

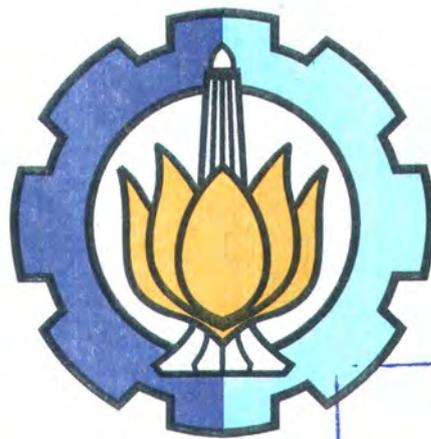
23.145/H/05



TUGAS AKHIR
(LK 1347)

**ANALISA KETANGGUHAN MATERIAL POROS
PROPELLER BAJA KARBON ASTM A 618 SETELAH
PENGELASAN**

RSPe
623.873
Ard
a-1
2005



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	1-8-2005
Periksa	H
No. Agenda Prp.	722857

OLEH

WAHYU ARDHIYANTO

NRP : 4199 100 067

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2005**

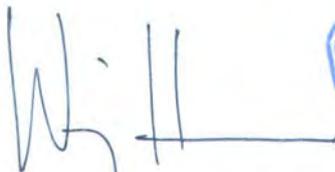
LEMBAR PENGESAHAN

ANALISA KETANGGUHAN MATERIAL POROS PROPELLER BAJA KARBON ASTM A 618 SETELAH PENGELASAN

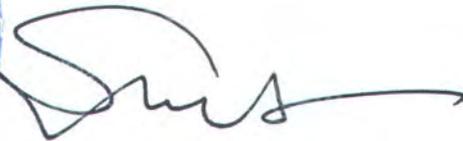
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik Perkapalan
Pada
Jurusan Teknik Perkapalan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya

Mengetahui / Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Mengetahui / Menyetujui,
Dosen Pembimbing II



Wing Hendroprasetyo A.P., S.T., M.Eng.

NIP : 132 133 972

Ir. Soeweify, M.Eng.

NIP : 130 368 597



ABSTRAK

Dalam penulisan Tugas Akhir ini dilakukan analisa terhadap perbedaan ketangguhan material pada material poros yang mengalami reparasi berupa pengelasan. Analisa dilakukan pada dua kondisi yang berbeda, yaitu pengelasan dengan post weld heat treatment dan pengelasan tanpa post weld heat treatment. Dari setiap kondisi diambil tiga daerah yang berbeda yaitu weld metal, HAZ dan base metal. Hal ini dilakukan untuk menganalisa ketangguhan apabila terdapat cacat di tiga daerah tersebut.

Metode yang digunakan untuk melakukan analisa ketangguhan pada setiap specimen adalah metode uji rotating bending karena specimen uji diambil dari bekas poros propeller kapal.

Dari percobaan rotating bending yang telah dilakukan didapatkan persamaan penjalaran retak dari ketiga metode paris endorgan sebagai berikut :

- Weld metal dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,2894 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 16,349$
- Weld metal tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,5845 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,382$
- HAZ dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,5239 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 17,905$
- HAZ tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,6258 (\text{Log } \Delta K_{rq}) - 18,587$
- Base metal dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,1299 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 15,283$
- Base metal tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,2118 (\text{Log } \Delta K_i) - 15,83$

Dalam aplikasinya dilapangan, dengan mengetahui harga ΔK (untuk material sejenis) pada struktur yang diperiksa dan memasukkan harga tersebut dalam grafik dan persamaan, maka akan diketahui kecepatan penjalaran retaknya (da/dN), sehingga dapat diprediksi ketangguhannya atau umur lelahnya, yang akan merekomendasi apakah komponen tersebut direparasi atau diganti atau dilanjutkan sampai pada batas pemeriksaan tertentu.

ABSTRACT

This research explores the difference of two conditions of shaft material for their toughness after welding process. Analyzing was conducted between the materials using post weld heat treatment and without post weld heat treatment. The specimens were taken from weld metal, HAZ and base metal for each condition to analyze the toughness differences using rotating bending.

The result is the equation of crack propagation using Paris Endorgan formula as follows:

- Weld metal dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,2894 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 16,349$
- Weld metal tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,5845 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,382$
- HAZ dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,5239 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 17,905$
- HAZ tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,6258 (\text{Log } \Delta K_{rq}) - 18,587$
- Base metal dengan annealing : $\text{Log } da/dN = 1,1299 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 15,283$
- Base metal tanpa annealing : $\text{Log } da/dN = 1,2118 (\text{Log } \Delta K_I) - 15,83-$

The formula can be used for the real condition. If the value of ΔK (for the same material) is known, crack propagation rate can be calculated and predicted.

KATA PENGANTAR

Syukur Alhamdulillah kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini pada waktunya meskipun banyak hambatan dan rintangan.

Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik secara langsung maupun tidak langsung. Untuk itu penulis menyampaikan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ayahanda dan Ibunda serta seluruh keluarga tercinta yang telah memberikan dukungan serta bantuan moral dan material sampai penulis dapat menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Perkapalan ITS..
2. Wing Hendroprasetyo, A.P., S.T., M.Eng. dan Ir. H. Soewify, MEng. Selaku dosen pembimbing yang dengan kesabarannya telah membimbing penulis sehingga akhirnya dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
3. Ir. Mahardjo Wartono. selaku dosen wali penulis selama di Teknik Perkapalan.
4. Ir. Tri Wilaswandio WP, M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik perkapalan-FTK ITS .
5. Ir. Wasis Dwi Aryawan, MSc, PhD. selaku Sekretaris Jurusan Teknik perkapalan-FTK ITS.

6. Seluruh dosen di Teknik Perkapalan-ITS khususnya dan seluruh ITS umumnya.
7. Seluruh staf dosen dan karyawan Teknik Perkapalan-ITS khususnya dan seluruh ITS umumnya serta karyawan BLPT Jawa Timur.
8. Sobatku seperjuangan anggota SS Perkapalan angkatan 99 atas kebersamaan dan bantuannya selama ini yang bersama-sama mengarungi dinamika kehidupan di kampus Perkapalan ITS baik suka maupun duka.
9. Seluruh rekan kerja di LBB BKI atas segala kerjasamanya dalam mencari rejeki.
10. Didik “BOS”, Eko Mardiono S.T., Heru “ KRIWUL “, Hanafi “ BODHONK “ atas bantuan konsultasi tugas akhir.
11. Serta semua pihak yang telah membantu penulis, yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Penulis sadar bahwa penulisan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, maka saran dan kritik yang bersifat membangun sangat diharapkan. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juni 2005

Penulis

DAFTAR ISI

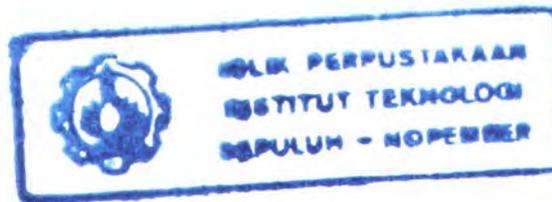
	Halaman
Lembar Pengesahan	
Abstrak	i
Kata pengantar	iii
Daftar isi	v
Daftar tabel	vii
Daftar gambar	ix
BAB I Pendahuluan	1
I.1 Latar belakang.....	1
I.2 Perumusan masalah.....	4
I.3 Tujuan.....	4
I.4 Manfaat.....	5
I.5 Batasan masalah.....	5
I.6 Sistematika penulisan.....	6
BAB II Dasar Teori	7
2.1 Baja karbon.....	7
2.1.1 Klasifikasi baja karbon.....	7
2.1.2 Pengaruh unsur paduan terhadap sifat baja.....	10
2.2 Fracture mechanic.....	12
2.2.1 Material properties baja karbon.....	12
2.2.2 Linier elastis baja karbon.....	14

2.2.3 Stress intensity factor.....	19
2.2.4 Fracture toughness.....	24
2.2.5 Parameter umur lelah bahan.....	25
2.2.6 Mekanisme penjalaran retak.....	31
2.2.7 Konsentrasi tegangan.....	32
2.3 Pengelasan.....	32
2.3.1 Las Elektroda terbungkus.....	33
2.3.2 Spesifikasi elektroda.....	36
2.3.3 Cacat dalam pengelasan.....	36
2.3.4 Daerah pengaruh panas.....	37
2.4 Post weld heat treatment.....	38
2.5 Pembebanan rotating bending.....	39
BAB III Metode penelitian.....	42
3.1 Pendahuluan.....	42
3.2.1 Pembuatan WPS.....	43
3.2.2 Persiapan pengelasan.....	45
3.2.3 Pelaksanaan pengelasan.....	45
3.3 Proses perlakuan panas.....	49
3.3.1 Persiapan perlakuan panas.....	50
3.3.2 Proses pemanasan dan pendinginan.....	50
3.4 Pembuatan specimen uji.....	51
3.5 Metode pengujian.....	54
3.5.1 Alat-alat yang digunakan untuk pengujian.....	54

3.5.2 Cara pengujian.....	55
BAB IV Analisa Data.....	60
4.1 Pendahuluan.....	60
4.2 Pendekatan karakteristik dengan formula paris.....	60
4.3 Hasil dan analisa hasil pengujian.....	63
4.3.1 Data-data hasil pengujian.....	64
4.4 Analisa data.....	81
BAB V Kesimpulan dan saran.....	116
5.1 Kesimpulan.....	116
5.2 Saran.....	119

Daftar Pustaka

Lampiran



DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Mode deformasi retak.....	14
Gambar 2.2 Distribusi tegangan elastis disekitar ujung retak.....	17
Gambar 2.3 Centre crack dengan beban uniform.....	19
Gambar 2.4 Contoh nilai-nilai β	24
Gambar 2.5. Fase pembentukan retak.....	26
gambar 2.6. Grafik crack growth fungsi ΔK	29
Gambar 2.7. Spesifikasi specimen Uji standar JIS.....	40
Gambar. 2.8. Posisi Specimen pada alat uji Rotating Bending.....	41
Gambar 3.1. Detail lapisan pengelasan.....	47
Gambar 3.2. Kurva laju pemanasan dan pendinginan Annealing.....	51
Gambar 3.3. Bentuk specimen uji rotating bending.....	52
Gambar 3.4. Flowchart pengujian dengan rotating bending.....	53
Gambar 3.5. Posisi tanda dan posisi CDM pada pengukuran.....	55
Gambar 3.6. Posisi specimen pada mesin uji rotating bending.....	59
Gambar 4.1. Grafik rata-rata pengujian weld metal dengan Annealing	75
Gambar 4.2. Grafik rata-rata pengujian weld metal tanpa Annealing	76
Gambar 4.3. Grafik rata-rata pengujian HAZ dengan Annealing.....	77
Gambar 4.4. Grafik rata-rata pengujian HAZ tanpa Annealing.....	78
Gambar 4.5. Grafik rata-rata pengujian base metal dengan Annealing	79
Gambar 4.6. Grafik rata-rata pengujian base metal tanpaAnnealing...	80

Halaman

Gambar 4.8. Grafik panjang retak vs jumlah cycle dalam skala Log...	83
Gambar 4.9. Grafik K_I weld metal dalam skala Log.....	87
Gambar 4.10. Grafik K_I HAZ dalam skala Log.....	87
Gambar 4.11. Grafik K_I base metal dalam skala Log.....	88
Gambar 4.13. Grafik K_{II} weld metal dalam skala Log.....	94
Gambar 4.14. Grafik K_{II} HAZ dalam skala Log.....	94
Gambar 4.15. Grafik K_{II} base metal dalam skala Log.....	95
Gambar 4.16. Grafik K_{II} total dalam skala Log.....	96
Gambar 4.17. Grafik K_{III} weld metal dalam skala Log.....	102
Gambar 4.18. Grafik K_{III} HAZ dalam skala Log.....	102
Gambar 4.19. Grafik K_{III} base metal dalam skala Log.....	103
Gambar 4.20. Grafik K_{III} total dalam skala Log.....	103
Gambar 4.21. Grafik K_{eq} weld metal dalam skala Log.....	106
Gambar 4.22. Grafik K_{eq} HAZ dalam skala Log.....	107
Gambar 4.23. Grafik K_{eq} base metal dalam skala Log.....	107
Gambar 4.24. Grafik K_{eq} total dalam skala Log.....	108

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel	40
Tabel 3.1.	48
Tabel 3.2.	48
Tabel 3.3.	49
Tabel 4.1.	64
Tabel 4.2.	64
Tabel 4.3.	65
Tabel 4.4.	66
Tabel 4.5.	66
Tabel 4.6.	67
Tabel 4.7.	67
Tabel 4.8.	68
Tabel 4.9.	69
Tabel 4.10.	69
Tabel 4.11.	70
Tabel 4.12.	71
Tabel 4.13.	71
Tabel 4.14.	72
Tabel 4.15.	72
Tabel 4.16.	73

Tabel 4.17.	Hasil pengujian base metal specimen II tanpa annealing.....	73
Tabel 4.18.	Hasil pengujian base metal specimen III tanpa annealing....	74
Tabel 4.19.	Rata-rata hasil pengujian weld metal dengan Annealing.....	75
Tabel 4.20.	Rata-rata hasil pengujian weld metal tanpa Annealing.....	76
Tabel 4.21.	Rata-rata hasil pengujian HAZ dengan Annealing.....	77
Tabel 4.22.	Rata-rata hasil pengujian HAZ tanpa Annealing.....	78
Tabel 4.23.	Rata-rata hasil pengujian base metal dengan Annealing.....	79
Tabel 4.24.	Rata-rata hasil pengujian base metal tanpa Annealing.....	80
Tabel 4.25.	Perhitungan a vs Log N pada weld metal.....	81
Tabel 4.26.	Perhitungan a vs Log N pada HAZ.....	82
Tabel 4.27.	Perhitungan a vs Log N pada base metal.....	82
Tabel 4.28.	Perhitungan da/dN pada weld metal.....	83
Tabel 4.29.	Perhitungan da/dN pada HAZ.....	84
Tabel 4.30.	Perhitungan da/dN pada base metal.....	84
Tabel 4.31.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal dengan Annealing.....	85
Tabel 4.32.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal tanpa Annealing.....	85
Tabel 4.33.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ dengan Annealing.....	85
Tabel 4.34.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ tanpa Annealing.....	86
Tabel 4.35.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal dengan Annealing.....	86
Tabel 4.36.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal tanpa Annealing.....	86
Tabel 4.37.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} weld metal dengan Annealing.....	92
Tabel 4.38.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} weld metal tanpa Annealing.....	92
Tabel 4.39.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} HAZ dengan Annealing.....	92

Tabel 4.40.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} HAZ tanpa Annealing.....	93
Tabel 4.41.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} base metal dengan Annealing.....	93
Tabel 4.42.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} base metal tanpa Annealing.....	93
Tabel 4.43.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} weld metal dengan Annealing.....	100
Tabel 4.44.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} weld metal tanpa Annealing.....	100
Tabel 4.45.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} HAZ dengan Annealing.....	100
Tabel 4.46.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} HAZ tanpa Annealing.....	101
Tabel 4.47.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} base metal dengan Annealing.....	101
Tabel 4.48.	Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} base metal tanpa Annealing.....	101
Tabel 4.49.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal dengan Annealing.....	104
Tabel 4.50.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal tanpa Annealing.....	105
Tabel 4.51.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ dengan Annealing.....	105
Tabel 4.52.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ tanpa Annealing.....	105
Tabel 4.53.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal dengan Annealing.....	106
Tabel 4.54.	Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal tanpa Annealing.....	106

*Sesungguhnya Allah tidak akan merubah keadaan
suatu kaum, sehingga mereka merubah keadaan
yang ada pada diri mereka sendiri.
[QS Ar Raad: 11]*

BAB I

PENDAHULUAN



BAB I

PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

Pemilihan suatu struktur material yang akan dibuat atau dibangun perlu didesain sesuai dengan kondisi lingkungan dimana struktur tersebut bekerja, dengan demikian tanda – tanda kegagalan yang mungkin dapat terjadi bisa diprediksi dan dihindari. Penyebab terjadinya kegagalan struktur dalam banyak konstruksi dapat secara umum digolongkan ke dalam dua kategori, yaitu :

- Kelalaian dalam perencanaan, pembangunan atau pemakaian struktur
- Penerapan desain atau material baru dengan hasil yang tidak terprediksi dan tidak diinginkan.

Perencanaan struktur harus memenuhi factor keamanan (*safety factor*) operasional, dimana struktur harus didesain mampu menerima beban operasi yang direncanakan atau beban yang diprediksi akan bekerja pada struktur tersebut. Sehingga dalam penentuan penggunaan material, pertimbangan material properties seperti yield strength (kekuatan tarik), yield stress (batas mulur), buckling stress (tegangan mulur) dan lainnya menjadi sangat penting.

Dengan asumsi tegangan nominal pada struktur tidak melebihi tegangan yield maka desain struktur tersebut aman. Asumsi tersebut benar apabila pada struktur tidak terdapat cacat (*defect*). Pada kenyataannya dalam beberapa kasus, struktur mengalami kegagalan justru pada saat beban



yang diterima masih dibawah *yield*. Dan kegagalan struktur yang terjadi bisa dengan munculnya cacat berupa retak awal. Retak merupakan bagian dari kegagalan yang terjadi pada konstruksi. Dengan adanya retak, kegagalan pada konstruksi dapat terjadi lebih cepat, terutama jika struktur harus menerima beban secara periodik yang akan mengakibatkan perambatan retak.

Kondisi yang sama juga dapat terjadi pada poros propeller, dimana lingkungan poros yang selalu lembab oleh bahan pelumas selalu rawan terjadinya korosi. Timbulnya korosi dapat menjadi tahap awal munculnya retak awal karena korosi dapat mengurangi kekuatan material tersebut dalam menerima beban.

Dan gaya beban yang diterima adalah gaya beban dinamis yaitu gaya yang terjadi secara berulang – ulang. Apabila poros mengalami korosi maka ada beberapa cara untuk menanganinya, yaitu :

- Reparasi poros

Poros yang mengalami korosi direparasi dengan cara dilakukan pembersihan poros dari korosi seperti digerinda kemudian dilakukan pengelasan pada bagian yang telah digerinda

- Diganti baru

Didalam ilmu perkapalan sebuah kapal untuk bisa bergerak pada kecepatan tertentu yang diinginkan diperlukan alat pendorong yang akan memberikan gaya dorong (*propulsive force*) pada kapal untuk melawan *resistance force* yang dialami kapal tersebut. Propeller merupakan alat



propulsi mekanis yang paling banyak digunakan yang berfungsi memberikan gaya dorong, sehingga kapal bisa melaju dengan kecepatan tertentu. Tenaga untuk menggerakkan propeller berasal dari mesin penggerak utamanya yang ditransfer melalui poros penghubungnya. Oleh karena itu kondisi poros yang baik sangat menentukan efisiensi kerja propeller.

Menilik dari penjelasan diatas maka keberadaan poros sangat vital sekali untuk bisa menyalurkan tenaga ke propeller untuk menghasilkan gaya dorong optimum. Oleh sebab itu diperlukan suatu poros yang memiliki kekuatan yang baik meskipun telah mengalami reparasi (pengelasan).

Dalam proses pemakaiannya poros berada di tempat yang basah karena pelumasan didalam stentube. Tempat yang basah dan lembab mempengaruhi laju korosi bahan poros terutama poros yang memakai pelumasan ait laut. Sehingga suatu saat poros akan mengalami korosi yang berpengaruh terhadap kekuatan poros. Jika terjadi korosi maka poros biasanya direparasi daripada diganti dengan yang baru karena biayanya lebih murah dan selama poros masih layak untuk direparasi. Tetapi pemanasan akibat pengelasan akan mempengaruhi komposisi penyusun bahan poros yang terbuat dari baja karbon. Perubahan komposisi bahan juga mempengaruhi kekuatan bahan tersebut.

Struktur konstruksi yang digunakan harus memenuhi factor keamanan operasional, dimana struktur harus di desain mampu menerima



beban operasional yang direncanakan atau beban yang diprediksi akan bekerja pada struktur tersebut. Sehingga diperlukan suatu penelitian terhadap pengaruh pengelasan pada bahan poros propeller baja karbon terhadap struktur mikro dan ketangguhannya.

I.2 PERUMUSAN MASALAH

Berdasarkan latar belakang tersebut diatas, permasalahan dalam tugas akhir ini adalah untuk mendapatkan data tentang besarnya harga fracture toughness baja karbon ASTM A 618 sebagai bahan poros kapal setelah dilakukan pengelasan dengan mengambil specimen dari daerah weld metal, HAZ dan base metal.

I.3 TUJUAN

Penulisan Tugas Akhir ini bertujuan :

- Mengetahui perubahan struktur mikro baja karbon setelah pengelasan.
- Memperoleh data tentang ketangguhan baja karbon setelah dilakukan uji rotating bending terhadap specimen baja karbon setelah pengelasan.
- Mengetahui perbedaan ketangguhan baja karbon antara yang mengalami perlakuan panas dan yang tidak mengalami perlakuan panas.



I.4 MANFAAT

Manfaat yang diperoleh dari Tugas Akhir ini adalah :

- Untuk mengetahui pengaruh harga *fracture toughness* terhadap pemilihan material khususnya baja karbon.
- Dapat menjadi tolak ukur untuk mengetahui ukuran ketangguhan poros baja karbon setelah dilakukan pengelasan akibat cacat termasuk perubahan struktur mikronya.

I.5 BATASAN MASALAH

Batasan masalah dari permasalahan yang diangkat dalam Tugas Akhir ini adalah :

- Material yang digunakan adalah ASTM A 618 bekas poros propeller.
- Dimensi specimen sesuai standar JIS untuk pengujian rotating bending.
- Pengujian ketangguhan dengan uji rotating bending.
- Jumlah specimen yang digunakan tiap bagian adalah tiga buah.
- Specimen diambil pada weld metal, HAZ dan base metal.
- Perubahan struktur kristal, *mechanical properties*, *fatigue life* tidak dibahas secara mendalam.
- Tegangan sisa akibat proses mekanis pada waktu pembentukan diabaikan.
- Jenis pengelasan adalah SMAW dengan metode *Back Weld*.
- *Post Weld Heat Treatment* dengan metode *Annealing*



I.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini antara lain :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan tugas akhir.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini berisi teori-teori pendukung bagi penulisan Tugas Akhir ini antara lain sifat-sifat mekanik material yang digunakan berdasarkan mechanical properties, teori pengelasan yang digunakan, teori pengujian, serta metode analisa data hasil pengujian.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang tata cara pengujian yang dilakukan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini meliputi tahap-tahap pembuatan specimen uji dan pengujiannya.

BAB IV ANALISA DATA HASIL PENGUJIAN

Bab ini berisi tentang analisa data yang dibuat berdasarkan data-data yang didapat dari hasil-hasil pengujian yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

*Dan hendaklah ada diantara kamu segolongan
umat yang menyeru kepada kebajikan, menyuruh
kepada yang ma'ruf dan mencegah dari yang
munkar, merekalah orang-orang yang beruntung
[Ali Imron : 104]*

BAB II

DASAR TEORI



BAB II

DASAR TEORI



2.1. Baja Karbon

2.1.1. Klasifikasi Baja Karbon

Baja merupakan logam jenis paduan yang paling banyak diproduksi/digunakan dalam kegiatan industri modern seperti pada saat ini. Jenis dan bentuk baja yang diproduksi pada saat ini sangat banyak jenis dan ragamnya, dimana hal tersebut dibuat sesuai dengan keperluan penggunaan baja tersebut. Pembagian baja dapat dilakukan menurut komposisi kimianya, baja dapat dibagi menjadi dua kelompok besar. Yaitu baja tanpa paduan yang umum disebut sebagai baja karbon (*carbon steel*) dan baja paduan (*alloy steel*). Baja karbon juga mengandung sejumlah kandungan dari unsur lain akan tetapi masih dalam batas-batas tertentu yang tidak banyak berpengaruh terhadap sifat maupun hal lainnya. Unsur-unsur ini biasanya merupakan ikutan yang berasal dari proses pembuatan besi/baja, seperti unsur mangan (Mn) ataupun silikon (Si) serta beberapa unsur pengotor lain seperti misalnya sulfur/belerang, fosfor, oksigen, nitrogen, dan lain-lain yang biasanya ditekan sampai kadar yang sangat kecil. Baja dengan kadar mangan (Mn) yang kurang dari 0,8%, silikon kurang dari 0,5% dan unsur lain yang sangat sedikit masih dapat dianggap sebagai baja karbon. Mangan dan silikon sengaja ditambahkan dalam proses pembuatan baja sebagai bahan pencegah



timbulnya proses oksidasi (*deoxidizer*), untuk mengurangi pengaruh buruk dari beberapa unsur pengotoran. Baja paduan mengandung unsur-unsur paduan yang berpengaruh menambah sifat-sifat tertentu. Untuk selanjutnya, baja yang digolongkan berdasarkan komposisi kimianya dapat dikelompokkan lagi menjadi 4 [*Caldarely, 2000*] :

- a. Baja Karbon Rendah (*Low Carbon Steel*). Yaitu merupakan jenis baja karbon yang memiliki kandungan unsur karbon hingga 0,25%. Penggunaannya sangat luas antara lain *chasis* atau rangka kendaraan, mur baut, pelat, pipa dan lain sebagainya. Baja ini kekuatannya relatif rendah atau lunak, karena unsur karbonnya sedikit, namun tingkat keuletan yang dimiliki (*ductility*) cukup baik sehingga mudah untuk dibentuk ataupun di-*machining*. Baja jenis *low carbon* ini tidak dapat dikeraskan kecuali dilakukan proses *case hardening*.
- b. Baja Karbon Sedang (*Medium Carbon Steel*). Yaitu merupakan jenis baja karbon yang memiliki kandungan unsur karbon hingga 0,25% - 0,55%. Baja jenis ini memiliki tingkat kekerasan (*hardness*) dan keuletan (*ductility*) yang tinggi bila dibanding baja jenis *low carbon* serta mudah untuk dikeraskan (*hardening process*). Untuk penggunaannya hampir sama dengan baja jenis *low carbon* yaitu digunakan untuk konstruksi yang memerlukan kekuatan dan ketangguhan yang cukup tinggi. Sebagai tambahan, baja jenis ini juga dipakai sebagai bahan untuk pembuatan konstruksi mesin, untuk *shaft* atau poros, roda gigi, rantai dan lain sebagainya. Intinya, baja jenis



medium carbon ini memiliki kemampuan yang lebih baik bila dibandingkan dengan jenis *low carbon*.

- c. Baja Karbon Tinggi (*High Carbon Steel*). Yaitu merupakan jenis baja karbon yang memiliki kandungan unsur karbon hingga lebih dari 0,55%. Baja jenis *high carbon* ini memiliki tingkat kekuatan (*strength*) serta kekerasan (*hardness*) yang lebih tinggi apabila dibanding dengan baja jenis *low carbon* ataupun *medium carbon* namun memiliki ketangguhan (*toughness*) yang rendah apabila dibandingkan kedua jenis baja tersebut. Tingginya kadar karbon yang dimiliki oleh baja jenis ini adalah penyebab rendahnya tingkat ketangguhan (*toughness*). Namun di lain sisi, tingginya kadar karbon yang dimiliki dapat memberikan tingkat kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi. Baja jenis ini umumnya dipergunakan sebagai bahan untuk perkakas yang memerlukan sifat tahan aus. Misalnya sebagai bahan untuk mata bor, *tap*, ataupun *reamer* dan lain sebagainya.
- d. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*). Yaitu merupakan baja paduan dengan kadar unsur paduan yang rendah (kurang dari 10%) namun mempunyai kekuatan dan ketangguhan yang lebih baik apabila dibandingkan dengan baja karbon walaupun dengan jumlah kadar yang sama, atau dengan kata lain memiliki tingkat keuletan (*ductility*) yang lebih baik daripada baja karbon yang memiliki tingkat kekuatan yang sama.



2.1.2 Pengaruh Unsur Paduan Terhadap Sifat Baja

Pengaruh dari unsur paduan terhadap baja banyak dipengaruhi oleh cara penyebarannya di dalam konstituen pada baja tersebut. Pada dasarnya semua unsur paduan, sedikit atau banyak dapat larut di dalam ferit maupun austenit, pada umumnya dapat melarutkan unsur paduan dalam kadar yang lebih banyak lagi jumlahnya. Sebagian dari unsur-unsur paduan di dalam baja cenderung akan membentuk karbida, ada kecenderungan yang tinggi dan ada pula yang rendah, bahkan ada pula yang tidak membentuk karbida sama sekali. Unsur paduan pada baja ada yang memiliki kecenderungan kuat untuk larut dalam ferit pada umumnya tidak membentuk karbida. Sebaliknya yang mempunyai kecenderungan kuat untuk membentuk karbida kelarutannya di dalam ferit lebih terbatas jumlahnya.

