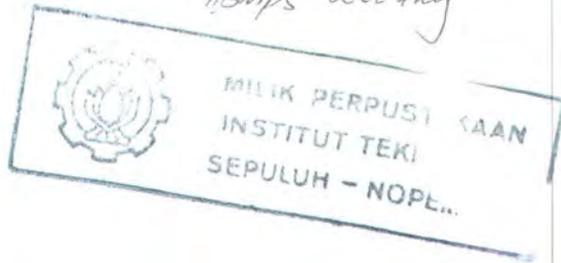


Ships-welding

*Andas-
2710*

3100099010845



TUGAS AKHIR (NA. 1701)

**PENGARUH HEAT INPUT PADA PENGELASAN SAW BAJA
KEKUATAN TINGGI TERHADAP PERAMBATAN RETAK DAN
UMUR LELAH DAERAH HAZ**

*RSPe
623.343 2
Bah
p-1
1997*



PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	25 Nop-97
Terima Oleh	H
No. Agenda Prp.	7678

OLEH :

DIDIK BAHTIAR
NRP. 4191.100.020

**JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1997**



JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS

SURAT KEPUTUSAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

No. : 55 /PT12.FTK2/M/1997

Nama Mahasiswa : Didik Bahtiar.....
 Nomor Pokok : 4191100020.....
 Tanggal diberikan tugas : 16 Maret 1997.....
 Tanggal selesai tugas : 26 Juli 1997.....
 Dosen Pembimbing : 1. Ir. Soewify, M.Eng.....
 2.

Uraian / judul tugas akhir yang diberikan :

PENGARUH MASUKKAN PANAS (HEAT INPUT) PADA PENGELASAN SAW BAJA KEKUATAN TINGGI-
 TERHADAP PERAMBATAN RETAK DAN UMUR LELAH PADA DAERAH PENGARUH PANAS (HAZ)=

sOn

Surabaya, 31 Maret 1997

Jurusan Teknik Perkapalan FTK-ITS



Soesowo Sastro Wiyono
NIP. 150 687 430.

Tembusan :

1. Yth. Dekan FTK-ITS.
2. Yth. Dosen Pembimbing.
3. Arsip.

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH HEAT INPUT PADA PENGELASAN S A W BAJA KEKUATAN
TINGGI TERHADAP PERAMBATAN RETAK DAN UMUR LELAH
DAERAH H A Z

Diajukan sebagai prasyarat memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan,
Institut Teknologi Sepuluh Nopember (I T S) Surabaya

Surabaya, ~~14~~.....Oktober 1997

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing



(Ir. Soeweify, M.Eng)
NIP. 130 368 597

LEMBAR PENGESAHAN
SETELAH DIREVISI

Surabaya, 23 Oktober 1997

Mengetahui / Menyetujui

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Soeweify', with a long horizontal flourish extending to the right.

(Ir. Soeweify, M.Eng)

NIP. 130 368 597

ABSTRAKSI

Sifat mekanis yang terbentuk pada logam hasil pengelasan, sangat dipengaruhi dan tergantung dari distribusi temperatur serta masukan panas (*heat input*) saat proses pengelasan, hal ini terjadi terutama pada daerah HAZ. Daerah ini penting karena pada umumnya adalah bagian terjelek dari semua hasil pengelasan. Pada daerah HAZ, besaran butir dan struktur berubah sesuai siklus thermal yang terjadi saat pengelasan. Adanya perubahan besaran butir dan struktur ini, kemudian diikuti oleh perubahan sifat mekanis pada daerah HAZ. Dan pada akhirnya perubahan /perbedaan besaran butir, struktur serta sifat mekanis yang terjadi akan berpengaruh pada umur lelah dan perambatan retaknya (ASM Metal Handbook vol.10).

