dengan K_I .

Untuk dapat mengetahui besarnya tegangan pada seluruh bidang pelat tak berhingga yang mengalami retak, yang mengalami beban uniform (seragam) jauh, σ , dari retak, maka terlebih dahulu harus diketahui besarnya K_I , seperti yang dirumuskan oleh Westergaard, Irwin diatas :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij(\beta)} \quad (4.7)$$

Besarnya faktor intensitas tegangan, K_I , dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain panjang retak, a , tegangan jauh yang digunakan, σ , serta F (faktor koreksi tanpa dimensi) yang dipengaruhi oleh bentuk pembebanan (beban tarik, atau beban tekan), posisi retak (retak tengah, retak tepi), geometri retak dan perbandingan panjang retak terhadap lebar material seperti a/W . Besarnya harga K_I secara umum dirumuskan sebagai berikut :

$$K = F \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4.8)$$

Penelitian- penelitian sebelumnya telah memberikan harga-harga faktor koreksi, F , untuk beberapa keadaan retak. Dalam pembahasan ini sesuai standart yang telah dipilih yaitu ASTM E 647 - 83. Untuk spesimen dengan type Compact Tension (CT), dengan retak ditepi serta laju penjalaran lebih besar dari 10^{-8} m/cycle mempunyai harga $F(a/W)$ sebagai berikut :

$$F\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{\left(2 + \left(\frac{a}{W}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{a}{W}\right)\right)^2} \left[0.866 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (4.9)$$

harga $F\left(\frac{a}{W}\right)$ valid untuk harga $\frac{a}{W} \geq 0.2$

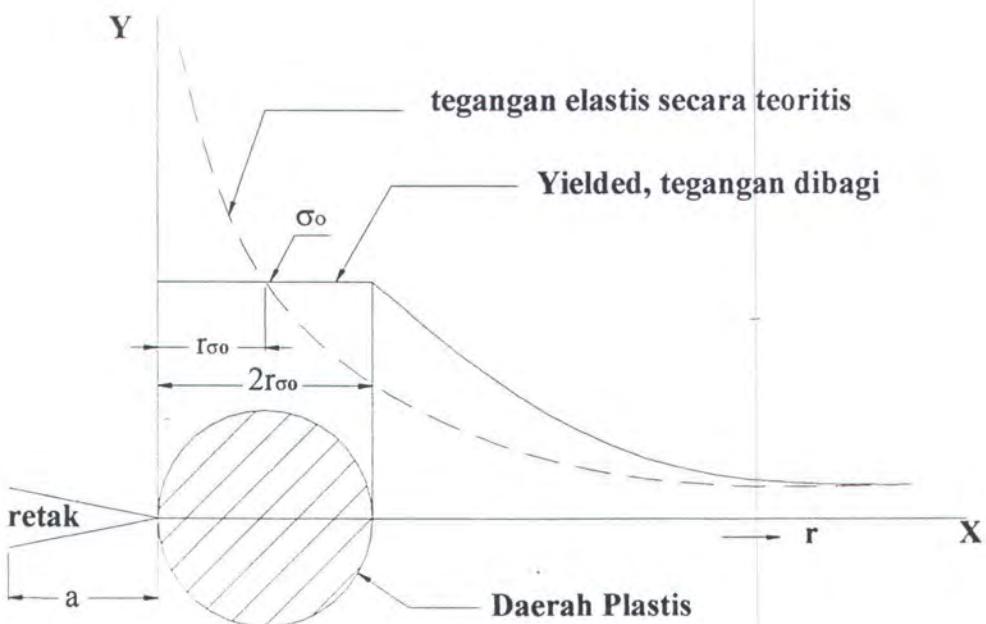
persamaan faktor intensitas tegangan diatas juga hanya berlaku untuk keadaan dimana ukuran daerah plastis di sekitar ujung retak jauh lebih kecil dibandingkan panjang retak.

4.5 UKURAN DAERAH PLASTIS DIUJUNG RETAK

Dari persamaan [4.3],[4.4] diatas, tampak bahwa, tegangan diujung retak (untuk daerah dengan r mendekati nol) besarnya menjadi tak hingga. Secara fisik hal ini tidak mungkin terjadi, karena material tidak akan dapat menahan tegangan yang sedemikian besarnya, sehingga ujung retak material akan menjadi tumpul dan terjadi fenomena yielding dan microcracking (retak mikro).

Timbulnya yielding secara lokal di ujung retak akan menentukan ukuran plastic zone yang terjadi dan menentukan konsekwensi berlaku tidaknya penerapan *linier elastic fracture mechanics* pada masalah tersebut.

Besarnya daerah plastis untuk regangan bidang dan tegangan bidang dapat ditentukan dari persamaan (4.3), (4.4) diatas.



Gambar IV.4. Perkiraan ukuran daerah plastis untuk tegangan bidang, menunjukkan perkiraan pengaruh tegangan dibagi kembali

4.5.1 Ukuran Daerah Plastis Untuk Tegangan Bidang

Untuk memperkirakan besarnya ukuran daerah plastis untuk tegangan bidang dapat diperkirakan dari persamaan (4.3), (4.4), untuk tegangan bidang $\sigma_z = 0$.

Pada bidang retak, dimana $\theta = 0$, persamaan (4.3), (4.4) disederhanakan menjadi :

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (4.10)$$

$$\sigma_z = \tau_{xy} = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0 \quad (4.11)$$

karena seluruh komponen tegangan geser sepanjang $\theta = 0$ adalah nol dan $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ secara prinsip merupakan tegangan normal. Kriteria tegangan geser dan yielding menghasilkan perkiraan bahwa yielding terjadi pada saat tegangan $\sigma_x = \sigma_y$

$=\sigma_0$, dimana σ_0 adalah tegangan yield (luluh) dari material. Dengan menggantikan nilai tegangan pada persamaan (4.10) diatas maka nilai r akan didapat :

$$r_{o\sigma} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_o} \right)^2 \quad (4.12)$$

Hasil ini adalah jarak didepan ujung retak dimana distribusi tegangan elastis melebihi kriteria yielding untuk plane stress. Dengan adanya yielding pada plastic zone, tegangan yang dihasilkan kurang dari nilai yang dihasilkan oleh persamaan medan tegangan elastis diatas. Material luluh kemudian akan menghasilkan tahanan yang lebih rendah dan deformasi yang lebih besar, sehingga yielding akan berkembang melebihi $r_{o\sigma}$. Umumnya yielding akan mencapai nilai sekitar $2 r_{o\sigma}$ oleh karena itu ukuran daerah plastis untuk tegangan bidang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$2r_{o\sigma} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_o} \right)^2 \quad (4.13)$$

Ukuran daerah plastis akan meningkat jika tegangan (oleh karenanya K) meningkat dan ukuran daerah plastis lebih kecil untuk material yang mempunyai tegangan luluh, σ_0 , yang lebih besar, untuk harga faktor intensitas tegangan, K_I , yang sama.

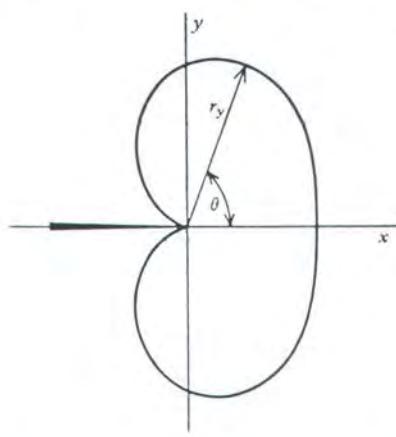
4.5.2 Ukuran Daerah Plastis Untuk Regangan Bidang

untuk regangan bidang, tegangan arah sumbu z, σ_z , tidak bernilai nol. Sehingga diperlukan nilai $\sigma_x = \sigma_y$ untuk menyebabkan yielding (luluh), sehingga mengurangi ukuran daerah plastis pada regangan bidang dibanding dengan

ukuran daerah plastis pada tegangan bidang. Irwin memperkirakan ukuran daerah plastis untuk regangan bidang adalah :

$$2r_{\infty} = \frac{1}{3\pi} \left(\frac{K}{\sigma_o} \right)^2 \quad (4.14)$$

dari persaman (4.14) diatas terlihat bahwa besarnya ukuran daerah plastis untuk regangan bidang adalah sepertiga tegangan bidang.



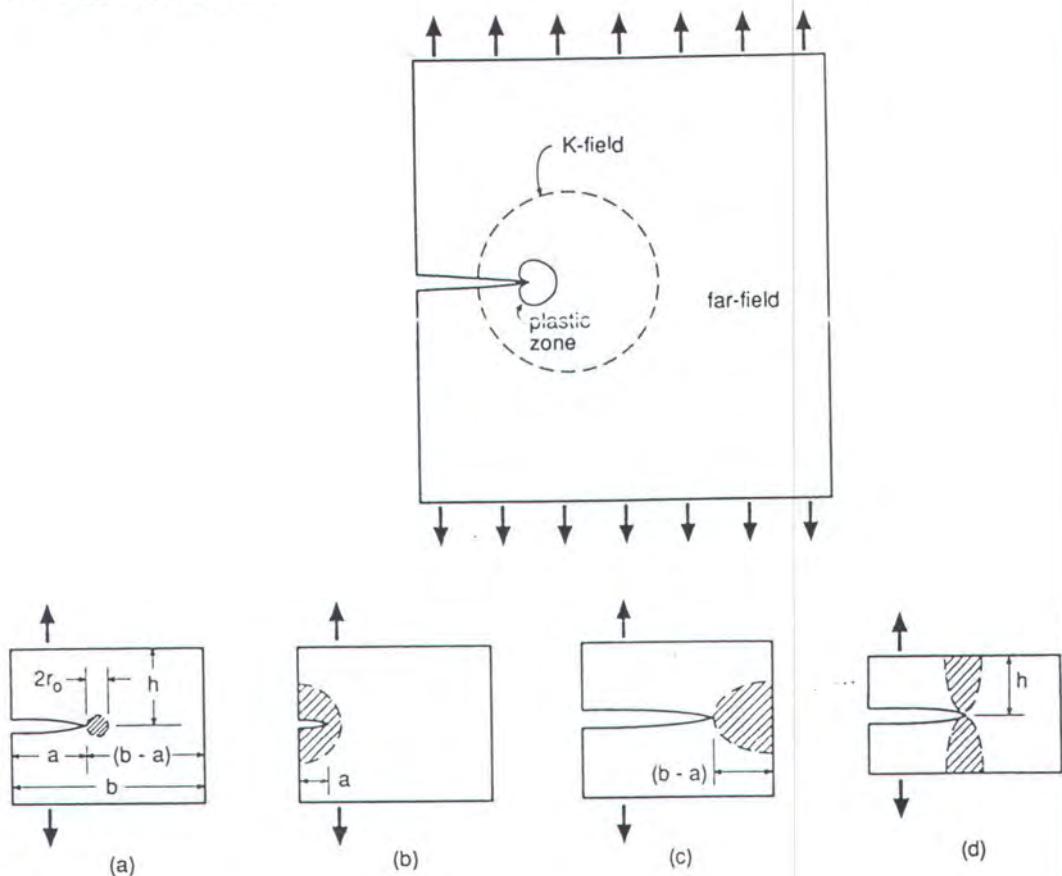
Gbr. IV.5. Batas plastic zone pada ujung retak sebagai fungsi θ

4.6. PEMBATASAN APLIKASI LINIER ELASTIC FRACTURE MECHANICS

Penerapan dari metode LEFM dibatasi menurut ukuran plastic zone yang terjadi pada ujung retak. Bila ukuran bagian plastic tersebut relatif cukup kecil, maka akan terdapat daerah diluar plastic zone tersebut dimana berlaku persamaan medan tegangan elastis. Daerah ini dinamakan *region of K-dominance* atau *K-field*. Hal ini diilustrasikan dalam gambar 4.12. Teori linier elastic fracture mechanics akan berlaku bila daerah ini ada. Daerah K-field ini meliputi dan menentukan perubahan yang terjadi pada ujung retak dan plastic zone tersebut..

Dengan demikian dapat dianggap bahwa nilai K akan menentukan karakterisasi tingkat situasi pada retak. Bila plastic yang terjadi terlalu besar maka

K-field akan hilang dan dengan demikian K tidak dapat berlaku sebagai penentu situasi disekitar retak.



Gbr.IV.6. K-field yang lebih besar dari plastic zone diperlukan agar LEFM dapat diaplikasikan

Secara umum, untuk dapat menerapkan LEFM, diperlukan ukuran plastic zone yang cukup kecil dibandingkan dengan jarak dari ujung retak ke sembarang batas material. Jarak sebesar empat kali ukuran plastic zone dianggap cukup untuk mencapai keadaan batas,

Pembatasan Linier Elastic Fracture Mechanics dapat dirumuskan sebagai

$$\text{berikut : } a, (b-a), h \geq \frac{4}{\pi} \left(\frac{K}{\sigma_o} \right)^2 \quad (4.15)$$

dimana : a , $(b-a)$, h = jarak dari ujung retak kebatas material.

Pembatasan ini harus dipenuhi untuk ketiga jarak tersebut, yaitu a, (b-a) dan h. Tidak terpenuhinya batasan tersebut menyebabkan keadaan yang mendekati gross yielding pada material dengan plastic zone, yang memanjang menuju satu atau beberapa batas ujung material. Perhitungan nilai K pada kondisi melebihi batas tersebut tidak akan menentukan keadaan kritis tidaknya retak pada material.

Untuk kasus-kasus fatigue pada umumnya, dengan siklus pembebanan yang cukup tinggi, retak akan terjadi pada kondisi quasi elastic. Dengan demikian ukuran plastic zone akan tetap kecil dibandingkan dengan panjang retak sehingga memungkinkan dan telah mencukupi untuk melakukan perhitungan dan analisa berdasarkan teori LEFM.

Beberapa hal yang memperkuat alasan ini adalah sebagai berikut :

1. pembebanan (tegangan nominal) yang cukup rendah sehingga menyebabkan tegangan pada ujung retak yang sebanding dengan tegangan normal.
2. kondisi triasial pada tegangan diujung retak akan berlaku sebagai penahanan terjadinya plastisitas.
3. ukuran plastic zone pada pembebanan berulang diketahui sebesar $\frac{1}{4}$ dibanding dengan ukuran plastic zone pada pembebanan monotomic.

IV.7. LAJU PENJALARAN RETAK MENENGAH

Formula untuk menghitung laju penjalaran retak diusulkan oleh Paris Erdogan dengan menghubungkan da/dN dengan rentang stress intensity faktor oleh persamaan :

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

dimana : $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$

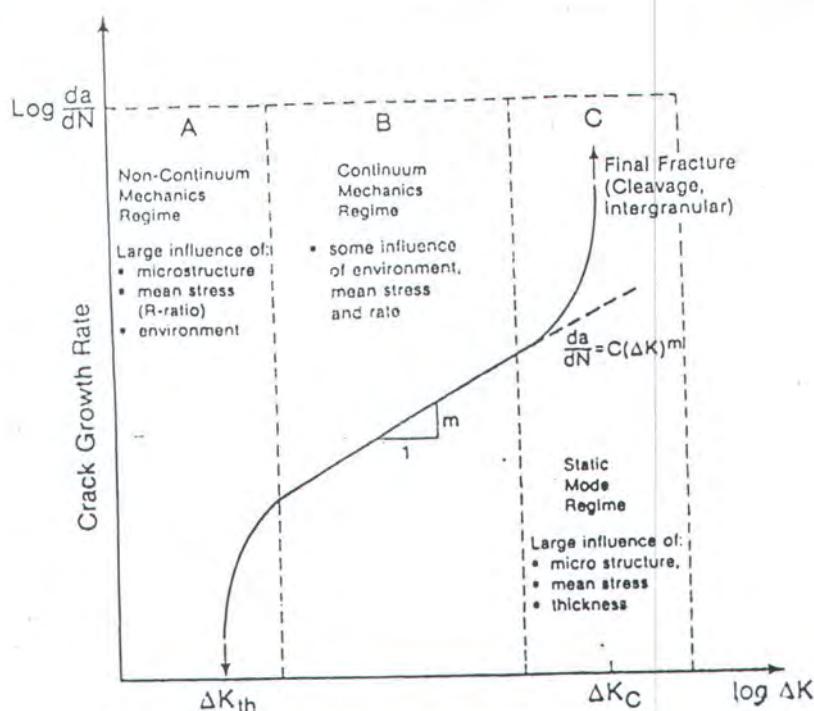
Sejumlah data penjalaran retak fatigue baik untuk material ferrous atau non ferrous telah didapat dengan pendekatan Paris Erdogan. Dari pendekatan stress intensity faktor dapat memberikan analisa data percobaan yang dapat diaplikasikan terhadap beberapa masalah teknis.