Dengan menambahkan satu atau beberapa unsur paduan tertentu maka banyak dapat memberikan manfaat. Misalnya saja, untuk baja karbon memiliki *hardenability* yang rendah, sehingga setelah dilakukan proses pengerasan maka akan mudah untuk menjadi lunak kembali. Baja dengan tambahan beberapa unsur paduan dinamakan sebagai baja paduan. Unsur paduan sengaja ditambahkan ke dalam baja dengan maksud agar tercapai tujuan berikut ini :

- *) Menaikkan *hardenability* (sifat mampu untuk dikeraskan)
- *) Memperbaiki kekuatan pada temperatur biasa
- *) Memperbaiki sifat mekanik pada temperatur rendah maupun tinggi



- *) Memperbaiki ketangguhan (*toughness*) pada tingkat kekuatan (*strength*) maupun kekerasan (*hardness*) tertentu.
- *) Menaikkan sifat tahan aus
- *) Menaikkan sifat tahan korosi
- *) Menaikkan sifat kemagnetan

Unsur paduan selain mungkin dapat larut dalam ferit maupun austenit ataupun membentuk karbida, juga dapat membentuk suatu fase yang berguna untuk menstabilkan suatu fase tertentu. Kelompok unsur paduan menurut fungsinya adalah sebagai berikut :

- a. **Ferrite Stabilizer**, yaitu unsur paduan yang membuat ferit menjadi lebih stabil sampai ke temperatur yang lebih tinggi. Biasanya ferit akan bertransformasi menjadi austenit pada suatu temperatur tertentu, dengan adanya unsur paduan *ferrite stabilizer* maka temperatur transformasi ini akan naik, bahkan bila jumlah unsur itu cukup banyak maka ferit akan tetap stabil sampai mulai terjadi pencairan. Sedangkan yang terpenting pada kelompok ini Cr, Si, Mo, W, dan Al.
- b. **Austenite Stabilizer**, yaitu merupakan unsur paduan yang membuat austenit menjadi lebih stabil pada temperatur yang lebih rendah. Biasanya austenit akan mulai bertransformasi bila didinginkan sampai ke temperatur tertentu, dengan adanya unsur paduan ini maka temperatur transformasi ini akan menjadi lebih rendah, bahkan dapat mencapai suhu kamar. Unsur yang terpenting pada kelompok ini adalah nikel dan mangan.



- c. **Carbide Forming Elements**, yaitu unsur paduan yang di dalam baja dapat membentuk karbida. Yang terpenting dalam kelompok ini dapat diurutkan mulai dari yang mempunyai tingkat *affinity* terhadap karbon rendah. Yaitu secara berurutan Cr, W, Mo, V, Ti, Nb, Ta, dan Zr. Adanya karbida akan menaikkan sifat tahan aus, biasanya *alloy steel* mengandung unsur pembentuk karbida dengan kadar yang cukup tinggi.
- d. **Carbide Stabilizer**, yaitu merupakan unsur paduan yang membuat karbida menjadi lebih stabil, tidak mudah terurai dan larut ke dalam suatu fase. Unsur-unsur dalam kelompok ini apabila diurutkan mulai yang terlemah hingga yang paling kuat yaitu Co, Ni, W, Mo, Cr, V, Ti, Nb, dan Ta.
- e. **Nitride Forming Elements**, yaitu merupakan unsur yang dapat membentuk nitrida. Pada dasarnya semua unsur pembentuk (*forming element*) dari karbida adalah juga pembentuk nitrida yang mampu membentuk nitrida bila dilakukan proses *nitriding*.

2.2. Fracture Mechanic

2.2.1. Material Properties Baja Karbon

Sifat – sifat dari material perlu dikenal secara baik karena material tersebut digunakan untuk berbagai macam keperluan dan berabagai keadaan. Sifat – sifat bahan yang diinginkan sangat banyak, termasuk: sifat mekanik (kekuatan, kekerasan, kekakuan, keliatan, keuletan).

a. Kekuatan material (*material strength*)



Kekuatan material adalah besarnya gaya atau beban yang mampu menahan material tersebut sampai patah.

b. Keuletan (*ductility*)

Ductility adalah propertis dari material yang mengalami perbedaan perubahan bentuk permukaan sebelum mengalami patah atau putus. Material seperti diatas bisa dikatakan *ductile*, sedangkan jika material tersebut menunjukkan tidak adanya perubahan atau kesulitan dalam pembentukan permukaan sebelum terjadinya patah atau putus dinamakan *brittle*. Sedangkan untuk pertimbangan desain, *ductility* secara langsung berpengaruh terhadap *fracture toughness* dan proses pembuatan material, sebuah material yang mempunyai keuletan tinggi mempunyai harga *fracture toughness* yang tinggi dibandingkan dengan *brittle* material. Hubungan antara tegangan dan regangan pada beban tarik ditentukan sebagai berikut. Apabila beban P , luas penampang A , dan tegangan tarik σ maka :

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

Dan dinyatakan dalam satuan N/m^2 , Mpa atau kgf/mm^2 .

Regangan dinyatakan sebagai :

$$\varepsilon = \frac{\delta_l}{l_o} \quad (2.2)$$

Dimana δ_l adalah deformasi dan l_o panjang asal, maka ε dinyatakan dalam m/m atau mm/mm bilangan tak berdimensi atau sering dinyatakan persen. Deformasi didaerah elastik menunjukkan

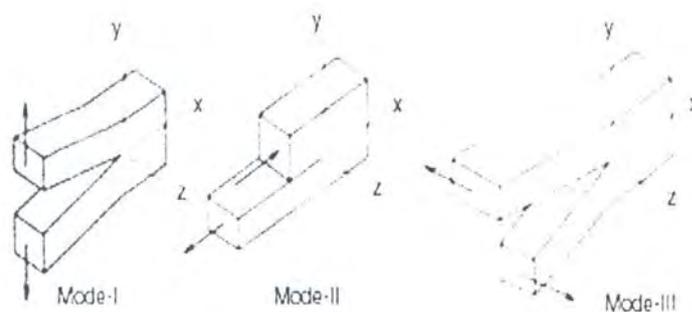
sifat proporsional atau sebanding lurus dengan tegangan. Hubungan lurus ini disebut dengan modulus elastis, dan dalam hal deformasi tarik disebut modulus elastis memanjang atau modulus young yang dinyatakan dengan E

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

satuannya N/m^2 , MPa atau kgf/mm^2

2.2.2. LINIER ELASTIC FRACTURE MECHANIC

Sebelum menganalisa perambatan retak perlu untuk mendefinisikan hubungan antara retak dengan tegangan. Distribusi tegangan di daerah ujung retak terdiri dari tiga mode seperti terlihat pada gambar 2.3 [Anderson, 1991]. Pada mode I, retak terentang oleh tegangan tarik yang bekerja dalam arah y tegak lurus pada permukaan retak. Cara ini lazim terdapat pada pengujian fracture toughness dan nilai intensitas tegangan kritis diberi tanda K_{IC} . Pada mode II, atau model geser, tegangan geser bekerja tegak lurus pada tepi depan retak dan bidang retak itu sendiri. Pada mode III, atau model geser sejajar, tegangan bekerja sejajar pada tepi depan retak. Mode I merupakan cara pembebanan yang paling penting.



Gambar 2.1 Mode deformasi retak.



Mode I : *Opening Mode*

Crack opening mode, retak dibuka lebar pada permukaan retakan akibat adanya tegangan tarik yang tegak lurus terhadap bidang penjalaran retak.

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2.4)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2.5)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.6)$$

$$\sigma_x = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.7)$$

$$U = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{(2\pi)} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.8)$$

$$V = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{(2\pi)} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.9)$$

$$W = 0$$

Mode II *Sliding Mode*

In-plane shear mode, bagian retak searah dengan bidang penjalaran retak yang diakibatkan oleh tegangan geser/ arah perambatan retak searah dengan arah bidang pembebanan..

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2.10)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \quad (2.11)$$



$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \left[\cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] \quad (2.12)$$

$$\sigma_x = \nu(\sigma_x + \sigma_y), \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (2.13)$$

$$U = \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{(2\pi)} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.14)$$

$$V = \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{(2\pi)} \right]^{\frac{1}{2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \quad (2.15)$$

$$W = 0$$

Mode III : *Tearing mode*

Out-of-plane shear mode, perambatan retak seperti robekan karena permukaan retak bergeser terhadap penjalaran lainnya dalam arah sejajar tepi takikan. Retak yang diakibatkan tegangan geser yang bekerja pada arah melintang dan membentuk sudut dengan arah penjalaran retak struktur yang mengalami beban torsional.

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.16)$$

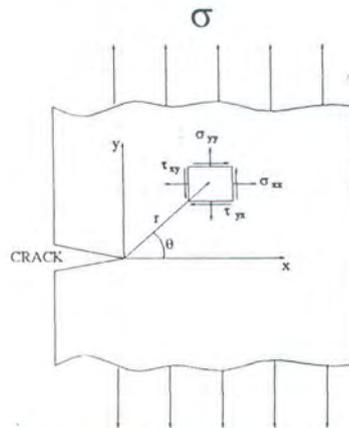
$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (2.17)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0$$

$$U = \frac{K_{III}}{G} \left[\frac{2r}{(\pi)} \right]^{\frac{1}{2}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.18)$$

$$U = V = 0$$

Pada tugas akhir ini mode yang digunakan adalah mode I. Gambar 2.4 menunjukkan sebuah pelat tak terhingga yang mengandung crack, yang dikenai tegangan, sehingga pelat akan mengalami tegangan baik ke arah sumbu x atau ke arah sumbu y



Gambar 2.2 Distribusi tegangan elastis disekitar ujung retak.

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.19)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (2.20)$$

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{xy} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \theta \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \quad (2.21)$$

Untuk $\theta = 0$, maka tegangan $\tau_{xy} = 0$ dan $x = r$, sehingga

$$\sigma_x = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.22)$$

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.23)$$



Dari persamaan 2.22 dan 2.23 kelihatan bahwa $\sigma_x = \sigma_y$, besarnya tegangan tergantung pada jarak x terhadap ujung retak, semakin besar jarak x , semakin kecil tegangannya. Disamping itu tegangan juga tergantung pada harga K (*Stress Intensity Factor*).

Harga K akan menunjukkan bahwa tegangan pada elastis body akan setara dengan beban, jika beban dinaikkan dua kali lipat, maka tegangan akan naik dengan factor kenaikan 2 kali lipat, sehingga dapat dikatakan bahwa tegangan pada ujung retak akan setara dengan tegangan nominal (*applied Stress*)

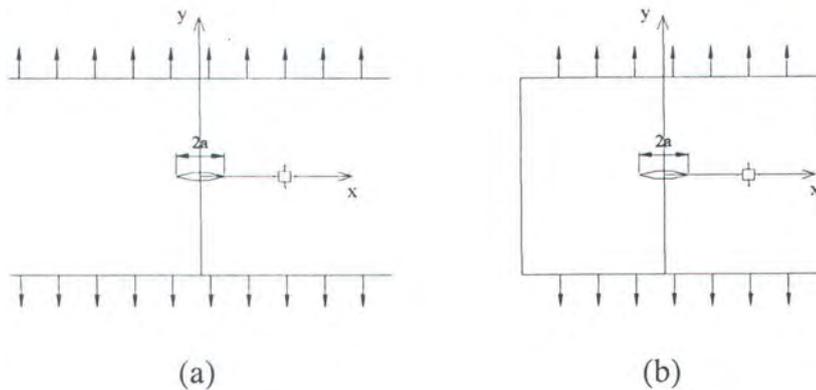
$$\sigma_y \approx \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.24)$$

Dapat dikatakan juga bahwa tegangan pada ujung retak akan tergantung pada ukuran retak. Tegangan akan lebih besar jika panjang retak (2.24) lebih besar. Oleh karena itu ukuran retak harus kelihatan pada pembilang pada persamaan (2.24), sehingga pembilang pada persamaan (2.24) dapat dikalikan dengan akar a , dan persamaan (2.24) menjadi

$$\sigma_y \approx \frac{\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.25)$$

Persamaan (2.25) masih mengandung kesetaraan bentuk sebagai pengaruh bentuk yang sebenarnya, sehingga factor bentuk harus dimasukkan, factor bentuk ini dinotasikan dengan C dan persamaan (2.25) menjadi

$$\sigma_y \approx \frac{C\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.26)$$



Gambar 2.3 Centre crack dengan beban uniform.

Persamaan (2.26) dapat diperoleh dengan sederhana, namun untuk penyelesaian yang sebenarnya akan membutuhkan nilai actual dari C . Untuk kasus seperti pada gambar 2.5.a , harga $C = \sqrt{\pi}$, sehingga persamaanya menjadi

$$\sigma_y \approx \frac{\sigma\sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (2.27)$$

Dengan membandingkan persamaan (2.25) dan (2.27) dapat disimpulkan bahwa untuk kasus seperti pada gambar 2.5.a

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.28)$$

2.2.3. STRESS INTENSITY FACTOR (K)

Stress intensity factor menunjukkan hubungan antara mode pembebanan, tegangan dan retak. Sebagai contoh untuk gambar 2.5.b : pelat dengan lebar W , tegangan pada ujung retak sama dengan



$$\sigma_y = \frac{C\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.29)$$

Pada kasus ini harus diperhitungkan bahwa ukuran pelat akan berpengaruh terhadap besarnya tegangan pada ujung retak, tegangan akan bertambah ketika lebar pelat semakin kecil. Disamping lebar pelat panjang retak juga akan mempengaruhi tegangan, sehingga factor bentuk C dapat dinotasikan sebagai fungsi W/a atau a/W karena harga C harus tidak berdimensi. Sebagai contoh pada gambar 2.5.b

$$C = \sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \quad (2.30)$$

sehingga

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \sigma \sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.31)$$

dan

$$K = \sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} \sigma \sqrt{a} \quad (2.32)$$

Jika W sangat besar atau a sangat kecil maka nilai

$$\sqrt{\pi \sec \frac{\pi a}{W}} = 1 \quad (2.33)$$

Jelas bahwa untuk beberapa konfigurasi tegangan di ujung retak akan sama dengan



$$\sigma_y = \frac{C\left(\frac{a}{L}\right)\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.34)$$

dan stress intensity factor sama dengan

$$K = C\left(\frac{a}{L}\right)\sigma\sqrt{a} \quad (2.35)$$

dimana L adalah panjang pelat yang mengandung retak

Dalam praktek, faktor C dibagi dengan $\sqrt{\pi}$ dan $\sqrt{\pi a}$ dimasukkan untuk \sqrt{a} sebagai kompensasi. Fungsi $C(a/L)/\sqrt{\pi}$ kemudian dinotasikan sebagai β , geometri faktor atau yang sering disebut faktor koreksi, sehingga

$$\sigma_y = \frac{\beta\sigma\sqrt{a}}{\sqrt{2\pi x}} = \frac{K}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.36)$$

$$K = \beta\left(\frac{a}{L}\right)\sigma\sqrt{\pi x} \quad (2.37)$$

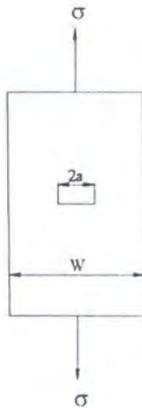
Persamaan (2.32) identik dengan persamaan sebelumnya, persamaan ini menunjukkan hubungan antara tegangan dengan stress intensity factor. Untuk panel yang sangat lebar $\beta = 1$, sedangkan untuk panel tertentu

$$K = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \quad (2.38)$$

Persamaan (2.32) merupakan representasi dari tegangan di ujung retak dan stress intensity factor untuk semua jenis/bentuk retak.



Persamaan ini telah diturunkan dari penyelesaian umum untuk retak yang berbeda-beda dengan pembebanan mode I yang berbeda beda. Untuk beberapa retak harga β seperti di bawah ini.



$$K = \beta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.39)$$

$$\beta = \sqrt{\sec \frac{\pi a}{W}} \quad (2.40)$$

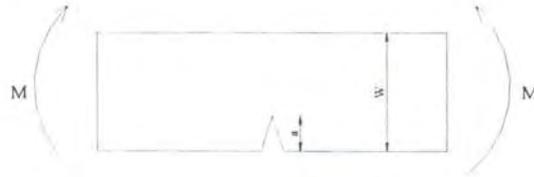
$$\beta = 1 + 0.256 \frac{a}{W} - 1.152 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 12.2 \left(\frac{a}{W} \right)^3 \quad (2.41)$$



$$\beta = 1.12 - 0.23 \frac{a}{W} + 10.56 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 21.74 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 30.42 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (2.42)$$



$$\beta = 1.12 + 0.43 \frac{a}{W} - 4.79 \left(\frac{a}{W} \right)^2 + 15.46 \left(\frac{a}{W} \right)^3 \quad (2.43)$$



Gambar 2.4 Contoh nilai-nilai β .

$$\beta = 1.122 - 1.40 \frac{a}{W} + 7.3 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 13.08 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 14.6 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \quad (2.44)$$

Untuk retak yang sangat kecil ($a/W \ll 1$) kita dapat menyederhanakan persamaan di atas, dimana $\pi a/W$ pada persamaan (2.33) sama dengan nol, sehingga

$$\beta = 1$$

untuk retak di samping $\beta = 1.12$

2.2.4. Fracture Toughness

Toughness merupakan kemampuan material untuk menyangga *stress intensity* tertinggi pada saat material mengandung retak [Anderson, 1991]. Stress intensity ini dinyatakan sebagai **Stress Intensity factor** (K). Seberapa besar *stress intensity* yang mampu disangga oleh material harus ditentukan melalui pengujian.

Fracture akan terjadi jika tegangan pada ujung retak terlalu besar untuk disanggah material atau pada saat stress intensity melebihi toughness yang dimiliki oleh material.

Fracture terjadi jika



$$\text{Dimana } K = \beta\sigma\sqrt{\pi a}$$

Dengan mengetahui harga toughness dari material dapat ditentukan berapa harga retak yang diijinkan jika material dikenai suatu beban.

Fatigue adalah salah satu mode kegagalan yang harus dipertimbangkan dalam mendesain suatu struktur, seperti telah diketahui bahwa logam yang dikenai tegangan berulang akan rusak pada tegangan yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan tegangan yang dibutuhkan untuk menimbulkan perpatahan pada penerapan beban tunggal. Kegagalan yang terjadi pada keadaan beban dinamik dinamakan *kegagalan lelah (fatigue failure)*. Hingga kini sering dinyatakan bahwa paling tidak 50% - 90% dari seluruh kegagalan mekanis disebabkan oleh *fatigue*.

Definisi dari *fatigue* atau kelelahan ini menurut ASTM (American Society For Testing Material) E206 hal 34 adalah:

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

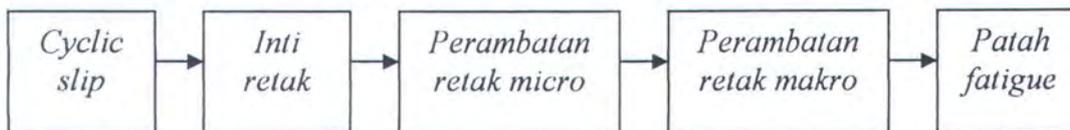
2.2.5. PARAMETER UMUR LELAH BAHAN

Kegagalan suatu material yang disebabkan oleh kelelahan akan mengalami 3 tahap, yaitu:

1. Crack Initiation (penintian retak)
2. Crack Growth (perambatan retak)

3. failure (kegagalan)

Secara umum mekanisme kelelahan pada struktur yang mengalami beban yang berfluktuasi dapat dibagi menjadi beberapa fase. Diawali dengan *cyclic slip* yang selanjutnya mengumpul menjadi inti retak. Akibat pembebanan selanjutnya inti retak berkembang menjadi retak mikro. Retak mikro akan membesar menjadi retak makro yang terus merambat sampai penampang sisa (*ligamen*) semakin kecil dan tidak mampu lagi menahan beban sehingga material mengalami patah seperti patahan pada beban static.



Gambar 2.5. Fase pembentukan retak.

Dari diagram diatas dapat disimpulkan bahwa terdapat tiga fase penting, yaitu:

1. Pembentukan retak awal (perambatan retak mikro/ *crack initiation*)
2. Perambatan retak makro (*crack propagation*)
3. Kegagalan akhir, yaitu pecah lelah (*fatigue fracture*) yang terjadi secara tiba-tiba pada penampang yang tersisa.

Seperti telah disebutkan di atas bahwa untuk mengetahui kekuatan lelah maupun umur lelah suatu bahan dapat menggunakan dua pendekatan. Pendekatan tersebut adalah *total fatigue life approach* dan *crack growth approach*.

a. Crack Growth Approach

Umur lelah pada pendekatan ini adalah hanya umur perambatan retak yang dimasukkan karena pada pendekatan ini bahan atau material

sudah mengandung retak awal (crack initiation). Perambatan retak dapat terjadi selama pengoperasian suatu struktur, dimana terjadinya dapat melalui salah satu dari mekanisme di bawah ini:

- Fatigue yang disebabkan oleh beban berulang.
- Stress corrosion yang diakibatkan oleh beban yang bekerja secara terus menerus.
- Penjalaran.
- Adanya hydrogen akibat adanya retak.
- Adanya liquid akibat adanya retak.



Perambatan retak digambarkan sebagai jumlah siklus yang diperlukan untuk mencapai panjang retak tertentu. Perambatan retak per cycle (Δa) akan lebih besar, jika tegangan maksimum dalam cycle tinggi dan jika tegangan minimum lebih rendah, sehingga hubungan di atas bisa ditulis sebagai berikut:

$$\Delta a_{\text{per cycle}} \uparrow \text{ untuk } \sigma_{\text{max}} \uparrow \text{ dan atau } \sigma_{\text{min}} \downarrow \quad (2.44)$$

Sedangkan range tegangan didefinisikan sebagai $\sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{min}}$, range tegangan akan lebih besar bila σ_{min} lebih kecil, sehingga persamaan di atas dapat ditulis sebagai:

$$\Delta a_{\text{per cycle}} \uparrow \text{ untuk } \sigma_{\text{max}} \uparrow \text{ dan atau } \Delta \sigma \uparrow \quad (2.45)$$

Tegangan local pada ujung retak dapat digambarkan dalam bentuk stress intensity factor K , dimana $K = \beta \sigma \sqrt{\pi a}$, jika σ adalah tegangan nominal yang bekerja dalam satu cycle, tegangan yang bekerja bervariasi dari σ_{min} sampai σ_{max} dengan range $\Delta \sigma$, dengan demikian lokal stress juga bervariasi seperti di bawah ini:



$$K_{\min} = \beta \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} \quad (2.46)$$

$$K_{\max} = \beta \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} \quad (2.47)$$

$$\Delta K = \beta \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.48)$$

Δ di sini berarti range, bukan tambahan yang kecil

Dengan menggunakan persamaan (2.44) dan persamaan (2.45) untuk perambatan retak menjadi:

$$\Delta a_{\text{per cycle}} \uparrow \text{ untuk } \sigma_{\max} \uparrow \text{ dan atau } \Delta K \uparrow \quad (2.49)$$

Lebih lanjut, rasio tegangan didefinisikan $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Kelihatan dari persamaan (2.49) bahwa pada ukuran retak a , rasio tegangan juga sama dengan K_{\min} / K_{\max}

$$\text{jika } \beta \sigma_{\min} \sqrt{\pi a} / \beta \sigma_{\max} \sqrt{\pi a} = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = R$$

$$\text{maka } R = K_{\min} / K_{\max} = K_{\max} - \Delta K / K_{\max} = 1 - (\Delta K / K_{\max})$$

$$\text{atau } K_{\max} = \Delta K / (1 - R) \quad (2.50)$$

Berdasarkan persamaan (24) perambatan retak akan lebih besar ketika K_{\max} lebih tinggi, dengan demikian perambatan retak juga akan bertambah besar ketika ΔK lebih besar dan atau R lebih tinggi, sehingga persamaan (2.49) dapat ditulis:

$$\Delta a_{\text{per cycle}} \uparrow \text{ untuk } \Delta K \uparrow \text{ dan atau } R \uparrow \quad (2.51)$$

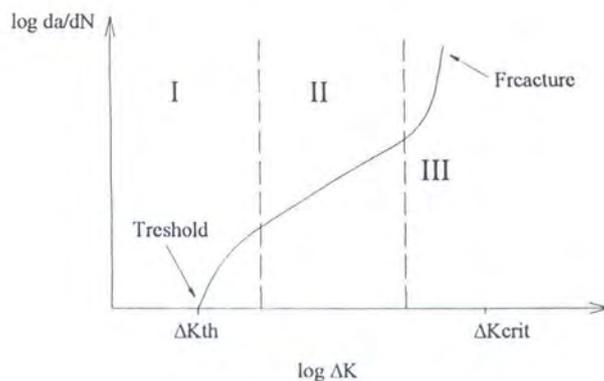
Dalam persamaan ini Δa adalah panjang pertambahan retak dalam satu cycle yang dinyatakan dalam inch/cycle atau mm/cycle. Jika perambatan telah diukur pada ΔN cycle, maka rata-rata perambatan retak

per cycle adalah $\Delta a/\Delta N$ yang merupakan kecepatan perambatan retak. Pada limit $N \rightarrow 1$ kecepatan perambatan retak dinyatakan dalam bentuk differensial da/dN . Persamaan (2.49) mengindisika bahwa kecepatan tergantung pada naik turunnya harga ΔK dan R , sehingga secara matematis persamaan (2.49) menjadi:

$$Da/dN = f(\Delta K, R) \quad (2.52)$$

b. Rate Equation

Gambar 5 menunjukkan skema plot log-log dari da/dN dengan ΔK , yang mengambarkan tipikal dari material terhadap perambatan retak. Kurva tersebut mengandung tiga region yang berbeda. Pada nilai tengah ΔK , kurva berbentuk linier, akan tetapi deviasi perambatan retak dari tren linier terjadi pada tinggi rendahnya nilai ΔK . Perambatan retak akan mengalami percepatan pada saat K_{max} mendekati harga K_{crit} , dimana K_{crit} merupakan Fracture Toughness yang dimiliki oleh material.



gambar 2.6. Grafik crack growth fungsi ΔK .



Pada region linier dari plot log-log pada gambar 5 digambarkan dengan persamaan berikut

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2.53)$$

dimana C dan m adalah konstanta material yang dapat ditentukan melalui pengujian. Menurut persamaan (28) perambatan retak hanya tergantung ΔK ; da/dN tidak terpengaruh dengan R ratio pada Region II, persamaan (28) ini diusulkan oleh Paris dan Erdogan.

Variasi dan laju perambatan retak $\frac{da}{dn}$ dengan ΔK 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 III). Bila harga ΔK telah melewati K_{ic} , maka perambatan retak yang terjadi *unstable*, artinya bahwa laju perambatan retak yang terjadi sangat cepat, dengan kata lain material akan mengalami *final failure*.

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

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



Pertama-tama pada sebuah spesimen dilakukan pengujian *fatigue* dengan beban tertentu. Dari pengujian tersebut didapatkan grafik yang menggambarkan berapa laju perambatan retak pada suatu range tertentu dari tiap-tiap spesimen. Laju perambatan retak ditransformasi pada kurva $\frac{da}{dn}$ vs ΔK dari kurva ini maka dapat diperkirakan suatu bentuk kurva yang menghubungkan panjang retak dan jumlah siklus pembebanan komponen tersebut.

2.2.6. Mekanisme penjalaran retak

Awal retak mula-mula akan menjalar pada bidang slip didalam beberapa butir crystal material. Peristiwa ini disebut perambatan retak mikro (perambatan retak tahap I). Kecapatan rambat retak mikro ini sangat lambat, hal ini mengakibatkan perambatan retak mikro ini memakan waktu yang relatif lama dari umur kelelahan total.

Perambatan retak makro (perambatan retak tahap II) ditandai dengan striasi (*striation*). Striasi adalah garis-garis halus yang menyatakan majunya retak untuk satu siklus beban. Garis-garis striasi ini terbentuk akibat pembukaan retak yang disusul dengan penumpukan ujung retak secara plastis, kemudian dilanjutkan dengan penutupan retak akibat turunnya tegangan.

Pada perambatan retak tahap III, laju perambatan retak tidak dapat dikontrol, karena perambatan berlangsung cepat, yang diakhiri dengan kegagalan material. Patahan yang terjadi disebut patah getas (*brittle fracture*).



2.2.7. Konsentrasi tegangan

Lubang, groove, fillet takik pada suatu struktur menyebabkan tegangan tidak terdistribusi sebgaimana mestinya, melainkan terkonsentrasi pada suatu daerah local pada akar notch/ takik. Besarnya tegangan terkonsentrasi tersebut digambarkan dengan suatu.