Di dalam Tugas Akhir ini mencoba menganalisa, bagaimana dan sejauhmana pengaruh masukan panas (*heat input*) saat proses pengelasan terhadap perambatan retak dan umur lelah daerah HAZ. Untuk itu dilakukan pengelasan pada pelat jenis *medium karbon steel* (S 45 C) dengan menggunakan masukan panas yang berbeda. selanjutnya dilakukan pengujian meliputi : uji tarik, uji kekerasan serta uji fatik dengan posisi takikan (*notch*) pada HAZ.

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi masukan panas, maka nilai kekerasan dan kekuatan tariknya akan semakin besar. Sedangkan perambatan retaknya semakin cepat.

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Alhamdulillah, dengan memanjatkan puji syukur kehadiran Allah SWT, atas segala limpahan rahmat, barokah, serta hidayahnya sehingga kami dapat menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir ini dengan baik.

Tugas Akhir ini berjudul " PENGARUH HEAT INPUT PADA PENGELASAN SAW BAJA KEKUATAN TINGGI TERHADAP PERAMBATAN RETAK DAN UMUR LELAH DAERAH HAZ ". Disusun sebagai salah satu persyaratan dalam menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Dengan selesainya Tugas Akhir ini, kami menyampaikan terima kasih yang sangat banyak kepada :

1. Bapak, Ibu dan Saudara-saudaraku yang telah banyak memberikan dukungan baik moril maupun materiil hingga terselesaikannya penulisan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Ir. Soewefy, M.Eng selaku Dosen Pembimbing yang telah memberi kan bimbingan dan arahan pada penyusunan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir. Koestowo SW dan Ir. Andjar S. selaku Kepala Jurusan Teknik Perkapalan dan sekretaris Jurusan Teknik Perkapalan FTK -ITS.
4. Bapak Ir. Mahardjo W. selaku Dosen Wali yang telah banyak membantu dalam bidang akademis dan non akademis selama kami melaksanakan kuliah.
5. Seluruh Pimpinan dan Karyawan laboratorium Konstruksi dan Produksi FTK-ITS, antara lain : Bapak Ir. P. Andrianto, Ir. Herri Soepomo, M.Sc, Pak hardiman, Pak Mudjito, Pak Naryo, Mas Didik , yang telah banyak membantu dalam pembuatan spesimen dan pelaksanaan pengujian.

6. Staf Laboratorium Komputasi FTK-ITS yang telah memberikan pelayanan dengan baik selama kami menyusun Tugas Akhir ini.
7. Teman-temanku di Jurusan Teknik Perkapalan ITS yang memberikan dukungan semangat dan moril.
8. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam pengerjaan tulisan ini, yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Dalam menyusun tulisan ini, penulis telah berusaha sebaik-baiknya, namun karena terbatasnya waktu serta kemampuan, maka kami sadar bahwa tulisan ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu penulis mengharapkan bimbingan, kritik dan saran dari semua pihak demi pengembangan pengetahuan dan penelitian selanjutnya. Akhirnya penulis berharap semoga tulisan ini dapat berguna bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Surabaya, Oktober 1997

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak	i
Kata Pengantar	ii
Daftar Isi	iv
Daftar Gambar	vii
Daftar Tabel	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Tinjauan Umum	1
1.2. Latar Belakang Masalah	1
1.3. Tujuan Penulisan	3
1.4. Batasan Masalah	4
1.5. Metodologi Penelitian	4
BAB II PENGELASAN SAW	
2.1. Prinsip Las Busur Rendam (SAW)	6
2.2. Peralatan Busur Rendam (SAW)	8
2.2.1. Fluks	9
2.2.2. Elektrode	11
2.2.3. Mesin Las & Sumber Tenaga SAW	12
2.3. Kondisi Pengelasan	13
2.3.1. Arus Pengelasan	14
2.3.2. Tegangan Busur	14
2.3.3. Kecepatan Pengelasan	15
2.3.4. Polaritas Pengelasan	15
2.3.5. Diameter Elektrode	15
2.3.6. Sudut Elektrode	16
2.3.7. Ketebalan Fluks	17
2.4. Persiapan Sambungan	18
2.5. Metalurgi Pengelasan	18
2.5.1. Tinjauan Umum	18