Dari penyelidikan lebih lanjut menunjukkan berdasar grafik log penjalaran retak fatigue da/dN vs ΔK , formula Paris Erdogan hanya valid pada daerah menengah pada kecepatan penjalaran retak yaitu antara $10^{-8} - 10^{-6}$ m/siklus atau $10^{-5} - 10^{-3}$ m/siklus, yaitu terletak pada daerah B dari gambar 4.7.

Variasi dari laju penjalaran retak da/dN adalah berbentuk sigmoidal, dimana harga ΔK dibatasi oleh K_{IC} dan parameter batas. Pada harga ΔK yang tinggi, kurva Paris Erdogan naik secara cepat (daerah C). Bila harga ΔK yang tinggi telah melewati K_{IC} , maka perambatan retak yang terjadi adalah unstable (tidak stabil). Arti unstable disini adalah bahwa laju penjalaran retak yang terjadi sangat cepat, dengan kata lain material akan mengalami *final failure*.

Sedang untuk ΔK rendah (daerah A), retak akan mulai merambat apabila harga ΔK melebihi harga ΔK_{th} .

Jadi dari gambar tersebut dapat diketahui bahwa formula Paris Erdogan memberikan gambaran yang bagus pada daerah laju penjalaran retak menengah sehingga dari data yang ada dapat diketahui jumlah siklus yang dibutuhkan untuk menjalarnya retak awal sampai dengan ukuran kritis yang dapat menimbulkan kegagalan.

Gbr IV.7. Kurva da/dN vs ΔK Paris Erdogan

Pengevaluasian karakteristik penjalaran retak pada suatu material dan aplikasi informasi yang didapat dari pengujian secara garis besar adalah sebagai berikut

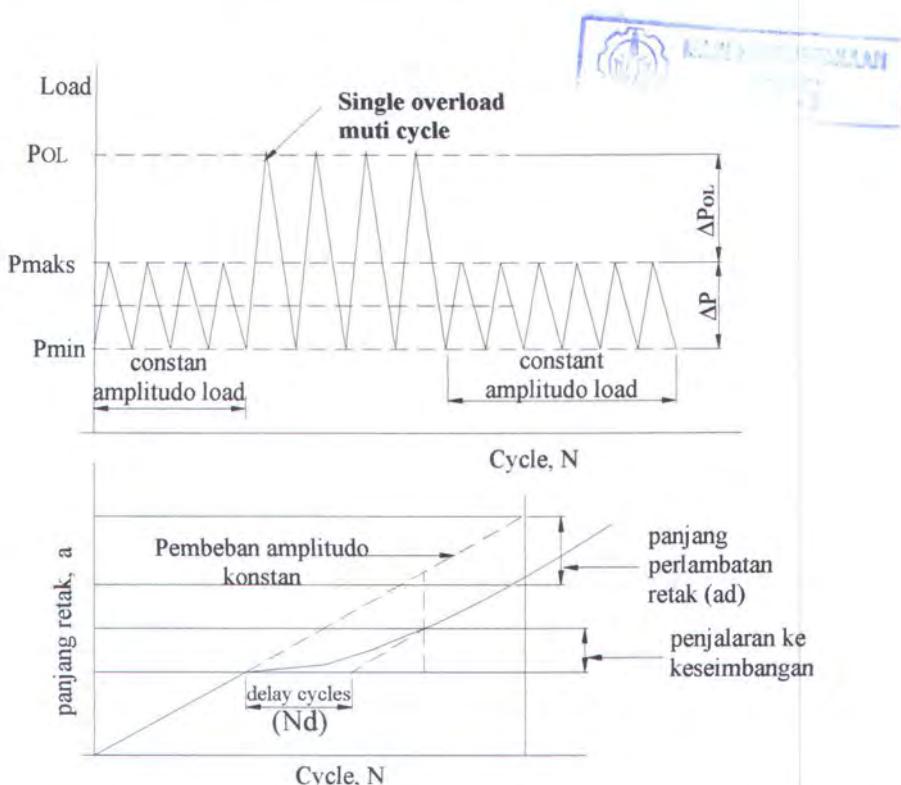
Pertama-tama pada sebuah spesimen dengan suatu konfigurasi tertentu dilakukan pengujian fatigue untuk beberapa tingkat pembebahan yang berbeda. Dari pengujian tersebut didapatkan grafik yang menggambarkan beberapa laju penjalaran retak pada suatu rentang tertentu dari tiap-tiap spesimen.

Laju penjalaran retak tersebut kemudian di evaluasi dan diplotkan pada kurva da/dN vs ΔK . Dari kurva yang telah dibuat tersebut aplikasi pengujian pada kondisi aktual. Suatu rekayasa struktur dapat dilakukan dengan terlebih dahulu ditentukan ΔK yang berlaku untuk komponen rekayasa yang dimaksud. Dengan berdasar pada kurva da/dN vs ΔK ini maka dapat diperkirakan suatu bentuk kurva yang menghubungkan panjang retak dan jumlah siklus pembebahan komponen tersebut.

IV.8. TERJADINYA RETARDASI

Pada kondisi sebenarnya, Banyak bagian struktur yang mengalami amplitudo pembebahan yang berubah-ubah selama umur operasionalnya (Service Life). Pada beban dengan amplitudo berubah ini prediksi perambatan retak menjadi kompleks karena adanya efek interaksi, perambatan retak ini tidak hanya tergantung ΔK , Stress Ratio (R) dan pembebahan yang sedang bekerja, tetapi juga dipengaruhi oleh beban sebelumnya. Efek interaksi ini dapat berupa retardasi (perlambatan) maupun akselerasi (percepatan) penjalaran retak fatigue.

Retardasi didefinisikan sebagai efek interaksi dimana retak menjalar lebih lambat dari penjalaran retak sebelumnya. Dan retardasi terjadi bila material mendapat beban berulang dengan amplitudo pembebahan konstan kemudian diikuti dengan kelebihan beban (overload) dan kembali ke pembebahan amplitudo konstan semula, lihat gambar IV.8 dibawah



Gambar IV.8. Skema ilustrasi pengaruh overload terhadap perilaku penjalaran retak

Menurut [1], bahwa besarnya pengaruh multiple overload pada retardasi penjalaran retak fatigue adalah dipengaruhi oleh variabel-variabel pembebahan (R , R_{OL}).

Seperti telah dijelaskan pada Bab II .3.2.1 di mana :

R , Rasio beban (stress ratio), yaitu perbandingan antara tegangan minimum dengan tegangan maksimum atau perbandingan beban minimum terhadap beban maksimum dalam satu siklus pembebahan.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$

Rasio beban overload, R_{OL} , yaitu perbandingan antara tegangan maksimum pada waktu overload dengan tegangan maksimum pada pembebahan amplitudo konstan dalam satu siklus pembebahan.

$$R_{OL} = \frac{\sigma_{maksOL}}{\sigma_{maks}} = \frac{P_{maksOL}}{P_{maks}}$$

Jadi menurut [1] bahwa semakin besar R_{OL} , maka pengaruhnya semakin besar terhadap retardasi penjalaran retak fatigue.

Ada beberapa model yang dapat digunakan untuk menjelaskan fenomena retardasi penjalaran retak yaitu :

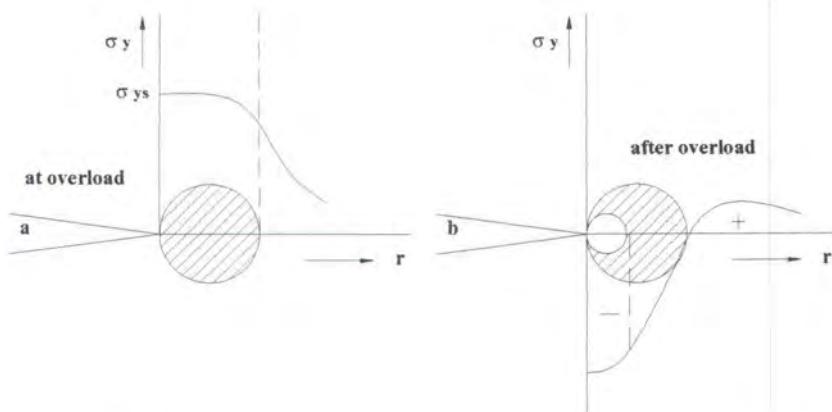
1. model geometri ujung retak.
2. model tegangan sisa tekan (negatif).
3. model Wheeler.

1. Model geometri ujung retak.

Model geometri ujung retak menerangkan bahwa beban-beban yang tinggi dapat menyebabkan bentuk ujung retak tumpul, sehingga sehingga terjadilah retardasi penjalaran retak fatigue pada beban-beban yang lebih rendah sampai bentuk ujung retak menjadi tajama kembali.

2. Model tegangan sisa tekan (negatif).

Model tegangan sisa tekan (negatif) menerangkan bahwa beban-beban yang tinggi akan menimbulkan tegangan tekan sisa pada ujung retak yang akan memperlambat (retardasi) penjalaran retak fatigue, karena tegangan tekan sisa tersebut cenderung menutup ujung retak, sehingga terjadilah retardasi penjalaran retak fatigue, (lihat gambar IV.9 dibawah)



Gbr IV.9. Tegangan tekan sisa pada ujung retak akibat overload

3. Model Wheeler

Model untuk menyelesaikan penomena retardasi yang telah diperkenalkan oleh Wheeler [6], dinamakan model retardasi Wheeler. Wheeler menganggap bahwa retardasi terjadi karena terbentuknya daerah plastis yang lebih besar di depan ujung retak pada saat terjadi kelebihan beban tarik (tensile overload).

Kelebihan beban tarik (tensile overload), menghasilkan deformasi tarik plastis yang lebih besar atau dinamakan daerah pengaruh kelebihan beban (overload affected zone). Dan pada saat pemindahan beban overload kepembebanan amplitudo konstan, maka sekitar material mengalami daerah elastis dan daerah plastis disekitar ujung retak mengalami tegangan tekan (compressive stress).

Pada model ini tingkat penjalaran retak berhubungan dengan ukuran daerah plastis pada saat overload dan ukuran daerah plastis berikutnya (pembebanan amplitudo konstan), (lihat gambar IV.10 dibawah).

Besarnya daerah plastis yang terjadi pada waktu overload dirumuskan seperti :

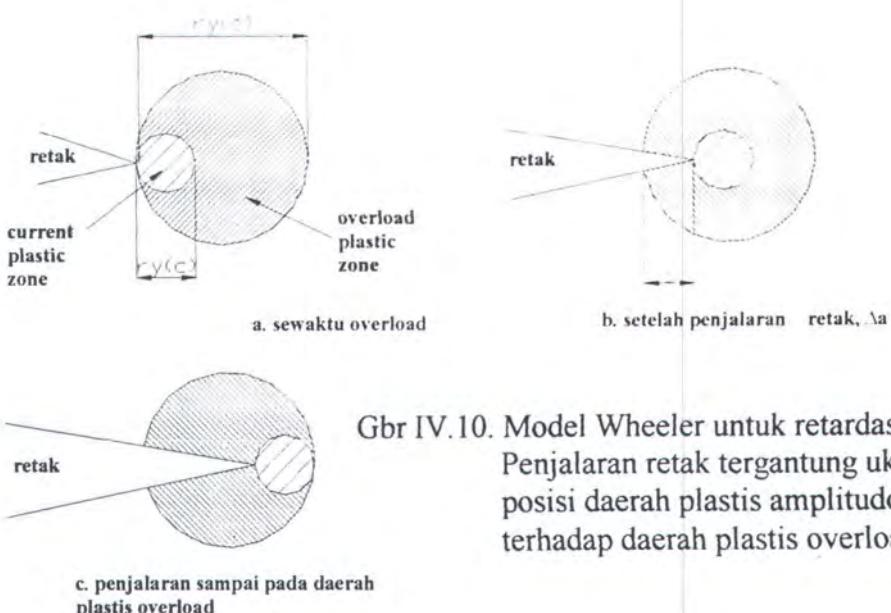
$$r_{y(OL)} = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_{OL}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$

dimana: K_{OL} = stress intensity faktor overload

$$\begin{aligned}\beta &= 2 \text{ (untuk plane stress)} \\ &= 6 \text{ (untuk plane strain)}\end{aligned}$$

Besarnya daerah platis pada saat amplitudo pembebanan konstan dirumuskan seperti :

$$r_{y(c)} = \frac{1}{\beta\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_{ys}} \right)^2$$



Gbr IV.10. Model Wheeler untuk retardasi fatigue. Penjalaran retak tergantung ukuran dan posisi daerah plastis amplitudo konstan terhadap daerah plastis overload

Wheeler menganggap bahwa pengaruh overload terhadap retardasi berlangsung selama $r_{y(c)} < r_{y(o)}$ (lihat gambar IV.10. (a) dan (b)), tetapi pengaruh overload tidak kelihatan sewaktu daerah plastis sekarang menyentuh batas luar $r_{y(o)}$, (lihat gambar IV.10.c).

BAB V

PELAKSANAAN DAN HASIL PENGUJIAN

BAB V

PELAKSANAAN DAN HASIL PENGUJIAN

V.1. Umum

Pengujian yang dilakukan adalah pengujian fatigue dimana dalam pengujian ini mengamati penjalaran retak fatigue secara visual dengan menggunakan mikroskop pada material high tensile A 36. Adapun pembebanan yang digunakan dalam pengujian fatigue ini ada 2 macam, yaitu :

1. pembebanan dengan amplitudo konstan
2. pembebanan amplitudo konstan, setelah retak menjalar dilanjutkan dengan pemberian single overload multi cycle dan kemudian dilanjutkan dengan kepembebanan amplitudo konstan seperti semula.

Dalam uji fatigue ini, variabel-variabel pembebanan R_{0L} , R yang berbeda-beda digunakan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap parameter-parameter retardasi (N_D , a_D) pada material tersebut.

Proses kelelahan struktur dapat dibedakan menjadi dua bagian :

1. Crack initiation, dimana proses ini meliputi proses slip (gelinciran) pada struktur mikro material sampai terjadi retak awal (initial crack).
2. Crack propagation, dimana proses ini merupakan proses lanjutan setelah terjadinya initial crack atau setelah proses initiation dilewati.

Pada pengujian ini, retak awal, ataupun proses crack initiation dianggap telah ada atau telah terjadi yaitu dengan membuat retak awal buatan yang sesuai

dengan yang disyaratkan oleh standart pengujian yang dipakai, selanjutnya pengamatan difokuskan pada proses penjalaran retak.

Dalam pengujian ini didapatkan hasil perambatan retaknya, jumlah siklus (cycle) pembebanan, rentang pembebanan, dan juga harga-harga stress ratio pada pembebanan amplitudo konstan dan pada saat overload pada setiap proses pembebanan. Dari data-data tadi dapat ditentukan laju penjalaran retak, da/dN serta rentang faktor intensitas tegangan (stress intensity faktor range), ΔK dan selanjutnya dapat dianalisa dalam bentuk grafik da/dN vs ΔK .

Sebelum dilakukan pengujian kelelahan (fatigue test) maka lebih dahulu dilakukan pengujian tarik untuk mengetahui sifat-sifat mekanis (mechanical properties) dari material yang akan diuji. Mechanical properties yang diselidiki adalah σ_{ult} , σ_{yield} . Hal yang sangat penting dari mechanical properties, utamanya adalah tegangan yield, yang dipakai untuk mengetahui elastisitas material, dimana hal ini dipakai untuk menentukan besarnya beban yang digunakan pada pembebanan dinamis. Setelah pengujian statis telah dilakukan, maka selanjutnya adalah melakukan kalibrasi mesin uji. Kalibrasi dilakukan untuk mendapatkan kesetaraan beban dari mesin uji dinamis terhadap mesin uji statis yang bekerja. Dari proses kalibrasi didapatkan suatu grafik kalibrasi yang dapat digunakan untuk mengetahui beban yang bekerja dari mesin uji dinamis.

Pelaksanaan uji tarik (tension test) dan uji fatigue (fatigue test) dilakukan di laboratorium konstruksi. Pembuatan spesimen uji tarik dan uji fatigue dilakukan di laboratorium teknologi mekanik FTK-ITS. Peralatan utama adalah mesin uji dinamis-statis. Pada pengujian statis dilakukan dengan memakai mesin

uji tarik, dan pengujian fatigue dilakukan dengan memakai mesin uji fatigue. Adapun perlengkapan pendukung lainnya adalah; mesin bor, mesin skrap, mesin gergaji, kertas gosok dan lain-lain.