2.3. Pengelasan

Berdasarkan definisi dari biro klasifikasi asal Jerman, *Deutsche Industrie Normen* (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. Dan pada saat ini, telah digunakan lebih dari 40 jenis pengelasan termasuk pengelasan yang dilaksanakan dengan hanya menekan dua logam yang disambung hingga terjadi ikatan antara atom-atom dan molekul-molekul dari logam yang disambungkan. Berdasarkan definisi tersebut diatas lalu secara garis besar pengelasan dibagi tiga kelompok [*Wiryo Sumarto, 1981*] yaitu :

1. Pengelasan cair adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan sampai mencair dengan sumber panas dari busur listrik atau atau semburan api gas yang terbakar.
2. Pengelasan tekan adalah cara pengelasan dimana sambungan dipanaskan dan kemudian ditekan hingga menyambung jadi satu.
3. Pematrian adalah cara pengelasan dimana sambungan diikat dan disatukan dengan menggunakan paduan logam yang mempunyai titik cair yang rendah. Pada cara seperti ini logam induk tidak turut mencair.



2.3.1. Las Elektroda Terbungkus (*Shielded Metal Arc Welding*)

Las elektroda terbungkus atau dikenal dengan SMAW, adalah merupakan jenis pengelasan yang paling banyak digunakan pada sekarang ini. Dalam cara pengelasan ini digunakan kawat las (elektroda) logam yang dibungkus dengan fluks. Pada teknik ini busur listrik terbentuk di antara logam induk dan ujung elektroda. Karena panas dari busur ini maka logam induk dan ujung elektroda tersebut mencair dan kemudian membeku bersama.

Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa oleh arus busur listrik yang terjadi. Bila digunakan arus listrik yang besar maka butiran logam cair yang terbawa akan menjadi halus. Dan sebaliknya, bila arus listrik kecil maka butirannya akan menjadi besar.

Pola pemindahan logam cair seperti yang dijelaskan di atas sangat mempengaruhi sifat mampu las (*weldability*) dari logam. Secara umum dapat dikatakan bahwa logam mempunyai sifat las yang tinggi apabila pemindahan terjadi dengan butiran yang halus. Sedangkan pola pemindahan cairan dipengaruhi oleh besar kecilnya arus seperti yang diterangkan di atas dan juga oleh komposisi dari bahan fluks yang digunakan. Selama proses pengelasan, bahan fluks yang digunakan untuk membungkus elektroda mencair dan membentuk terak yang kemudian menutupi logam cair yang terkumpul di tempat sambungan dan bekerja sebagai penghalang oksidasi (*deoxidizer*). Di dalam las elektroda terbungkus (SMAW), fluks memegang peranan penting karena fluks bertindak sebagai :



1. Pemantap busur dan penyebab kelancaran pemindahan butir-butir cairan logam.
2. Sumber terak atau gas yang dapat melindungi logam cair terhadap udara di sekitarnya.
3. Pengatur penggunaan.
4. Sumber dari unsur-unsur paduan.

Fluks pada umumnya terdiri dari bahan-bahan tertentu dengan perbandingan yang tertentu pula. Bahan-bahan yang digunakan dapat digolongkan dalam bahan pemantap busur, pembuat terak, penghasil gas, deoksidator, unsur paduan dan bahan pengikat.

Keuntungan penggunaan las SMAW

- Pengelasan bisa dilakukan pada semua logam dengan berbagai jenis ketebalan (tipis atau tebal) dengan berbagai macam posisi pengelasan.
- Lebih ekonomis karena modal yang relatif kecil dan biaya pemeliharaan murah.
- Cara pengoperasionalnya mudah.

Spesifikasi mesin las

- Jenis pembangkit listrik
- Karakteristik tegangan
- Jenis perubah arus lasnya
- Jenis arus yang dikeluarkan
- Kapasitas

Jenis arus yang dikeluarkan menggunakan arus DC (searah) karena pengelasan dengan arus DC busur lasnya lebih stabil dan mantap dan baik



untuk pengelasan pelat tipis. Arus searah (DC) dapat digolongkan sebagai berikut :

- DCEN : polarisasi searah, kutub positif dihubungkan dengan base metal dan kutub negatif dihubungkan dengan electrode. Panas yang timbul lebih besar sehingga menghasilkan penetrasi yang dalam ke dalam material. Prosentase panas sekitar 70% pada base metal dan 30 % pada electrode. Dengan karakteristik ini maka DCEN digunakan untuk pengelasan sambungan.
- DCEF : Kutub positif dihubungkan dengan electrode dan kutub negatif dihubungkan dengan base metal. Prosentase panas adalah 70% pada electrode dan 30% pada base metal, sehingga penetrasi yang dihasilkan lebih dangkal. Dengan karakteristik ini maka DCEF digunakan untuk penambalan material (pemopokan).

Fungsi fluks pada electrode adalah sebagai berikut :

- Sumber gas yang melindungi logam cair dari kontaminasi udara
- Mengurangi timbulnya cacat las yang berupa pori – pori.
- Merupakan unsur atau elemen pengionisasi
- Mempertinggi produktifitas electrode.

Pemilihan electrode berdasarkan pada :

- Jenis logam yang akan dilas
- Tebal pelat
- Jenis sambungan
- Posisi las
- Spesifikasi teknis base metal



- Jenis arus
- Kecepatan pengelasan

2.3.2. Spesifikasi electrode

E XXXX , digit 1 dan 2 menunjukkan kuat tarik maksimum weld metal dalam psi, digit 3 adalah posisi pengelasan, digit 4 adalah jenis fluks.

Sedangkan jenis elektrode yang digunakan adalah E 7018 yaitu :

- Jenis fluks yang digunakan serbuk besi dan hidrogen rendah
- Posisi pengelasan F,V,OH,H (F : datar, V : vertical, OH : atas kepala, H : horizontal)
- Jenis arus AC atau DC
- Kekuatan tarik 50,6 kg/mm², kekuatan luluh 42,2 kg/mm²
- Perpanjangan 22 %

2.3.3. Cacat dalam pengelasan

Jenis cacat pengelasan yang bisa terjadi adalah :

1. Pencairan :

- Inkomplete penetration yaitu tidak sempurnanya penggabungan antara logam induk dengan logam las (logam las tidak dapat mencapai akar).
- Incomplete fusion : Tidak sempurnanya peleburan antara logam induk dan logam las pada garis peleburan.

2. Metalurgi :

- Porosity : adanya gelembung gas yang terperangkap dalam logam las.
- Slag inclusion : internal defect karena adanya metalik atau non metalik/material yang terperangkap di dalam material las.

3. Crack :



- Cacat pengelasan yang berupa retak di daerah logam las dan HAZ.

Retak lasan dapat dikurangi dengan pemanasan mula (90 – 260)°C dan dengan suhu pemanasan setelah pengelasan yaitu (600 – 650)°C yang bertujuan untuk mengurangi pengerasan pada daerah HAZ.

2.3.4. Daerah Pengaruh Panas (HAZ)

Pengelasan merupakan suatu proses penyambungan logam dengan menggunakan energi panas dimana proses pengikatan metalurgi dari logam tersebut dilakukan dalam keadaan lumer/cair pada suhu tinggi. , daerah hasil pengelasan tersebut secara garis besar terbagi menjadi tiga [*Teknologi Pengelasan Logam*, Prof. Dr. Toshie Okumura], yaitu :

1. Logam lasan (*weld metal*)
2. Daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone/HAZ*)
3. Logam induk (*base metal*)

Weld metal adalah merupakan bagian dari logam yang pada waktu proses pengelasan mencair dan kemudian membeku. *Weld metal* ini pada umumnya berada pada daerah sambungan las. Sedangkan *base metal* atau logam induk yaitu bagian pada logam dasar yang tidak terpengaruh oleh siklus termal dari hasil proses pengelasan dimana panas serta suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan struktur dan sifat. Pada penyusunan Tugas Akhir ini, spesifik membahas daerah pengaruh panas (HAZ) yang merupakan efek dari proses pengelasan. Definisi daerah pengaruh panas atau yang lebih dikenal dengan istilah *heat affected zone* (HAZ), adalah daerah pada *base metal* yang bersebelahan dengan *weld metal* yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan secara cepat. Siklus



termal disini maksudnya adalah merupakan proses pemanasan dan pendinginan di daerah yang mengalami proses pengelasan (*welding process*). Lamanya pendinginan dalam suatu daerah pada temperatur tertentu dari suatu siklus termal las sangat mempengaruhi kualitas dari sambungan.

Selain itu struktur mikro dan sifat mekanik dari daerah HAZ sebagian besar tergantung. Pada lamanya proses pendinginan. Struktur mikro, kekerasan, dan berlangsungnya transformasi dari daerah HAZ dapat diketahui pada diagram transformasi pendinginan berlanjut atau CCT (*Continuous Cooling Transformation*). Diagram CCT ini berguna untuk membahas pengaruh struktur terhadap retak las, keuletan, dan lain sebagainya yang kemudian dapat dipergunakan untuk menentukan prosedur dan cara pengelasan.

2.4. Post Weld Heat Treatment (PWHT)

Metode pemanasan yang digunakan setelah dilakukan pengelasan (*post weld heat treatment*) adalah metode annealing. Perlakuan panas setelah pengelasan bertujuan untuk mengurangi kekerasan yang menyebabkan material bersifat getas, mendapatkan sifat – sifat mekanis yang diinginkan serta menghasilkan bentuk mikrostruktur yang diinginkan. Untuk baja paduan dilakukan metode *full annealing* yaitu annealing pada baja paduan jenis austenit dan dengan pendinginan perlahan melalui beberapa tahap penurunan suhu transformasi.

Proses ini meliputi pemanasan logam atau paduan dalam bentuk padatan hingga temperature tertentu, diikuti oleh pendinginan dengan



kecepatan tertentu untuk mendapatkan sifat mekanis dan fisik yang diinginkan.

Proses *Heat Treatment* ini pada dasarnya terdiri atas beberapa tahap yang dimulai dengan memanasi sampai temperature tertentu diikuti dengan penahanan beberapa saat, baru setelah itu dilakukan pendinginan dengan laju pendinginan tertentu. Yang membedakan suatu proses yang satu dengan yang lainnya (juga menentukan sifat dari baja setelah proses berakhir) antara lain :

- Temperatur pemanasan
- Waktu penahanan (*holding time*)
- Laju pendinginan

Sifat mekanis baja tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada mikrostrukturnya, perbedaan mikrostruktur selain terjadi karena perbedaan komposisi kimia juga akibat proses pembentukan dan perbedaan perlakuan panas yang dihadapi. Proses perlakuan panas terhadap baja pada umumnya akan melibatkan transformasi / dekomposisi austenit sehingga mempengaruhi sifat mekanik dari baja.

Besar suhu maksimum untuk baja karbon adalah 50°C diatas suhu kritis. Untuk baja karbon sedang memiliki suhu maksimum 750°C , sehingga suhu maksimum yang digunakan adalah sebesar 800°C . Dan waktu penahanan yang digunakan adalah selama satu jam.

2.5. Pembebanan Rotating Bending

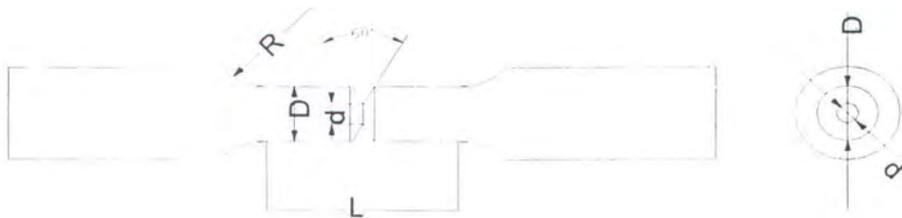
Dalam Tugas Akhir ini digunakan metode pengujian *Rotating Bending* karena pada pengujian ini specimen diputar dengan kecepatan tertentu, dengan

pembebanan tertentu pada ujungnya. Dimana poros berputar dengan kecepatan tertentu dan mengalami pembebanan diujung oleh propeller kapal.

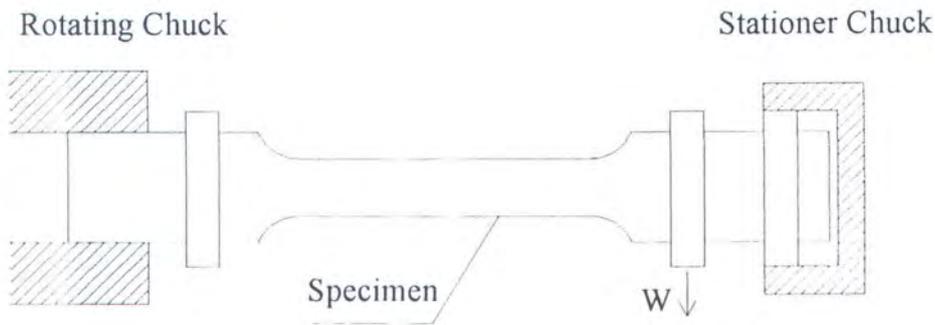
Standar pengujian disesuaikan dengan standar yang dimiliki oleh Japan International Standar [JIS Z 2247,1986] dengan spesifikasi specimen uji seperti pada tabel berikut ini :

Tabel Spesifikasi specimen uji Standar JIS

D	d (mm)	R	L	ρ
1.25d	6	min. 3 d	min. 2d	60
	8			
	10			
	12			



Gambar 2.7. Spesifikasi specimen Uji standar JIS.



Gambar. 2.8. Posisi Specimen pada alat uji Rotating Bending.

Pada pengujian rotating bending beban uji adalah momen bending yang diberikan dalam bentuk beban statis. Apabila beban uji mengalami patah maka mesin uji harus berhenti secara otomatis untuk pembacaan jumlah cycle tempuhnya. Bending moment selama pengujian sebisa mungkin dijaga dengan beban konstan.

Kecepatan putar yang diijinkan adalah sekitar 1000 – 5000 cycle permenit, dengan jumlah cycle maksimum adalah 10.juta cycle. Meskipun specimen mungkin belum mengalami patah pada cycle tersebut, besar pembebanan harus diganti dengan pembebanan yang lebih besar.

*Sesungguhnya orang-orang mukmin itu bersaudara,
karena itu damaikanlah antara kedua saudaramu
dan bertaqwalah kepada Allah agar mendapat
rahmat* [Al Hujuraat:10]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Pendahuluan

Pengujian *fracture* (kepecahan) dilakukan untuk mendapatkan harga *fracture toughness* atau ketangguhan material dengan menggunakan standar JIS (Japan International Standar) untuk pengujian *rotating bending*.

Persiapan material dan pengujian dilakukan di laboratorium konstruksi dan kekuatan, laboratorium produksi Teknik Perkapalan, laboratorium CNC (*Computer Numerical Control*) Teknik Sistem Perkapalan, laboratorium teknik material BLPT Jawa Timur serta laboratoium metalurgi Teknik Mesin ITS.

Pengujian dilakukan dengan metode *rotating bending* untuk mendekati keadaan atau kondisi poros sebenarnya, karena specimen uji berasal dari bekas poros propeller.

Data – data yang diperlukan untuk pengujian adalah

- RPM
- Momen Bending

Data – data yang diambil dari hasil pengujian adalah

- Jumlah cycle saat patah
- Kedalaman retak pada specimen
- Waktu pengujian



3.2 Pembuatan Welding Procedure Specification (WPS)

Prosedur pengelasan mengacu pada *Welding Procedure Specification* (WPS) berdasarkan standar ASME Section IX .

Prosedur pengelasan :

Welding Process	: Shield Metal Arc Welding (SMAW)
Type	: Manual
Joint Design	: Butt joint, Single V groove
Base Metal	: Medium carbon steel
Groove	: 12 – 24 mm
Plate Thickness Range	: Maximum 24 mm
Filler Metal	:
AWS no. (Classification)	: E 7018
Diametres	: 2,6 – 4,0 mm
Welding Position	: 1G (Down Hand)
Interpass Temperature	: 50 ⁰ C - 350 ⁰ C
Current AC or DC	: DC
Polarity	: DCEP
Amperage (Range)	: 70 –125 A
Voltage (Range)	: 20 – 30 V
String or Weave Bead	: Both
Initial and Interpass Cleaning	: Chipping, Brushing and Grinding
Technique	: Back Weld / Grinding
Speed	: 50 – 110 mm/minute



Pengelasan dilakukan dengan proses SMAW (Shield Metal Arc Welding) dengan arus DC. Penggunaan mesin dengan cara manual lebih memudahkan untuk melakukan pengelasan pada posisi-posisi tertentu.

Model pengelasan didesain sama dengan sambungan butt joint. Hal ini dilakukan karena meskipun penelitian mengacu pada pemopokan poros, tetapi untuk mempermudah pemodelan dan pengujian maka dibuat pengelasan butt joint.

Arus yang digunakan adalah antara 70 – 125 A. Pemilihan arus ini didasarkan pada dimensi elektroda. Selain itu hal yang penting dipertimbangkan adalah berkenaan dengan masukan panas (heat input). Arus ini dipandang sesuai untuk memperoleh masukan panas yang cukup untuk baja paduan. Untuk mengatasi pengerasan yang cepat pada daerah HAZ sehingga dapat menimbulkan retak maka dilakukan pendinginan pelan.

Tegangan yang dipakai adalah sebesar 20 – 30 V. Karena untuk pengelasan dengan posisi datar besar tegangan yang diperlukan untuk mengelas dengan elektroda bergaris tengah 3 sampai 6 mm adalah sebesar tersebut. Tegangan tidak terlalu besar karena tingginya tegangan tidak banyak mempengaruhi kecepatan pencairan, sehingga tegangan yang terlalu tinggi hanya akan membuang energi.

Elektroda yang digunakan adalah elektroda produksi ESAB dengan diameter 3,2 mm type E 7018. Elektroda jenis ini dipilih sesuai



dengan kekuatan tarik terendah kelompok E 70 yaitu sebesar 70.000 Psi, yang masih lebih tinggi dibanding dengan kekuatan tarik logam induknya.

Kecepatan pengelasan berkisar antara 50 – 110 mm/menit. Kecepatan ini sering digunakan oleh seorang pengelas. Semakin cepat pengelasan maka heat input juga semakin kecil. Kecepatan juga berpengaruh pada tinggi bead weld metal (manik las). Pengelasan dengan kecepatan tinggi akan menghasilkan tinggi manik las yang kecil. Berdasarkan pengalaman pengelasan dengan kecepatan tinggi akan memperkecil deformasi yang terjadi.

Pada pengelasan ini pendinginan dilakukan dengan udara secara perlahan.

3.2.2. Persiapan Pengelasan.

Pada proses pengelasan ini hal-hal yang harus dipersiapkan antara lain :

- a. Peralatan mesin las, disetting sesuai dengan besar arus dan voltase yang telah ditentukan pada WPS.
- b. Pemilihan kawat las / elektroda, disesuaikan dengan komposisi material induk terutama kandungan karbon dan kekuatan tariknya.
- c. Pembuatan groove pada sisi-sisi plat material yang akan dilas. Untuk ukuran sudut dan kedalaman disesuaikan dengan WPS yang telah ada.

3.2.3. Pelaksanaan Pengelasan.

Langkah-langkah pengelasan berurutan seagai berikut :

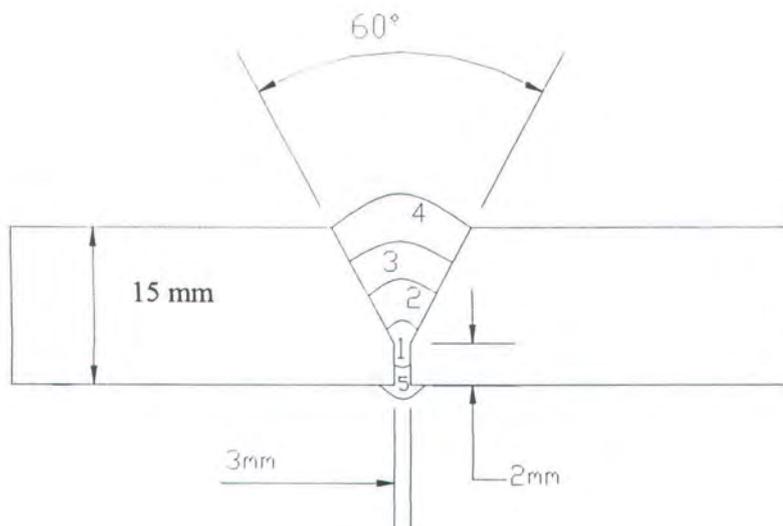


- a. Pembersihan daerah yang akan dilas sepanjang sisi material dengan gerinda dan sikat baja hingga bersih dan terbebas dari kotoran serta karat yang timbul. Setelah benar-benar bersih maka pengelasan bisa dimulai.
- b. Untuk mengurangi deformasi yang akan terjadi, maka dua pelat yang akan dilas diikat / ditahan dengan pelat penahan dan tack weld pada bidang belakang material yang akan dilas.
- c. Pengelasan lapisan / layer pertama dilakukan dengan elektroda jenis E 7018 berdiameter 3,2 mm sepanjang sisi material dan dilakukan pengukuran kecepatan pengelasan dengan alat stop watch.
- d. Melakukan pendinginan dengan udara biasa sampai suhu tertentu sehingga apabila dilakukan pembersihan slag atau terak dengan cara diceaping tidak akan menimbulkan struktur martensit yang bersifat getas.
- e. Pembersihan terhadap slag yang timbul, yang dilakukan dengan cara di peening sehingga slag yang ada akan terlepas dari logam las. Kemudian dilakukan penggosokan dengan sikat baja untuk membersihkan kotoran yang masih melekat.
- f. Setelah bersih dari kotoran, logam las diukur temperaturnya sebelum dilakukan pengelasan berikutnya. Berdasarkan WPS temperatur interpassnya maksimum sebesar 350°C . Pengukuran dilakukan dengan kapur temperatur berindikator suhu 150°C . Jika kapur meleleh maka

suhu logam las masih di atas 150°C . Pengelasan dilakukan kembali setelah suhu logam las di bawah 150°C .

- g. Pengelasan dengan elektroda yang sama dilakukan dengan cara melapiskan di atas layer pertama.
- h. Pendinginan dan pembersihan kotoran seperti pada langkah 4 dan 5.
- i. Pengelasan kembali layer berikutnya hingga pada layer ke-4.
- j. Pelepasan pelat penahan.
- g. Pembersihan sisi balik material tepat pada alur las dan sekitarnya dengan gerinda dan sikat baja.
- h. Pembuatan alur las dengan kedalaman 2 mm tepat pada akar las.
- i. Pengelasan layer ke-5 yang merupakan back weld dan layer terakhir dari proses pengelasan ini.

Pembersihan kotoran dengan chipping dan sikat baja, dan didinginkan.



Gambar 3.1. Detail lapisan pengelasan.



Parameter pengelasan (pemopokan) poros :

Spesimen I :

Tabel 3.1. Parameter pengelasan spesimen I

Layer	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Kecepatan (mm/s)
1	85 – 100	20 - 30	0.99
2	100 - 115	20 - 30	0.95
3	100 - 115	20 - 30	1.03
4	115 - 125	20 - 30	1.02
5	90 - 105	20 - 30	1.18

Spesimen II :

Tabel 3.2. Parameter pengelasan spesimen II

Layer	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Kecepatan (mm/s)
1	85 – 100	20 - 30	1.13
2	100 - 115	20 - 30	1.31
3	100 - 115	20 - 30	1.18
4	115 - 125	20 - 30	1.16
5	90 - 105	20 - 30	0.96



3. Spesimen III

Tabel 3.3. Parameter pengelasan spesimen III

Layer	Arus (Ampere)	Tegangan (Volt)	Kecepatan (mm/s)
1	85 – 100	20 - 30	1.14
2	100 - 115	20 - 30	1.06
3	100 - 115	20 - 30	1.33
4	115 - 125	20 - 30	0.98
5	90 - 105	20 - 30	0.82

3.3. Proses Perlakuan Panas (heat treatment)

Peralatan yang digunakan dalam proses perlakuan panas adalah sebagai berikut :

- Oven pemanas dengan merek Naber-Industrieofenbau Germany dengan kapasitas pemanasan maksimum 1100⁰C.
- Voltage 220 V.
- Frekuensi 50 Hz.
- Tang penjepit.
- Sarung tangan.
- Jam tangan.

Perlakuan panas ini akan dilakukan di Laboratorium Konstruksi dan Kekuatan Jurusan Teknik Perkapalan - ITS.



3.3.1. Persiapan Perlakuan Panas

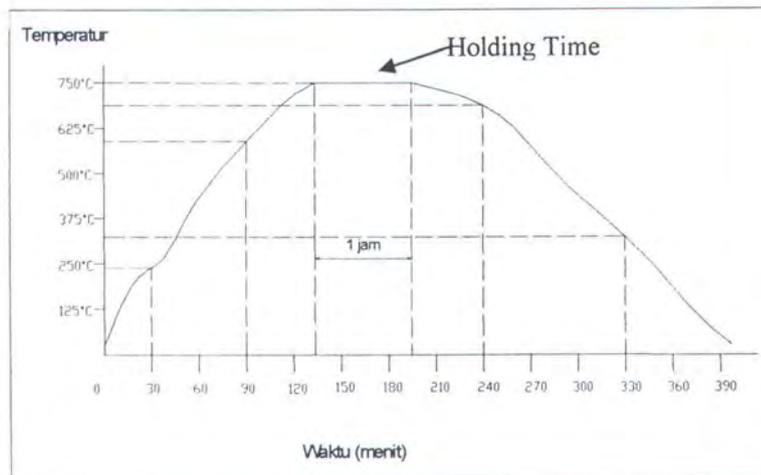
Sebelum material dilakukan pemanasan maka perlu dilakukan persiapan-persiapan antara lain :

- Menyediakan peralatan yang dibutuhkan.
- Menandai semua spesimen dengan tanda berupa nomor pada kedua ujung sisinya.
- Meletakkan semua spesimen uji ke dalam oven.
- Spesimen uji ditata sedemikian rupa sehingga dapat mempermudah pengambilan setelah selesai pemanasan.

3.3.2. Proses Pemanasan dan Pendinginan

Pemanasan dilakukan dengan menghidupkan oven. Waktu dimulainya pengovenan dan waktu yang diperlukan untuk tiap kenaikan temperatur 50°C dicatat sehingga waktu pemanasan dapat diketahui. Pemberian panas untuk spesimen ini hingga temperatur 750°C yang dilakukan dalam oven pemanas dilakukan dengan simulasi pemanasan seperti pada grafik di bawah ini :





Gambar 3.2. Kurva laju pemanasan dan pendinginan pada proses Annealing.

Pada saat oven mencapai temperatur 750°C dilakukan penahanan (holding time) selama 1 jam. Waktu penahanan ini sesuai dengan ketentuan bahwa pelat dengan ketebalan 1 inchi (25,4 mm) harus mengalami penahanan suhu panas selama minimal 60 menit (1 jam). Sehingga untuk material dengan tebal 12 mm (kurang dari 1 inchi) cukup dengan menggunakan waktu penahanan 1 jam. Kemudian dilakukan penurunan suhu secara perlahan hingga menuju suhu kamar $\pm 25^{\circ}\text{C}$. Pendinginan ini dilakukan dengan cara membuka tutup oven sehingga panas yang berada di dalam akan merambat ke luar. Jadi proses pendinginan ini dengan bantuan udara sekitar dengan laju penurunan suhu sangat lambat.