2.5.2. Daerah Pengelasan	20
2.5.3. Siklus Thermal Pengelasan	21
2.5.4. Struktur Mikro Daerah HAZ	23
2.5.5. Masukan Panas (Heat Input)	28
2.5.5.1. Pengukuran Heat Input	30

BAB III KELELAHAN SEBAGAI KEGAGALAN STRUKTUR

3.1. Pendahuluan	32
3.2. Terjadinya Kelelahan	33
3.2.1. Penggelinciran Berulang	34
3.2.2. Retak Inti	34
3.2.3. Pertumbuhan Retak Mikro	35
3.2.4. Pertumbuhan Retak Makro	36
3.2.5. Kegagalan Akhir	37
3.3. Mekanika Kepecahan Elastis Linear (LEFM)	37
3.3.1. Analisa Tegangan Di Ujung Retak	38
3.3.2. Plastisitas Ujung Retak	42
3.3.3. Faktor Intensitas Tegangan	43
3.4. Umur Lelah (Fatigue Life)	45
3.4.1. Pengaruh Parameter Pengelasan	46
3.4.2. Perkiraan Umur Lelah	48

BAB IV PERCOBAAN

4.1. Material Uji	51
4.2. Pengelasan	51
4.2.1. Persiapan	51
4.2.2. Pelaksanaan Pengelasan	52
4.3. Pengujian	55
4.3.1. Makro Etsa	56
4.3.2. Pengujian Tarik	57
4.3.2.1. Pembuatan Spesimen	57
4.3.2.2. Pelaksanaan Pengujian Tarik	58

4.3.3. Pengujian Kekerasan (Brinell)	60
4.3.3.1 Pembuatan Spesimen	61
4.3.3.2 Pelaksanaan Pengujian Kekerasan	62
4.3.4. Pengujian Fatik	63
4.3.4.1 Pembuatan Spesimen	64
4.3.4.2 Pelaksanaan Pengujian Fatik	65
BAB V ANALISA DAN PENGOLAHAN DATA	
5.1 Pendahuluan	68
5.2 Hasil Uji Tarik	68
5.2.1 Analisa Hasil Uji Tarik	71
5.3 Hasil Uji Kekerasan	71
5.3.1. Analisa Hasil Uji Kekerasan	76
5.4 Hasil Uji Fatik	77
5.4.1. Pengolahan Data hasil Pengujian	79
5.4.2. Analisa Laju Perambatan Retak	86
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1. Kesimpulan	87
6.2. Saran	88
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema pengelasan busur rendam	7
Gambar 2.2.	Hubungan kecepatan pemindahan logam las dengan arus pengelasan SAW	8
Gambar 2.3.	Mesin las busur rendam	13
Gambar 2.4.	Pengaruh arus las terhadap bentuk manik las	16
Gambar 2.5.	Pengaruh tegangan busur terhadap bentuk manik las	16
Gambar 2.6.	Pengaruh kecepatan pengelasan terhadap bentuk manik las	17
Gambar 2.7.	Hubungan antara kemiringan sudut elektrode dengan bentuk manik las	17
Gambar 2.8.	Siklus thermal dengan kondisi pengelasan yang berbeda	20
Gambar 2.9.	Siklus thermal pada beberapa lokasi daerah pengelasan	22
Gambar 2.10	Skema struktur mikro daerah HAZ	24
Gambar 2.11	Diagram pendinginan kontinyu (CCT Diagram)	25
Gambar 2.12	Daerah-daerah yang terpengaruh panas	26
Gambar 3.1	S-N Diagram	32
Gambar 3.2.	Retak kecil yang digambarkan lebih awal dari usia kelelahannya	36
Gambar 3.3	Mode dasar bukaan permukaan retak	38
Gambar 3.4	Distribusi tegangan elastis dekat ujung retak (mode I)	41
Gambar 3.5.	Daerah plastis di ujung retak	42
Gambar 3.6	Gometri retak tepi	45
Gambar 4.1	Bentuk kampuh las	51
Gambar 4.2	Posisi pelat dengan klem penjepit	54
Gambar 4.3	Pembagian pelat untuk pembuatan spesimen	55
Gambar 4.4	Spesimen uji tarik ASTM E8	57