Untuk mengamati penjalaran retak pada uji fatigue digunakan kaca pembesar dan teleskop. Bentuk gelombang pembebahan yang digunakan adalah sinusoidal, dapat dilihat dari display osiloskop. Persiapan dan pelaksanaan pengujian seluruhnya dilakukan oleh mahasiswa dibantu oleh teknisi laboratorium dan dibimbing oleh dosen pembimbing.

V.2. PERSIAPAN PENGUJIAN

V.2.1. PEMBUATAN SPESIMEN UJI

Spesimen uji dibuat berdasarkan standart uji ASTM (American Society for Testing and Material), yaitu ASTM E8 untuk uji tarik dan ASTM E 647 untuk uji fatigue, material yang dipilih sebagai spesimen adalah material high tensile A36.

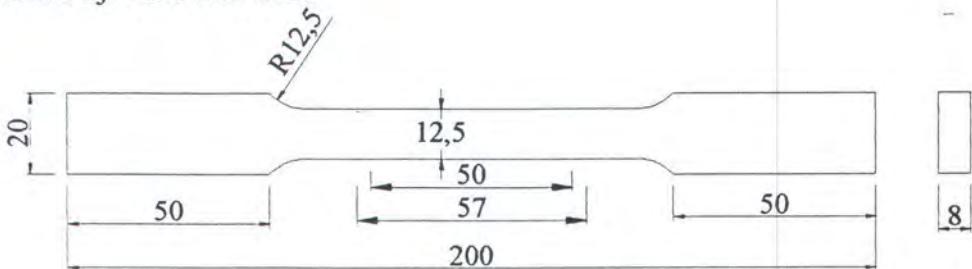
- **Pembuatan Spesimen Uji Tarik**

Perencanaan spesimen uji tarik dalam ASTM terdapat beberapa macam type antara lain type round bar, type sheet (datar).

Dalam pengujian ini, type spesimen yang dipilih adalah type sheet yang mensyaratkan ketebalan spesimen uji antara 0,13 – 15 mm, dan ketebalan spesimen yang digunakan adalah 8 mm. Proses pembuatannya dimulai dengan mengukur panjang lebar berdasarkan ukuran yang disyaratkan kemudian dipotong dengan melebihkan ukurannya lebih kurang 1 mm, kemudian material dipotong dengan mesin gergaji. Untuk mendapatkan bentuk yang sesuai dengan yang

disyaratkan, penggerjaan kemudian menggunakan mesin sekrap, diperhalus dengan kikir dan kertas gosok. Bentuk dan ukuran spesimen seperti pada gambar V.1.

Standart Uji Tarik ASTM E8



Gambar V.1.Bentuk dan Ukuran Spesimen Uji Tarik

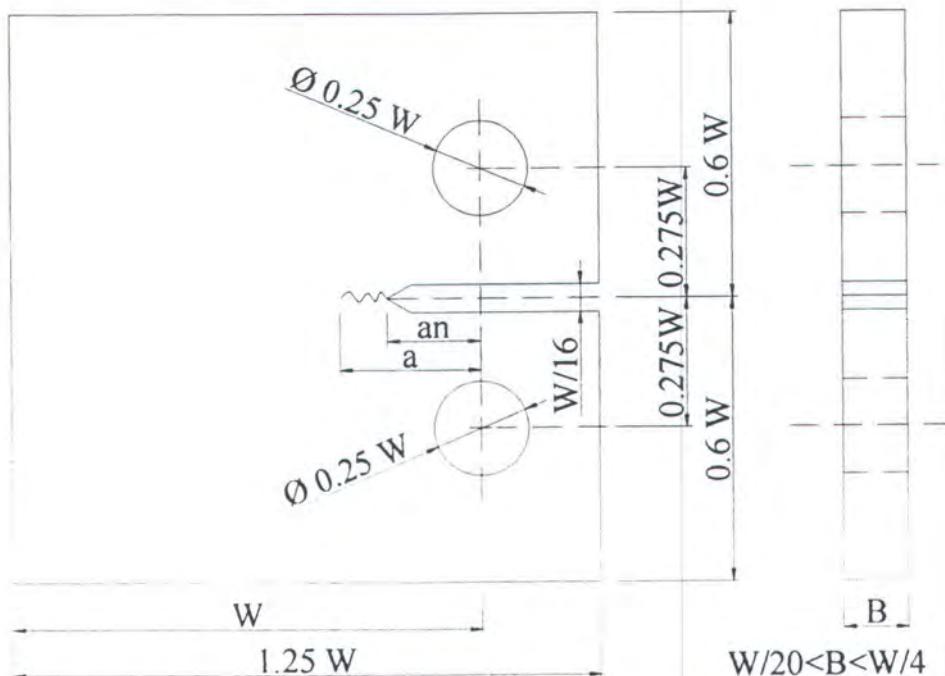
- **Pembuatan Spesimen Uji Fatigue**

Pada perencanaan spesimen uji fatigue dalam ASTM E 647 terdapat beberapa jenis antara lain, yaitu :

- Compact Tension (CT)
- Centre Crack Tension (CCT)

Untuk memudahkan proses pengujian dan pengamatan yang akan dilakukan, maka dipilih type Compact Tension (CT). Pada type ini spesimen mempunyai retak awal di tepi (crack edge). Pada type yang lain (CCT) retak berawal di tengah, dan relatif lebih sulit melakukan pengamatan. Bentuk dan ukuran spesimen type Compact Tension yang disyaratkan oleh ASTM E 647 adalah seperti pada gambar V.2

Standart Compact Tension C(T) Spesimen For Fatigue
Crack Growth Rate Testing



Gambar V.2. Bentuk dan ukuran spesimen type Compact Tension Standart ASTM

Ukuran-ukuran dalam spesimen ini adalah merupakan fungsi dari lebar spesimen (W), dalam perecanaan ini ditentukan $W = 100$ mm, sedangkan ukuran selainnya adalah fungsi dari lebar spesimen ini. Pada penentuan tebal spesimen disyaratkan bahwa :

$$W/20 \leq B \leq W/4$$

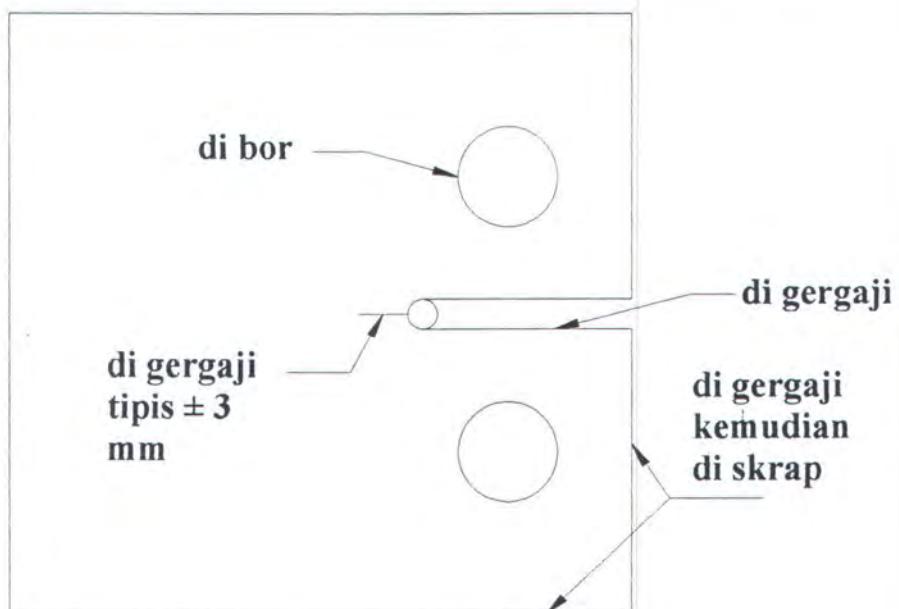
Berdasarkan hal ini tebal spesimen dibatasi :

$$5 \leq B \leq 20$$

Seperti halnya spesimen uji tarik, tebal dari spesimen uji fatigue dipilih dengan tebal 8 mm, dan memenuhi persyaratan diatas. Hanya pada perencanaan diameter lubang pin terdapat satu pengecualian dimana dalam persyaratan disebutkan diameter adalah 0,25 W atau dalam ukuran sebenarnya adalah 25 mm,

sedangkan lubang pin dalam klem yang ada di laboratorium berdiameter 20 mm. Untuk menyesuaikannya maka dipilih ukuran yang sama dengan yang dilaboratorium, diasumsikan bahwa dalam pengujian tidak terjadi perubahan yang berarti pada pin dan klem penggemggam.

Proses penggerjaan spesimen dimulai setelah penentuan ukuran telah selesai termasuk dengan penyesuaian-penyesuaian yang harus dilakukan. Ukuran spesimen yang telah disesuaikan tersebut seperti terlihat pada gambar V.4



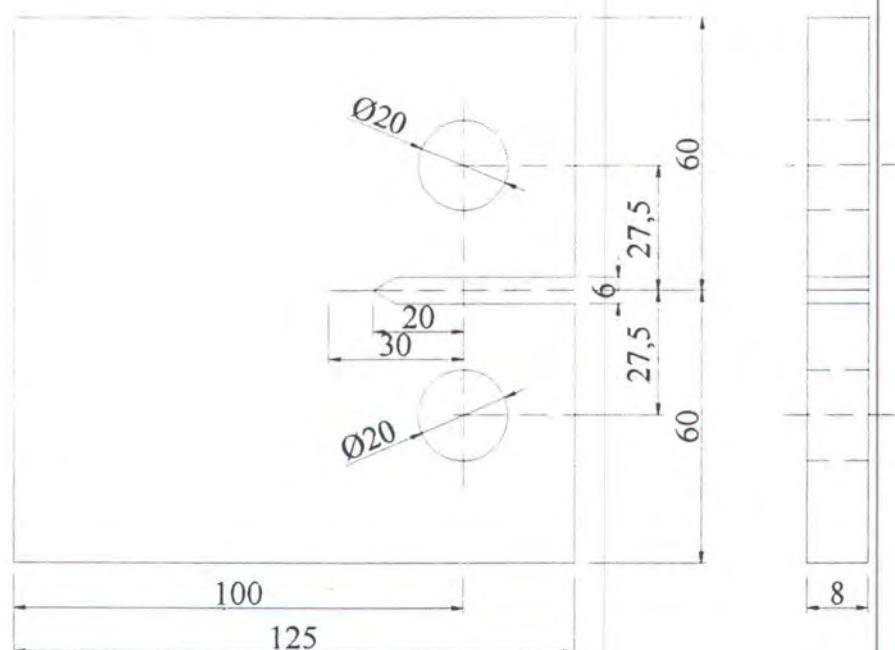
Gambar V.3. Proses penggerjaan spesimen fatigue

Proses penggerjaan seperti pada Gambar V.3. diawali dengan memotong ukuran spesimen dengan panjang dan lebar yang telah ditentukan dengan menggunakan gergaji mesin dan memberi toleransi ukuran ± 2 mm. Untuk mendapatkan ukuran yang lebih mendekati ukuran standart uji, maka prosesnya diawali dengan mesin sekrap, dilanjutkan dengan kikir. Setelah ukurannya telah

sesuai dengan pembuatan takikan/notch dan lubang pin, keduanya menggunakan mesin bor.

Pada proses pembuatan takikan (notch) dilakukan bertahap mula-mula dibor dulu kemudian digergaji dan dihaluskan dengan kikir untuk mendapatkan ukuran yang diinginkan. Pada ujung takikan tadi dibuatkan lagi takikannya yang lebih kecil yaitu dibuat dengan menggunakan gergaji yang ditipiskan sampai ketebalan ± 0.3 mm.

Standart Compact Tension C(T) Spesimen For Fatigue Crack Growth Rate Testing



Gambar V.4. Bentuk dan ukuran spesimen type Compact Tension

V.3. KALIBRASI

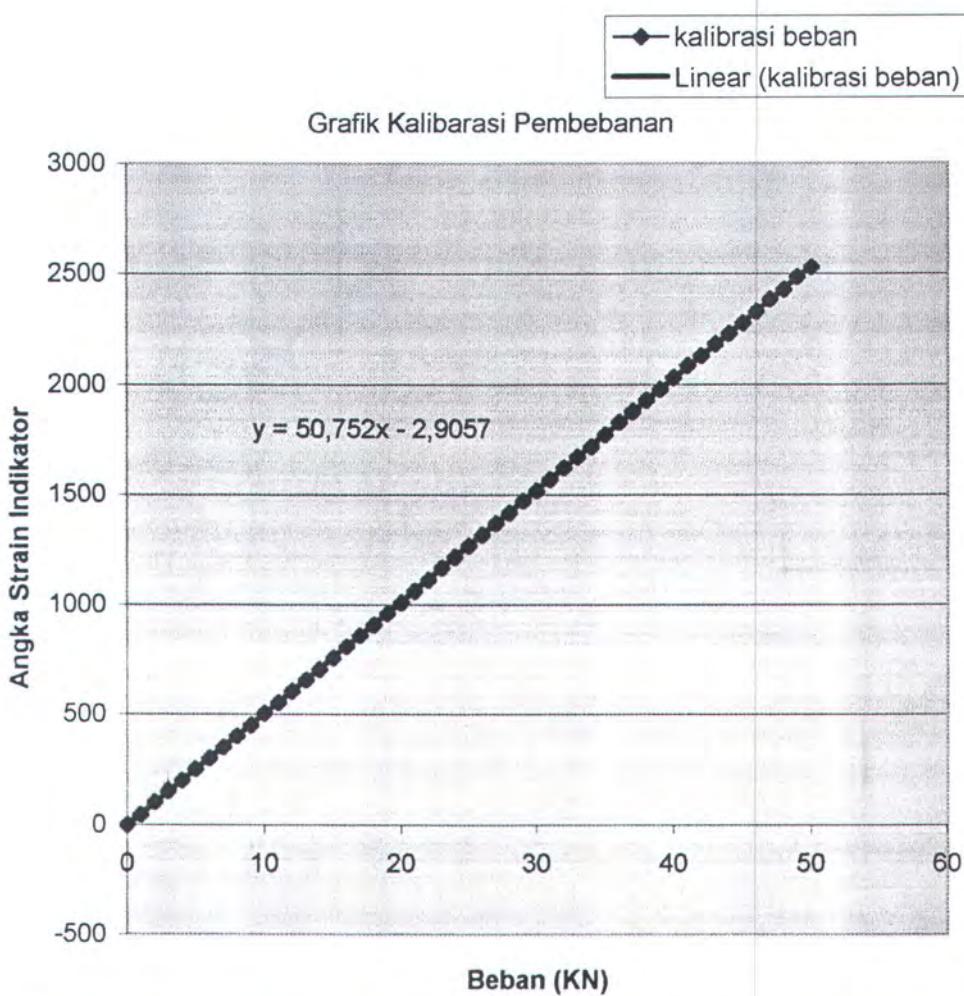
Proses kalibrasi dilakukan, bertujuan untuk mendapatkan kesetaraan antara loadcell pada mesin uji tarik dengan mesin uji fatigue. Dengan melakukan kalibrasi, dapat ditentukan beban kerja pada mesin uji dinamis, dengan mengamati

angka digital yang ditunjukkan pada indikator beban mesin uji fatigue. Kalibrasi dilakukan dengan memasang loadcell mesin uji fatigue pada mesin uji statis. Kemudian dikenakan beban statis dan dilakukan pengamatan angka pada indikator beban pada setiap kenaikan beban 1 KiloNewton.