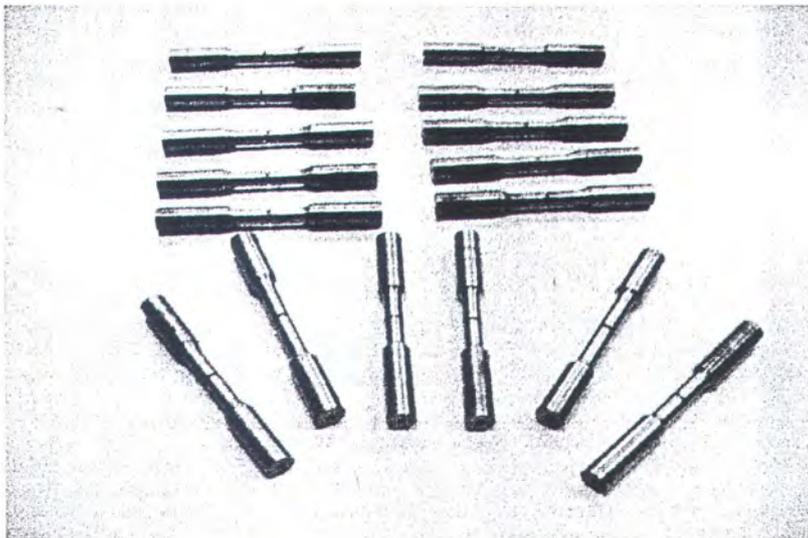
3.4. Pembuatan Specimen Uji

Specimen uji Rotating Bending dibuat dengan menggunakan mesin bubut otomatis Computer Numerical Control (CNC) di laboratorium

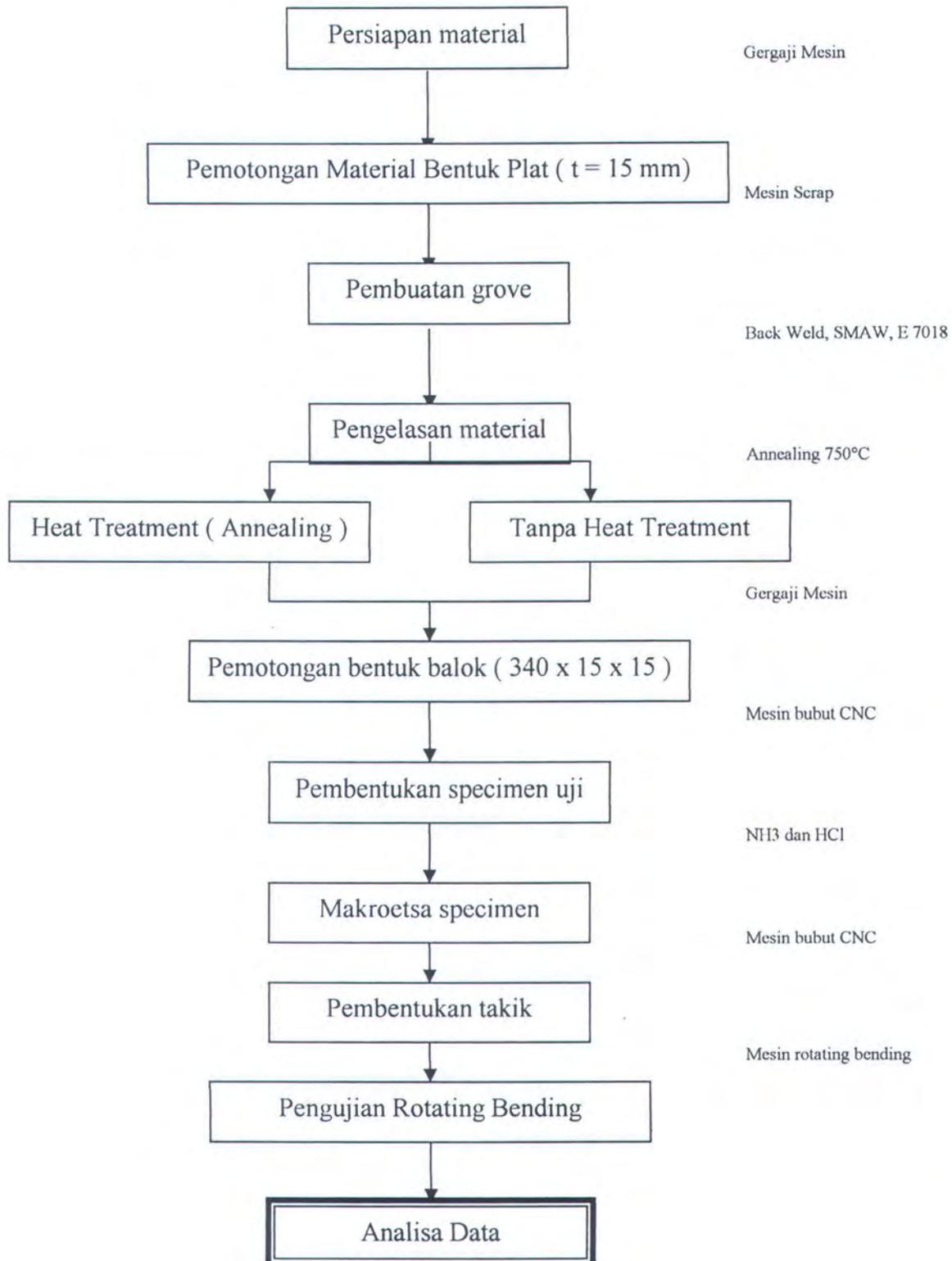
CNC jurusan Teknik Sistem Perkapalan ITS. Bentuk dan ukuran sesuai dengan standar yang dimiliki oleh JIS.

Langkah-langkah pembuatannya adalah sebagai berikut :

- Sebagian pelat yang telah dilas dipotong menjadi bentuk batang dengan ukuran penampang (15 x 15) mm, sebagian yang lain disiapkan untuk dilakukan PWHT (*Post Weld Heat Treatment*)
- Metode pemanasan yang dilakukan (PWHT) adalah Annealing dengan suhu maksimal 50°C diatas suhu kritis baja karbon sedang (750°C).
- Pembuatan bentuk batang dengan luas penampang (15 x 15) mm dari pelat yang telah di *Annealing*.
- Pembuatan Specimen uji sesuai standar JIS untuk Rotating Bending Test dengan *Computer Numerical Control* (CNC) di laboratorium CNC Teknik Sistem Perkapalan ITS.



Gambar 3.3. Bentuk specimen uji rotating bending.



Gambar 3.4. Flowchart pengujian fracture toughness dengan rotating bending.



3.5. Metode Pengujian Specimen

Pengujian Rotating Bending dilakukan untuk mendekati dengan kondisi poros ketika digunakan, yaitu poros bergerak berputar dengan pembebanan oleh propeller. Pengujian dilakukan di laboratorium Metalurgi Jurusan Teknik Mesin ITS. Tujuan dari pengujian adalah untuk mendapatkan data tentang perbedaan ketangguhan masing – masing specimen uji. Data yang diambil dari hasil pengujian adalah jumlah cycle yang telah ditempuh setelah specimen patah, RPM yang digunakan mesin penguji, dan tegangan yang diberikan serta dimensi penjalaran retak.

3.5.1. Alat-alat yang digunakan untuk pengujian

- Mesin Fatigue Dynamics for Rotating Bending

Model	: REF 2000
Tegangan	: 220 Volt
RPM	: Max. 10.000/menit
Beban	: Max. 200 lb
Phase	: 1
Cycle	: Max. 7 digit pengukuran
Serial	: 2049

- Stopwatch

- CDM (Crack Depth Meter)

- Alat tulis

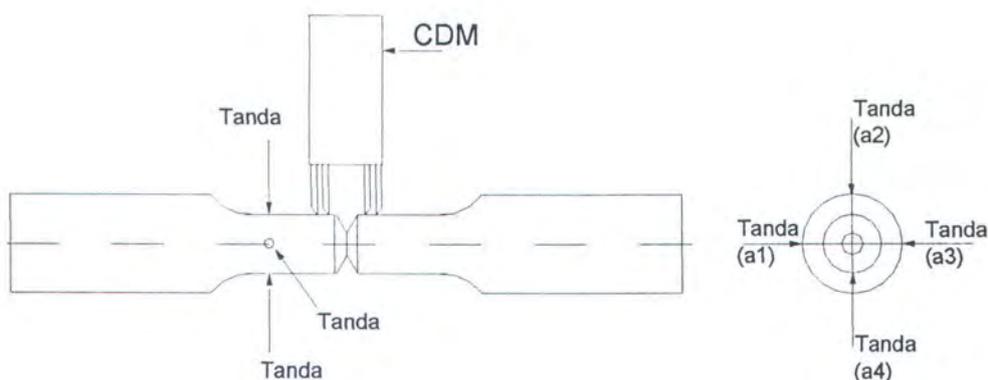
- Jangka Sorong (digital)

3.5.2. Cara Pengujian

Data–data yang diambil dari pengujian adalah besarnya kedalaman retak, jumlah cycle dan waktu tempuh saat patah. Untuk memudahkan pengukuran kedalaman digunakan alat ukur kedalaman retak *Crack Depth Meter (CDM)*. Pengukuran dilakukan dari empat bagian specimen dengan jarak yang sama pada arah memutarnya dengan memberi tanda terlebih dahulu agar titik acuan yang diukur tetap. Sedangkan langkah-langkahnya adalah sebagai berikut :

Langkah-langkah Pengujian :

- Penyiapan specimen yang telah terbentuk untuk dipasang pada alat uji.
- Pemberian tanda pada empat sisi specimen sebagai acuan pengukuran.
- Pengaturan mesin uji sesuai standar uji yang akan dilakukan, seperti pengaturan RPM, pengaturan beban dan pemeriksaan angka penunjuk jumlah cycle.
- Penyiapan alat pengukur kedalaman retak (CDM).



Gambar 3.5. Posisi tanda dan posisi CDM pada pengukuran.



Sebelum pengujian dilakukan, terlebih dahulu dilakukan perhitungan beban untuk mendapatkan besar momen bending yang akan digunakan sebagai beban uji.

Dari hasil pengujian tarik material menunjukkan :

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{y1} = 31.04 \\ \sigma_{y2} = 30.50 \end{array} \right\} \sigma_r = 30.77 \quad [\text{kgf} / \text{mm}^2]$$

σ_y = Tegangan yield

σ_r = Tegangan yield rata-rata

Nilai Fatigue limit material untuk uji rotating bending sebesar

- 0,5 – 0,6 dari σ_y

Pada pengujian ini diambil 0.7 dari σ_y

$$P = \sigma_y \times 2,2 \times 0,7 \quad [\text{lb} / \text{mm}^2]$$

$$P = 30.77 \text{kgf} / \text{mm}^2 \times 2.2 \times 0.7 = 47.3858 \quad [\text{lb} / \text{mm}^2]$$

1 kgf = 2.2 lb

Momen inerti specimen uji :

$$I = \frac{1}{64} \times \pi \times D_o^4 \quad [\text{mm}^4]$$

$$I = \frac{1}{64} \times 3.14 \times 6^4 = 63.585 \text{mm}^4 \quad [\text{mm}^4]$$

Titik berat dari garis dasar specimen uji (z) = 3 mm

Modulus specimen (W)

$$\begin{aligned} W &= I / z \\ &= 63,585 / 3 \\ &= 21.195 \quad [\text{mm}^3] \end{aligned}$$

Perhitungan momen bending pengujian



Momen Bending specimen (Mb)

$$\begin{aligned} Mb &= W \times \sigma_y \\ &= 47.3858 \times 21.195 \\ &= 1004.342 \end{aligned} \quad [\text{lb.mm}]$$

Panjang (L) specimen = 102 mm

Panjang lengan dari tengah takik ke ujung specimen 51 mm

$$1 \text{ mm} = 0.039 \text{ in.}$$

Maka

$$\begin{aligned} Mb &= 1004.32 \times 0,039 \\ &= 39.57 \end{aligned} \quad [\text{lb.in}]$$

- **Cara Pengukuran**

- *Pengukuran waktu*

Alat yang dipakai untuk mengukur waktu tempuh adalah stopwatch. Pengukuran dilakukan terlebih dahulu pada angka penunjuk jumlah cycle putaran sebelum dilakukan pengujian. Pada pengujian ini digunakan 1000 cycle permenit, jadi dilakukan pengukuran dengan mengatur kecepatan putar mesin uji hingga angka penunjuk cycle benar-benar menunjukkan angka yang tepat yaitu 1000 cycle permenit.

- *Pengukuran kedalaman retak*

Alat yang digunakan untuk mengukur kedalaman retak pada specimen adalah Crack Depth Meter (CDM). *Crack Depth Meter* merupakan sebuah alat yang digunakan untuk mendeteksi adanya cacat dalam material dan dapat menentukan kedalaman cacat. Alat ini bekerja berdasarkan metode Direct Current Potential Drop (DCPD) yaitu dengan mengalirkan arus steady di bawah permukaan material kemudian membaca beda potential yang terjadi antara dua probe sebagai



kedalaman retak. Fungsi probe adalah sebagai pemancar dan penerima arus sehingga beda potential diantara kedua probe dapat terbaca di display. Display dari alat ini menunjukkan angka 0 – 12 mm, sehingga untuk pengukuran kedalaman retak yang lebih dari 12 mm dapat dilakukan dengan mengatur factor pengali antara 1 – 5. Jadi maksimal pengukuran yang dapat dilakukan adalah 60 mm.

Tahap-tahap dalam pengukuran kedalaman retak :

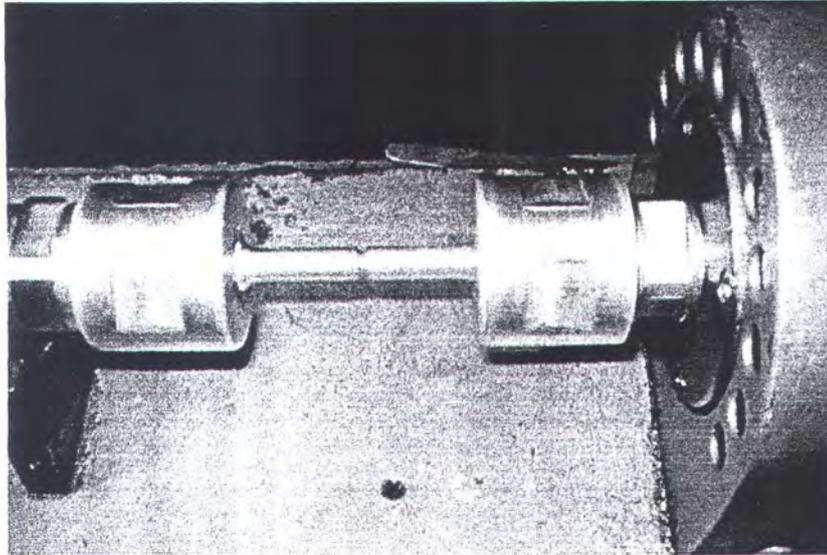
1. Dilakukan kalibrasi pembacaan pengukuran. Kalibrasi dilakukan dengan mengukur terlebih dahulu specimen bertakik sebelum dilakukan pengujian (specimen awal). Angka yang ditunjukkan adalah ukuran specimen awal dengan takik sebelum mengalami cacat akibat pengujian.

Kedalaman cacat akibat pembebanan pada pengujian dapat diketahui dari perubahan angka yang ditunjukkan pada display CDM. Selisih antara angka ketika pengujian dengan angka sebelum pengujian adalah kedalaman perambatan cacat pada specimen.

2. Menghidupkan mesin uji dengan RPM 1000 dan dihentikan setiap 2000 cycle untuk dilakukan pengukuran pada empat bagian specimen sesuai tanda yang telah dibuat, pengukuran dilakukan berulang-ulang setiap dua ribu cycle hingga specimen uji patah.
3. Mencatat cycle saat patah, karena angka penunjuk cycle akan berhenti secara otomatis ketika specimen patah.



4. Mengukur sisa penjarangan retak pada permukaan patahan specimen menggunakan jangka sorong dari bentuk striasi permukaan patahan dengan bantuan mikroskop.
5. Proses dilakukan pada semua specimen.



Gambar 3.6. Posisi specimen pada mesin uji rotating bending.

*Dan tolong menolonglah kamu mengerjakan
kebaikan dan taqwa, dan jangan tolong
menolong dalam berbuat dosa dan pelanggaran
[Al Maidah : 2]*

BAB IV *ANALISA DATA*



BAB IV

ANALISA DATA

4.1. Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas mengenai pengaruh pengelasan dan pengaruh *Heat Treatment* terhadap ketangguhan material baja karbon ASTM A 618.

Ukuran ketangguhan didasarkan pada jumlah cycle yang ditempuh specimen pada pengujian rotating bending dengan beban yang sama dan berdasarkan perambatan retaknya. Specimen diasumsikan mengalami cacat dengan adanya takik di tengah specimen ke arah memanjangnya.

Data yang diambil dari hasil pengujian adalah jumlah cycle, perambatan retak dan waktu pengujian. Beban pengujian yang dilakukan di mesin pengujian rotating bending adalah beban bending.

Seusai dengan batasan masalah pada bab I, bahwa beban aksial yang diakibatkan adanya gaya dorong dari propeller dianggap tidak ada, sehingga dalam analisa tidak diikutkan beban yang searah dengan sumbu aksial poros.

4.2. Pendekatan Karakteristik Perambatan Retak dengan Formula Paris

Formula perambatan retak dari Paris Erdogan hanya berlaku pada region II (Gambar 2.11), oleh karena itu perlu ditentukan data retak yang akan dimasukkan dalam perhitungan. Data retak diambil pada beban yang



sama bertujuan agar lebih memudahkan dalam analisa perambatan retaknya.

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa umur perambatan retak merupakan fungsi panjang retak (a) dan siklus pembebanan (N). Sedangkan pertumbuhan retak merupakan penambahan panjang retak (Δa) setiap penambahan siklus (ΔN). Dengan membandingkan penambahan panjang retak untuk setiap jumlah siklus yang diberikan pada beban tertentu, kita dapat mengetahui perambatan retaknya.

Dari data yang didapat dapat dihitung besarnya harga K untuk mode I, perambatan retak mode I ialah perambatan retak yang arahnya tegak lurus dengan arah pembebanan atau perambatan retaknya tegak lurus dengan arah pembebanannya.

Langkah-langkah perhitungan untuk mode I ialah :

a. Menentukan grafik pertumbuhan retak (*crack growth*), yaitu grafik yang menghubungkan panjang retak (a) dan jumlah *cycle* beban (N) dalam skala logaritmik.

b. Menentukan kecepatan penjalaran retak, dimana

$$da/dN = \Delta a/\Delta N. \quad (4.1)$$

c. Menentukan range factor intensitas tegangan mode I, mode II dan mode III dan membuat grafik karakteristik perambatan retak yaitu grafik yang menghubungkan laju perambatan retak (da/dN) dengan



range factor intensitas tegangan (ΔK) dalam skala logaritmik untuk ketiga mode.

$$(\Delta K) = K_{Imaks} - K_{Imin}. \quad (4.2)$$

Untuk poros bertakik dengan perbandingan diameter d/D ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$K_I = \alpha \cdot \sigma_x \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.3)$$

$$K_{II} = \alpha \cdot \tau_{xy} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (4.4)$$

$$K_{III} = \alpha \cdot \tau_{zy} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Dimana :

K = Faktor intensitas tegangan, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

α = Faktor geometri specimen

mode I

$$\alpha = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{D}{d}} \left(\frac{D}{d} + \frac{1}{2} + \frac{3d}{8D} - 0.36 \frac{d^2}{D^2} + 0.73 \frac{d^3}{D^3} \right)$$

mode II

$$\alpha = \frac{2}{5} \sqrt{\frac{D}{d}} \left(\frac{D}{d} + \frac{2}{5} + \frac{5d}{16D} + 0.28 \frac{d^2}{D^2} + 0.52 \frac{d^3}{D^3} \right)$$

mode III

$$\alpha = \frac{3}{8} \sqrt{\frac{D}{d}} \left(\frac{D^2}{d^2} + \frac{1D}{2d} + \frac{3}{8} + \frac{5d}{16D} + \frac{35d^2}{128D^2} + 0.21 \frac{d^3}{D^3} \right)$$

σ_x = Tegangan nominal akibat beban bending, N/m^2 .

τ_{xy} = Tegangan nominal akibat tegangan geser, N/m^2 .

τ_{zy} = Tegangan nominal akibat beban torsi, N/m^2 .

a = Panjang retak yang terjadi, m.



d = Diameter specimen dalam, m.

D = Diameter specimen luar, m.

4.3. Hasil dan analisa hasil pengujian

Data hasil pengukuran kedalaman retak yang dilakukan di Laboratorium Metalurgi jurusan Teknik Mesin ITS dengan alat pengukur kedalaman retak (CDM) disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Pengambilan data diambil sesuai dengan prosedur yang telah dijelaskan di bab III. Pada tabel dan grafik terdapat beberapa notasi yang akan dijelaskan berikut ini :

DN & N : selisih Cycle yang ditempuh (ribuan)

da : Selisih perambatan retak (mm)

a : Total panjang retak (mm)

dX : Selisih rata-rata perambatan retak dari keempat sisi pengukuran (mm)

X : Total rata-rata panjang retak (mm)

RPM : 1000 cycle/menit

σ : $0,7 \sigma_y$

Mb : 40 lbmm

Do : 6 mm



4.3.1. Data-data hasil pengujian rotating bending

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
2	2.0	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
3	2.0	6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
4	2.0	8.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.00	0.00	0.05	0.05	0.050	0.05
5	2.0	10.0	0.09	0.14	0.08	0.13	0.00	0.00	0.08	0.13	0.080	0.13
6	2.0	12.0	0.11	0.25	0.10	0.23	0.00	0.00	0.11	0.24	0.110	0.24
7	2.0	14.0	0.14	0.39	0.13	0.36	0.00	0.00	0.12	0.36	0.130	0.37
8	2.0	16.0	0.22	0.61	0.14	0.50	0.00	0.00	0.23	0.59	0.200	0.57
9	2.0	18.0	0.19	0.80	0.19	0.69	0.00	0.00	0.16	0.75	0.180	0.75
10	2.0	20.0	0.27	1.07	0.24	0.93	0.00	0.00	0.22	0.97	0.220	0.95
11	1.1	21.1	0.60	1.67	0.40	1.33	0.00	0.00	0.58	1.55	0.550	1.52

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 8.000.
- Specimen patah dalam waktu 21,1 menit.
- Dari keempat titik acuan pengukuran terjadi perambatan retak yang tidak merata, karena tidak terdapat perambatan retak pada titik acuan a3.
- Specimen patah pada cycle ke 21100 ribu.

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	2.00	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	2.00	6.0	0.02	0.02	0.05	0.05	0.00	0.00	0.01	0.01	0.013	0.013
4	2.00	8.0	0.03	0.05	0.02	0.07	0.02	0.02	0.04	0.05	0.038	0.050
5	2.00	10.0	0.07	0.12	0.05	0.12	0.05	0.07	0.07	0.12	0.060	0.110
6	2.00	12.0	0.11	0.23	0.11	0.23	0.11	0.18	0.10	0.22	0.110	0.220
7	2.00	14.0	0.13	0.36	0.13	0.36	0.13	0.31	0.13	0.35	0.130	0.350
8	2.00	16.0	0.17	0.53	0.20	0.56	0.17	0.48	0.15	0.50	0.160	0.510
9	2.00	18.0	0.19	0.72	0.18	0.74	0.16	0.64	0.21	0.71	0.180	0.690
10	2.00	20.0	0.22	0.94	0.22	0.96	0.25	0.89	0.23	0.94	0.240	0.930
11	1.40	21.4	0.58	1.52	0.64	1.60	0.36	1.25	0.51	1.44	0.556	1.486



Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 6 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 21,4 menit.
- Specimen patah pada cycle ke 21,4 ribu.
- Dari keempat titik acuan pengukuran terjadi perambatan retak yang tidak seimbangurang merata karena pada titik acuan .

Tabel 4.3. Weld Metal III dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	2.0	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	2.0	6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
4	2.0	8.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.02	0.02	0.05	0.05	0.060	0.060
5	2.0	10.0	0.09	0.14	0.07	0.12	0.05	0.07	0.12	0.17	0.110	0.170
6	2.0	12.0	0.11	0.25	0.10	0.22	0.11	0.18	0.13	0.30	0.110	0.280
7	2.0	14.0	0.14	0.39	0.14	0.36	0.13	0.31	0.17	0.47	0.160	0.440
8	2.0	16.0	0.16	0.55	0.16	0.52	0.17	0.48	0.20	0.67	0.160	0.600
9	2.0	18.0	0.20	0.75	0.20	0.72	0.16	0.64	0.13	0.80	0.200	0.800
10	2.0	20.0	0.22	0.97	0.23	0.95	0.25	0.89	0.20	1.00	0.190	0.990
11	0.8	20.8	0.65	1.62	0.63	1.58	0.36	1.25	0.66	1.66	0.580	1.570

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 8 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 20,8 menit.
- Specimen patah pada cycle ke 20,8 ribu.
- Titik kritis sebelum patah hampir dapat diketahui karena kenaikan selisih perambatan retak yang cukup besar dibanding sebelumnya.



Tabel 4.4. HAZ I dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.00	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.05	0.05	0.100	0.100
2	2.00	4.00	0.17	0.22	0.14	0.20	0.19	0.27	0.09	0.14	0.130	0.230
3	2.00	6.00	0.19	0.41	0.19	0.39	0.21	0.48	0.11	0.25	0.170	0.400
4	2.00	8.00	0.22	0.63	0.23	0.62	0.25	0.73	0.19	0.44	0.230	0.630
5	2.00	10.00	0.28	0.91	0.27	0.89	0.30	1.03	0.29	0.73	0.330	0.960
6	0.85	10.85	0.42	1.33	0.42	1.31	0.46	1.49	0.40	1.13	0.430	1.390

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 10,85 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang terdeteksi pada titik acuan a1, a2 dan a3, kemudian a4 sehingga specimen mengalami perambatan retak yang hampir merata.

Specimen patah pada cycle ke 10,85 ribu.

Tabel 4.5. HAZ II dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.00	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.05	0.09	0.080	0.080
2	2.00	4.00	0.17	0.22	0.14	0.20	0.19	0.27	0.09	0.18	0.120	0.200
3	2.00	6.00	0.19	0.41	0.19	0.39	0.21	0.48	0.11	0.29	0.155	0.355
4	2.00	8.00	0.18	0.59	0.23	0.62	0.25	0.73	0.19	0.48	0.255	0.610
5	2.00	10.00	0.24	0.83	0.27	0.89	0.30	1.03	0.29	0.87	0.350	0.960
6	1.20	11.20	0.38	1.21	0.42	1.31	0.46	1.49	0.40	1.27	0.390	1.350

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 11,2 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata dan terdeteksi pada semua titik acuan, sehingga specimen mengalami perambatan retak yang seimbang.
- Specimen patah pada cycle ke 11,2 ribu.



Tabel 4.6. HAZ III dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.00	0.05	0.05	0.06	0.06	0.08	0.08	0.05	0.09	0.110	0.110
2	2.00	4.00	0.10	0.15	0.11	0.17	0.19	0.27	0.08	0.17	0.120	0.230
3	2.00	6.00	0.23	0.38	0.18	0.35	0.21	0.48	0.11	0.28	0.200	0.430
4	2.00	8.00	0.31	0.69	0.21	0.56	0.25	0.73	0.18	0.46	0.260	0.690
5	2.00	10.00	0.51	1.20	0.25	0.81	0.30	1.03	0.27	0.87	0.230	0.920
6	0.50	10.50	0.40	1.60	0.43	1.24	0.46	1.49	0.38	1.25	0.480	1.400

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 10,5 menit
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata dan terdeteksi pada semua titik acuan, sehingga specimen mengalami perambatan retak yang seimbang.
- Specimen patah pada cycle ke 10,5 ribu.

Tabel 4.7. Base Metal I dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.050
2	2.00	4.00	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.060	0.110
3	2.00	6.00	0.05	0.05	0.07	0.12	0.06	0.05	0.07	0.12	0.100	0.210
4	2.00	8.00	0.07	0.12	0.08	0.20	0.07	0.12	0.09	0.21	0.100	0.310
5	2.00	10.00	0.09	0.21	0.10	0.30	0.08	0.20	0.10	0.31	0.150	0.460
6	2.00	12.00	0.11	0.32	0.13	0.43	0.10	0.30	0.13	0.44	0.190	0.650
7	2.00	14.00	0.20	1.20	0.15	1.15	0.15	1.21	0.28	1.23	0.210	0.860
8	1.90	15.90	0.35	1.67	0.34	1.61	0.29	1.69	0.37	1.71	0.830	1.690

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 15,9 menit.



- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata dan terdeteksi pada semua titik acuan, sehingga specimen mengalami perambatan retak yang seimbang.
- Specimen patah pada cycle ke 15,9 ribu.

Tabel 4.8. Base Metal II dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.050
2	2.0	4.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.080	0.130
3	2.0	6.0	0.05	0.10	0.06	0.11	0.06	0.11	0.06	0.11	0.080	0.210
4	2.0	8.0	0.07	0.17	0.08	0.19	0.08	0.19	0.08	0.19	0.120	0.330
5	2.0	10.0	0.10	0.27	0.11	0.30	0.10	0.29	0.11	0.30	0.100	0.430
6	2.0	12.0	0.15	0.42	0.14	0.44	0.15	0.44	0.14	0.44	0.170	0.600
7	2.0	14.0	0.25	1.05	0.18	1.11	0.20	0.98	0.17	1.15	0.190	0.790
8	1.5	15.5	0.65	1.58	0.50	1.68	0.36	1.49	0.35	1.63	0.860	1.650

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 15,5 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata dan terdeteksi pada semua titik acuan, sehingga specimen mengalami perambatan retak yang seimbang.
- Specimen patah pada cycle ke 15,5 ribu.



Tabel 4.9. Base Metal III dengan Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.050
2	2.00	4.00	0.05	0.05	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.040	0.090
3	2.00	6.00	0.09	0.14	0.08	0.14	0.08	0.13	0.08	0.13	0.100	0.190
4	2.00	8.00	0.13	0.27	0.12	0.26	0.13	0.26	0.11	0.24	0.120	0.310
5	2.00	10.00	0.16	0.43	0.17	0.43	0.17	0.43	0.15	0.39	0.200	0.510
6	2.00	12.00	0.20	0.63	0.21	0.64	0.20	0.63	0.19	0.58	0.150	0.660
7	2.00	14.00	0.35	0.98	0.36	1.00	0.32	0.95	0.32	0.90	0.250	0.910
8	2.00	16.00	0.75	1.73	0.70	1.70	0.72	1.67	0.80	1.70	0.800	1.710

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 16 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata dan terdeteksi pada semua titik acuan, sehingga specimen mengalami perambatan retak yang seimbang.
- Specimen patah pada cycle ke 16 ribu.