Gambar 4.5	Spesimen uji kekerasan	62
Gambar 4.6	Spesimen uji fatik ASTM E466-82	64
Gambar 5.1	Grafik hasil uji tarik	70
Gambar 5.2	Jarak dan posisi pengujian kekerasan	72
Gambar 5.3	Grafik hasil uji kekerasan	75
Gambar 5.4	Grafik laju perambatan retak spesimen III	83
Gambar 5.5	Grafik laju perambatan retak spesimen II	84
Gambar 5.6	Grafik laju perambatan retak spesimen III & II	85

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Spesifikasi kawat las SAW (JIS Z 3311- 1964)	11
Tabel 2.2 Spesifikasi kawat las SAW (AWS A5.17 - 1976)	11
Tabel 2.3 Hubungan diameter kawat dengan besarnya arus	12
Tabel 2.4 Perkiraan waktu pendinginan pada beberapa las busur	23
Tabel 2.5 Sifat konduktor dari beberapa jenis logam	29
Tabel 4.1 Parameter pengelasan	53
Tabel 4.2 Hasil uji tarik material induk	60
Tabel 5.1 Hasil uji tarik material dengan perbedaan heat input pengelasan	69
Tabel 5.2 Hasil uji kekerasan material dengan perbedaan heat input pengelasan	73
Tabel 5.3 Data hasil pengujian fatik	78
Tabel 5.4 Penentuan harga da/dN	79
Tabel 5.5 Perhitungan rentang Faktor Intensitas Tegangan	81
Tabel 5.6 Data grafik laju perambatan retak	82

BAB I

PENDAHULUAN

I.1 TINJAUAN UMUM

Perkembangan teknologi pengelasan berkembang dengan pesat pada akhir abad ke-19, penggunaan teknik-teknik pengelasan seperti las busur, las resistansi listrik, las termit dan las gas telah banyak diterapkan dalam bidang konstruksi. Lingkup penggunaan teknik pengelasan dalam bidang konstruksipun sangat luas, baik konstruksi bangunan baja maupun konstruksi mesin yaitu meliputi perkapalan, jembatan, rangka baja, bejana tekan, pipa pesat, pipa saluran, kendaraan rel dan lain-lain.

Luasnya penggunaan teknologi pengelasan ini disebabkan karena bangunan dan mesin yang dibuat dengan mempergunakan teknologi penyambungan ini menjadi relatif lebih ringan dan proses pembuatannya juga lebih sederhana, sehingga biaya keseluruhannya menjadi relatif lebih murah dari teknik penyambungan yang lain.

I. 2 LATAR BELAKANG MASALAH

Jenis pengelasan yang banyak dilakukan terutama dalam bidang konstruksi adalah las busur listrik. Las inipun banyak macamnya salah satunya adalah Las Busur Rendam (*Submerged Arc welding*) atau disebut juga las busur otomatis, karena pengumpanan dan jalannya elektrode (*filler material*) semuanya dikendalikan secara otomatis, sehingga tidak membutuhkan ketrampilan yang tinggi dari operatornya seperti pada pengelasan manual (SMAW). Disamping itu hasil pengelasannya baik (*high quality*) serta penetrasinyapun cukup dalam. Secara umum dapat dikatakan bahwa las SAW lebih baik dibandingkan las busur lainnya.