Dari hasil kalibrasi beban tersebut dibuatkan grafik kalibrasi beban yang akan dipakai dalam pengujian selanjutnya. Hasil kalibrasi beban seperti ditunjukkan pada tabel di bawah ini

Beban Statis (KN)	Pengamatan pd strain indikator	Beban Statis (KN)	Pengamatan pd strain indikator
0	0	26	1314
1	46	27	1368
2	103	28	1417
3	153	29	1469
4	200	30	1518
5	253	31	1569
6	301	32	1622
7	352	33	1671
8	402	34	1719
9	452	35	1773
10	506	36	1829
11	555	37	1877
12	607	38	1927
13	655	39	1977
14	705	40	2031
15	758	41	2084
16	809	42	2130
17	861	43	2183
18	909	44	2231
19	960	45	2279
20	1009	46	2331
21	1061	47	2384
22	1112	48	2429
23	1164	49	2485
24	1215	50	2531
25	1265		

Tabel V.1. Hasil kalibrasi beban mesin uji tarik vs mesin uji fatigue



Grafik V.1. Grafik hasil kalibrasi beban mesin uji tarik vs mesin uji fatigue

Adapun langkah-langkah kerja pengkalibrasian adalah sebagai berikut :

1. Pemasangan penahanan tambahan pada load cell untuk klem penjepit pada mesin uji tarik.
2. Pemasangan load cell pada klem penjepit mesin uji tarik, memasang kabel penghubung load cell dengan strain amplifier.
3. Mesin uji tarik dan strain amplifier dinyalakan dan dilakukan pengaturan angka nol pada strain amplifier untuk keadaan tanpa beban load cell.

4. beban pada load cell dinaikkan perlahan, dan dilakukan pengamatan pada beban uji tarik. Pada setiap kenaikan 1 KN dilakukan pencatatan angka penunjuk baik pada mesin uji tarik maupun pada strain indikator pada strain amplifier. Pembebanan dihentikan sampai beban mendekati beban maksimum pada load cell dan diatur pada posisi nol kembali.
5. Dari data yang didapat dengan menggunakan regresi linier dibuat grafik kalibrasi beban statis dan angka penunjuk pada strain indikator. Dengan regresi linier dapat dibuat persamaan untuk menentukan beban dan angka penunjukan pada strain indicator.

V.4. PELAKSANAAN PENGUJIAN

V.4.1. Uji Tarik (Tension Test)

Uji tarik dilakukan untuk mendapatkan sifat-sifat mekanis (mechanical properties) material yaitu : Tegangan Yield, Tegangan Ultimate, Elongation. Setelah didapatkan sifat-sifat mekanisnya, terutama tegangan yield, besarnya pembebanan untuk pengujian fatigue dapat ditentukan.

Adapun langkah-langkah uji tarik yang dilakukan adalah sebagai berikut :

- Persiapan Material
 1. Persiapan dan pemeriksaan fisik ulang spesimen, untuk mengetahui keadaan fisik spesimen uji.
 2. Pengukuran ulang dimensi material meliputi lebar W, tebal B, panjang L.
- Persiapan Peralatan
 1. Pemeriksaan material uji statis (sesuai dengan petunjuk pengoperasian).

2. Pemilihan klem penjepit sesuai ketebalan dari material uji.
 3. Pemasangan kertas grafik (milimeter blok) pada drum penggambar grafik.
 4. Pemasangan pena penggambar grafik pengujian.
 5. Penentuan sumbu absis dari grafik pengujian.
 6. Penyediaan alat tulis dan kertas untuk pencatatan hasil pengamatan visual besarnya beban pada mesin uji.
- Pemilihan Skala Beban
 1. Pemilihan skala beban bertujuan agar besarnya pembebanan yang dikenakan pada material uji tidak berlebihan, pembebanan yang dikenakan adalah mulai dari nol sampai spesimen uji putus, maka dipilih rentang beban yang memenuhiinya. Material yang akan diuji adalah High Tensile A 36, maka diperkirakan kekuatan tariknya antara $525 - 630 \text{ N/mm}^2$, maka dari rumus :

$$\sigma = \frac{1,02P}{A}$$

dimana :

P = Beban (KN)

A = Luas Penampang material (mm^2)

Karena tebal material (B), 8 mm dan lebar (W), 12,5 mm, maka $A = 100 \text{ mm}^2$, maka didapatkan $P = 64,26 \text{ KN}$. Dari perkiraan ini dipilih skala bebannya adalah 100, artinya beban maksimum yang dapat ditunjukkan mesin adalah 100 KN.

- Pelaksanaan Pengujian

1. Material yang akan diuji dipasang pada klem penjepit atas dan klem penjepit bawah. Kemudian dipastikan agar material uji tidak terjepit pada bagian gage length-nya.
2. Saklar power dinyalakan.
3. Pembebanan dilakukan bertahap disesuaikan keadaan material, kemudian konstan.
4. Dilakukan pengamatan terhadap jarum penunjuk pembebanan, bila material mencapai yield yang ditandai dengan ketidak beraturan pada kenaikan jarum. Dan titik ultimate dapat ditunjukkan dengan skala maksimum yang dicapai.
5. Dilakukan pencatatan beban maksimum yang dicapai.

- Penanganan setelah pengujian

1. Melepas patahan spesimen dari klem penjepit, kemudian dilakukan pengukuran terhadap dimensi, panjang, lebar dan tebal spesimen setelah mengalami pemuluran dan melakukan pencatatan.
2. Dari grafik dapat dihitung harga tegangan yield material dengan perbandingan geometris panjang ordinat titik yield dan titik ultimate.

Berikut ini adalah tabel yang berisi data hasil uji tarik yang telah dilakukan untuk tiga spesimen.

W (mm)	T (mm)	A (mm ²)	Lo (mm)	Lf (mm)
12,5	8	100	50	65,5
12,6	8	100,8	50	64,8
12,5	8	100	50	67

Material	F _{YIELD} (KN)	F _{ULT} (KN)	σ _{Yield} (N/mm ²)	σ _{ULT} (N/mm ²)	ε _f (%)	σ _{Yield} (kgf/mm ²)	σ _{ULT} (kgf/mm ²)
Spesimen I	45	61,8	450	618	27,19	45,9184	63,0612
Spesimen II	45,5	62,3	451,389	618,06	25,96	46,0601	63,0669
Spesimen III	45	62,5	450	625	29,82	45,9184	63,7755

Tabel V.2. Hasil Pengujian Tarik

V.4.2. UJI FATIGUE (KELELAHAN)

V.4.2.1. Beban Uji Fatigue

Pada pengujian fatigue (kelelahan) ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel pembebanan (R , R_{OL}) terhadap parameter-parameter retardasi (N_D , a_D) penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A36.

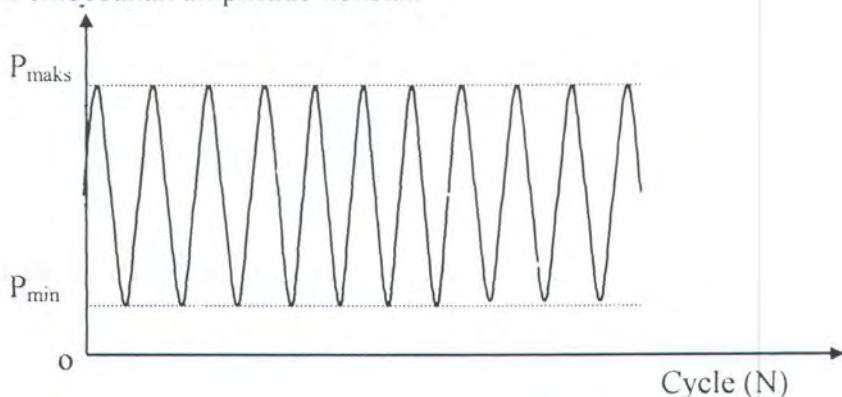
Seperti disebutkan pada Bab V.1 diatas bahwa ada dua macam pembebanan yang digunakan dalam pengujian ini dan nantinya laju penjalaran retaknya akan diperbandingkan.

Adapun pembebanan yang digunakan dalam pengujian fatigue ini adalah :

1. pembebanan dengan amplitudo konstan
2. pembebanan amplitudo konstan, setelah retak menjalar dilanjutkan dengan pemberian single overload multi cycle dan kemudian dilanjutkan dengan kepembebanan amplitudo konstan seperti semula.

Besarnya beban yang digunakan dalam pengujian ini adalah sebagai berikut :

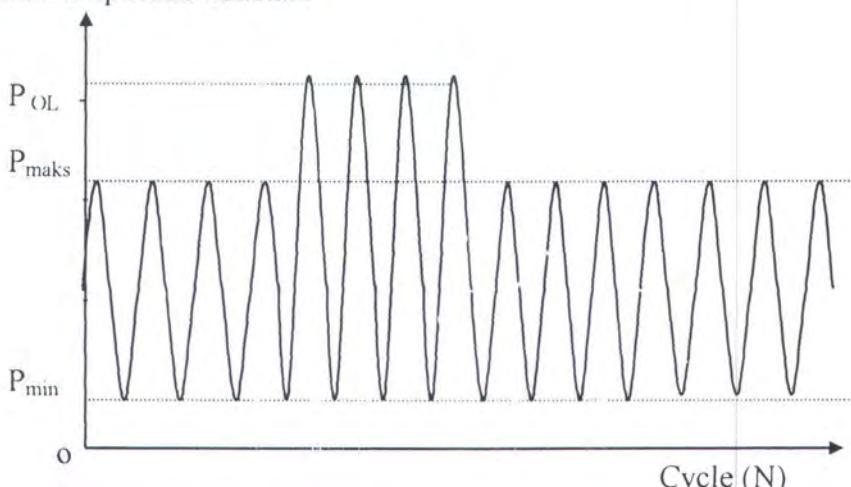
I. Pembebaan amplitudo konstan



Kondisi	P_{min} (KN)	P_{maks} (KN)	$R = P_{\text{min}} / P_{\text{maks}}$
I	5	15	0.33
Frekwensi		2 Hz	
Gelombang pembebaan		Sinusoidal	

Tabel V.3. Beban Amplitudo Konstan

II. Pembebaan dengan penggunaan single overload multi cycle pada pembebaan amplitudo konstan.



Kondisi	P_{min} (KN)	P_{maks} (KN)	P_{OL} (KN)	$R = P_{\text{min}} / P_{\text{maks}}$	$R_{\text{OL}} = P_{\text{OL}} / P_{\text{maks}}$
II	5	15	30	0.33	2
III	5	15	40	0.33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan				2 Hz	
Frekwensi saat tensile overload				2 Hz	
gelombang pembebaan				Sinusoidal	

Tabel V.4. Beban Single Overload Multi Cycle

Disyaratkan bahwa besarnya beban yang diberikan sewaktu uji fatigue tidak boleh melebihi beban yield material. Dari hasil uji tarik yang telah dilaksanakan, diketahui bahwa tegangan yield material adalah (σ_{Yield}) = 45,918 kg/mm², maka dari hasil ini dapat di cek apakah besar pembebanan pada pelaksanaan uji fatigue (kelelahan) melebihi tegangan yield material.

Beban terbesar yang digunakan selama pengujian adalah :

$$P_{maks} = 40 \text{ KN} = 40000 \text{ N}$$

$$A = 70 \times 8 = 560 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}\sigma_{Applied} &= \frac{P}{A} \\ &= 40000 / 560 \\ &= 71,4285 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

karena 1 kg = 9,8 N, maka :

$$\sigma_{Applied} = 7,288 \text{ kg/mm}^2$$

Jadi tegangan yang digunakan ($\sigma_{Applied} = 7,288 \text{ kg/mm}^2$) besarnya masih jauh lebih kecil dibawah tegangan yield ($\sigma_{Yield} = 45,918 \text{ kg/mm}^2$) material yang digunakan.

Adapun alasan pengambilan besar beban seperti diatas karena kemampuan mesin fatigue yang digunakan sangat terbatas, diamana kemampuan bebannya adalah sekitar 47 KN.

Dari kalibrasi mesin dinamis telah didapatkan persamaan dimana dapat ditentukan berapa angka yang menunjukkan beban strain indikator dalam pengujian dinamis, persamaan kalibrasi beban adalah :

$$Y = 50,752X - 2,9057$$

dimana : Y = angka yang menunjukkan beban strain indikator

$$X = \text{beban statis [KN]}$$

jadi beban pada strain indikator adalah :

Pembelahan amplitudo konstan

Kondisi	Strain Indikator Min	Strain Indikator Maks
I	250	758
Frekwensi		2 Hz
Gelombang pembelahan		Sinusoidal

Tabel V.5 Besar beban pada strain indikator pada pembelahan amplitudo konstan

Pembelahan Single Overload Multi Cycle pada pembelahan amplitudo konstan

Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
II	250	758	1520	0.33	2
III	250	758	2027	0.33	2.67
Frekwensi amplitudo konstan				2 Hz	
Frekwensi saat single overload multi cycle				2 Hz	
Gelombang pembelahan				Sinusoidal	

Tabel V.6 Besar beban pada strain indikator pada pembelahan single overload multi cycle.

V.4.2.2. Prosedur Pelaksanaan Pengujian Fatigue.

Prosedur pengujian yang dilaksanakan sebagai berikut :

I. Pembelahan Amplitudo Konstan.

1. setelah pemanasan mesin uji selesai dilakukan, spesimen dipasang pada mesin dengan memperhatikan agar lubang pin spesimen tepat berada segaris dengan lubang pin pegangan pada mesin, baut pas dengan diameter 20 mm dipergunakan sebagai penahan spesimen pada pegangan yang terdapat pada mesin.
2. setelah spesimen terpasang pada mesin, dilakukan pengesetan travelling mikroskop sehingga penglihatan dan fokus tepat berada pada ujung notch. Dalam

pengamatan ini digunakan lampu baca sebagai alat penerangan. Setelah selesai diset, baut penahan mikroscope dikencangkan.

3. pengujian dilakukan dengan pembebahan sesuai dengan yang telah ditentukan. Pembebahan diberikan naik secara bertahap sehingga mencapai harga P_{maks} dan P_{min} yang diinginkan. Cycle counter dihidupkan sehingga jumlah siklus dapat diketahui.
4. Ujung fatigue pre-cracked dipakai sebagai acuan untuk pengukuran panjang retak yang akan timbul kemudian.
5. pengamatan ujung retak dilakukan setelah spesimen mengalami siklus pembebahan tertentu. Pangjang retak diukur pada ujung retak, pada ASTM, pengukuran petambahan retak sesuai rumus :

- $\Delta a \leq 0,04 W$ untuk $0,25 \leq a/W \leq 0,4$
- $\Delta a \leq 0,02 W$ untuk $0,4 \leq a/W \leq 0,6$
- $\Delta a \leq 0,01 W$ untuk $a/W \geq 0,4$

berdasarkan persyaratan diatas dengan retak awal 30 mm, maka batas pengukuran yang diijinkan ($W = 100$) adalah :

$$\Delta a \leq 0,04 (100)$$

$$\Delta a \leq 4 \text{ mm}$$

6. Sewaktu pengukuran panjang retak, siklus pembebahan dihentikan, beban yang terjadi pada spesimen dijaga agar tetap berada disekitar nol.
7. Hasil pencatatan panjang retak dan jumlah siklus yang diperlukan untuk mencapai panjang retak tersebut dibuat dalam bentuk tabel untuk memudahkan

analisa. Pengujian dan pencatatan dilanjutkan sampai dapat dikumpulkan sejumlah data tertentu.

II. Pembebanan Single Overload Multi Cycle

Prosedur pengujian pada pembebanan single overload multi cycle ini hampir sama dengan prosedur pengujian pembebanan amplitudo konstan. Tetapi dalam pemberian beban pengujian ada perbedaan.

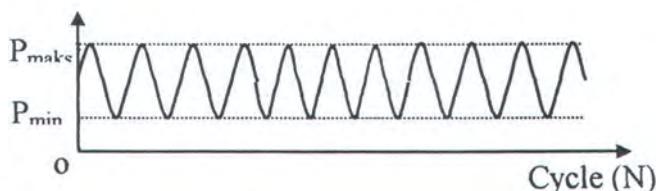
Pada pembebanan single overload multi cycle ini, pertama spesimen dibebani dengan beban amplitudo konstan sampai retak menjalar, dan setelah retak menjalar dilakukan pengukuran tiap 1000 siklus pembebanan, setelah spesimen telah dibebani sampai 21000 siklus dan spesimen telah menjalar sampai panjang tertentu maka dilakukan pemberian beban single overload multi cycle pada spesimen uji.

Setelah pemberian beban single overload multi cycle, beban dikembalikan lagi ke nol, kemudian dilanjutkan lagi dengan pemberian beban amplitudo konstan. Dan pengukuran pertambahan panjang retak dilakukan tiap 1000 siklus.

V.5. Hasil Pengujian Fatigue (Kelelahan).

Dari hasil pengujian yang dilakukan maka didapatkan data hasil pengujian untuk tiga kondisi pembebahan (kondisi I, II, III).