Tabel 4.10. Weld Metal I tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	2.0	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	2.0	6.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.050	0.050
4	2.0	8.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.110	0.160
5	2.0	10.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.120	0.280
6	2.0	12.0	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.160	0.440
7	2.0	14.0	0.05	0.11	0.06	0.11	0.07	0.12	0.07	0.12	0.190	0.630
8	2.0	16.0	0.07	0.18	0.07	0.18	0.09	0.21	0.06	0.18	0.250	0.880
9	2.0	18.0	0.09	0.27	0.09	0.27	0.10	0.31	0.07	0.25	0.300	1.180
10	1.1	19.1	0.10	1.43	0.11	1.13	0.12	1.42	0.11	1.45	0.220	1.400

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 19,1 menit.



- Terjadi perambatan retak pada specimen yang tidak merata karena tidak terdapat perambatan retak pada titik acuan a3.
- Specimen patah pada cycle ke 19,1 ribu.
- Titik kritis patah dapat diketahui karena terjadi kenaikan selisih perambatan retak yang cukup besar dibanding sebelumnya.

Tabel 4.11. Weld Metal II tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	2.00	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	2.00	6.0	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05	0.050	0.050
4	2.00	8.0	0.11	0.16	0.05	0.05	0.05	0.05	0.11	0.16	0.080	0.130
5	2.00	10.0	0.13	0.29	0.07	0.12	0.08	0.13	0.13	0.29	0.110	0.240
6	2.00	12.0	0.17	0.46	0.11	0.23	0.12	0.25	0.17	0.46	0.140	0.380
7	2.00	14.0	0.21	0.67	0.15	0.38	0.17	0.42	0.20	0.66	0.200	0.580
8	2.00	16.0	0.26	0.93	0.19	0.57	0.20	0.62	0.26	0.92	0.250	0.830
9	2.00	18.0	0.31	1.24	0.25	0.82	0.26	0.88	0.31	1.23	0.260	1.090
10	0.50	18.5	0.41	1.65	0.36	1.13	0.37	1.25	0.34	1.57	0.290	1.380

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 18,5 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang tidak merata karena perambatan retak dimulai pada titik acuan a1 dan a4, kemudian diikuti titik acuan a2 dan a3 setelah 4 ribu cycle kemudian.
- Specimen patah pada cycle ke 18,5 ribu.



Tabel 4.12. Weld Metal III tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
2	2.0	4.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000
3	2.0	6.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.050	0.050
4	2.0	8.0	0.15	0.20	0.05	0.10	0.05	0.10	0.11	0.16	0.110	0.160
5	2.0	10.0	0.18	0.38	0.07	0.17	0.08	0.18	0.13	0.29	0.140	0.300
6	2.0	12.0	0.21	0.59	0.11	0.28	0.12	0.30	0.17	0.46	0.130	0.430
7	2.0	14.0	0.26	0.85	0.15	0.43	0.17	0.47	0.20	0.66	0.230	0.660
8	2.0	16.0	0.29	1.14	0.19	0.62	0.20	0.67	0.26	0.92	0.260	0.920
9	2.0	18.0	0.35	1.49	0.25	0.87	0.26	0.93	0.31	1.23	0.280	1.200
10	1.3	19.3	0.41	1.90	0.36	1.13	0.37	1.30	0.34	1.57	0.220	1.420

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 19,3 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 19,3 ribu.

Tabel 4.13. HAZ I tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.14	0.14	0.10	0.10	0.13	0.13	0.09	0.09	0.130	0.130
2	2.00	4.0	0.22	0.36	0.16	0.26	0.20	0.33	0.15	0.24	0.180	0.310
3	2.00	6.0	0.29	0.65	0.19	0.45	0.27	0.60	0.17	0.41	0.190	0.500
4	2.00	8.0	0.40	1.05	0.33	0.78	0.38	0.98	0.31	0.72	0.340	0.840
5	0.66	8.7	0.43	1.48	0.41	1.19	0.46	1.44	0.39	1.11	0.480	1.320

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 8,7 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 8,7 ribu.



Tabel 4.14. HAZ II tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.120	0.120
2	2.00	4.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.160	0.280
3	2.00	6.0	0.07	0.12	0.07	0.12	0.08	0.13	0.07	0.12	0.200	0.480
4	2.00	8.0	0.11	0.23	0.10	0.22	0.11	0.24	0.10	0.22	0.320	0.800
5	0.95	8.95	0.15	1.32	0.16	0.98	0.18	1.34	0.15	1.11	0.480	1.280

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 8,9 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 8,9 ribu.

Tabel 4.15. HAZ III tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.09	0.09	0.10	0.10	0.09	0.09	0.08	0.08	0.090	0.090
2	2.00	4.0	0.10	0.19	0.11	0.21	0.11	0.20	0.09	0.17	0.100	0.190
3	2.00	6.0	0.21	0.40	0.21	0.42	0.17	0.37	0.21	0.38	0.210	0.400
4	2.00	8.0	0.32	0.72	0.31	0.73	0.31	0.68	0.32	0.70	0.310	0.710
5	1.30	9.3	0.46	1.18	0.44	1.17	0.43	1.11	0.42	1.12	0.440	1.150

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 9,3 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 9,3 ribu.



Tabel 4.16. Base Metal I tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
2	2.00	4.0	0.06	0.06	0.08	0.08	0.09	0.09	0.05	0.05	0.050	0.140
3	2.00	6.0	0.11	0.17	0.10	0.18	0.13	0.22	0.09	0.14	0.140	0.280
4	2.00	8.0	0.13	0.30	0.14	0.32	0.17	0.39	0.11	0.25	0.120	0.400
5	2.00	10.0	0.18	0.48	0.19	0.51	0.20	0.59	0.19	0.44	0.160	0.560
6	2.00	12.0	0.25	0.73	0.25	0.76	0.25	0.84	0.24	0.68	0.250	0.810
7	2.00	14.0	0.31	1.04	0.32	1.08	0.31	1.15	0.32	1.00	0.260	1.070
8	0.10	14.1	0.39	1.43	0.44	1.52	0.43	1.58	0.44	1.44	0.47	1.54

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 14,1 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 14,1 ribu.

Tabel 4.17. Base Metal II tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.0	2.0	0.06	0.06	0.05	0.05	0.08	0.08	0.05	0.10	0.075	0.075
2	2.0	4.0	0.07	0.13	0.09	0.14	0.10	0.18	0.09	0.19	0.075	0.150
3	2.0	6.0	0.12	0.25	0.13	0.27	0.15	0.33	0.13	0.32	0.110	0.260
4	2.0	8.0	0.14	0.39	0.20	0.47	0.19	0.52	0.16	0.48	0.140	0.400
5	2.0	10.0	0.17	0.56	0.27	0.74	0.21	0.73	0.19	0.67	0.180	0.580
6	2.0	12.0	0.22	0.91	0.28	0.91	0.25	0.91	0.25	0.91	0.240	0.820
7	2.0	14.0	0.23	1.02	0.3	1.02	0.27	1.02	0.26	1.02	0.240	1.060
8	0.1	14.1	0.45	1.52	0.45	1.45	0.45	1.36	0.45	1.12	0.47	1.53

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 14,1 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 14,1 ribu.



Bab 4.18. Base Metal III tanpa Annealing

No	dN	N	da1	a1	da2	a2	da3	a3	da4	a4	dX	X
1	2.00	2.0	0.05	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.070	0.070
2	2.00	4.0	0.07	0.12	0.08	0.14	0.07	0.13	0.07	0.12	0.058	0.128
3	2.00	6.0	0.10	0.22	0.10	0.24	0.10	0.23	0.10	0.22	0.123	0.250
4	2.00	8.0	0.15	0.37	0.14	0.38	0.14	0.37	0.15	0.37	0.160	0.410
5	2.00	10.0	0.25	0.62	0.21	0.59	0.24	0.61	0.23	0.60	0.170	0.580
6	2.00	12.0	0.28	0.90	0.24	0.83	0.26	0.87	0.25	0.85	0.260	0.840
7	2.00	14.0	0.30	1.02	0.28	1.02	0.31	1.02	0.30	1.02	0.300	1.140
8	0.25	14.3	0.36	1.61	0.37	1.58	0.36	1.57	0.37	1.63	0.45	1.59

Keterangan :

- Data diatas menunjukkan bahwa retak awal terjadi pada cycle ke 2 ribu.
- Specimen patah dalam waktu 14,3 menit.
- Terjadi perambatan retak pada specimen yang merata karena perambatan retak dimulai pada semua titik acuan.
- Specimen patah pada cycle ke 14,3 ribu.



4.3. ANALISA DATA

Data-data yang telah diperoleh kemudian dianalisa dengan melakukan perhitungan sesuai dengan metode yang digunakan dalam Tugas Akhir, ini dengan langkah-langkah sebagai berikut :

- a. Menentukan grafik pertumbuhan retak (crack growth), yaitu grafik yang menghubungkan panjang retak (a) dan jumlah *cycle* beban (N) dalam skala logaritmik.

Tabel 4.25. Perhitungan a vs Log N pada weld metal

No	Weld Metal			
	dengan Annealing		Tanpa Annealing	
	a mm	Log N	a mm	Log N
1	0	3.301	0	3.301
2	0	3.602	0	3.602
3	0	3.778	0.05	3.778
4	0.05	3.903	0.15	3.903
5	0.14	4	0.27	4
6	0.25	4.097	0.42	4.097
7	0.39	4.146	0.62	4.146
8	0.56	4.204	0.88	4.204
9	0.75	4.255	1.16	4.255
10	0.96	4.301	1.4	4.301
11	1.53	4.342		



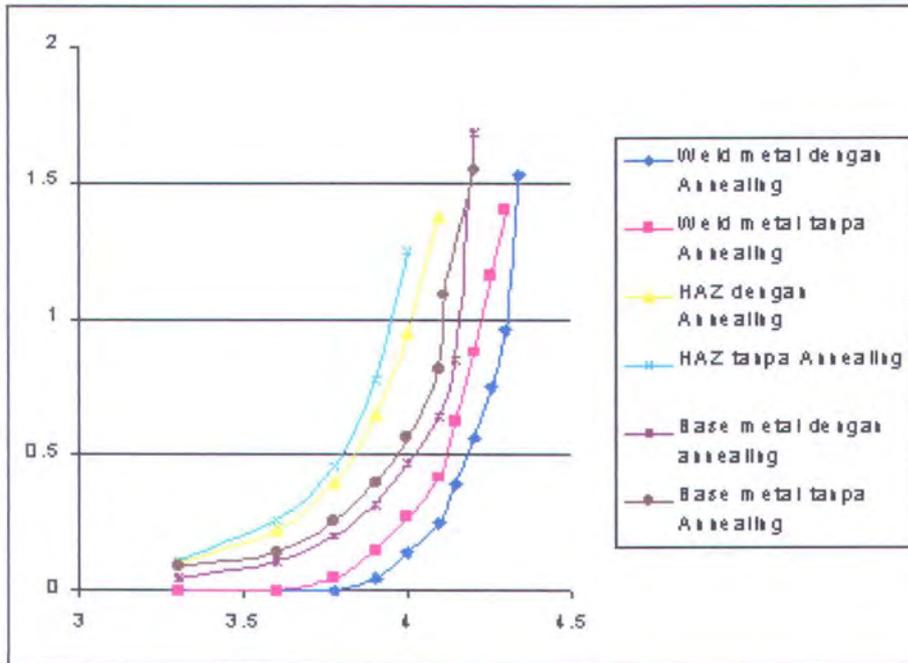


Tabel 4.26. Perhitungan a vs Log N pada HAZ

No	HAZ			
	dengan Annealing		Tanpa Annealing	
	a mm	Log N	a mm	Log N
1	0.10	3.301	0.11	3.301
2	0.22	3.602	0.26	3.602
3	0.40	3.778	0.46	3.778
4	0.65	3.903	0.78	3.903
5	0.95	4	1.25	4
6	1.38	4.097		

Tabel 4.27. Perhitungan a vs Log N pada base metal

No	Base Metal			
	dengan Annealing		Tanpa Annealing	
	a mm	Log N	a mm	Log N
1	0.05	3.30	0.09	3.301
2	0.11	3.60	0.14	3.602
3	0.20	3.78	0.26	3.778
4	0.32	3.90	0.4	3.903
5	0.47	4.00	0.57	4
6	0.64	4.10	0.82	4.097
7	0.85	4.15	1.09	4.113
8	1.68	4.20	1.55	4.204



Gambar 4.8. Grafik panjang retak vs jumlah cycle dalam skala Log

b. Menentukan kecepatan penjalaran retak, dimana

Tabel 4.28. Perhitungan da/dN pada weld metal

No	Weld Metal					
	dengan Annealing			Tanpa Annealing		
	dN	da(mm)	da(m)/dN	dN	da(mm)	da(m)/dN
1	2000	0.00	0.0000	2000	0.00	0.0000
2	2000	0.00	0.0000	2000	0.00	0
3	2000	0.00	0.0000	2000	0.05	2.5E-08
4	2000	0.05	2.5E-08	2000	0.10	5E-08
5	2000	0.09	4.5E-08	2000	0.12	6E-08
6	2000	0.11	5.5E-08	2000	0.15	7.5E-08
7	2000	0.14	7E-08	2000	0.20	1E-07
8	2000	0.17	8.5E-08	2000	0.26	1.3E-07
9	2000	0.19	9.5E-08	2000	0.28	1.4E-07
10	2000	0.21	1.1E-07	250	0.24	9.6E-07
11	1500	0.57	3.8E-07			



Tabel 4.29. Perhitungan da/dN pada HAZ

No	HAZ					
	dengan Annealing			Tanpa Annealing		
	dN	da(mm)	da(m)/dN	dN	da(mm)	da(m)/dN
1	2000	0.10	5.0E-08	2000	0.11	5.50E-08
2	2000	0.12	6.0E-08	2000	0.15	7.50E-08
3	2000	0.18	9.0E-08	2000	0.20	1.00E-07
4	2000	0.25	1.3E-07	2000	0.32	1.60E-07
5	2000	0.30	1.5E-07	970	0.47	4.85E-07
6	850	0.43	5.1E-07			

Tabel 4.30. Perhitungan da/dN pada base metal

No	Base Metal					
	dengan Annealing			Tanpa Annealing		
	dN	da(mm)	da(m)/dN	dN	da(mm)	da(m)/dN
1	2000	0.05	2.5E-08	2000	0.09	4.5E-08
2	2000	0.06	3E-08	2000	0.05	2.5E-08
3	2000	0.09	4.5E-08	2000	0.12	6E-08
4	2000	0.12	6E-08	2000	0.14	7E-08
5	2000	0.15	7.5E-08	2000	0.17	8.5E-08
6	2000	0.17	8.5E-08	2000	0.25	1.3E-07
7	2000	0.21	1.1E-07	2000	0.27	1.4E-07
8	1800	0.83	4.6E-07	150	0.46	3.1E-06



c. Menentukan range factor intensitas tegangan mode I (K_I dan ΔK_I)

$$Y = \text{Log} (da/dN) \text{ dan } X = \text{Log} \Delta K$$

Tabel 4.31. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal dengan Annealing

Weld Metal dengan Annealing													
No	a	a/d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{(\pi a)}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0.00	0	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	0.000	2.4184	0.000	0.000	0.000	0.000	
2	0.00	0	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	0.000	2.4184	0.000	0.000	0.000	0.000	
3	0.00	0	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	0.000	2.4184	0.000	0.000	0.000	0.000	
4	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	2.64E+06	2.4184	6.39E+06	5.3E+06	6.723262	2.5E-08	-7.60E+00
5	0.14	1E-04	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	4.42E+06	2.4184	1.07E+07	8.8E+06	6.946841	4.5E-08	-7.35E+00
6	0.25	3E-04	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	5.91E+06	2.4184	1.43E+07	1.2E+07	7.072747	5.5E-08	-7.26E+00
7	0.39	4E-04	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	7.38E+06	2.4184	1.79E+07	1.5E+07	7.16931	7.00E-08	-7.15E+00
8	0.56	6E-04	0.006	0.750	1.333	2.1E+08	8.85E+06	2.4184	2.14E+07	1.8E+07	7.247871	8.50E-08	-7.07E+00
9	0.75	8E-04	0.006	0.750	1.334	2.1E+08	1.02E+07	2.4185	2.48E+07	2.0E+07	7.311308	9.50E-08	-7.02E+00
10	0.96	1E-03	0.006	0.750	1.334	2.1E+08	1.16E+07	2.4185	2.80E+07	2.3E+07	7.364913	1.05E-07	-6.98E+00
11	1.53	0.002	0.006	0.750	1.334	2.1E+08	1.46E+07	2.4185	3.54E+07	2.9E+07	7.466123	3.80E-07	-6.42E+00

Tabel 4.32. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I weld metal tanpa Annealing

Weld Metal tanpa Annealing													
No	a	a/d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{(\pi a)}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0	0	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	0	2.4184	0	0	0	0	0
2	0	0	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	0	2.4184	0	0	0	0	0
3	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	8.36E+07	2.4184	2.02E+08	5287645	6.723262	2.5E-08	-7.60E+00
4	0.15	2E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	144808118	2.4184	3.50E+08	9158470	6.961823	5E-08	-7.30E+00
5	0.27	3E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.94E+08	2.4184	4.70E+08	1.2E+07	7.089459	6.00E-08	-7.22E+00
6	0.42	4E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.42E+08	2.4184	5.86E+08	1.5E+07	7.185402	7.50E-08	-7.12E+00
7	0.62	6E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.94E+08	2.4184	7.12E+08	1.9E+07	7.269973	1.00E-07	-7.00E+00
8	0.88	9E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.51E+08	2.4185	8.48E+08	2.2E+07	7.346019	1.30E-07	-6.89E+00
9	1.16	0.001	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.03E+08	2.4185	9.74E+08	2.5E+07	7.406006	1.40E-07	-6.85E+00
10	1.4	0.001	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.42E+08	2.4185	1.07E+09	2.8E+07	7.446841	9.60E-07	-6.02E+00

Tabel 4.33. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ dengan Annealing

HAZ dengan Annealing													
No	a	a/d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{(\pi a)}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0.10	1E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.18E+08	2.4184	2.9E+08	7477859	6.873777	5E-08	-7.3E+00
2	0.22	2E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.75E+08	2.4184	4.2E+08	1.1E+07	7.044989	6E-08	-7.2E+00
3	0.4	4E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.36E+08	2.4184	5.7E+08	1.5E+07	7.174807	9E-08	-7.0E+00
4	0.65	7E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.01E+08	2.4184	7.3E+08	1.9E+07	7.280234	1.25E-07	-6.9E+00
5	0.95	1E-03	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.64E+08	2.4185	8.8E+08	2.3E+07	7.362639	1.5E-07	-6.8E+00
6	1.38	0.001	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.39E+08	2.4185	1.1E+09	2.8E+07	7.443717	5.06E-07	-6.3E+00



Tabel 4.34. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I HAZ tanpa Annealing

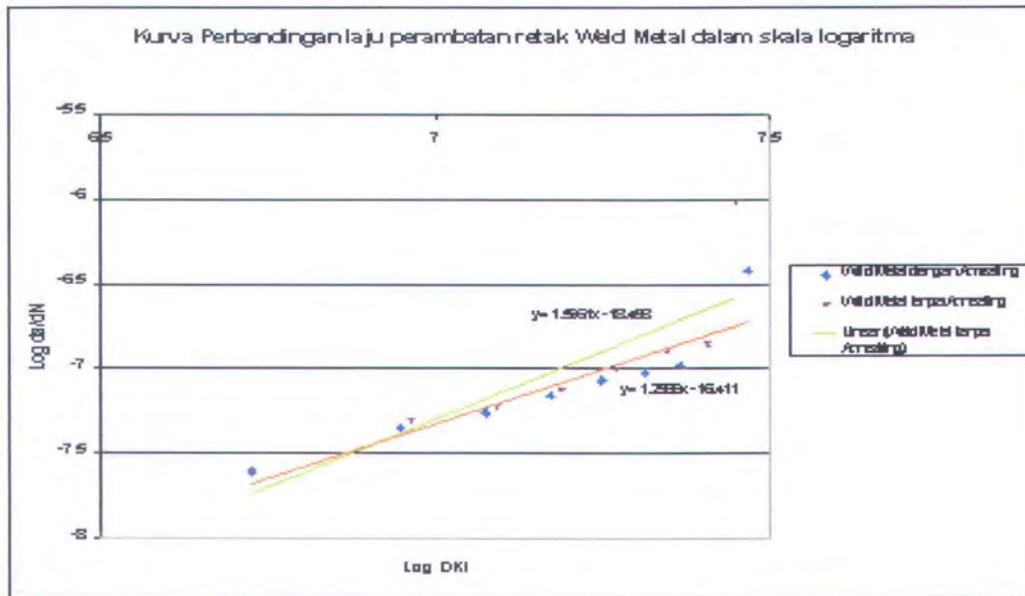
HAZ tanpa Annealing													
No	a	a d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{\pi a}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0.11	1E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.2E+08	2.4184	3.0E+08	7842845	6.894474	5.5E-08	-7.3E+00
2	0.26	3E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.9E+08	2.4184	4.6E+08	1.2E+07	7.081264	7.5E-08	-7.1E+00
3	0.46	5E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.5E+08	2.4184	6.1E+08	1.6E+07	7.205156	1.0E-07	-7.0E+00
4	0.78	8E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.3E+08	2.4185	8.0E+08	2.1E+07	7.319825	1.6E-07	-6.8E+00
5	1.25	0.001	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.2E+08	2.4185	1.0E+09	2.6E+07	7.422232	4.8E-07	-6.3E+00

Tabel 4.35. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal dengan Annealing

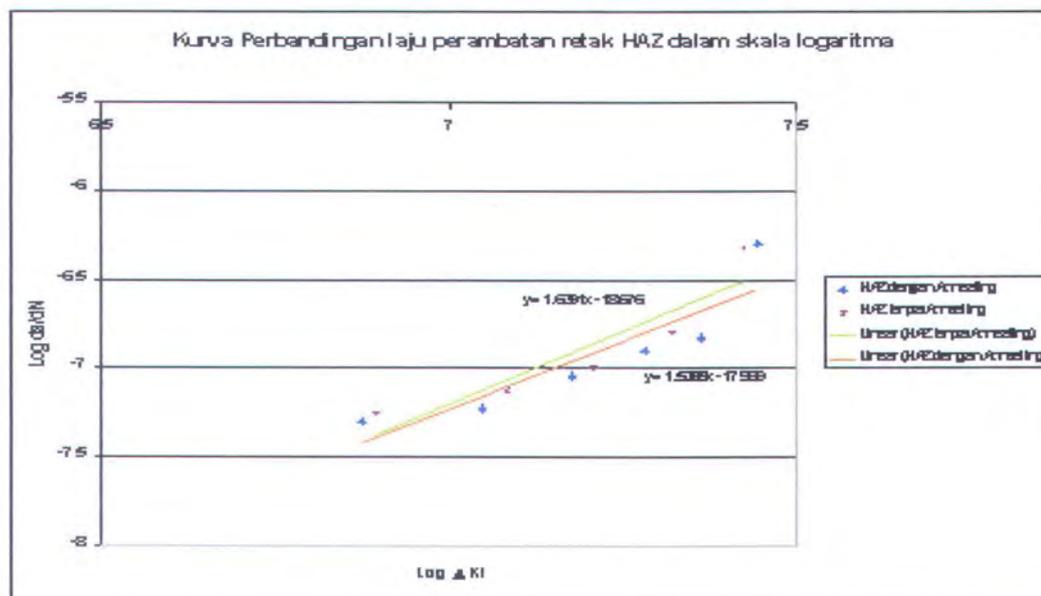
Base Metal dengan Annealing													
No	a	a d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{\pi a}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	8.36E+07	2.4184	2.02E+08	5287645	6.723262	2.50E-08	-7.60E+00
2	0.11	1E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.24E+08	2.4184	3.00E+08	7842845	6.894474	3.00E-08	-7.52E+00
3	0.20	2E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.67E+08	2.4184	4.04E+08	1.1E+07	7.024292	4.50E-08	-7.35E+00
4	0.32	3E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.12E+08	2.4184	5.12E+08	1.3E+07	7.126352	6.00E-08	-7.22E+00
5	0.47	5E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.56E+08	2.4184	6.20E+08	1.6E+07	7.209826	7.50E-08	-7.12E+00
6	0.64	8E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.99E+08	2.4184	7.23E+08	1.9E+07	7.276867	8.50E-08	-7.07E+00
7	0.85	9E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.45E+08	2.4185	8.34E+08	2.2E+07	7.338487	1.05E-07	-6.98E+00
8	1.68	0.002	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.85E+08	2.4185	1.17E+09	3.1E+07	7.486432	4.61E-07	-6.34E+00

Tabel 4.36. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_I base metal tanpa Annealing

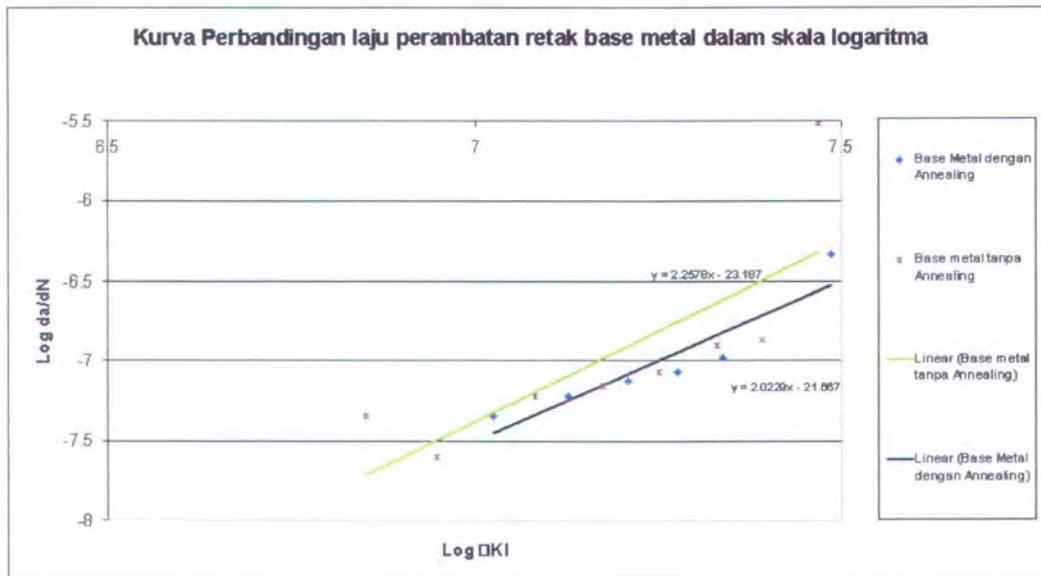
Base Metal tanpa Annealing													
No	a	a d	d/Do	Do/d	Stress	$\sigma \sqrt{\pi a}$	α	KI	DK	Log DK	da/dN	Log da/dN	
1	0.09	9E-05	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.12E+08	2.4184	2.71E+08	7094120	6.850899	4.50E-08	-7.35E+00
2	0.14	1E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.40E+08	2.4184	3.38E+08	8847922	6.946841	2.50E-08	-7.60E+00
3	0.26	3E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	1.91E+08	2.4184	4.61E+08	1.2E+07	7.081264	6.00E-08	-7.22E+00
4	0.4	4E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.36E+08	2.4184	5.72E+08	1.5E+07	7.174807	7.00E-08	-7.15E+00
5	0.57	6E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	2.82E+08	2.4184	6.83E+08	1.8E+07	7.251715	8.50E-08	-7.07E+00
6	0.82	8E-04	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.39E+08	2.4185	8.19E+08	2.1E+07	7.330684	1.25E-07	-6.90E+00
7	1.09	0.001	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	3.90E+08	2.4185	9.44E+08	2.5E+07	7.392491	1.35E-07	-6.87E+00
8	1.55	0.002	0.006	0.750	1.33	2.1E+08	4.65E+08	2.4185	1.13E+09	2.9E+07	7.468943	3.07E-06	-5.51E+00



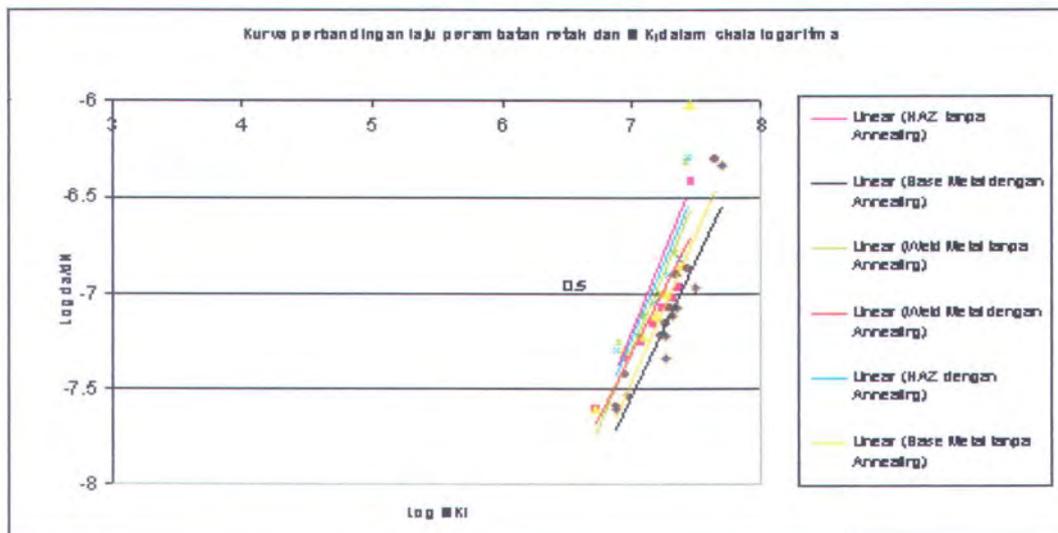
Gambar 4.9. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan weld metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.10. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan HAZ dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.11. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan base metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.12. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan retak gabungan dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Merubah hasil analisa perhitungan ke bentuk $\frac{da}{dN} = c(\Delta K_I)^m$

- Untuk pengujian specimen pada weld metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,9289 (\text{Log } \Delta K_I) - 16,411$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 3,8815 \cdot 10^{-17} (\Delta K_I)^{1,9289}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga

$3,8815 \cdot 10^{-17}$ dan konstanta m berharga 1,9289.