Pengelasan SAW menggunakan masukan panas (*Heat Input*) yang tinggi, hal ini dapat dilihat terutama pada penggunaan parameter arus pengelasan (*ampere*) yang tinggi sehingga penetrasinyapun cukup dalam. Di dalam prakteknya dan juga beberapa standar pengelasan yang ada, pemilihan masukan panas ini sangat beragam dan bervariasi untuk pengelasan dengan ketebalan pelat yang sama, tergantung seberapa dalam penetrasi yang diinginkan. Karena masukan panas tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa parameter pengelasan yaitu : Arus pengelasan, tegangan busur dan kecepatan pengelasan. Sehingga kemungkinan untuk memvariasikan ketiga parameter dapat dilakukan. Dengan adanya perbedaan kondisi pengelasan (masukan panas yang berbeda) maka hal ini akan berpengaruh terhadap siklus thermal serta pada akhirnya kecepatan pendinginannyapun berbeda. Penggunaan masukan panas yang tinggi akan memperlambat proses pendinginan (kecepatan pendinginan yang rendah) dan sebaliknya penggunaan masukan panas yang rendah akan mempercepat proses pendinginan. Kecepatan pendinginan dalam suatu proses metalurgi sangatlah penting karena akan menentukan struktur akhir suatu material. Hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro yang terbentuk biasanya digambarkan dalam diagram yang menghubungkan waktu, suhu dan transformasi (*Continuous Cooling transformation*).

Struktur mikro yang terbentuk tergantung dari kecepatan pendinginan dari suhu daerah Austenit sampai suhu kamar. Bila kecepatan pendinginannya naik berarti waktu pendinginan dari suhu austenit turun, struktur akhir yang terjadi berubah dari campuran ferit-perlit kecampuran ferit-perlit-bainit-martensit, ferit-bainit-martensit, kemudian bainit-martensit dan akhirnya pada kecepatan pendinginan yang tinggi sekali struktur akhirnya adalah martensit.

Pada proses pengelasan, daerah pengaruh panas (*Heat Affected Zone*) menjadi perhatian utama. Karena dalam hal ini daerah yang paling berpengaruh terhadap panas pengelasan dan kecepatan pendinginan. Daerah HAZ adalah merupakan daerah pada logam induk yang bersebelahan dengan logam las, dimana selama proses pengelasan mengalami siklus thermal dan pendinginan secara cepat sehingga strukturnya berubah. Daerah ini menjadi perhatian dan penting karena umumnya adalah merupakan bagian terjelek dari semua hasil pengelasan. Karena adanya perbedaan struktur inilah maka dengan sendirinya sifat-sifat mekanik yang dimilikinya juga berbeda. Disamping itu ternyata besaran butir dan struktur mikro berpengaruh juga terhadap perambatan retak dan umur lelah (ASM " Metal Handbook vol 10. Failure analysis And Prevention).

Setelah melihat permasalahan yang ada dan dasar teori di atas maka penulis ingin mencoba mengetahui sejauh mana hubungan atau pengaruh masukan panas (*Heat Input*) pada pengelasan terhadap perambatan retak dan umur lelah dari suatu material. Adapun jenis pengelasan yang dipilih adalah las SAW dengan tujuan untuk mendapatkan hasil pengelasan yang baik dan mempermudah dalam mengatur besarnya parameter pengelasan yang diinginkan terutama kecepatan pengelasan. Sedangkan material yang dipilih adalah jenis baja kekuatan tinggi dengan kadar karbon menengah dimana jenis baja ini pada daerah HAZ mudah menjadi keras karena panas pengelasan.

I.3 TUJUAN PENULISAN

Adapun tujuan penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Mengetahui sifat mekanik yang terbentuk (kekuatan tarik, kekerasan,) pada pengelasan SAW dengan variasi besarnya masukan panas (*heat input*).

2. Mengetahui hubungan atau pengaruh perambatan retak dan umur lelah pada pengelasan SAW dengan variasi besarnya masukan panas.

I.4 BATASAN MASALAH

- Jenis pengelasan SAW dengan sambungan adalah tumpul.
- Menggunakan 1 macam ketebalan pelat dengan jenis baja kekuatan tinggi
- Pengamatan dan penelitian dilakukan pada daerah HAZ
- Dalam pengujian fatik, jenis beban yang digunakan adalah beban dinamis aksial dengan amplitudo konstan.
- Beban yang bekerja, besarnya ditentukan berdasarkan *yield stress* dan *ultimat stress* material model sambungan yang dipakai dalam percobaan dan masih dalam batas elastisitas.