I. Pembebahan amplitudo konstan (kondisi I)



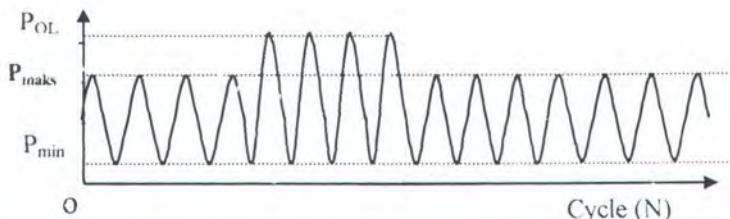
Kondisi	Strain Indikator Min	Strain Indikator Maks
I	250	758
Frekwensi	2 Hz	
Gelombang pembebahan	Sinusoidal	

Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembebahan Amplitudo Konstan (Kondisi I)

No	Cycle	strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	a _{rata-rata} (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	0,4072
3	19000	758	250	508	31,22	0,22	31,110
4	20000	758	250	508	31,48	0,26	31,350
5	21000	758	250	508	31,70	0,22	31,590
6	22000	758	250	508	31,94	0,24	31,820
7	23000	758	250	508	32,15	0,21	32,045
8	24000	758	250	508	32,40	0,25	32,275
9	25000	758	250	508	32,66	0,26	32,530
10	26000	758	250	508	32,89	0,23	32,775
11	27000	758	250	508	33,10	0,21	32,995
12	28000	758	250	508	33,34	0,24	33,220
13	29000	758	250	508	33,61	0,27	33,475
14	30000	758	250	508	33,91	0,30	33,760
15	31000	758	250	508	34,24	0,33	34,075

Tabel V.7 Hasil Pengujian Dinamis Pembebahan Amplitudo Konstan

II. Pembelahan Single Overload Multi Cycle (kondisi II)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
II	250	758	1520	0.33	2
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembelahan					Sinusoidal

Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembelahan Single Overload Multi Cycle (Kondisi II)

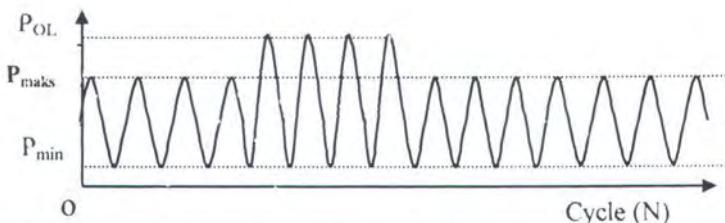
$$R = 0,33$$

$$R_{OL} = 2$$

Nc	Cycle	Strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	30,875
3	19000	758	250	508	31,23	0,23	31,115
4	20000	758	250	508	31,48	0,25	31,355
5	21000	758	250	508	31,69	0,21	31,585
6	22000	758	250	508	31,75	0,06	31,720
7	23000	758	250	508	31,82	0,07	31,785
8	24000	758	250	508	31,93	0,11	31,875
9	25000	758	250	508	32,06	0,13	31,995
10	26000	758	250	508	32,22	0,16	32,140
11	27000	758	250	508	32,40	0,18	32,310
12	28000	758	250	508	32,61	0,21	32,505
13	29000	758	250	508	32,84	0,23	32,725
14	30000	758	250	508	33,06	0,22	32,950
15	31000	758	250	508	33,30	0,24	33,180

Tabel V.8 Hasil Pengujian Dinamis Pembelahan Single Overload Multi Cycle (Kondisi II)

III. Pembebanan Single Overload Multi Cycle (kondisi III)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
III	250	758	2027	0,33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembebatan					Sinusoidal

Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembebatan Single Overload Multi Cycle (kondisi III)

$$R = 0,33$$

$$R_{OL} = 2,67$$

No	Cycle	Strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	$a_{rata-rata}$ (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	30,875
3	19000	758	250	508	31,24	0,24	31,120
4	20000	758	250	508	31,49	0,25	31,365
5	21000	758	250	508	31,72	0,23	31,605
6	22000	758	250	508	31,75	0,03	31,735
7	23000	758	250	508	31,79	0,04	31,770
8	24000	758	250	508	31,85	0,06	31,820
9	25000	758	250	508	31,96	0,11	31,905
10	26000	758	250	508	32,10	0,14	32,030
11	27000	758	250	508	32,26	0,16	32,180
12	28000	758	250	508	32,45	0,19	32,355
13	29000	758	250	508	32,68	0,23	32,565
14	30000	758	250	508	32,89	0,21	32,785
15	31000	758	250	508	33,14	0,25	33,015

Tabel V.9 Hasil Pengujian Dinamis Pembebatan Single Overload Multi Cycle (Kondisi III)

BAB VI

ANALISA DATA HASIL PENGUJIAN

BAB VI

ANALISA DATA HASIL PENGUJIAN

VI.1. Langkah-langkah Penganalisaan laju penjalaran retak.

Setelah dilakukan pengujian untuk beberapa spesimen dan variabel yang berbeda-beda maka data pengujian dianalisa untuk mendapatkan hasil yang diinginkan yaitu untuk mengetahui pengaruh variabel-variabel pembebahan (R , R_{OL}) terhadap parameter-parameter retardasi (a_D , N_D) penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36.

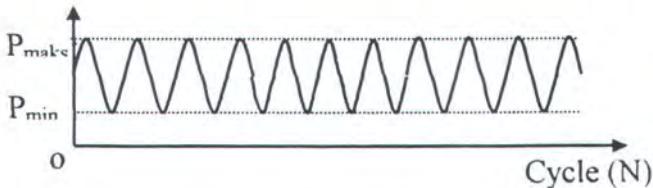
Berdasarkan konsep mekanika kepecahan (fracture mechanics), langkah-langkah untuk menganalisa penjalaran retak dan kelakuan penjalaran retak pada material adalah sebagai berikut :

1. Pembuatan grafik perpanjangan retak terhadap pertambahan jumlah siklus (a vs N).
2. Menentukan rentang stress intensity faktor $\Delta K = K_{maks} - K_{min}$. Sesuai standart ASTM E 647-93, valid untuk $\alpha (a/W) > 0,2$. Rumus ini sesuai dengan bentuk spesimen Compact Tension Test dengan retak awal di tepi.
3. Menentukan kecepatan penjalaran retak, dimana $da/dN = \Delta a/\Delta N$.
4. Pembuatan grafik laju penjalaran retak, yaitu grafik $\log \frac{da}{dN}$ vs $\log \Delta K$.
5. Analisa hasil perhitungan dan grafik.

VI.2. Pembuatan grafik a vs N.

Dari data hasil pengujian yang didapat maka dapat dibuat grafik a vs N, dimana a (panjang retak) dan N (siklus beban). Dari grafik a vs N akan dapat dianalisa laju penjalaran retak untuk tiga kondisi pembebahan.

I. Pembebahan amplitudo konstan (kondisi I)



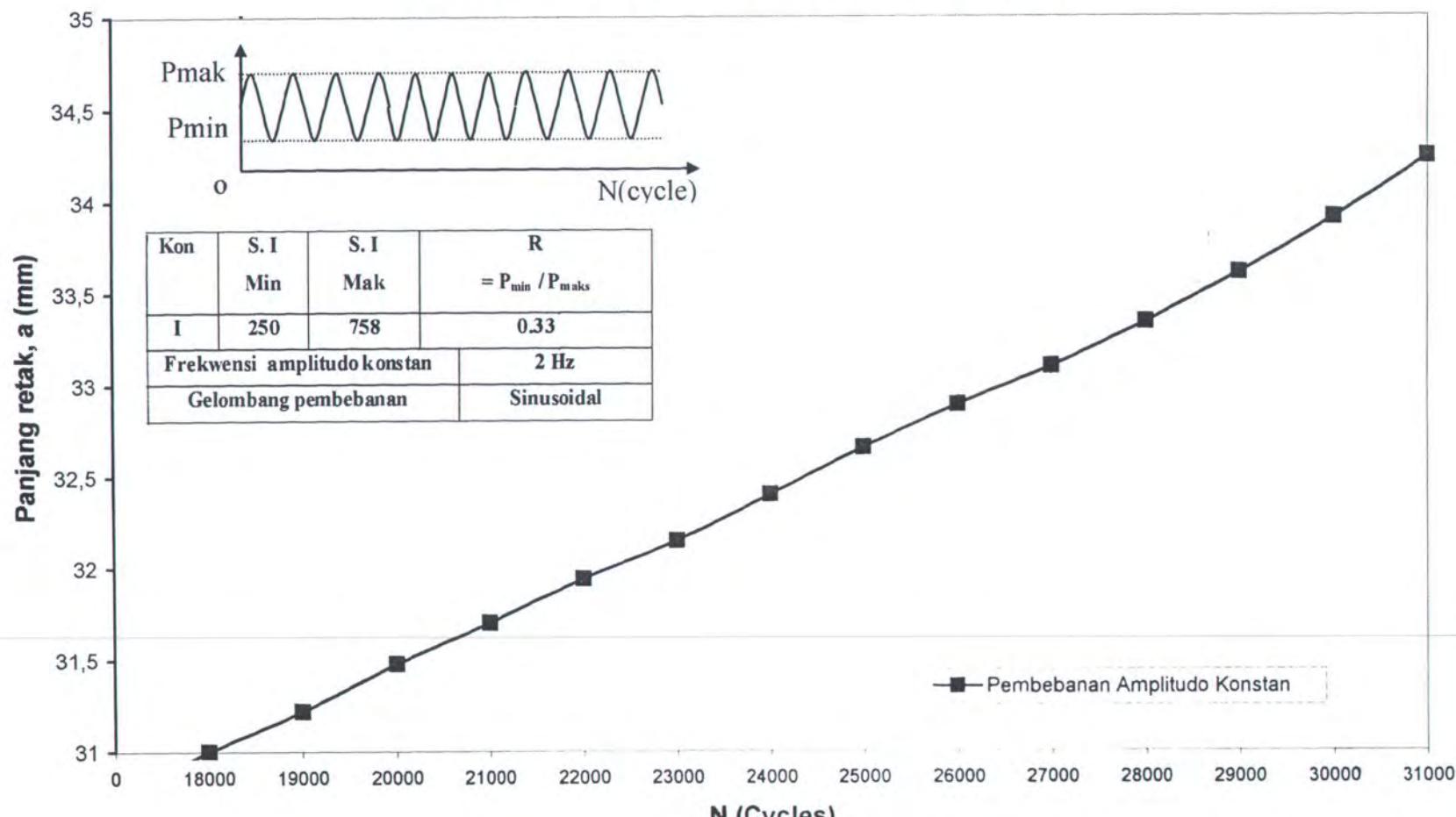
Kondisi	Strain Indikator Min	Strain Indikator Maks
I	250	758
Frekwensi	2 Hz	
Gelombang pembebahan	Sinusoidal	

Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembebahan Amplitudo Konstan (Kondisi I)

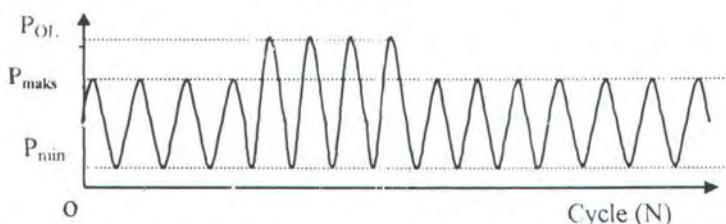
No	Cycle	strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	a _{rata-rata} (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	0,4072
3	19000	758	250	508	31,22	0,22	31,110
4	20000	758	250	508	31,48	0,26	31,350
5	21000	758	250	508	31,70	0,22	31,590
6	22000	758	250	508	31,94	0,24	31,820
7	23000	758	250	508	32,15	0,21	32,045
8	24000	758	250	508	32,40	0,25	32,275
9	25000	758	250	508	32,66	0,26	32,530
10	26000	758	250	508	32,89	0,23	32,775
11	27000	758	250	508	33,10	0,21	32,995
12	28000	758	250	508	33,34	0,24	33,220
13	29000	758	250	508	33,61	0,27	33,475
14	30000	758	250	508	33,91	0,30	33,760
15	31000	758	250	508	34,24	0,33	34,075

Tabel VI.1.Data Pembuatan grafik a vs N pembebahan amplitudo konstan (kondisi I)

Grafik VI.1. a vs N, Pembebatan Amplitudo Konstan (kondisi I)



II. Pembebanan Single Overload Multi Cycle (kondisi II)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
II	250	758	1520	0.33	2
Frekwensi amplitudo konstan				2 Hz	
Frekwensi single overload multi cycle				2 Hz	
$N_{Overload}$				4 Siklus	
Gelombang pembebatanan				Sinusoidal	

Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembekalan Single Overload Multi Cycle (Kondisi II)

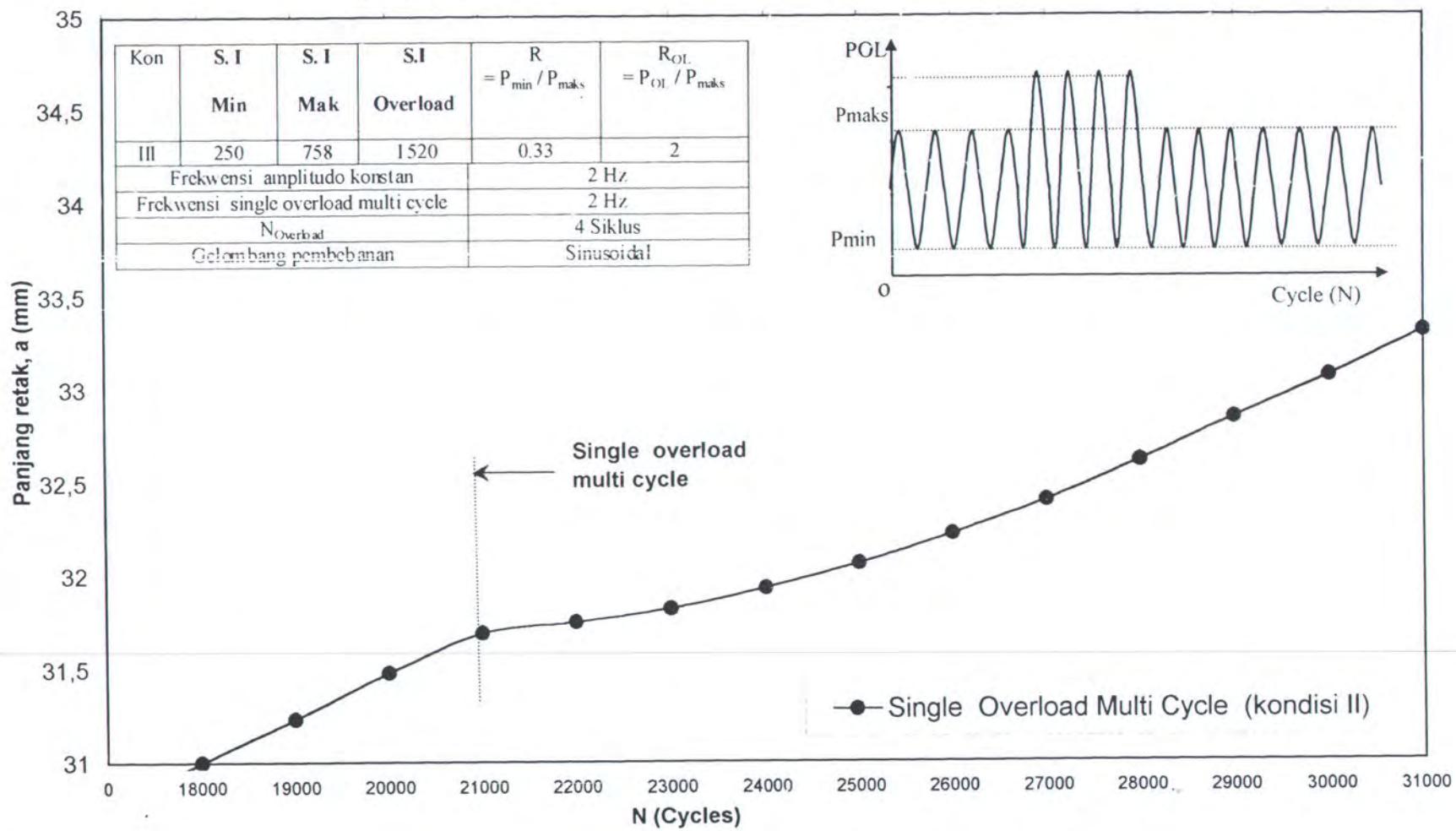
$$R = 0,33$$

$$R_{OL} = 2$$

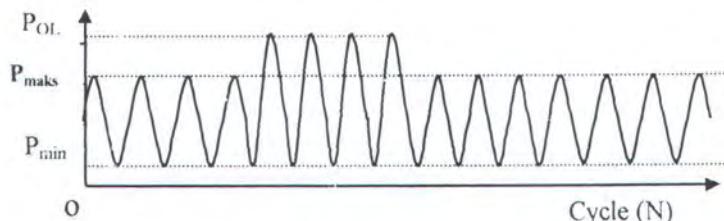
No	Cycle	Strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	a _{rata-rata} (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	30,875
3	19000	758	250	508	31,23	0,23	31,115
4	20000	758	250	508	31,48	0,25	31,355
5	21000	758	250	508	31,69	0,21	31,585
6	22000	758	250	508	31,75	0,06	31,720
7	23000	758	250	508	31,82	0,07	31,785
8	24000	758	250	508	31,93	0,11	31,875
9	25000	758	250	508	32,06	0,13	31,995
10	26000	758	250	508	32,22	0,16	32,140
11	27000	758	250	508	32,40	0,18	32,310
12	28000	758	250	508	32,61	0,21	32,505
13	29000	758	250	508	32,84	0,23	32,725
14	30000	758	250	508	33,06	0,22	32,950
15	31000	758	250	508	33,30	0,24	33,180