- Untuk pengujian specimen pada weld metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5961 (\text{Log } \Delta K_I) - 18,458$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 3,4834 \cdot 10^{-17} (\Delta K_I)^{1,5961}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga

$3,4834 \cdot 10^{-17}$ dan konstanta m berharga 1,5961.

- Untuk pengujian specimen pada daerah HAZ dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5365 (\text{Log } \Delta K_I) - 17,989$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,0256 \cdot 10^{-18} (\Delta K_I)^{1,5365}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga

$1,0256 \cdot 10^{-18}$ dan konstanta m berharga 1,5365.



- Untuk pengujian specimen pada HAZ tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,6391 (\text{Log } \Delta K_I) - 18,676$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 2,19869 \cdot 10^{-19} (\Delta K_I)^{1,6391}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,19869 \cdot 10^{-19}$ dan konstanta m berharga 1,6391.

- Untuk pengujian specimen pada base metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 2,0229 (\text{Log } \Delta K_I) - 21,667$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 2,1528 \cdot 10^{-22} (\Delta K_I)^{2,0229}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,1528 \cdot 10^{-22}$ dan konstanta m berharga 2,0229.

- Untuk pengujian specimen pada weld metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 2,2578 (\text{Log } \Delta K_I) - 23,187$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 6,5013 \cdot 10^{-24} (\Delta K_I)^{2,2578}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $6,5013 \cdot 10^{-24}$ dan konstanta m berharga 2,2578.



- d. Menentukan range factor intensitas tegangan mode II (K_{II} dan ΔK_{II})

Perambatan retak mode II ialah perambatan retak yang arahnya sejajar dengan arah pembebanan atau perambatan retaknya sebidang dengan arah pembebanannya. Langkah-langkah perhitungan untuk mode II ialah :

- Menentukan grafik pertumbuhan retak (crack growth), yaitu grafik yang menghubungkan panjang retak (a) dan cycle beban (N , dalam skala logaritmik). Pertumbuhan retak sama dengan perhitungan pada mode I.

- Menentukan range factor intensitas tegangan mode II.

$$(\Delta K_{II}) = K_{II\text{maks}} - K_{II\text{min}} \quad (5.12)$$

Untuk poros bertakik dengan perbandingan diameter d/D ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$K_{II} = \tau_{xy} \cdot \sqrt{\pi \cdot a} \quad (5.13)$$

Dimana :

K_{II} = Faktor intensitas tegangan mode II, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

τ_{xy} = Tegangan nominal akibat gaya geser, N/m^2 .

a = Panjang retak yang terjadi, m.

- Membuat grafik karakteristik perambatan retak yaitu grafik yang menghubungkan laju perambatan retak (da/dN) dengan range factor intensitas tegangan (ΔK_{II}) dalam skala logaritmik untuk mode II.
- Menentukan K_{II} dan ΔK_{II}

$$\text{dengan besarnya } \Delta K_{II} = K_{II\text{maks}} - K_{II\text{min}} \quad (5.14)$$



Perhitungan ΔK_{II}

Tabel 4.37. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} weld metal dengan Annealing

Weld Metal dengan Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.00	0.00	0.006	0.750	1.333	0.00	0.00	1.13E+07	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.006	0.750	1.333	0.00	0.00	1.13E+07	0.00	0.00	0.00
3	0.00	0.00	0.006	0.750	1.333	0.00	0.00	1.13E+07	0.00	0.00	0.00
4	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.333	2.5E-08	-7.60E+00	1.13E+07	1.57E+05	3.15E+05	5.4981
5	0.14	1E-04	0.006	0.750	1.333	4.5E-08	-7.35E+00	1.13E+07	2.63E+05	5.27E+05	5.7216
6	0.25	3E-04	0.006	0.750	1.333	5.5E-08	-7.26E+00	1.13E+07	3.52E+05	7.04E+05	5.8476
7	0.39	4E-04	0.006	0.750	1.333	7.00E-08	-7.15E+00	1.13E+07	4.40E+05	8.79E+05	5.9441
8	0.56	6E-04	0.006	0.750	1.333	8.50E-08	-7.07E+00	1.13E+07	5.27E+05	1.05E+06	6.0227
9	0.75	8E-04	0.006	0.750	1.334	9.50E-08	-7.02E+00	1.13E+07	6.10E+05	1.22E+06	6.0861
10	0.96	1E-03	0.006	0.750	1.334	1.05E-07	-6.98E+00	1.13E+07	6.90E+05	1.38E+06	6.1397
11	1.53	0.002	0.006	0.750	1.334	3.80E-07	-6.42E+00	1.13E+07	870762.22	1.74E+06	6.2409

Tabel 4.38. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} weld metal tanpa Annealing

Weld Metal tanpa Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.00	0.00	0.006	0.750	1.333	0.00	0.00	1.13E+07	0.00	0.00	0.00
2	0.00	0.00	0.006	0.750	1.333	0.00	0.00	1.13E+07	0.00	0.00	0.00
3	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.333	2.5E-08	-7.60E+00	1.13E+07	1.57E+05	3.15E+05	5.4981
4	0.15	2E-04	0.006	0.750	1.333	5E-08	-7.30E+00	1.13E+07	2.73E+05	5.45E+05	5.7366
5	0.27	3E-04	0.006	0.750	1.333	6E-08	-7.22E+00	1.13E+07	3.66E+05	7.32E+05	5.8643
6	0.42	4E-04	0.006	0.750	1.333	7.5E-08	-7.12E+00	1.13E+07	4.56E+05	9.12E+05	5.9602
7	0.62	6E-04	0.006	0.750	1.333	1.00E-07	-7.00E+00	1.13E+07	5.54E+05	1.11E+06	6.0448
8	0.88	9E-04	0.006	0.750	1.334	1.30E-07	-6.89E+00	1.13E+07	6.60E+05	1.32E+06	6.1208
9	1.16	0.001	0.006	0.750	1.334	1.40E-07	-6.85E+00	1.13E+07	7.58E+05	1.52E+06	6.1808
10	1.40	0.001	0.006	0.750	1.334	9.60E-07	-6.02E+00	1.13E+07	8.33E+05	1.67E+06	6.2216

Tabel 4.39. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} HAZ dengan Annealing

HAZ dengan Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.10	1E-04	0.006	0.750	1.333	5E-08	-7.30E+00	1.13E+07	2.23E+05	4.45E+05	5.6486
2	0.22	2E-04	0.006	0.750	1.333	6E-08	-7.22E+00	1.13E+07	3.30E+05	6.60E+05	5.8198
3	0.40	4E-04	0.006	0.750	1.333	9E-08	-7.05E+00	1.13E+07	4.45E+05	8.90E+05	5.9496
4	0.65	7E-04	0.006	0.750	1.333	1.25E-07	-6.90E+00	1.13E+07	5.68E+05	1.14E+06	6.055
5	0.95	1E-03	0.006	0.750	1.334	1.5E-07	-6.82E+00	1.13E+07	6.86E+05	1.37E+06	6.1374
6	1.38	0.001	0.006	0.750	1.334	5.06E-07	-6.30E+00	1.13E+07	8.27E+05	1.65E+06	6.2185



Tabel 4.40. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} HAZ tanpa Annealing

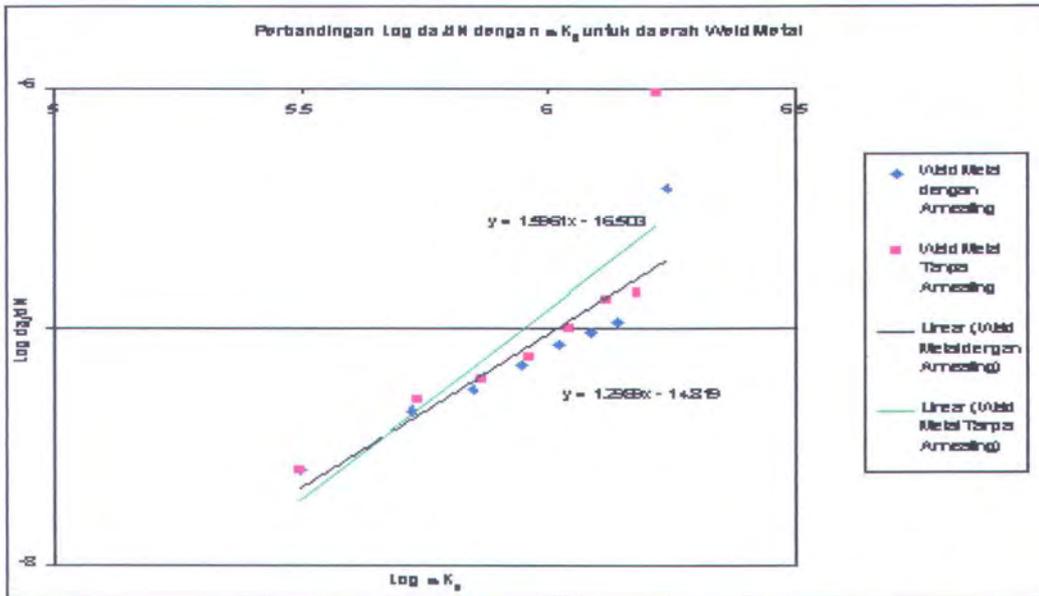
HAZ tanpa Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.11	1E-04	0.006	0.750	1.333	5.5E-08	-7.26E+00	1.13E+07	2.33E+05	4.67E+05	5.6693
2	0.26	3E-04	0.006	0.750	1.333	7.5E-08	-7.12E+00	1.13E+07	3.59E+05	7.18E+05	5.8561
3	0.46	5E-04	0.006	0.750	1.333	1E-07	-7.00E+00	1.13E+07	4.77E+05	9.55E+05	5.98
4	0.78	8E-04	0.006	0.750	1.334	1.6E-07	-6.80E+00	1.13E+07	6.22E+05	1.24E+06	6.0946
5	1.25	0.001	0.006	0.750	1.334	4.85E-07	-6.31E+00	1.13E+07	7.87E+05	1.57E+06	6.197

Tabel 4.41. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} base metal dengan Annealing

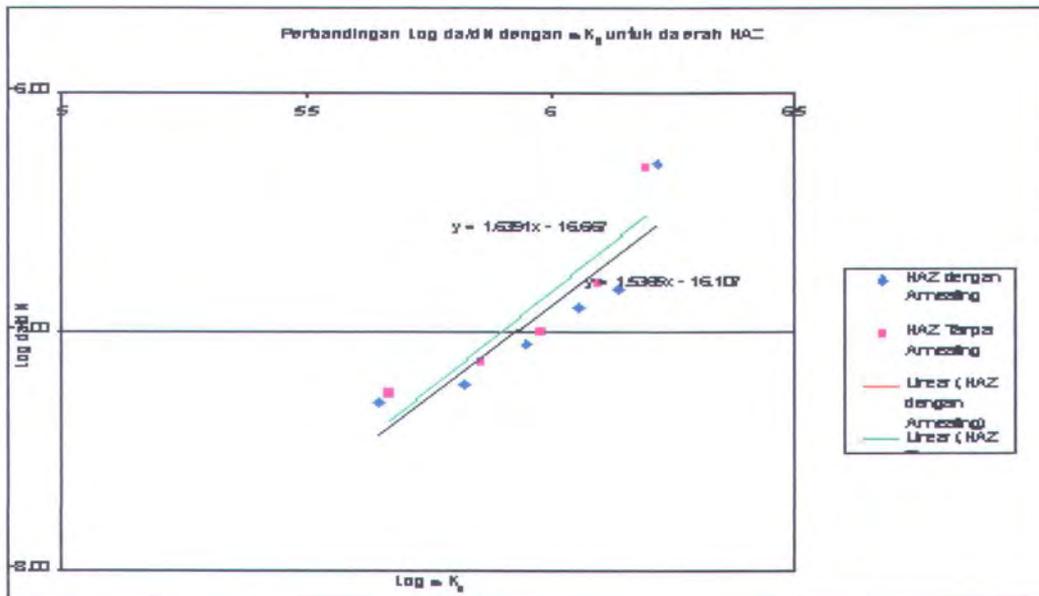
Base Metal dengan Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.05	5E-05	0.006	0.750	1.333	2.50E-08	-7.60E+00	1.13E+07	1.57E+05	3.15E+05	5.4981
2	0.11	1E-04	0.006	0.750	1.333	3.00E-08	-7.52E+00	1.13E+07	2.33E+05	4.67E+05	5.6693
3	0.20	2E-04	0.006	0.750	1.333	4.50E-08	-7.35E+00	1.13E+07	3.15E+05	6.30E+05	5.7991
4	0.32	3E-04	0.006	0.750	1.333	6.00E-08	-7.22E+00	1.13E+07	3.98E+05	7.96E+05	5.9012
5	0.47	5E-04	0.006	0.750	1.333	7.50E-08	-7.12E+00	1.13E+07	4.83E+05	9.65E+05	5.9846
6	0.64	6E-04	0.006	0.750	1.333	8.50E-08	-7.07E+00	1.13E+07	5.63E+05	1.13E+06	6.0517
7	0.85	9E-04	0.006	0.750	1.334	1.05E-07	-6.98E+00	1.13E+07	6.49E+05	1.30E+06	6.1133
8	1.68	0.002	0.006	0.750	1.334	4.61E-07	-6.34E+00	1.13E+07	9.12E+05	1.82E+06	6.2612

Tabel 4.42. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{II} base metal tanpa Annealing

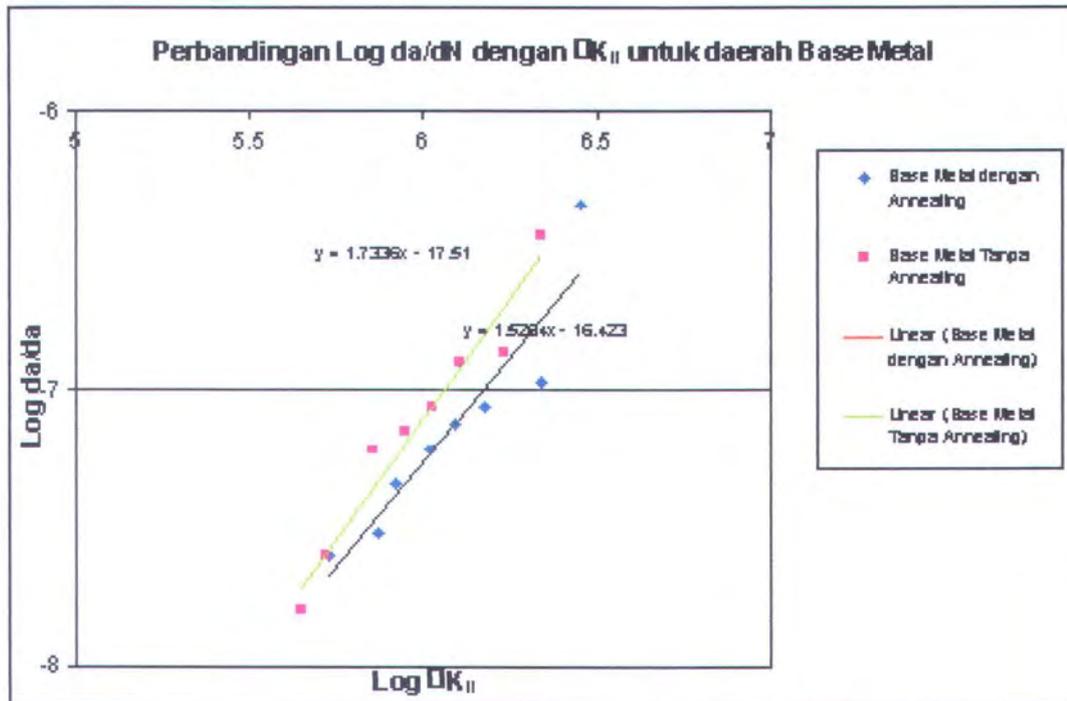
Base Metal tanpa Annealing											
No	a	a	d	d/Do	Do/d	da/dN	Log da/dN	τ_{xy}	K_{II}	ΔK_{II}	Log ΔK_{II}
1	0.09	9E-05	0.006	0.750	1.333	4.50E-08	-7.35E+00	1.13E+07	2.11E+05	4.22E+05	5.6257
2	0.14	1E-04	0.006	0.750	1.333	2.50E-08	-7.60E+00	1.13E+07	2.63E+05	5.27E+05	5.7216
3	0.26	3E-04	0.006	0.750	1.333	6.00E-08	-7.22E+00	1.13E+07	3.59E+05	7.18E+05	5.8561
4	0.40	4E-04	0.006	0.750	1.333	7.00E-08	-7.15E+00	1.13E+07	4.45E+05	8.90E+05	5.9496
5	0.57	6E-04	0.006	0.750	1.333	8.50E-08	-7.07E+00	1.13E+07	5.31E+05	1.06E+06	6.0265
6	0.82	8E-04	0.006	0.750	1.334	1.25E-07	-6.90E+00	1.13E+07	6.37E+05	1.27E+06	6.1055
7	1.09	0.001	0.006	0.750	1.334	1.35E-07	-6.87E+00	1.13E+07	7.35E+05	1.47E+06	6.1673
8	1.55	0.002	0.006	0.750	1.334	3.07E-06	-5.51E+00	1.13E+07	8.76E+05	1.75E+06	6.2437



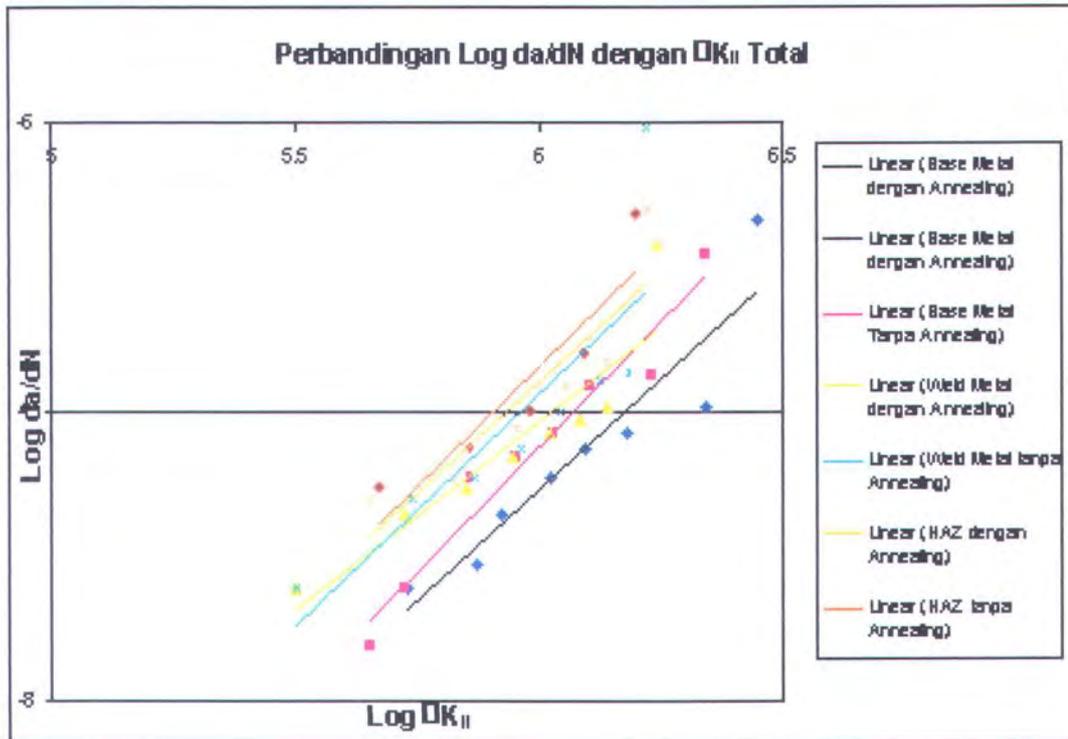
Gambar 4.13. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan weld metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.14. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan HAZ dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.15. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan base metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma



Gambar 4.16. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan retak gabungan dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.

Merubah hasil analisa perhitungan ke bentuk $\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{II})^m$

- Untuk pengujian specimen pada weld metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,6495(\text{Log } \Delta K_{II}) - 9,7866$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,6346 \cdot 10^{-10} (\Delta K_I)^{0,6495}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga

$1,6346 \cdot 10^{-10}$ dan konstanta m berharga 0,6495.



- Untuk pengujian specimen pada weld metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,7981(\text{Log } \Delta K_{II}) - 10,319$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 4,7973 \cdot 10^{-11} (\Delta K_{II})^{0,7981}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,7973 \cdot 10^{-11}$ dan konstanta m berharga 0,7981.

- Untuk pengujian specimen pada daerah HAZ dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,7682 (\text{Log } \Delta K_{II}) - 10,154$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 7,0145 \cdot 10^{-11} (\Delta K_{II})^{0,7682}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $7,0145 \cdot 10^{-11}$ dan konstanta m berharga 0,7682.

- Untuk pengujian specimen pada HAZ tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,8196(\text{Log } \Delta K_{II}) - 10,316$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 4,8306 \cdot 10^{-11} (\Delta K_{II})^{0,8196}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,8306 \cdot 10^{-11}$ dan konstanta m berharga 0,8196.

- Untuk pengujian specimen pada base metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,571 (\text{Log } \Delta K_{II}) - 9,5376$$



maka

$$\frac{da}{dN} = 2,900 \cdot 10^{-10} (\Delta K_{II})^{0,571}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,1301 \cdot 10^{-10}$ dan konstanta m berharga 0,612.

- Untuk pengujian specimen pada base metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 0,6121 (\text{Log } \Delta K_{II}) - 9,6716$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 2,1301 \cdot 10^{-10} (\Delta K_{II})^{0,6121}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,1301 \cdot 10^{-10}$ dan konstanta m berharga 0,612.

d. Perhitungan perambatan retak mode III

Perambatan retak mode III adalah perambatan retak yang diakibatkan karena adanya bembahanan torsional. Mode III ini sering terjadi diakibatkan pembebanan out plane shear. Langkah-langkah perhitungan untuk mode III ialah :

- Menentukan grafik pertumbuhan retak (crack growth), yaitu grafik yang menghubungkan panjang retak (a) dan cycle beban (N, dalam skala logaritmik). Pertumbuhan retak sama dengan pertumbuhan retak pada mode I
- Menentukan kecepatan penjalaran retak, dimana



$$da/dN = \Delta a/\Delta N.$$

- Menentukan range factor intensitas tegangan mode III.

$$(\Delta K_{III}) = K_{III\text{maks}} - K_{III\text{min}}.$$

Untuk poros bertakik dengan perbandingan diameter d/D ditentukan dengan rumus sebagai berikut :

$$K_{III} = \tau_{zy} \cdot \sqrt{\pi \cdot a}$$

Dimana :

K_{III} = Faktor intensitas tegangan mode III, $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$.

τ_{zy} = Tegangan nominal akibat beban torsi, N/m^2 .

a = Panjang retak yang terjadi, m.

- Membuat grafik karakteristik perambatan retak yaitu grafik yang menghubungkan laju perambatan retak (da/dN) dengan range factor intensitas tegangan (ΔK_{III}) dalam skala logaritmik untuk mode III.