I.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian yang dipakai dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Studi Literatur

Mempelajari dan menggunakan literatur atau konsep dasar yang mendukung pembahasan masalah dalam Tugas Akhir ini.

2. Percobaan Dan Analisa

Di dalam metode ini akan dilakukan persiapan material untuk pengelasan, pelaksanaan pengelasan pengujian dan analisa hasil pengelasan. Dan secara rincinya adalah sebagai berikut :

Persiapan material :

1. Pemilihan dan pengadaan material.
2. Menyediakan 3 buah pelat uji dengan ketebalan yang sama.
3. Persiapan sisi untuk proses pengelasan.

Pelaksanaan pengelasan

1. Menggunakan jenis las SAW dengan sambungan tumpul.
2. Melakukan pengelasan dengan masukan panas (*Heat Input*) yang berbeda untuk tiap pelat uji.

Pengujian dan analisa

1. Memeriksa hasil pengelasan, cacat permukaan dan mengukur tinggi manik las.
2. Membuat spesimen uji (uji tarik, uji impact, uji kekerasan dan uji fatik) pada tiap pelat uji.
3. Pelaksanaan pengujian (uji tarik, uji impact, uji kekrasan dan uji fatik).
4. Analisa dan pembahasan pengujian.

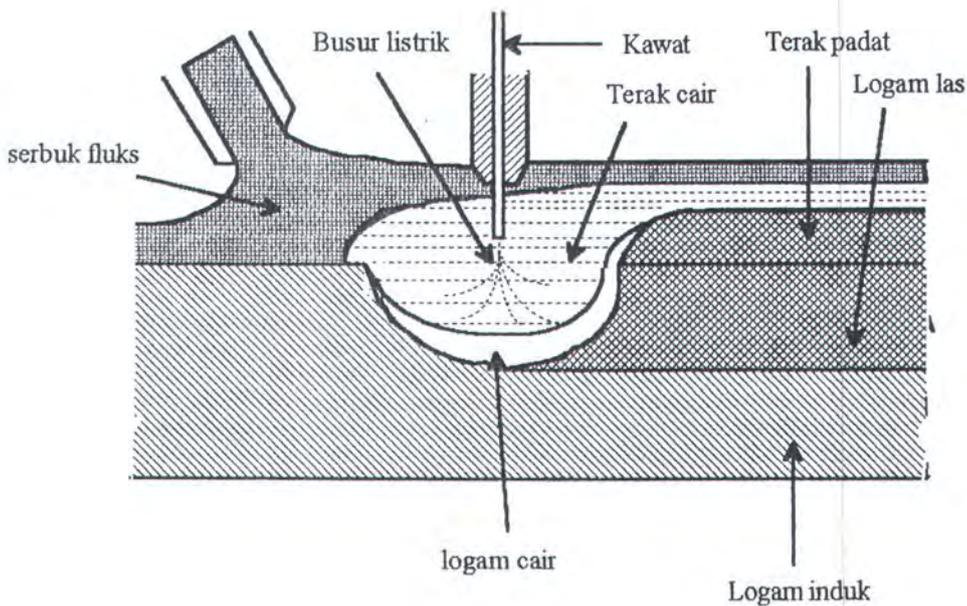
BAB II

PENGELASAN SAW

2.1. PRINSIP LAS BUSUR RENDAM (*SUBMERGE ARC WELDING*)

Proses pengelasan busur rendam adalah suatu proses pengelasan logam dengan menggunakan panas yang ditimbulkan oleh busur listrik antara kawat elektrode yang tidak terbungkus dengan logam yang akan disambung. Prinsip pengelasan dengan cara ini dimulai dari timbulnya busur las yang diakibatkan dari loncatan elektron antara elektrode dengan base metal, kemudian meleleh dan terbawa arus listrik ke base metal dalam waktu yang terus-menerus. Selama proses pengelasan berlangsung busur las dan logam cair pada kawah las diberi pelindung yang berupa serbuk berbentuk granular yang disebut fluks. Fluks berfungsi sebagai pelindung logam cair dari kontaminasi dengan udara luar agar hasil lasan baik. Karena mempunyai berat lebih ringan dari deposit metal maka fluks mengapung ke atas dan kemudian berfungsi melindungi kawah las yang terjadi. Pada proses pengelasan ini tidak terlihat adanya flash atau percikan bunga api seperti pada *open arc welding*. Dari fluks hanya terlihat asap yang kecil selama pengelasan berlangsung.