Tabel VI.2. Data Pembuatan grafik a vs N pembekalan single overload multi cycle (kondisi II)

Grafik VI.2 a vs N Pembebanan Single Overload Multi Cycle (Kondisi II)



III. Pembebanan Single Overload Multi Cycle (kondisi III)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
III	250	758	2027	0.33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembebatan					Sinusoidal

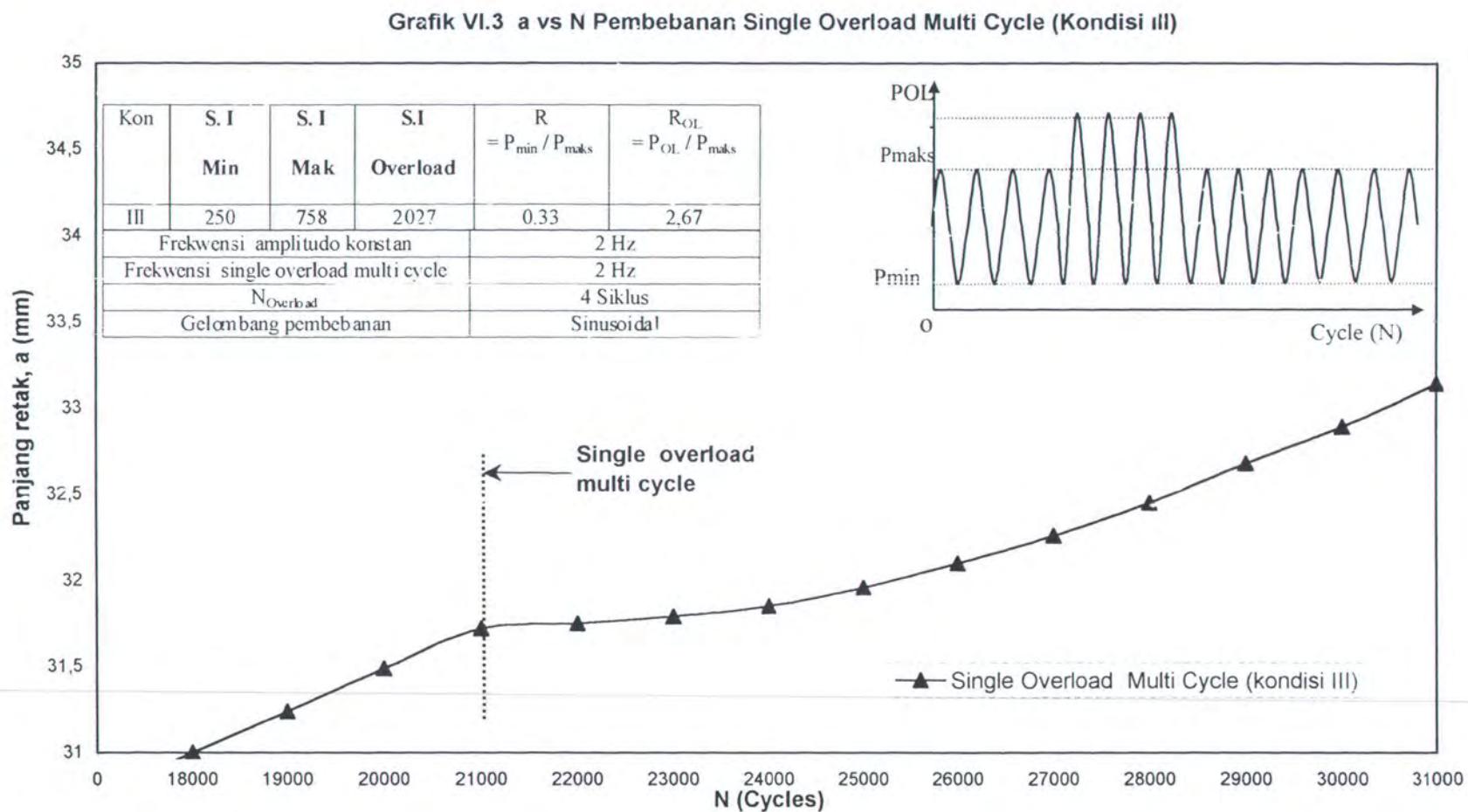
Hasil Pengujian Dinamis Spesimen Pembebatan Single Overload Multi Cycle (kondisi III)

$$R = 0,33$$

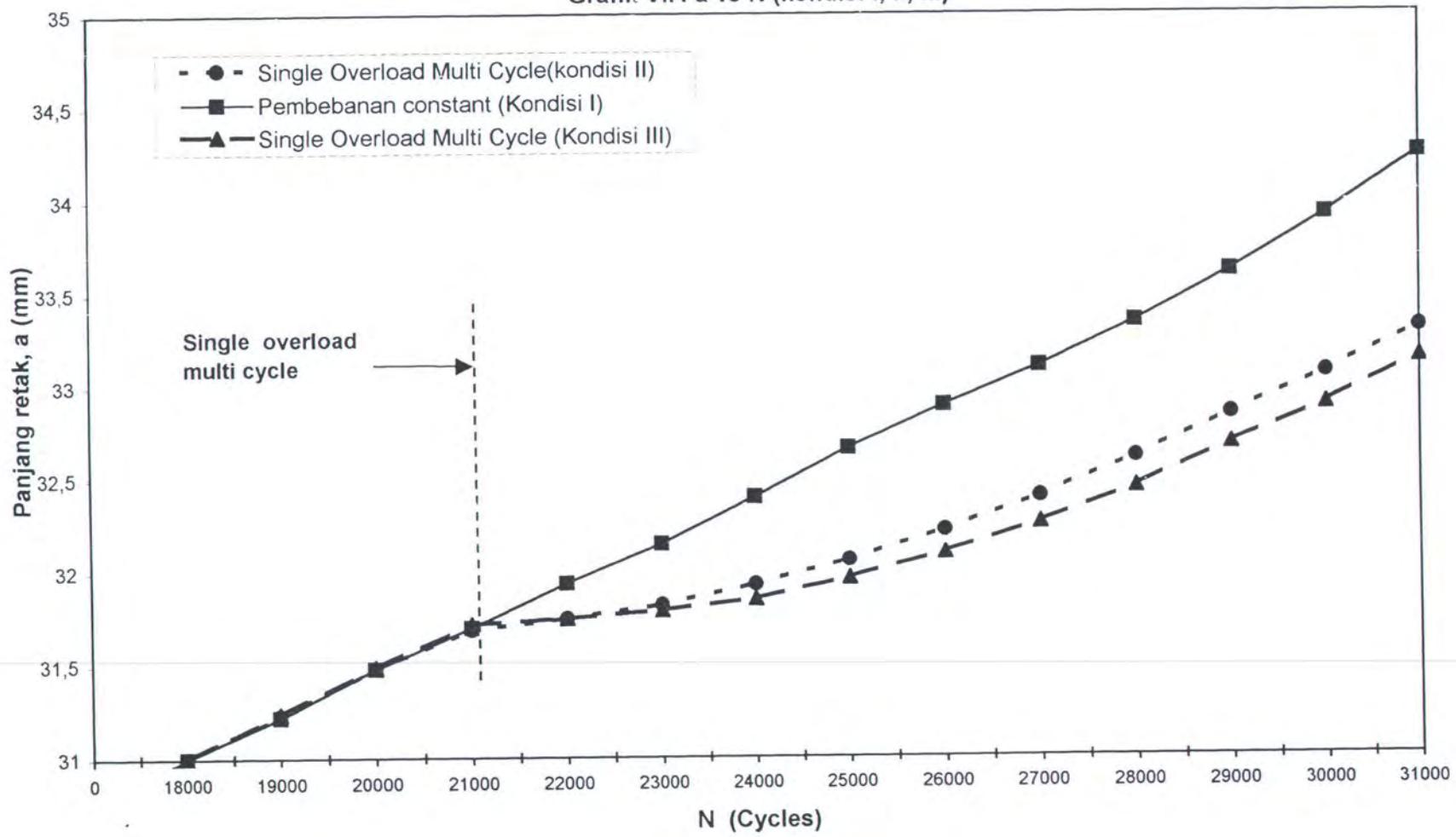
$$R_{OL} = 2,67$$

No	Cycle	Strain Indikator		Beda Indikator	a (mm)	da (mm)	a rata-rata (mm)
		Max	Min				
1	0				30,75		
2	18000	758	250	508	31,00	0,25	30,875
3	19000	758	250	508	31,24	0,24	31,120
4	20000	758	250	508	31,49	0,25	31,365
5	21000	758	250	508	31,72	0,23	31,605
6	22000	758	250	508	31,75	0,03	31,735
7	23000	758	250	508	31,79	0,04	31,770
8	24000	758	250	508	31,85	0,06	31,820
9	25000	758	250	508	31,96	0,11	31,905
10	26000	758	250	508	32,10	0,14	32,030
11	27000	758	250	508	32,26	0,16	32,180
12	28000	758	250	508	32,45	0,19	32,355
13	29000	758	250	508	32,68	0,23	32,565
14	30000	758	250	508	32,89	0,21	32,785
15	31000	758	250	508	33,14	0,25	33,015

Tabel VI.3. Data Pembuatan grafik a vs N pembebatan single overload multi cycle (kondisi III)



Grafik VI.4 a vs N (kondisi I, II, III)



VI.3. Perhitungan Rentang Faktor Intensitas Tegangan.

Perhitungan rentang faktor intensitas tegangan (ΔK) dari ASTM E 647-93, valid untuk $\alpha (a/W) > 0,2$. Rumus ini sesuai dengan bentuk spesimen Compact Tension Test dengan retak awal di tepi.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0,886 + 4,64\alpha - 13,32\alpha^2 + 14,72\alpha^3 - 5,6\alpha^4)$$

dimana :

ΔK = rentang faktor intensitas tegangan

= $K_{\text{maks}} - K_{\text{min}}$ [KN m^{3/2}]

ΔP = $P_{\text{max}} - P_{\text{min}}$ = rentang pembebahan [KN] untuk $R > 0$

B = tebal spesimen [m]

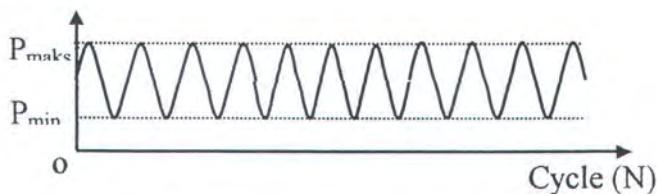
W = lebar spesimen [m]

α = a/W = panjang retak dibagi lebar spesimen

Pada perhitungan laju penjalaran retak setelah didapat harga ΔK , kemudian diubah dalam bentuk logaritma.

Perhitungan untuk rentang stress intensity faktor dapat dilihat pada tabel 6.4 sampai 6.6

I. Stress Intensity Faktor Pembebanan amplitudo konstan (kondisi I)



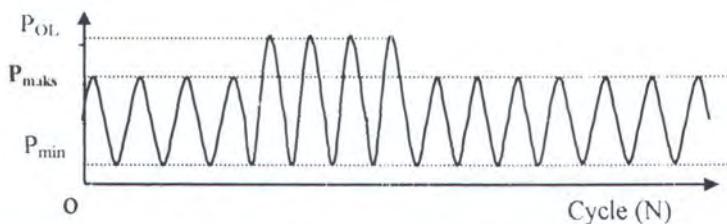
Kondisi	Strain Indikator Min	Strain Indikator Maks
I	250	758
Frekwensi	2 Hz	
Gelombang pembebanan	Sinusoidal	

Perhitungan Logaritma ΔK Pembebanan Amplitudo Konstan (kondisi I)

No	a (mm)	a _{rata-rata} (mm)	α a _{rata-rata} /W	ΔP (KN)	ΔK (KN m ^{1/2} /m ²)	Log (ΔK)
1	30,750					
2	31,000	30,875	0,3088	10,067	22558,623	4,35331
3	31,220	31,110	0,311	10,067	22695,662	4,35594
4	31,480	31,350	0,314	10,067	22836,339	4,35863
5	31,700	31,590	0,316	10,067	22977,763	4,36131
6	31,940	31,820	0,318	10,067	23114,011	4,36388
7	32,150	32,045	0,320	10,067	23247,989	4,36639
8	32,400	32,275	0,323	10,067	23385,668	4,36895
9	32,660	32,530	0,325	10,067	23539,183	4,37179
10	32,890	32,775	0,328	10,067	23687,560	4,37452
11	33,100	32,995	0,330	10,067	23821,549	4,37697
12	33,340	33,220	0,332	10,067	23959,336	4,37947
13	33,610	33,475	0,335	10,067	24116,431	4,38231
14	33,910	33,760	0,338	10,067	24293,213	4,38548
15	34,240	34,075	0,341	10,067	24490,122	4,38899

Tabel VI.4 Perhitungan log (ΔK) pembebanan amplitudo konstan (kondisi I)

II. Stress Intensity Faktor Pembelahan Single Overload Multi Cycle (kondisi II)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{min} / P_{maks}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{maks}$
II	250	758	1520	0.33	2
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembelahan					Sinusoidal

Perhitungan Logaritma ΔK Single overload
Multi Cycle (kondisi II)

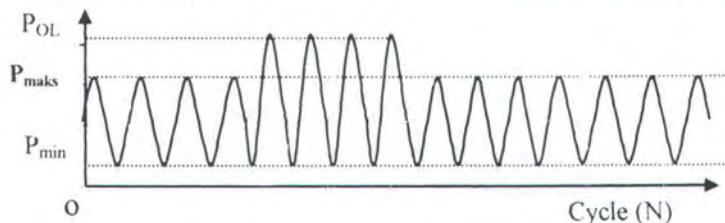
$$R = 0,33$$

$$R_{OL} = 2$$

No	a (mm)	a _{rata-rata} (mm)	α a _{rata-rata} /W	ΔP (KN)	ΔK (K N m ^{1/2} /m ²)	Log (ΔK)
1	30,750					
2	31,000	30,875	0,3088	10,0667	22558,6234	4,3533
3	31,230	31,115	0,3112	10,0667	22698,5848	4,3560
4	31,480	31,355	0,3136	10,0667	22839,2775	4,3587
5	31,690	31,585	0,3159	10,0667	22974,8091	4,3613
6	31,750	31,720	0,3172	10,0667	23054,6858	4,3628
7	31,820	31,785	0,3179	10,0667	23093,2319	4,3635
8	31,930	31,875	0,3188	10,0667	23146,6975	4,3645
9	32,060	31,995	0,3200	10,0667	23218,1566	4,3658
10	32,220	32,140	0,3214	10,0667	23304,7671	4,3674
11	32,400	32,310	0,3231	10,0667	23406,6836	4,3693
12	32,610	32,505	0,3251	10,0667	23524,0911	4,3715
13	32,840	32,725	0,3273	10,0667	23657,2077	4,3740
14	33,060	32,950	0,3295	10,0667	23794,0837	4,3765
15	33,300	33,180	0,3318	10,0667	23934,7840	4,3790

Tabel VI.5 Perhitungan log (ΔK) pembelahan single overload multi cycle (kondisi II)

III. Stress Intensity Faktor Pembebanan Single Overload Multi Cycle(kondisi III)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
III	250	758	2027	0.33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembebanan					Sinusoidal

Perhitungan Logaritma ΔK Single Overload Multi Cycle (kondisi III)

$$R = 0,33$$

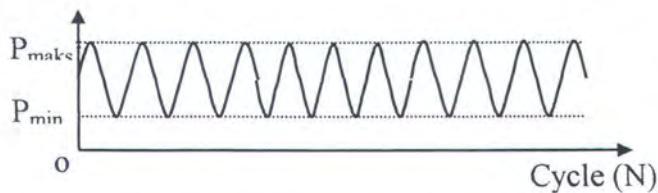
$$R_{OL} = 2,67$$

No	a (mm)	a _{rata-rata} (mm)	α a _{rata-rata} /W	ΔP (KN)	ΔK ($K N m^{1/2}/m^2$)	Log (ΔK)
1	30,750					
2	31,000	30,875	0,30875	10,0667	22558,6234	4,3533
3	31,240	31,120	0,31120	10,0667	22701,5084	4,3561
4	31,490	31,365	0,31365	10,0667	22845,1558	4,3588
5	31,720	31,605	0,31605	10,0667	22986,6274	4,3615
6	31,750	31,735	0,31735	10,0667	23063,5760	4,3629
7	31,790	31,770	0,31770	10,0667	23084,3316	4,3633
8	31,850	31,820	0,31820	10,0667	23114,0110	4,3639
9	31,960	31,905	0,31905	10,0667	23164,5439	4,3648
10	32,100	32,030	0,32030	10,0667	23239,0360	4,3662
11	32,260	32,180	0,32180	10,0667	23328,7110	4,3679
12	32,450	32,355	0,32355	10,0667	23433,7296	4,3698
13	32,680	32,565	0,32565	10,0667	23560,3260	4,3722
14	32,890	32,785	0,32785	10,0667	23693,6348	4,3746
15	33,140	33,015	0,33015	10,0667	23833,7660	4,3772

Tabel VI.6 Perhitungan log (ΔK) pembebanan single overload multi cycle (kondisi III)

VI.4. Perhitungan Laju Penjalaran Retak.