- Menentukan K_{III} dan ΔK_{III}

dengan besarnya $\Delta K_{III} = K_{III\text{maks}} - K_{III\text{min}}$



Tabel 4.43. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} weld metal dengan Annealing

Weld Metal dengan Annealing											
No	a	a	d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}
1	0.00	0.0000	0.006	0.750	4.770	0.0000	0.00	2.25E+08	0.00E+00	0.00E+00	0.000
2	0.00	0.0000	0.006	0.750	4.770	0.0000	0.00	2.25E+08	0.00E+00	0.00E+00	0.000
3	0.00	0.0000	0.006	0.750	4.770	0.0000	0.00	2.25E+08	0.00E+00	0.00E+00	0.000
4	0.05	0.0001	0.006	0.750	4.770	2.50E-08	-7.60	2.25E+08	1.77E+04	3.53E+04	4.548179
5	0.14	0.0001	0.006	0.750	4.770	4.50E-08	-7.35	2.25E+08	4.95E+04	9.89E+04	4.995337
6	0.25	0.0003	0.006	0.750	4.770	5.50E-08	-7.26	2.25E+08	8.83E+04	1.77E+05	5.247149
7	0.39	0.0004	0.006	0.750	4.770	7.00E-08	-7.15	2.25E+08	1.38E+05	2.76E+05	5.440273
8	0.56	0.0006	0.006	0.750	4.770	8.50E-08	-7.07	2.25E+08	1.98E+05	3.96E+05	5.597397
9	0.75	0.0008	0.006	0.750	4.770	9.50E-08	-7.02	2.25E+08	2.65E+05	5.30E+05	5.72427
10	0.96	0.0010	0.006	0.750	4.770	1.05E-07	-6.98	2.25E+08	3.39E+05	6.78E+05	5.83148
11	1.53	0.0015	0.006	0.750	4.770	3.80E-07	-6.42	2.25E+08	5.41E+05	1.08E+06	6.0339

Tabel 4.44. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} weld metal tanpa Annealing

Weld Metal tanpa Annealing											
No	a	a	d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}
1	0.00	0	0.006	0.750	4.770	0.00	0	2.25E+08	0.000000	0.00E+00	0
2	0.00	0	0.006	0.750	4.770	0	0	2.25E+08	0.000000	0.00E+00	0
3	0.05	0.00005	0.006	0.750	4.770	2.50E-08	-7.60	2.25E+08	1.77E+04	3.53E+04	4.548179
4	0.15	0.00015	0.006	0.750	4.770	5.00E-08	-7.30	2.25E+08	5.30E+04	1.06E+05	5.0253
5	0.27	0.00027	0.006	0.750	4.770	6.00E-08	-7.22	2.25E+08	9.54E+04	1.91E+05	5.280572
6	0.42	0.00042	0.006	0.750	4.770	7.50E-08	-7.12	2.25E+08	1.48E+05	2.97E+05	5.47246
7	0.62	0.00062	0.006	0.750	4.770	1.00E-07	-7.00	2.25E+08	2.19E+05	4.38E+05	5.6416
8	0.88	0.00088	0.006	0.750	4.770	1.30E-07	-6.89	2.25E+08	3.11E+05	6.22E+05	5.793691
9	1.16	0.00116	0.006	0.750	4.770	1.40E-07	-6.85	2.25E+08	4.10E+05	8.20E+05	5.913667
10	1.40	0.00140	0.006	0.750	4.770	9.60E-07	-6.02	2.25E+08	4.95E+05	9.89E+05	5.995337

Tabel 4.45. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} HAZ dengan Annealing

HAZ dengan Annealing											
No	a	a	d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}
1	0.10	0.00010	0.006	0.750	4.770	5.00E-08	-7.30E+00	2.25E+08	3.53E+04	7.07E+04	4.85E+00
2	0.22	0.00022	0.006	0.750	4.770	6.00E-08	-7.22E+00	2.25E+08	7.77E+04	1.55E+05	5.19E+00
3	0.40	0.00040	0.006	0.750	4.770	9.00E-08	-7.05E+00	2.25E+08	1.41E+05	2.83E+05	5.45E+00
4	0.65	0.00065	0.006	0.750	4.770	1.25E-07	-6.90E+00	2.25E+08	2.30E+05	4.59E+05	5.66E+00
5	0.95	0.00095	0.006	0.750	4.770	1.50E-07	-6.82E+00	2.25E+08	3.36E+05	6.71E+05	5.83E+00
6	1.38	0.00138	0.006	0.750	4.770	5.06E-07	-6.30E+00	2.25E+08	4.88E+05	9.75E+05	5.99E+00



Tabel 4.46. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} HAZ tanpa Annealing

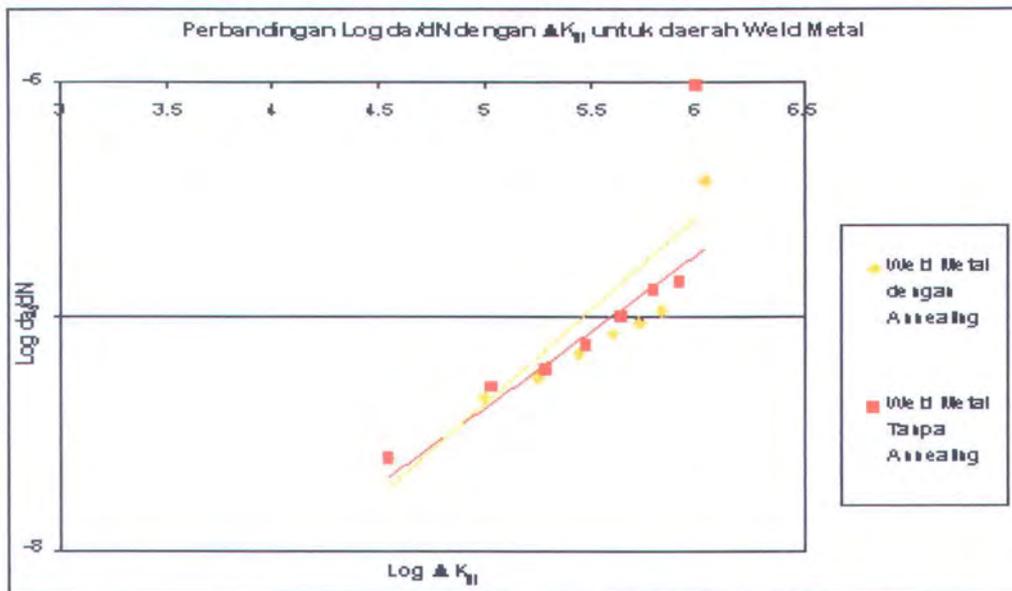
HAZ tanpa Annealing											
No	a	a/d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}	
1	0.11	0.00011	0.006	0.750	7.013	5.50E-08	-7.26E+00	7.03E+07	1.21E+04	2.43E+04	4.39E+00
2	0.26	0.00026	0.006	0.750	7.013	7.50E-08	-7.12E+00	7.03E+07	2.87E+04	5.74E+04	4.76E+00
3	0.46	0.00046	0.006	0.750	7.013	1.00E-07	-7.00E+00	7.03E+07	5.08E+04	1.02E+05	5.01E+00
4	0.78	0.00078	0.006	0.750	7.013	1.60E-07	-6.80E+00	7.03E+07	8.61E+04	1.72E+05	5.24E+00
5	1.25	0.00125	0.006	0.750	7.013	4.85E-07	-6.31E+00	7.03E+07	1.38E+05	2.76E+05	5.44E+00

Tabel 4.47. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} base metal dengan Annealing

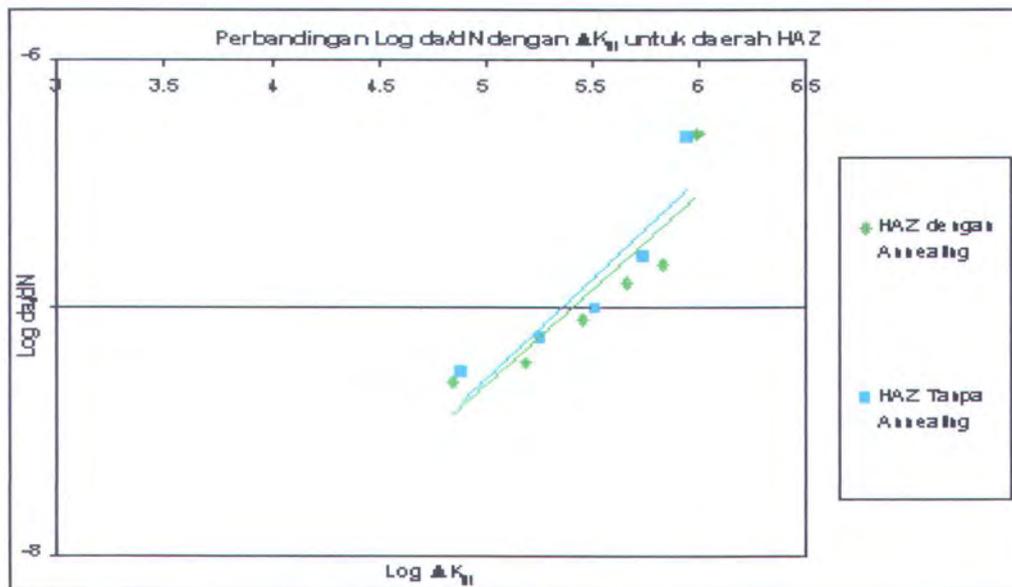
Base Metal dengan Annealing											
No	a	a/d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}	
1	0.05	0.00005	0.006	0.750	7.013	2.50E-08	-7.60E+00	7.03E+07	5.52E+03	1.10E+04	4.04E+00
2	0.11	0.00011	0.006	0.750	7.013	3.00E-08	-7.52E+00	7.03E+07	1.21E+04	2.43E+04	4.39E+00
3	0.20	0.0002	0.006	0.750	7.013	4.50E-08	-7.35E+00	7.03E+07	2.21E+04	4.41E+04	4.64E+00
4	0.32	0.00032	0.006	0.750	7.013	6.00E-08	-7.22E+00	7.03E+07	3.53E+04	7.06E+04	4.85E+00
5	0.47	0.00047	0.006	0.750	7.013	7.50E-08	-7.12E+00	7.03E+07	5.19E+04	1.04E+05	5.02E+00
6	0.64	0.00064	0.006	0.750	7.013	8.50E-08	-7.07E+00	7.03E+07	7.06E+04	1.41E+05	5.15E+00
7	0.85	0.00085	0.006	0.750	7.013	1.05E-07	-6.98E+00	7.03E+07	9.38E+04	1.88E+05	5.27E+00
8	1.68	0.00168	0.006	0.750	7.013	4.61E-07	-6.34E+00	7.03E+07	1.85E+05	3.71E+05	5.57E+00

Tabel 4.48. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{III} base metal tanpa Annealing

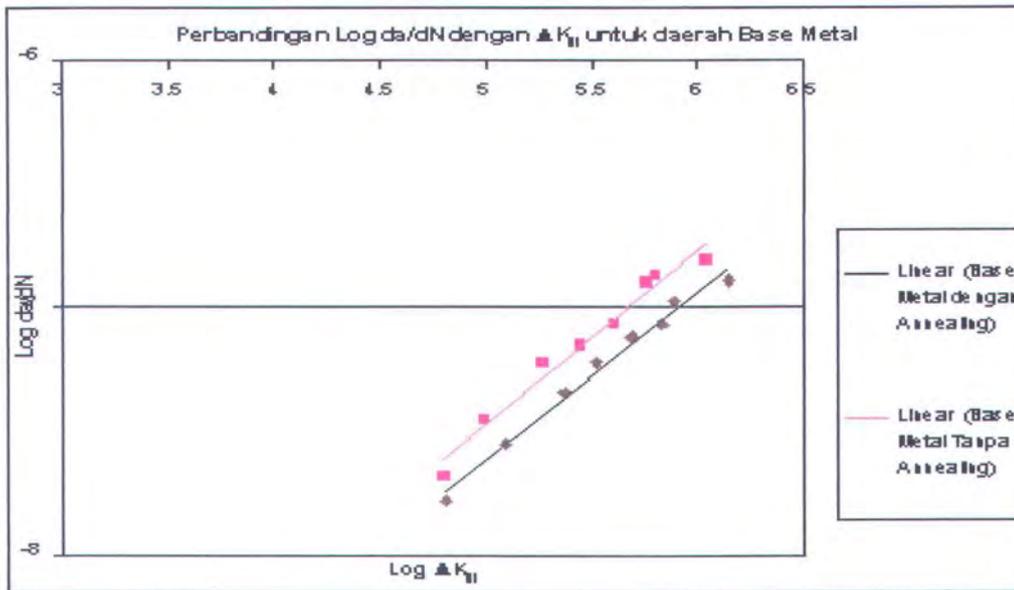
Base Metal tanpa Annealing											
No	a	a/d	d/Do	M_T	da/dN	Log da/dN	τ_{yz}	K_{III}	ΔK_{III}	Log ΔK_{III}	
1	0.09	0.00009	0.006	0.750	7.013	4.50E-08	-7.35E+00	7.03E+07	9.93E+03	1.99E+04	4.30E+00
2	0.14	0.00014	0.006	0.750	7.013	2.50E-08	-7.60E+00	7.03E+07	1.54E+04	3.09E+04	4.49E+00
3	0.26	0.00026	0.006	0.750	7.013	6.00E-08	-7.22E+00	7.03E+07	2.87E+04	5.74E+04	4.76E+00
4	0.40	0.0004	0.006	0.750	7.013	7.00E-08	-7.15E+00	7.03E+07	4.41E+04	8.83E+04	4.95E+00
5	0.57	0.00057	0.006	0.750	7.013	8.50E-08	-7.07E+00	7.03E+07	6.29E+04	1.26E+05	5.10E+00
6	0.82	0.00082	0.006	0.750	7.013	1.25E-07	-6.90E+00	7.03E+07	9.05E+04	1.81E+05	5.26E+00
7	1.09	0.00109	0.006	0.750	7.013	1.35E-07	-6.87E+00	7.03E+07	1.20E+05	2.41E+05	5.38E+00
8	1.55	0.00155	0.006	0.750	7.013	3.07E-08	-5.51E+00	7.03E+07	1.71E+05	3.42E+05	5.53E+00



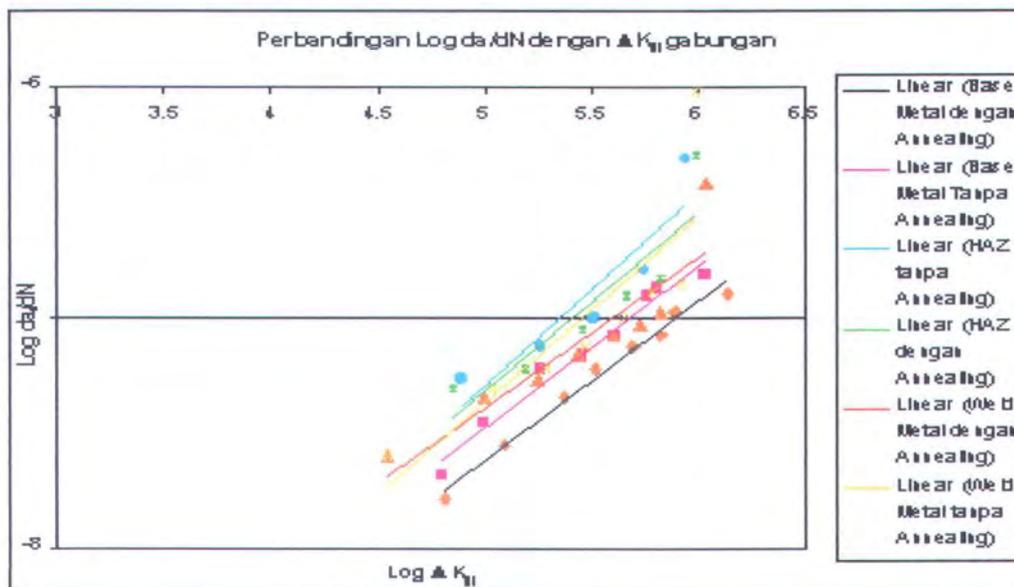
Gambar 4.17. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan weld metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma



Gambar 4.18. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan HAZ dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma



Gambar 4.19. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan base metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma



Gambar 4.20. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan retak gabungan dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



e. Perhitungan perambatan retak mode gabungan

Pada penulisan tugas akhir ini mode perambatan retak yang terjadi adalah mode I, mode II dan mode III, sehingga dicari konsentrasi tegangan untuk mode gabungan. Dimana persamaan mode gabungan tiga mode adalah

$$\Delta K_{eq} = \left[\Delta K_I^2 + \Delta K_{II}^2 + (1+\nu)\Delta K_{III}^2 \right]^{0.5}$$

ν ialah poisson's ratio, dengan nilai 0.32 (Finite Element Analysis, Saced Moaveri) diambil dari referensi untuk material medium karbon.

Tabel 4.49. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{eq} weld metal dengan Annealing

Weld Metal dengan Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	1 + ν	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00	0.0000	0.000	0.000	0.000
2	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00	0.0000	0.000	0.000	0.000
3	0.00	0.00	1.32	0.00	0.00	0.0000	0.000	0.000	0.000
4	2.5E-08	-7.60	1.32	2.80E+13	3.07E+07	1.61E+08	2.80E+13	5.30E+06	6.724621
5	4.5E-08	-7.35	1.32	7.83E+13	2.41E+08	1.26E+09	7.83E+13	8.89E+06	6.949113
6	5.5E-08	-7.26	1.32	1.40E+14	7.67E+08	4.02E+09	1.40E+14	1.19E+07	7.07578
7	7.00E-08	-7.15	1.32	2.18E+14	1.87E+09	9.78E+09	2.18E+14	1.49E+07	7.173095
8	8.50E-08	-7.07	1.32	3.13E+14	3.85E+09	2.02E+10	3.13E+14	1.79E+07	7.252403
9	9.5E-08	-7.02	1.32	4.19E+14	6.90E+09	3.62E+10	4.19E+14	2.07E+07	7.316548
10	1.05E-07	-6.98	1.32	5.37E+14	1.13E+10	5.92E+10	5.37E+14	2.35E+07	7.370837
11	3.8E-07	-6.42	1.32	8.56E+14	2.87E+10	1.50E+11	8.56E+14	2.98E+07	7.473588



Tabel 4.50. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{eq} weld metal tanpa Annealing

Weld Metal tanpa Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	$1 + \nu$	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	0	0.00	1.32	0.00	0.00	0	0	0.00E+00	0
2	0	0.00	1.32	0.00	0.00	0	0	0.00E+00	0
3	2.5E-08	-7.60	1.32	2.80E+13	3.07E+07	1.61E+08	2.8E+13	5.30E+06	6.724621
4	5E-08	-7.30	1.32	8.39E+13	2.76E+08	1.45E+09	8.39E+13	9.21E+06	6.964174
5	6E-08	-7.22	1.32	1.51E+14	8.95E+08	4.69E+09	1.51E+14	1.24E+07	7.092611
6	7.5E-08	-7.12	1.32	2.35E+14	2.16E+09	1.13E+10	2.35E+14	1.55E+07	7.189329
7	1.00E-07	-7.00	1.32	3.47E+14	4.72E+09	2.47E+10	3.47E+14	1.88E+07	7.27474
8	1.30E-07	-6.89	1.32	4.92E+14	9.50E+09	4.98E+10	4.92E+14	2.25E+07	7.351692
9	1.4E-07	-6.85	1.32	6.49E+14	1.65E+10	8.65E+10	6.49E+14	2.59E+07	7.412514
10	9.6E-07	-6.02	1.32	7.83E+14	2.41E+10	1.26E+11	7.83E+14	2.84E+07	7.453985

Tabel 4.51. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{eq} HAZ dengan Annealing

HAZ dengan Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	$1 + \nu$	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	5E-08	-7.30	1.32	5.59E+13	1.23E+08	6.43E+08	5.59E+13	7.51E+06	6.875698
2	6E-08	-7.22	1.32	1.23E+14	5.94E+08	3.11E+09	1.23E+14	1.12E+07	7.047834
3	9E-08	-7.05	1.32	2.24E+14	1.96E+09	1.03E+10	2.24E+14	1.51E+07	7.17864
4	1.25E-07	-6.90	1.32	3.63E+14	5.18E+09	2.72E+10	3.64E+14	1.93E+07	7.285114
5	1.5E-07	-6.82	1.32	5.31E+14	1.11E+10	5.80E+10	5.31E+14	2.34E+07	7.368532
6	5.06E-07	-6.30	1.32	7.72E+14	2.34E+10	1.22E+11	7.72E+14	2.82E+07	7.45081

Tabel 4.52. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{eq} HAZ tanpa Annealing

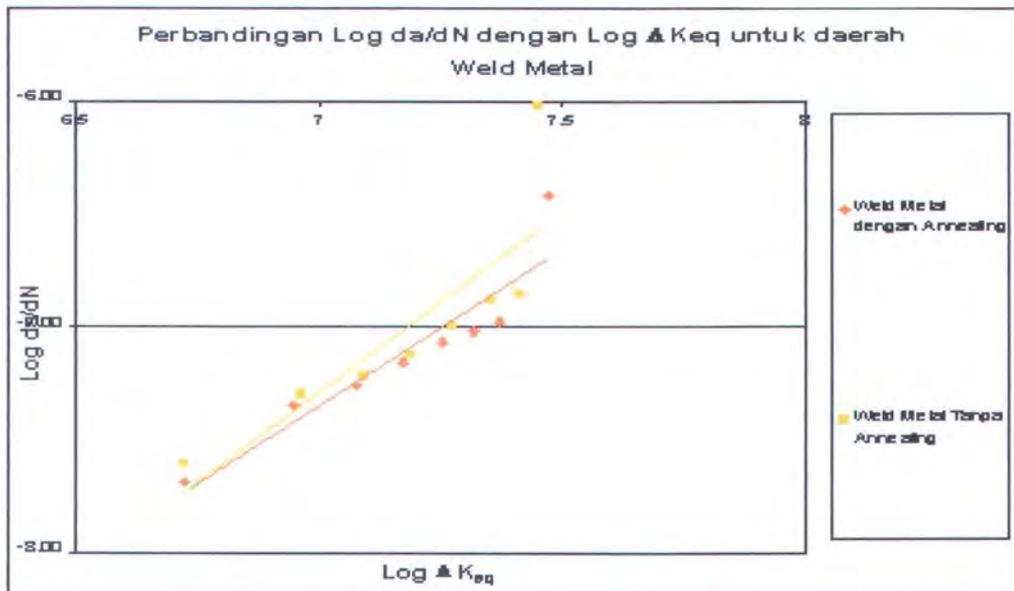
HAZ tanpa Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	$1 + \nu$	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	5.5E-08	-7.26	1.32	6.15E+13	1.48E+08	7.78E+08	6.15E+13	7.88E+06	6.896488
2	7.5E-08	-7.12	1.32	1.45E+14	8.30E+08	4.35E+09	1.45E+14	1.21E+07	7.084357
3	1E-07	-7.00	1.32	2.57E+14	2.60E+09	1.36E+10	2.57E+14	1.62E+07	7.209265
4	1.6E-07	-6.80	1.32	4.36E+14	7.47E+09	3.91E+10	4.36E+14	2.11E+07	7.325168
5	4.85E-07	-6.31	1.32	6.99E+14	1.92E+10	1.00E+11	6.99E+14	2.69E+07	7.428985



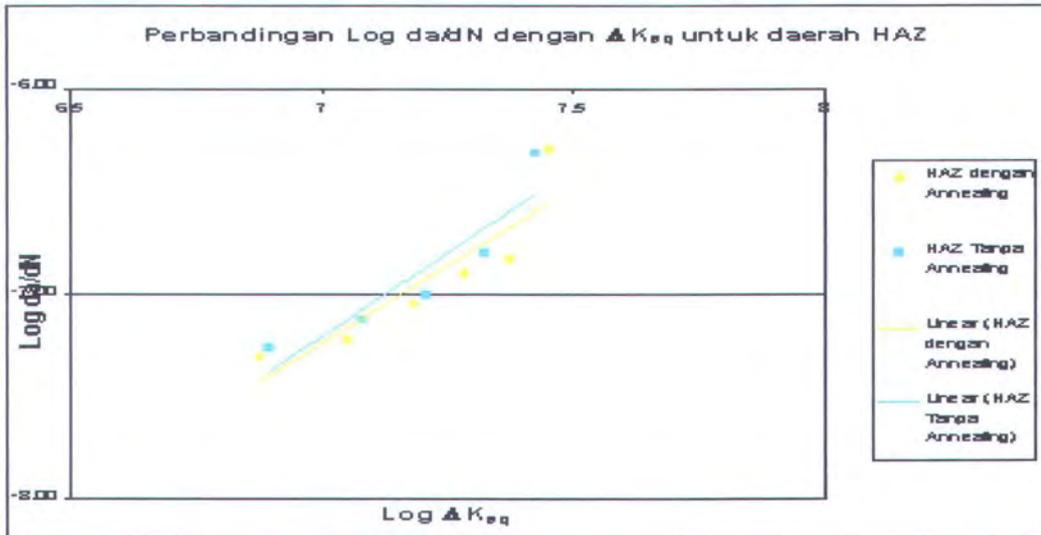
Base Metal dengan Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	1 + ν	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	2.5E-08	-7.60	1.32	2.80E+13	3.07E+07	1.61E+08	2.8E+13	5.30E+06	6.724621
2	3E-08	-7.52	1.32	6.15E+13	1.48E+08	7.78E+08	6.15E+13	7.88E+06	6.896488
3	4.5E-08	-7.35	1.32	1.12E+14	4.91E+08	2.57E+09	1.12E+14	1.06E+07	7.027006
4	6E-08	-7.22	1.32	1.79E+14	1.26E+09	6.58E+09	1.79E+14	1.35E+07	7.129782
5	7.5E-08	-7.12	1.32	2.63E+14	2.71E+09	1.42E+10	2.63E+14	1.64E+07	7.21398
6	8.5E-08	-7.07	1.32	3.58E+14	5.03E+09	2.63E+10	3.58E+14	1.91E+07	7.28171
7	1.05E-07	-6.98	1.32	4.75E+14	8.87E+09	4.64E+10	4.75E+14	2.21E+07	7.344063
8	4.61E-07	-6.34	1.32	9.39E+14	3.46E+10	1.81E+11	9.4E+14	3.12E+07	7.494251

Tabel 4.54. Perhitungan Log (da/dN) dan Log ΔK_{eq} base metal tanpa Annealing

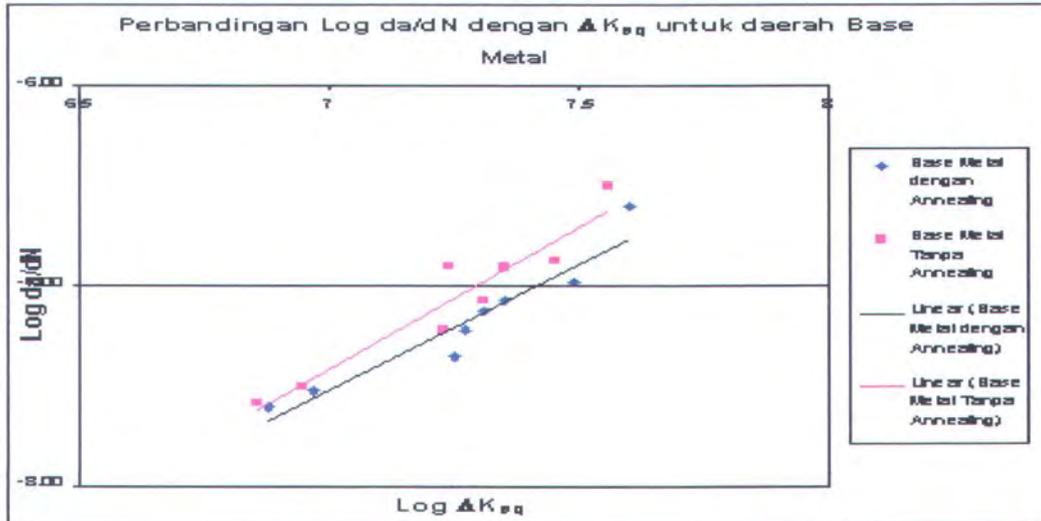
Base Metal dengan Annealing									
No	da/dN	Log da/dN	1 + ν	ΔK_I^2	ΔK_{II}^2	$(1 + \nu)\Delta K_{III}^2$	ΔK_{eq}^2	ΔK_{eq}	Log ΔK_{eq}
1	4.5E-08	-7.35	1.32	5.03E+13	9.94E+07	5.21E+08	5.03E+13	7.12E+06	6.852721
2	2.5E-08	-7.60	1.32	7.83E+13	2.41E+08	1.26E+09	7.83E+13	8.89E+06	6.949113
3	6E-08	-7.22	1.32	1.45E+14	8.30E+08	4.35E+09	1.45E+14	1.21E+07	7.084357
4	7E-08	-7.15	1.32	2.24E+14	1.96E+09	1.03E+10	2.24E+14	1.51E+07	7.17864
5	8.5E-08	-7.07	1.32	3.19E+14	3.99E+09	2.09E+10	3.19E+14	1.80E+07	7.256286
6	1.25E-07	-6.90	1.32	4.59E+14	8.25E+09	4.32E+10	4.59E+14	2.17E+07	7.336162
7	1.35E-07	-6.87	1.32	6.10E+14	1.46E+10	7.64E+10	6.1E+14	2.50E+07	7.3988
8	3.07E-06	-5.51	1.32	8.67E+14	2.95E+10	1.54E+11	8.67E+14	3.00E+07	7.476456



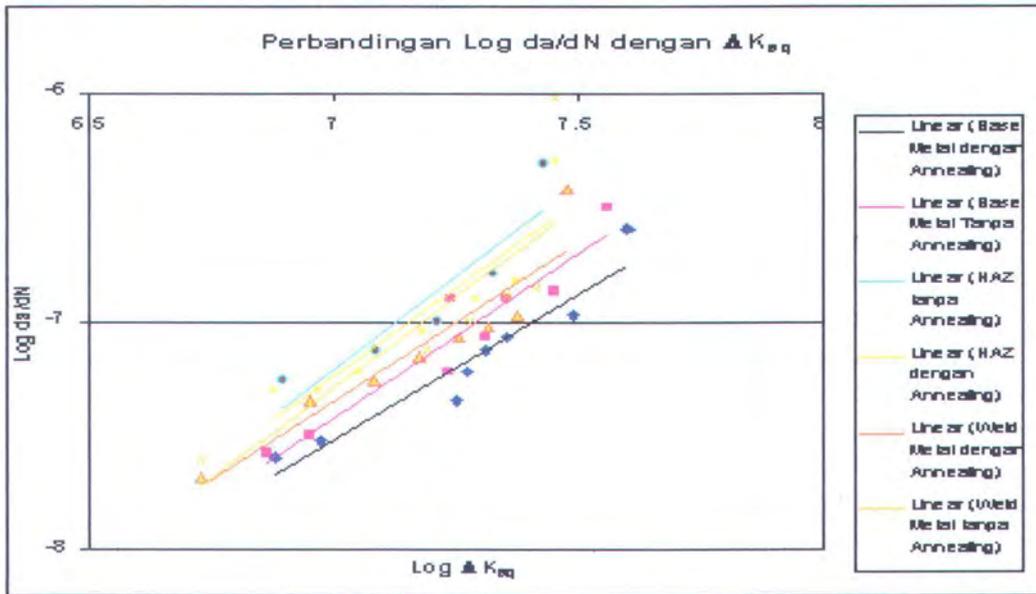
Gambar 4.21. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan weld metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.22. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan HAZ dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.23. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan base metal dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Gambar 4.24. Grafik perbandingan karakteristik laju perambatan total dengan annealing dan tanpa annealing dalam skala Logaritma.



Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,4875 \cdot 10^{-17}$ dan konstanta m berharga 1,2894.

- Untuk pengujian specimen pada weld metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5845(\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,382$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 4,1495 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,5845}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,1495 \cdot 10^{-19}$ dan konstanta m berharga 1,5845.

- Untuk pengujian specimen pada daerah HAZ dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5239 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 17,905$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,2445 \cdot 10^{-18} (\Delta K_{eq})^{1,5239}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,2445 \cdot 10^{-18}$ dan konstanta m berharga 1,5239.

- Untuk pengujian specimen pada HAZ tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,6258 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,587$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 2,5882 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,6258}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,5882 \cdot 10^{-19}$ dan konstanta m berharga 1,6258.



- Untuk pengujian specimen pada base metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,1299 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 15,83$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_{eq})^{1,1299}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,4791 \cdot 10^{-16}$ dan konstanta m berharga 1,1299.

- Untuk pengujian specimen pada base metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,2118 (\text{Log } \Delta K_I) - 15,83$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_I)^{1,2118}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,4791 \cdot 10^{-16}$ dan konstanta m berharga 1,2118.

Dari hasil yang didapatkan diatas dapat diketahui adanya perbedaan besar ketangguhan atau perbedaan parambatan retak, dengan indikasi , pada harga



. Merubah hasil analisa perhitungan ke bentuk $\frac{da}{dN} = c(\Delta K_{eq})^m$

- Untuk pengujian specimen pada weld metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,2894 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 16,348$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 4,4875 \cdot 10^{-17} (\Delta K_{eq})^{1,2894}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,4875 \cdot 10^{-17}$ dan konstanta m berharga 1,2894.