I. Laju Penjalaran Retak da/dN Pembelahan amplitudo konstan (kondisi I)



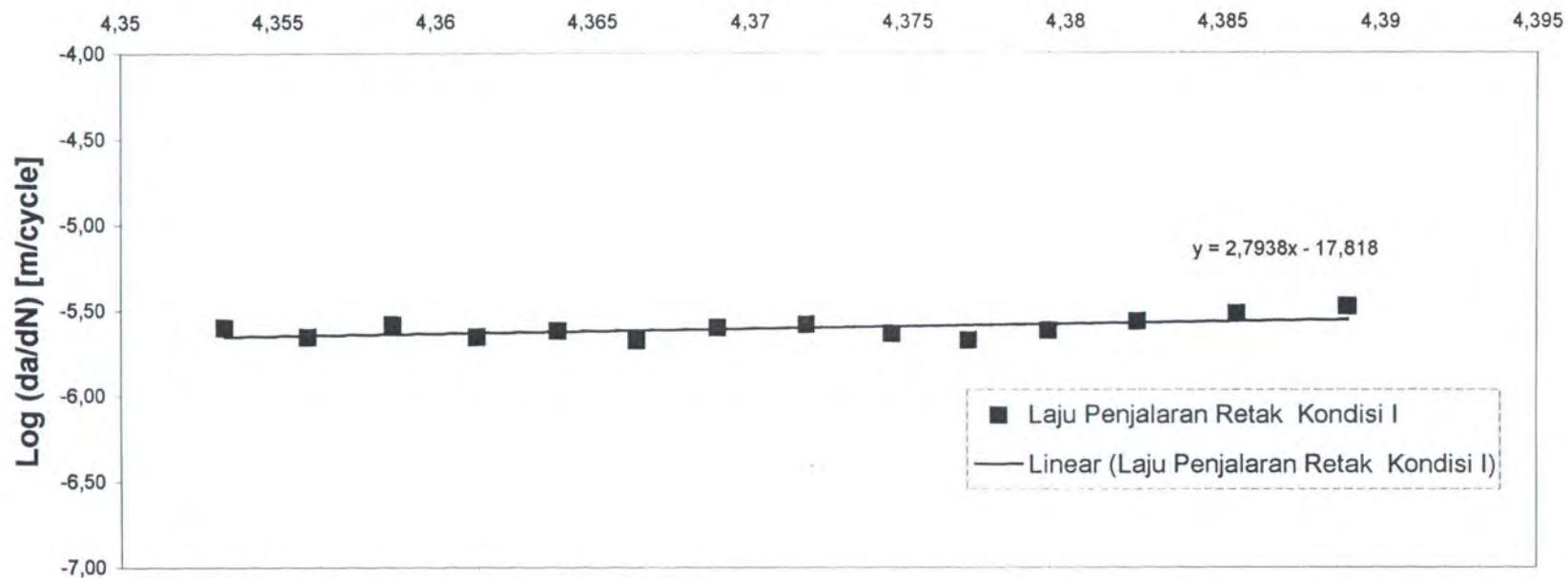
Kondisi	Strain Indikator Min	Strain Indikator Maks
I	250	758
Frekwensi	2 Hz	
Gelombang pembelahan	Sinusoidal	

Perhitungan Logaritma da/dN Pembelahan Amplitudo Konstan (kondisi I)

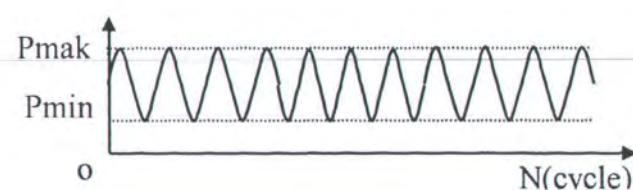
No	a (mm)	da (m)	dN (Cycle)	da/dN (m/cycle)	log da/ dN
1	30,75				
2	31,00	0,0025	1000	2,50E-06	-5,6021
3	31,22	0,0022	1000	2,20E-06	-5,6576
4	31,48	0,0026	1000	2,60E-06	-5,5850
5	31,70	0,0022	1000	2,20E-06	-5,6576
6	31,94	0,0024	1000	2,40E-06	-5,6198
7	32,15	0,0021	1000	2,10E-06	-5,6778
8	32,40	0,0025	1000	2,50E-06	-5,6021
9	32,66	0,0026	1000	2,60E-06	-5,5850
10	32,89	0,0023	1000	2,30E-06	-5,6383
11	33,10	0,0021	1000	2,10E-06	-5,6778
12	33,34	0,0024	1000	2,40E-06	-5,6198
13	33,61	0,0027	1000	2,70E-06	-5,5686
14	33,91	0,003	1000	3,00E-06	-5,5229
15	34,24	0,0033	1000	3,30E-06	-5,4815

Tabel VI.7 Perhitungan log(da/dN) pembelahan amplitudo konstan (kondisi I)

Grafik VI.5. Laju Penjalaran Retak (da/dN vs ΔK) Pembebanan Aplitudo Konstan (kondisi Log (ΔK) [$\text{KN}^{1/2}/\text{m}^{3/2}$])

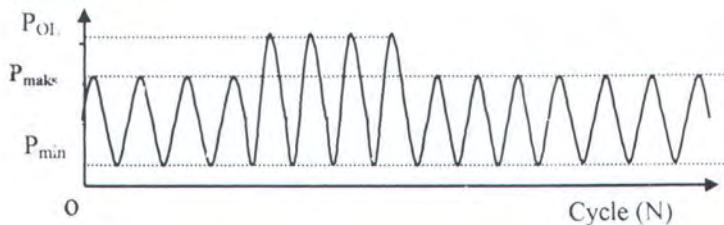


Kon	S. I	S. I	R
	Min	Mak	$= P_{\min} / P_{\max}$
I	250	758	0.33
Frekwensi amplitudo konstan			2 Hz
Gelombang pembebaan			Sinusoidal



II. Laju Penjalaran Retak da/dN Pembekalan Single Overload Multi

Cycle (kondisi II)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
II	250	758	1520	0.33	2
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembebahan					Sinusoidal

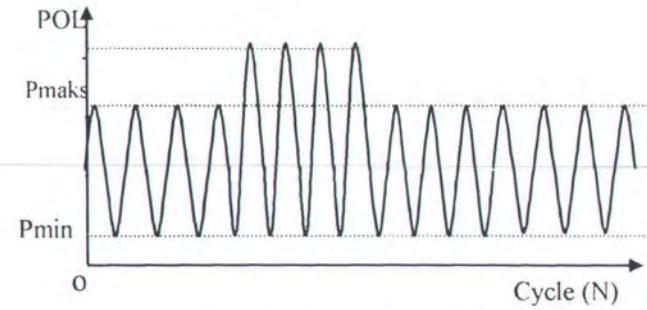
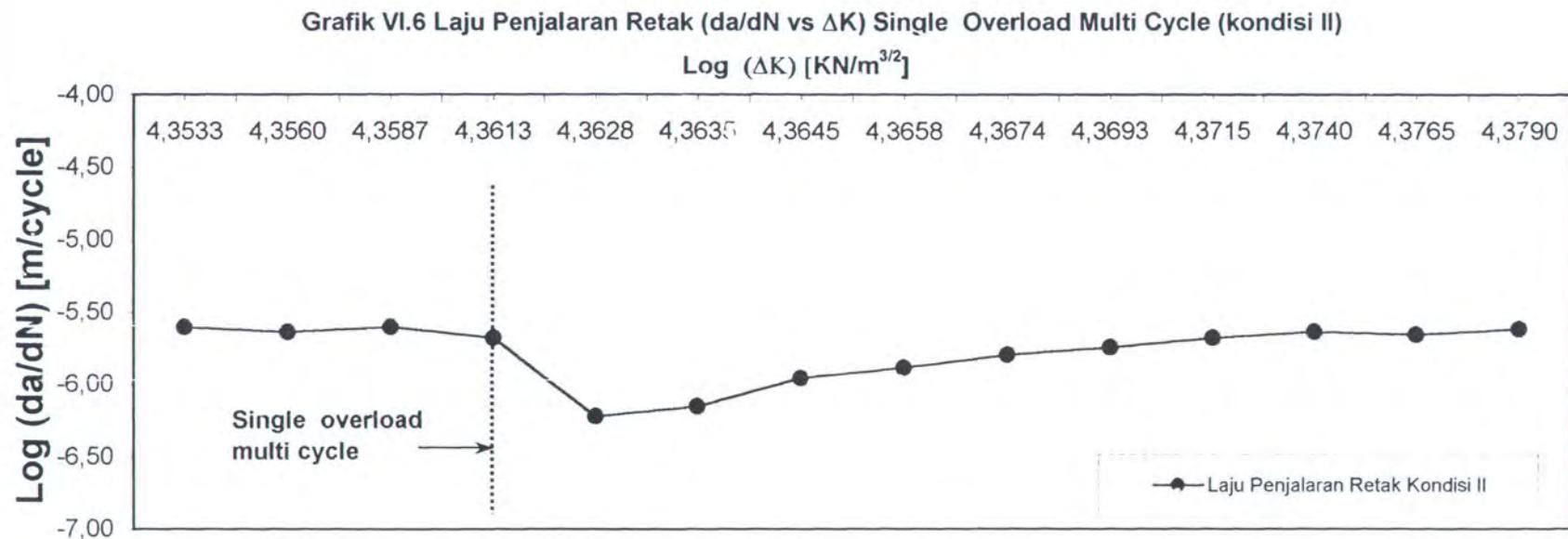
Perhitungan Logaritma da/dN Single Overload Multi Cycle (kondisi II)

$$R = 0,33$$

$$R_{OL} = 2$$

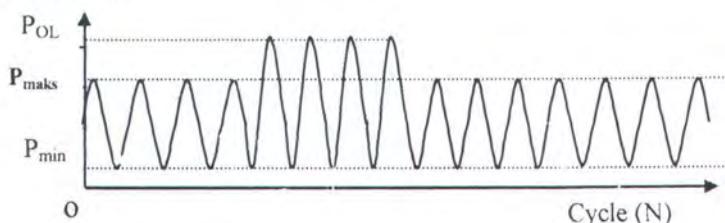
No	a (mm)	da (m)	dN (Cycle)	da/dN (m/cycle)	log da/ dN
1	30,75				
2	31,00	0,0025	1000	2,500E-06	-5,6021
3	31,23	0,0023	1000	2,300E-06	-5,6383
4	31,48	0,0025	1000	2,500E-06	-5,6021
5	31,69	0,0021	1000	2,100E-06	-5,6778
6	31,75	0,0006	1000	6,000E-07	-6,2218
7	31,82	0,0007	1000	7,000E-07	-6,1549
8	31,93	0,0011	1000	1,100E-06	-5,9586
9	32,06	0,0013	1000	1,300E-06	-5,8861
10	32,22	0,0016	1000	1,600E-06	-5,7959
11	32,4	0,0018	1000	1,800E-06	-5,7447
12	32,61	0,0021	1000	2,100E-06	-5,6778
13	32,84	0,0023	1000	2,300E-06	-5,6383
14	33,06	0,0022	1000	2,200E-06	-5,6576
15	33,3	0,0024	1000	2,400E-06	-5,6198

Tabel VI.8 Perhitungan log(da/dN) pembebahan single overload multi cycie (kondisi II)



III. Laju Penjalaran Retak da/dN Pembebanan Single Overload Multi Cycle

(kondisi III)



Kondisi	Strain Ind Min	Strain Ind Maks	Strain Ind Overload	$R = P_{\min} / P_{\max}$	$R_{OL} = P_{OL} / P_{\max}$
III	250	758	2027	0.33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan				2 Hz	
Frekwensi single overload multi cycle				2 Hz	
$N_{Overload}$				4 Siklus	
Gelombang pembebahan				Sinusoidal	

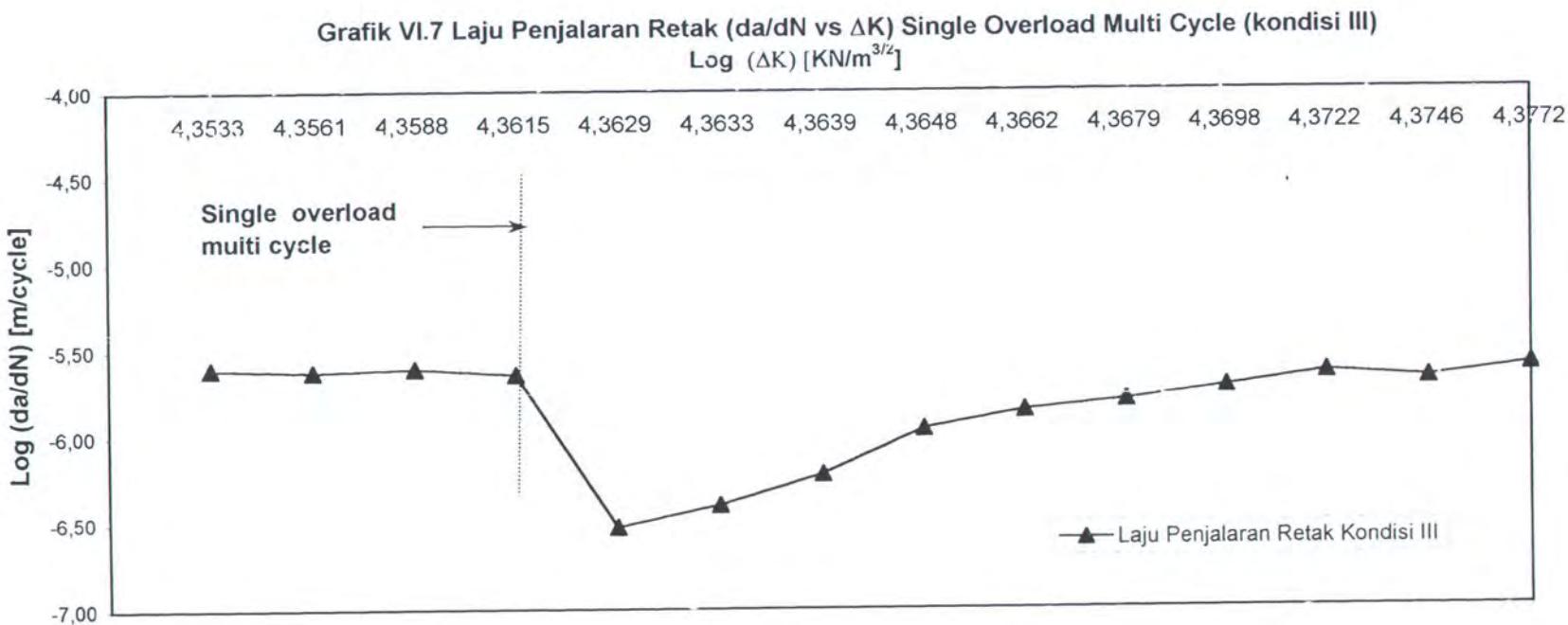
Perhitungan Logaritma da/dN Single Overload Multi Cycle (kondisi III)

$$R = 0,33$$

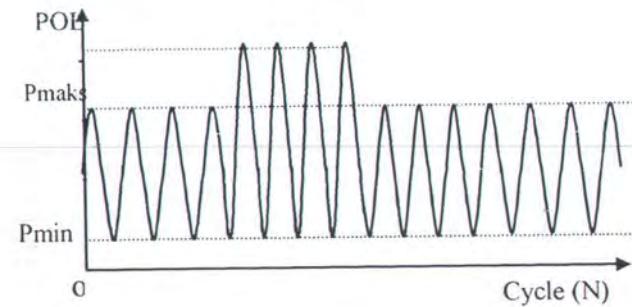
$$R_{OL} = 2,67$$

No	a (mm)	da (m)	dN (Cycle)	da/dN (m/cycle)	log da/ dN
1	30,75				
2	31,00	0,0025	1000	2,500E-06	-5,6021
3	31,24	0,0024	1000	2,400E-06	-5,6198
4	31,49	0,0025	1000	2,500E-06	-5,6021
5	31,72	0,0023	1000	2,300E-06	-5,6383
6	31,75	0,0003	1000	3,000E-07	-6,5229
7	31,79	0,0004	1000	4,000E-07	-6,3979
8	31,85	0,0006	1000	6,000E-07	-6,2218
9	31,96	0,0011	1000	1,100E-06	-5,9586
10	32,10	0,0014	1000	1,400E-06	-5,8539
11	32,26	0,0016	1000	1,600E-06	-5,7959
12	32,45	0,0019	1000	1,900E-06	-5,7212
13	32,68	0,0023	1000	2,300E-06	-5,6383
14	32,89	0,0021	1000	2,100E-06	-5,6778
15	33,14	0,0025	1000	2,500E-06	-5,6021

Tabel VI.9 Perhitungan log(da/dN) pembebahan single overload multi cycle (kondisi III)



Kon	S. I Min	S. I Mak	S.I Overload	R $= P_{min} / P_{maks}$	R_{OL} $= P_{OL} / P_{maks}$
III	250	758	2027	0.33	2,67
Frekwensi amplitudo konstan					2 Hz
Frekwensi single overload multi cycle					2 Hz
$N_{Overload}$					4 Siklus
Gelombang pembebahan					Sinusoidal



VI.5. Analisa Data Perhitungan Dan Grafik.

V.5.1. Analisa grafik a vs N.

Dari pengolahan data perhitungan dan grafik a vs N dapat dianalisa pengaruh variabel-variabel pembebanan, (R , R_{OL}), terhadap parameter-parameter retardasi, (a_D, N_D), penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36.

Bila dibandingkan pertambahan panjang retak (Δa) yang diukur tiap 1000 siklus setelah retak menjalar, antara kondisi I, kondisi II dan kondisi III terlihat bahwa pada penggunaan single overload multi cycle menyebabkan terjadinya retardasi (perlambatan) pertambahan panjang retak.

Pada kondisi I (pembebanan amplitudo konstan) dengan stress ratio $R=0,33$, tidak terjadi retardasi (perlambatan) pertambahan panjang retak, seperti terlihat pada *tabel VI.1* atau *grafik VI.1*. Lain halnya pada kondisi II dan kondisi III, bahwa pada penggunaan single overload multi cycle pada siklus 21000, terlihat terjadinya retardasi (perlambatan) pertambahan panjang retak dari data sebelumnya (data pertambahan panjang retak mulai siklus 18000 – 21000), seperti terlihat pada *tabel VI.2* atau *grafik VI.2* untuk kondisi II dan *tabel VI.3* atau *grafik VI.3*, untuk kondisi III.

Bila dibandingkan antara kondisi II ($R = 0,33$, $R_{OL} = 2$) dan kondisi III ($R=0,33$, $R_{OL} = 2,67$), setelah penggunaan siklus single overload multi cycle pada siklus 21000 dimana jumlah siklus single overload sebanyak 4 siklus, tampak bahwa pada kondisi III memberikan retardasi (perlambatan) pertambahan panjang retak yang lebih besar bila dibandingkan dengan kondisi II.

VI.5.2. Analisa Data Perhitungan Dan Grafik da/dN vs ΔK .

Dari pengolahan data hasil percobaan yang telah dilakukan untuk ketiga kondisi pembebanan (kondisi I, kondisi II dan kondisi III) maka akan dianalisa pengaruh varibael-variabel pembebanan (R , R_{OL}) terhadap parameter retardasi (a_D , N_D) penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36.

Untuk kondisi I (pembebanan amplitudo konstan), pertama diperiksa apakah pengambilan data da/dN telah memenuhi persyaratan yang telah ditentukan untuk dapat diselesaikan dengan Paris-Erdogan. Harga hasil perhitungan da/dN maksimal dan minimal untuk spesimen adalah sebagai berikut:

Kondisi	da/dN min	da/dN mak
I	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$

Harga da/dN dari hasil uji untuk ketiga kondisi pembebanan terletak dalam range $2,6 \cdot 10^{-6}$ dan $3,3 \cdot 10^{-6}$. Menurut Paris Erdogan, harga da/dN yang valid adalah antara 10^{-8} m/cycle dan 10^{-6} m/cycle, oleh karena harga da/dN hasil pengujian masih dalam range yang distandardkan oleh rumusan Paris Erdogan maka perhitungan dapat dipakai sebagai hasil analisa

Hasil linier laju penjalaran retak yang didapat dari grafik $\log da/dN$ vs $\log \Delta K$ untuk kondisi I menghasilkan persamaan garis linier untuk :

$$\text{Kondisi I, } y = 2,7938x - 17,818$$

Berdasarkan persamaan Paris Erdogan $da/dN = C(\Delta K)^m$, persamaan garis linier diatas akan sesuai dengan formula Paris Erdogan dalam bentuk logaritma :

$$\log da/dN = m \log \Delta K + \log C$$

Maka konstanta C dan m serta persamaan Paris Erdogan untuk masing-masing kondisi pembebahan sebagai berikut :

$$\text{Kondisi I, } C = 10^{-17,818} = 1,5205 \cdot 10^{-18}$$

$$m = 2,7938$$

maka persamaan laju penjalaran retak untuk pembebahan amplitudo konstan adalah :

$$da/dN = 1,5205 \cdot 10^{-18} (\Delta K)^{2,7938}$$

bila dibandingkan grafik log da/dN vs log ΔK untuk ketiga kondisi pembebahan, maka grafik kondisi I merupakan grafik yang linier dan untuk kondisi II dan kondisi III sewaktu penggunaan single overload multi cycle pada siklus 21000 maka penjalaran retaknya da/dN mengalami penurunan dari penjalaran retak sebelumnya (lihat grafik VI.6 untuk kondisi II dan grafik V.7 untuk kondisi III).

Jadi dapat dikatakan bahwa pemberian single overload multi cycle mempengaruhi laju penjalaran retak.

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

BAB VII

KESIMPULAN DAN SARAN

KESIMPULAN

Dari hasil analisis perhitungan dan pengamatan terhadap pengaruh variabel-variabel pembebanan (R , R_{OL}) terhadap parameter-parameter retardasi (a_D , N_D) penjalaran akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36, dapat disimpulkan sebagai berikut :

- Dari hasil perhitungan dan analisa grafik dapat dinyatakan bahwa variabel-variabel pembebanan (R , R_{OL}) mempengaruhi retardasi penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile A 36.
- Dari data hasil pengujian yang didapat menunjukkan bahwa semakin besar R_{OL} maka retardasi penjalaran retak fatigue makin besar.

SARAN

Suatu penelitian tidak akan bisa secara mutlak memberikan suatu kebenaran dalam menyelesaikan permasalahan. Terlepas dari benar tidaknya hasil penelitian, maka saya mengajukan beberapa saran untuk menguji dan menyempurnakannya sebagai berikut :

1. perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh variabel-variabel pembebanan terhadap parameter-parameter retardasi penjalaran retak fatigue akibat kelebihan beban (overload) pada material high tensile pada material yang lain.
2. perlu dilakukan penelitian dengan mesin dan alat ukur yang baik.
3. dimensi dari spesimen harus baik dan presisi.

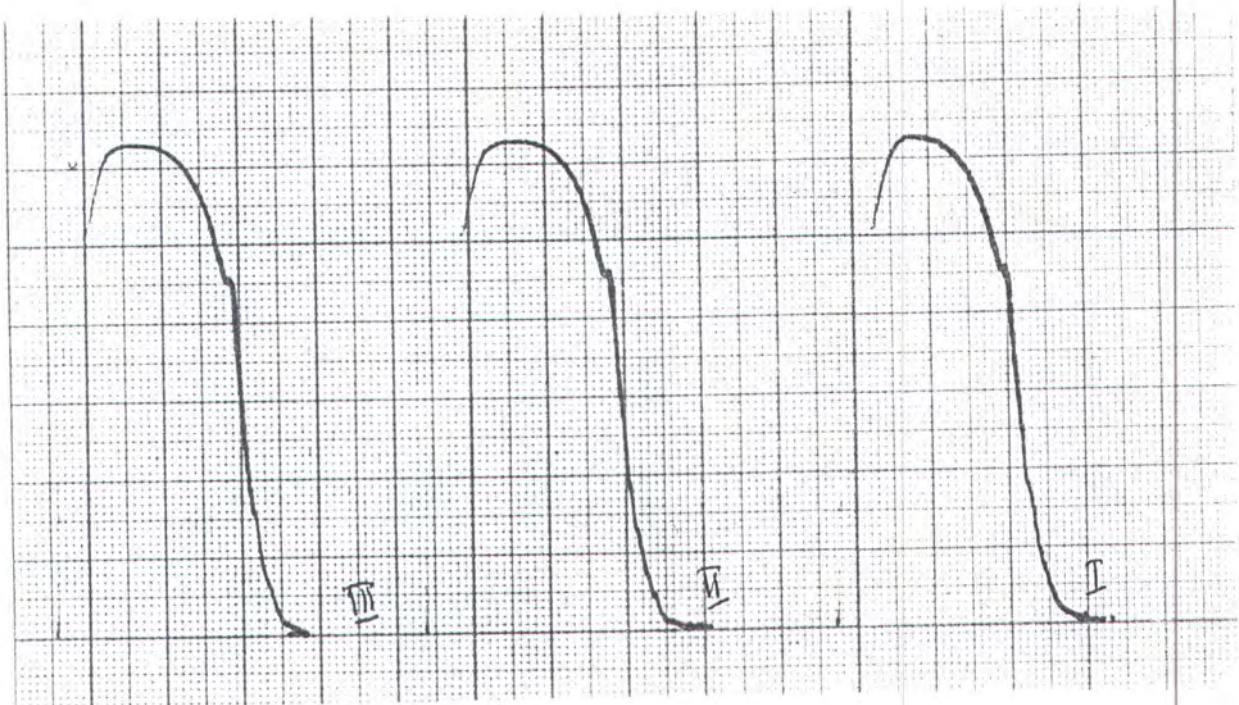
DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

1. NORMAN E. DOWLING : *Mechanical Behaviour Of Material : Engineering Methods For Deformation, Fracture, And Fatigue*, Prentice-Hall International Editions
2. BROEK, DAVID, *Elementary Engineering of Fracture Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers 1987.
3. Langgeng Saika J, *Pengaruh Stress Ratio Terhadap Penjalaran Retak*, Tugas Akhir 1995.
4. American Society for Testing and Materials, Metal Test Methods and Analytical Procedures, *Annual Book of ASTM Standards*, Philadelphia, 1994.
5. Knott, J. F., *Fundamental of Fracture Mechanics*.
6. T.L. Anderson, Ph.D., *Fracture Mechanics : fundamentals and application* 2th edition, Departement of Mechanical Engineering Texas A&M University College Station, Texas.
7. J. P, D. L. Davidson, S. Suresh and P. Rabbe, *Fatigue Crack Growth Under Variable Amplitude Loading*, Chapman & Hall North Way. Andover. Hampshire. England.
8. Farahmand, Bahram, *Fatigue and Fracture Mechanics of High Risk Parts : application of LEFM & FMDM theory*, Chapman & Hall North Way. Andover. Hampshire. England.
9. Fernand Ellyin, *Fatigue Damage, Crack Growth and Life Prediction* 1st edition, Chapman & Hall London 1997.

LAMPIRAN

Grafik uji tarik spesimen





COMBINATUL SIDERURGIC SIDEX S.A.
GALATI - ROMANIA

SIDEX

1214217

CERTIFICAT DE CALITATE NR.

QUALITY CERTIFICATE / MILL'S TEST CERTIFICATE

" QUALITY CERTIFICATE/MILL'S TEST CERTIFICATE ACC. TO DIN 50049/31C "

BENEFICIAR THYSSEN - GERMANIA

Germanischer Lloyd

CUSTOMER

Attachment to

OM. BENEFICIAR 70274

Cert-No.:

ORDER

352986JC

RODUSUL

" PRIME HOT ROLLED SHIPBUILDING PLATES IN GL QUALITIES "

PRODUCT

FORMA GL; DIN 1543/81



ORM

SUITABLE

SPECT EXTERIOR

INTERNAL ASPECT

NORMALISED

TAREA DE LIVRARE

DELIVERY STATE 9.02.98

1214217

ATA

AVIZ

VAGON,

ATE

ADVICE OF DISPATCH

WAGGON

543

NR. LOT: HATCH COVER



WEIGHT : 318455

QUALITY CERTIFICATE NO. 1214217 CONTENTS 3 PAGES
 TOTAL NUMBER OF PIECES = 305

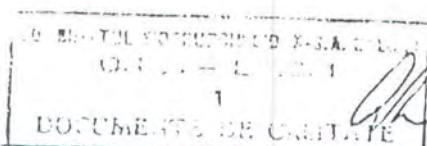
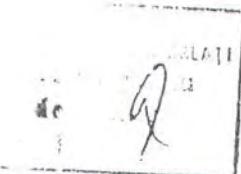
NO.	DIMENSIONS IN MM	PIECES	NO. PROG	WEIGHT KG	HEAT NO	QUALITY
ORD						
1	8 X 2000 X 7100 24/1-3;22/1-3	6	19290		930459	GL A 36
2	8 X 2000 X 7100 25-31/1-4	28	19290		930459	GL A 36
3	8 X 2000 X 7100 27/1-4	4	19289		930458	GL A 36
4	8 X 2000 X 7100 38/1-4	4	19284/D		930457	GL A 36
5	8 X 2000 X 8000 01-03/1-3;02/4 04/2,3;05/1,2 06-12/1-4	42	19290		930459	GL A 36
6	8 X 2000 X 8000 13-16/1-4 17-18/2-4 19-21/1-4	34	19290		930459	GL A 36
7	8 X 2000 X 8000 34-37/1-3	12	19284/D		930457	GL A 36
8	8 X 2000 X 8000 01-09/1-4	36	19289		930458	GL A 36
9	8 X 2000 X 8000	32	19289		930458	GL A 36

TO BE CONTINUED

KILLED POURING SAMPLE ANALYSIS

HEAT	C	MN	SI	S	P	AL	AS	CR	NI	CU	V	N2	NB	CE
													BELOW	
930459	0.16	1.44	0.34	0.010	0.022	0.044		0.01	0.01	0.01				0.40
247182	0.17	1.43	0.32	0.025	0.032	0.037		0.01	0.01	0.01				0.41
930457	0.14	1.55	0.29	0.015	0.027	0.060		0.01	0.01	0.01				0.40
930458	0.16	1.45	0.33	0.010	0.025	0.025		0.01	0.01	0.01				0.40

" WE HEREBY CERTIFY THAT THE MATERIAL WAS MANUFACTURED BY AN APPROVED PROCESS AND TESTED IN ACCORDANCE WITH THE RULES FOR MATERIALS OF GERMANISCHER LLOYDS (GL) AND THE REQUIREMENTS WERE SATISFIED "



DIRECTOR
(IMPUTERNICIT)
HEADMASTER

ORGAN C.T.C.
TECHNICAL QUALITY CONTROL