- Untuk pengujian specimen pada weld metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5845 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,382$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 4,1495 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,5845}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $4,1495 \cdot 10^{-19}$ dan konstanta m berharga 1,5845.

- Untuk pengujian specimen pada daerah HAZ dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,5239 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 17,905$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,2445 \cdot 10^{-18} (\Delta K_{eq})^{1,5239}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,2445 \cdot 10^{-18}$ dan konstanta m berharga 1,5239.



- Untuk pengujian specimen pada HAZ tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,6258 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,587$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 2,5882 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,6258}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $2,5882 \cdot 10^{-19}$ dan konstanta m berharga 1,6258.

- Untuk pengujian specimen pada base metal dengan Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,1299 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 15,83$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_{eq})^{1,1299}$$



Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,4791 \cdot 10^{-16}$ dan konstanta m berharga 1,1299.

- Untuk pengujian specimen pada base metal tanpa Annealing didapat :

$$\text{Log } da/dN = 1,2118 (\text{Log } \Delta K_I) - 15,83$$

maka

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_I)^{1,2118}$$

Maka didapatkan nilai konstanta c dari formula Paris Erdogan berharga $1,4791 \cdot 10^{-16}$ dan konstanta m berharga 1,2118.



Dari hasil yang didapatkan diatas dapat diketahui adanya perbedaan besar ketangguhan untuk tiap-tiap specimen pada titik pengujian yang berbeda, perbedaan nilai ketangguhan disebabkan karena :

a. Pengaruh Metalurgi

Adanya perbedaan ketangguhan yang cukup besar antara weld metal dengan base metal dan HAZ karena terjadi proses tambah selama pengelasan. proses tambahan. Hal ini berbeda dengan proses pembentukan base metal yaitu baja karbon. Pada pengelasan terjadi hal-hal berikut :

- Kecepatan pendinginan selama pengelasan lebih tinggi daripada pendinginan pada pembuatan baja karbon/ base metal.
- Sumber panas selama pengelasan bergerak terus.
- Selama pengelasan, logam las mencair dan membeku secara berurutan dan terus menerus.

Ketika logam las masih mencair, oksidasi dihalangi oleh terak dan gas pelindung dari pembungkus elektroda. Meski demikian terak dan gas pelindung tidak dapat menghalangi sepenuhnya, sehingga logam las mengandung lebih banyak oksigen dibanding logam induk, kandungan oksigen mempengaruhi keuletan dari material, semakin banyak oksigen yang dikandung maka semakin menurun keuletannya.

Unsur lain yang bereaksi selain oksigen adalah hydrogen. Difusi hydrogen berasal dari kandungan air dan zat organic lain yang ada



dalam fluks pembungkus logam las. Adanya difusi hydrogen menyebabkan terjadinya pemisahan komponen penyusun sehingga terjadi stuktur yang tidak homogen yang menurunkan ketangguhannya.

Pada daerah HAZ yang dekat dengan garis lebur, pada daerah ini terjadi siklus termal pemanasan dan pendinginan secara cepat, sehingga butiran kristalnya tumbuh dengan cepat dan membentuk butir-butir kasar pada batas las yang menyebabkan pada daerah ini sifatnya getas.

b. Pengaruh *heat treatment* (annealing)

Adanya suatu perbedaan ketangguhan dalam perambatan retaknya antara specimen yang *diannealing* dengan yang tidak menunjukkan bahwa pengaruh *heat treatment* juga berpengaruh terhadap ketangguhannya. Pada proses *heat treatment* terjadi perubahan ukuran struktur mikro penyusun material baja karbon, ukuran struktur mikro menjadi lebih kecil dan lebih halus dibanding sebelumnya. Semakin kecil ukuran struktur mikro maka jumlah luas permukaan struktur mikro penyusun akan bertambah besar. Luas permukaan struktur mikro berpengaruh terhadap besarnya energi ikat antar struktur, semakin luas permukaan maka semakin besar energi ikatnya, sehingga semakin besar energi luar yang diperlukan untuk melawan energi ikat antar struktur agar struktur dapat terpisah.

Pada proses annealing stuktur mikro akan berubah dari ukuran martensit hingga ke ukuran ferit perlit dari suhu austenit ke suhu kamar.



Ukuran bentuk struktur mikro tergantung dari kecepatan pendinginannya. Pada suhu austenit, struktur mikro akan terpisah dari ikatannya karena berkurangnya energi ikat akibat adanya kenaikan suhu. Pada proses pendinginan struktur mikro akan berubah menjadi martensit, ferit bainit martensit, ferit perlit bainit martensit, hingga ferit perlit tergantung dari kecepatan pendinginannya. Semakin cepat laju pendinginan maka semakin besar ukuran struktur mikro yang terbentuk. Pada proses annealing yang telah dilakukan pendinginan dilakukan secara perlahan yaitu diturunkan secara perlahan dari suhu austenit ke suhu kamar dengan beberapa tahap. Suhu transisi yang berpengaruh besar adalah antara 750°C – 500°C , pada suhu ini ditentukan bagaimana bentuk dan ukuran struktur mikro. Oleh karena itu pada suhu ini dilakukan penurunan suhu secara bertahap yaitu diturunkan tiap 150°C hingga mencapai suhu 450°C . Dengan melakukan pendinginan secara perlahan maka didapatkan ukuran struktur mikro yang lebih kecil daripada sebelumnya sehingga menambah besarnya energi ikat permukaan antar struktur mikro penyusun material baja karbon. Sehingga untuk daerah pengujian yang sama, specimen yang diannealing memiliki ketangguhan yang lebih baik daripada yang tidak diannealing.

c. Persamaan Paris Endorgen



Persamaan Paris Endorgen yang diperoleh dari hasil analisa pada grafik Log da/dN dengan Log dK dapat digunakan untuk mencari nilai pendekatan da/dN tanpa melalui pengujian untuk jenis specimen yang sama. Pemilihan penggunaan persamaan ini karena persamaan Paris Endorgen sangat mudah digunakan karena disamping sederhana juga dapat disajikan dalam bentuk tabel sehingga mudah dalam pembacaan dan mempelajarinya. Dari persamaan ini dapat diketahui berapa besar laju perambatan retaknya (da/dN), sehingga dapat diperkirakan secara matematis apakah suatu konstruksi harus direparasi atau diganti atau masih bisa digunakan sampai waktu tertentu dengan pemantauan secara berkesinambungan dan tentu saja untuk bahan specimen yang sama.

Akan tetapi (dia berkata) : Hendaklah kamu menjadi orang-orang yang Rabhani, karena kamu selalu mengajarkan Al-Qur'an dan disebabkan kamu tetap mempelajarinya. [Ali Imron :79]

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

5.1.1. Dari hasil pengujian rotating bending didapatkan data-data sebagai berikut :

- a. Specimen uji weld metal dengan Annealing
 - Waktu pengujian : 21,1 menit
 - Panjang retak : 1,53 mm
 - Jumlah cycle : 21,1 ribu
- b. Specimen uji weld metal tanpa Annealing
 - Waktu pengujian : 18,25 menit
 - Panjang retak : 1,40 mm
 - Jumlah cycle : 18,25 ribu
- c. Specimen uji HAZ dengan Annealing
 - Waktu pengujian : 10,85 menit
 - Panjang retak : 1,40 mm
 - Jumlah cycle : 10,85 ribu
- d. Specimen uji HAZ tanpa Annealing
 - Waktu pengujian : 8,97 menit
 - Panjang retak : 1,25 mm
 - Jumlah cycle : 8,97 ribu
- e. Specimen uji basemetal dengan Annealing
 - Waktu pengujian : 15,8 menit



- Panjang retak : 1,68 mm

- Jumlah cycle : 15,8 ribu

f. Specimen uji base metal tanpa Annealing

- Waktu pengujian : 14,15 menit

- Panjang retak : 1,55 mm

- Jumlah cycle : 14,15 ribu

Dari data tersebut didapat urutan ketangguhan untuk tiap specimen uji, yaitu :

Base Metal dengan Annealing > Base Metal tanpa Annealing > Weld Metal dengan Annealing > Weld Metal tanpa Annealing > HAZ dengan Annealing > HAZ tanpa Annealing.

- Daerah base metal dengan Annealing adalah daerah yang memiliki ketangguhan yang paling besar jika ditinjau dari laju perambatan retaknya.

- Daerah HAZ tanpa Annealing adalah daerah yang memiliki ketangguhan yang paling rendah jika ditinjau dari laju perambatan retaknya.

- Specimen yang diannealing memiliki ketangguhan yang lebih baik dari yang tidak diannealing untuk daerah pengujian yang sama.

5.1.2. Persamaan linier dari hubungan da/dN dan ΔK dengan cara Paris

Endorgen

Dari grafik hubungan $\text{Log } da/dN$ dengan $\text{Log } \Delta K$ didapatkan persamaan-persamaan sebagai berikut :



a. Weld metal dengan annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,2894 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 16,348$$

$$\frac{da}{dN} = 4,4875 \cdot 10^{-17} (\Delta K_{eq})^{1,2894}$$

b. Weld metal tanpa annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,5845 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,382$$

$$\frac{da}{dN} = 4,1495 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,5845}$$

c. HAZ dengan annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,5239 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 17,905$$

$$\frac{da}{dN} = 1,2445 \cdot 10^{-18} (\Delta K_{eq})^{1,5239}$$

d. HAZ tanpa annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,6258 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 18,587$$

$$\frac{da}{dN} = 2,5882 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,6258}$$

e. Base metal dengan annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,1299 (\text{Log } \Delta K_{eq}) - 15,83$$

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_{eq})^{1,1299}$$

f. Base metal tanpa annealing :

$$\text{Log } da/dN = 1,2118 (\text{Log } \Delta K_I) - 15,83$$

$$\frac{da}{dN} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_I)^{1,2118}$$



5.1.3 Perbandingan besar laju perambatan retak dari persamaan Paris Endorgen pada tiap daerah uji terhadap base metal tanpa diannealing.

Dari grafik didapatkan suatu persamaan pendekatan untuk mendapatkan besar laju perambatan untuk tiap-tiap daerah pengujian. Untuk membandingkan besar laju perambatan retaknya dapat diambil satu nilai yang sama pada harga ΔK_{eq} dari grafik. Misal diambil harga ΔK_{eq} sebesar 7, karena pada grafik menggunakan skala logaritma maka nilai ΔK_{eq} adalah 10 juta, sehingga didapatkan harga da/dN untuk tiap-tiap daerah pangujian sebagai berikut :

- a. Weld metal dengan annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 4,4875 \cdot 10^{-17} (\Delta K_{eq})^{1,2894} = 4,4875 \cdot 10^{-17} (10^7)^{1,2894} \\ &= 4,7622 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

- b. Weld metal tanpa annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 4,1495 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,5845} = 4,1495 \cdot 10^{-19} (10^7)^{1,5845} \\ &= 5,1227 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

- c. HAZ dengan annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 1,2445 \cdot 10^{-18} (\Delta K_{eq})^{1,5239} = 1,2445 \cdot 10^{-18} (10^7)^{1,5239} \\ &= 5,7849 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$



d. HAZ tanpa annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 2,5882 \cdot 10^{-19} (\Delta K_{eq})^{1,6258} = 2,5882 \cdot 10^{-19} (10^7)^{1,6258} \\ &= 6,2172 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

e. Base metal dengan annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_{eq})^{1,1299} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (10^7)^{1,1299} \\ &= 1,2003 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

f. Base metal tanpa annealing

$$\begin{aligned}\frac{da}{dN} &= 1,4791 \cdot 10^{-16} (\Delta K_l)^{1,2118} = 1,4791 \cdot 10^{-16} (10^7)^{1,2118} \\ &= 4,4936 \cdot 10^{-8}\end{aligned}$$

Dari hasil yang didapat dapat diketahui prosentase kenaikan atau penurunan laju perambatan retak terhadap base metal awal sebelum dilakukan pengelasan dan sebelum dilakukan annealing.

a. Weld metal dengan annealing

$$\frac{4,7622 \cdot 10^{-8} - 4,4936 \cdot 10^{-8}}{4,4936 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = 5,9774\% \quad (\text{naik})$$

b. Weld metal tanpa annealing

$$\frac{5,1227 \cdot 10^{-8} - 4,4396 \cdot 10^{-8}}{4,4936 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = 15,3865\% \quad (\text{naik})$$

c. HAZ dengan annealing

$$\frac{5,7849 \cdot 10^{-8} - 4,4936 \cdot 10^{-8}}{4,4936 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = 28,7364\% \quad (\text{naik})$$



d. HAZ tanpa annealing

$$\frac{6,2172 \cdot 10^{-8} - 4,4936 \cdot 10^{-8}}{4,4936 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = 38,3564\% \quad (\text{naik})$$

e. Base metal dengan annealing

$$\frac{1,4791 \cdot 10^{-8} - 4,4936 \cdot 10^{-8}}{4,4936 \cdot 10^{-8}} \times 100\% = -67,0843\% \quad (\text{turun})$$

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan pada tugas akhir ini adalah :

1. Pada saat melakukan pengukuran kedalaman retak, probe pada Crack Depth Meter (CDM) harus ditancapkan pada sisi specimen diantara takik dengan tekanan stabil dan pembacaan kedalaman ditunggu sampai jarum penunjuk benar-benar berada pada kondisi yang stabil.
2. Kalibrasi alat harus dilakukan sebelum dilakukan pengujian untuk setiap specimen.
3. Sebelum dilakukan pengujian, specimen dalam keadaan bersih terutama pada takikan agar tidak timbul korosi.
4. Holding time saat annealing mungkin bisa ditambah karena hasil pengujian menunjukkan pangaruh yang tidak begitu besar.

Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, silih bergantinya malam dan siang, bahtera yang berlayar di laut membawa apa yang berguna bagi manusia, dan apa yang Allah turunkan dari langit berupa air itu, lalu dengan air itu Dia hidupakan bumi sesudah mati (kering)nya dan Dia sebarkan di bumi itu segala jenis hewan, dan pengisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi, sungguh (terdapat, tanda-tanda (keesaan dan kebesaran Allah) bagi kaum yang memikirkan [Al Baqarah : 164]

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson T.L (1991), "*Fracture Mechanics*",CRC
- American Society for Metal, "*METALS HANDBOOK* " , vol. 2, USA
- American Society for Metal, "*METALS HANDBOOK* " , vol. 6, USA
- Broek D (1996), "*Elementary of Fracture Mechanics*", Nijhof publisher, Boston
- Caldarelli F (2000), "*Material Handbook* " springer, London, Great Britain
- Happer C.A (2001), "*Handbook of Material For Product Design*",
McGrawHill,Inc
- JIS (1986), "*Ferrous Material and Metalurgy* " Z 2247, Japan
- Johnson G.S. (1971), "*Welding Technology* " , American Technical Society
- Linnert, (1994), "*Welding Mertalurgy* " , vol.I, AWS
- Popov E.V, (1995), "*Mekanika Teknik*", Erlangga
- Moaveri Saced, "*Finite Element Analysis*"
- Wiryosumarto dkk (1981), "*Teknologi Pengelasan Logam*" , PT Pradnya
Paramita, Cetakan kelima

*Adapun terhadap karunia Tuhanmu, hendaklah
engkau syukuri dan engkau dermakan
[Al Insyirah : 11]*

LAMPIRAN



**LABORATORIUM KONSTRUKSI DAN KEKUATAN
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN**

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Gedung W Lt. 1, Kampus ITS Sukotilo, Surabaya 60111

Telp./Fax. 031 599-4933, HP. 0816 542-8017

REPORT ON TEST RESULT NO. : 03055/PT.12.LK/K/P/2004

DATE : May 24, 2004
 MATERIAL TEST : Forged Steel
 FOR : PROPELLER SHAFT
 TEST NAME : KM. Terun Namito K.04029
 REFERENCE : Biro Klasifikasi Indonesia
 FROM : PT. Dok & Perkapalan
 SURABAYA : Surabaya

TENSILE TEST

VISUAL	SAMPLE SPECIFICATION						TENSILE TEST RESULTS				REMARK
	WIDTH (mm)	THICK (mm)	DIA (mm)	C.S.A (mm ²)	Fu (kN)	Fy (kN)	TENSILE STRENGTH (kgf/mm ²)	YIELD STRENGTH (kgf/mm ²)	ELONGATIO N (%)	REDUCT OF AREA (%)	
GOOD	-	-	14.10	156.07	78.00	47.50	50.98	31.04	19.14	32.90	-
GOOD	-	-	14.00	153.86	77.00	46.00	51.05	30.50	20.00	29.56	-

CHARPY IMPACT TEST

St. Piece Code	LENGTH (mm)	WIDTH (mm)	THICKNESS AT NOTCH (mm)	TEMPERATURE (°C)	ENERGY (JOULE)
1	55.00	10.05	-	29	61.00
2	55.00	10.00	-	29	68.00
3	54.90	10.00	-	29	63.00

CHEMICAL COMPOSITION TEST

Material Test	Fe	C	Mn	P	S	Si	Sn	Al	Alsol	Cr
Propeller Shaft	98.31590	0.24233	0.81873	0.00746	0.01524	0.30859	0.00381	0.02002	0.01510	0.07966
	Cl	Nb	Nb	Ca	Mo	V	Co	B	Pb	Ti
	0.03330	0.10663	0.06253	0.00004	0.01433	0.00083	0.00896	0.00059	0.00127	0.00062
	W	N	CE	0.00435	0.01678	0.45900				

HARDNESS TEST

Material Test	Brinell Hardness Number (BHN)										Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Propeller Shaft	139.0	137.0	148.0	140.0	145.0	149.0	146.0	148.0	155.0	135.0	144.2

Equipment: Hardness Tester "Instron, HT-2000A"

This report is valid only for the specimen tested on the Laboratory of Material Strength and Construction and cannot be used by third parties.

Prepared by,
 Surveyor Class
 Biro Klasifikasi Indonesia

2. Pimpinan Proyek

Head of the Lab.

Dr. Nurdin Gading
 Kepala Bagian QA/QC

Tjatur Pulra

Wing Hendroprasetyo, M.Eng.
 NIP. 132 133 972

Wahyudi

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)

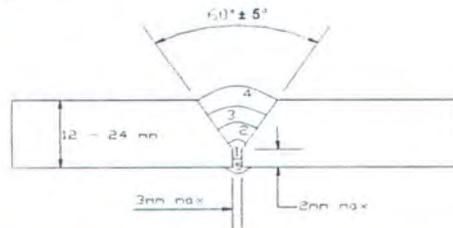
Section IX, ASME Boiler and Pressure Vessel Code

Company Name : DIDIK & WAHYU
 No. : 01-TA/04/05
 Reporting PQR No. : -
 Revision No. : -
 Welding Process(es) : SMAW
 Date : March 31, 2005
 Date : -
 Date : -
 Type(s) : Manual

DESIGN (QW-402)

Design : Butt joint, single V groove
 Filler Material : N/A
 Shielding Material (Type) : N/A
 Metal : () Nonfusing Metal
 Nonmetallic : () Others

Details



BASE METALS (QW-403)

P-No : 1
 Classification Type and Grade : -
 Chem. Analysis and Mech. Prop. : N/A
 Thickness Range :
 Base Metal : Groove : 12 to 24 mm
 Groove Thickness Range : Maximum 24 mm
 Others : N/A
 P-No : 1
 Group No : 1
 Classification Type and Grade : -
 Chem. Analysis and Mech. Prop. : N/A
 Fillet : All
 Fillet : N/A

FILLER METALS (QW-403)

Specification No. (SFA) : 5.1
 AWS No. (Classification) : E 7018 for
 filler and
 root
 : 4
 : 1
 Type of Filler Metals : 2.6 - 4.0 mm
 Base Metal : Groove : Max 24 mm
 : All
 Electrode-Flux (Class) : N/A
 Trade Name : N/A
 Consumable Insert : N/A
 Others : N/A

POSITIONS (QW-405)

Position(s) of Groove : 1 G (Down Hand)
 Welding Progression : See Joint Detail

PREHEAT (QW-406)

Preheat Temperature Min. ($^{\circ}$ C) : N/A
 Interpass Temperature ($^{\circ}$ C) : 50 min - 350 max
 Preheat Maintenance : -

POSTWELD HEAT TREATMENT (QW-407)

Temperature Range (°C) : 600°C s/d 800°C
 Time Range : 1 h s/d 2 h

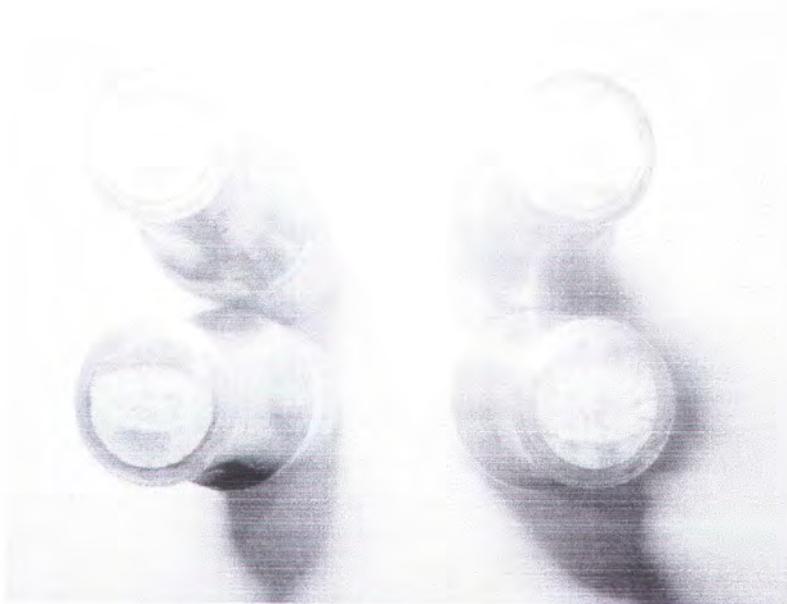
ELECTRICAL CHARACTERISTICS (QW-409)

Current AC or DC : DC
 Polarity : DCEP
 Amperage (range) : 70 – 125 A
 Voltage (range) : 20 – 30 V

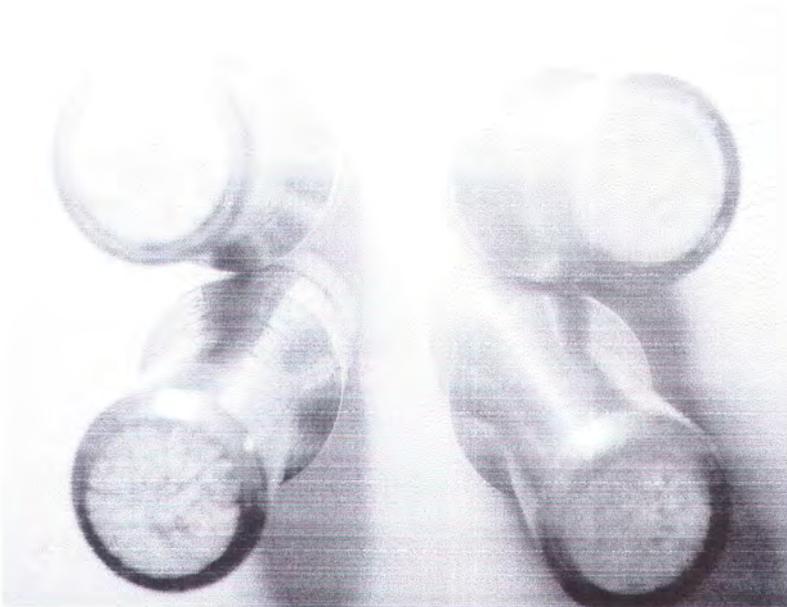
WELDING TECHNIQUE (QW-410)

Welding or Weave Bead : Both
 Electrode or Gas Cup Size : N/A
 Preheat and Interpass Cleaning : Chipping, Brushing and Grinding
 Method of Back Gouging : N/A
 Multiple or Single Pass (per-side) : Multiple
 Multiple or Single Electrodes : Multiple
 Travel Speed : See Below
 Peening : N/A
 Others : N/A

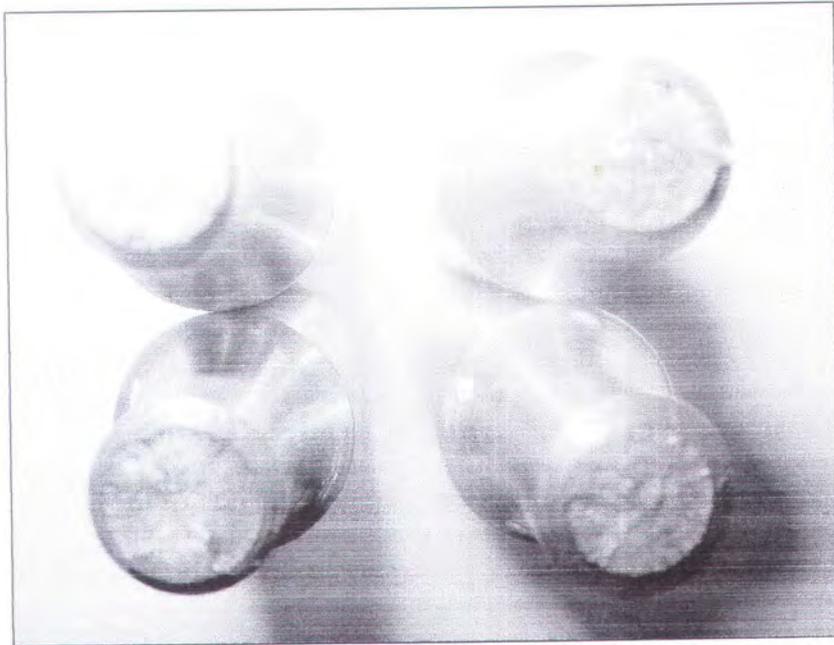
Welding Position	Process	Filler Metal		Current		Voltage Range (V)	Travel Speed Range (mm/min)	Others
		Class	Diameter (mm)	Type of Polarity	Amp. Range			
Horizontal	SMAW	E 7018	3,2	DCEN	.....	20 – 30	.....	N/A
Vertical	SMAW	E 7018	3,2	DCEN	.....	20 – 30	.....	N/A
Overhead	SMAW	E 7018	3,2	DCEN	.....	20 – 30	.....	N/A
Underneath	SMAW	E 7018	3,2	DCEN	.....	20 – 30	.....	N/A
Underneath	SMAW	E 7018	3,2	DCEN	.....	20 – 30	.....	N/A



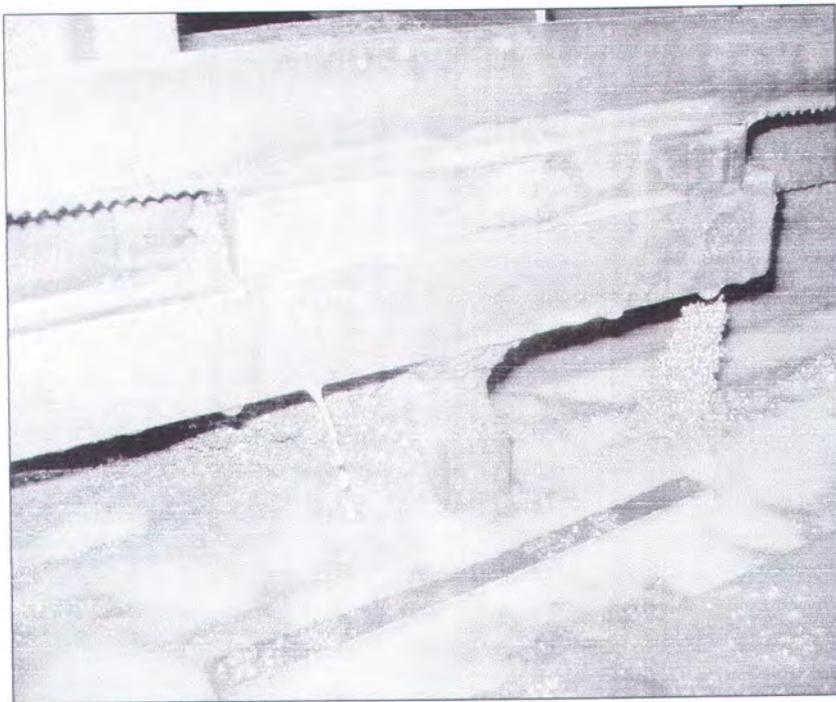
Gambar potongan specimen hasil uji rotating bending daerah HAZ dengan annealing (kiri) dan tanpa annealing (kanan)



Gambar potongan specimen hasil uji rotating bending daerah base metal tanpa annealing (kiri) dan dengan annealing (kanan)



Gambar potongan specimen hasil uji rotating bending daerah weld metal tanpa annealing (kiri) dan dengan annealing (kanan)



Gambar proses pemotongan baja dengan gergaji mesin