Melihat keadaan peralatan dan yang dilaksanakan, kemampuan pengelasan dengan cara ini adalah terbatas. Cara pengelasan ini hanya dapat digunakan pada pengelasan dengan posisi datar baik *butt joint* maupun *fillet joint*. Hal ini disebabkan karena logam cair yang terjadi pada proses ini sangat cair dan slag yang terjadi juga terlalu cair sehingga mudah keluar dari tempat kawah las bila bukan pada posisi datar (*down hand*). Skema dari pengelasan SAW dapat dilihat pada gambar 2.1



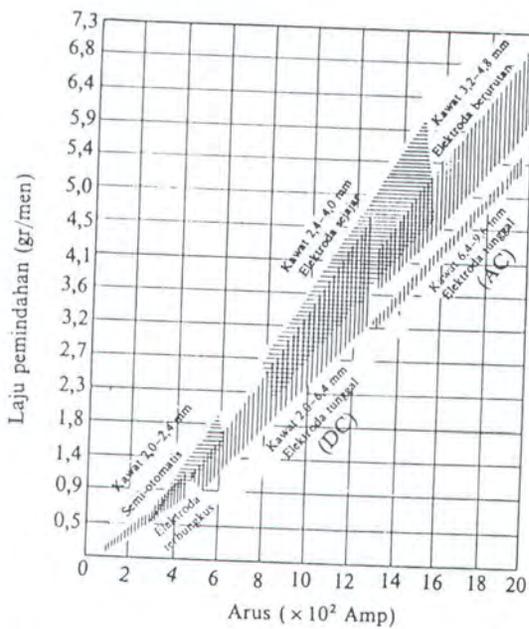
Gambar 2.1 Skema pengelasan busur rendam

Hal-hal yang penting dalam pengelasan ini adalah sebagai berikut :

1. Karena seluruh cairan tertutup oleh fluks maka kualitas daerah las sangat baik.
2. Karena dapat digunakan kawat las yang besar, maka arus pengelasan juga besar sehingga penetrasi cukup dalam dan efisiensi pengelasan tinggi.
3. Karena kampuh las dapat dibuat kecil, maka bahan las dapat dihemat.
4. Karena penetrasinya yang cukup dalam, sehingga dapat mengelas baja sampai ketebalan 1.5 cm dengan tanpa *groove*.
5. Karena prosesnya secara otomatis maka tidak perlu ketrampilan juru las (operator) yang tinggi, tetapi perubahan-perubahan teknik pengelasan yang dilakukan oleh juru las akan banyak pengaruhnya terhadap kualitas hasil lasan.
6. Karena busur yang tidak kelihatan, maka penentuan pengelasan yang salah dapat menggagalkan seluruh hasil pengelasan.
7. Posisi pengelasan terbatas hanya pada posisi horizontal.

8. Karena prosesnya otomatis, maka penggunaannya hanya terbatas bila dibandingkan dengan las tangan atau las semi otomatis.

Dari hal-hal seperti tersebut di atas keadaan yang paling menguntungkan dalam pengelasan ini adalah besarnya arus yang dapat digunakan. Bila menggunakan elektrode dalam waktu bersamaan, arus las dapat dinaikkan sampai kira-kira 3000 ampere. Hubungan antara efisiensi dan arus dalam pengelasan SAW ditunjukkan dalam gambar 2.2



Gambar 2.2 Hubungan kecepatan pemindahan logam las dengan arus pengelasan dalam las busur rendam (SAW)

2.2. PERALATAN LAS BUSUR RENDAM (SAW)

Peralatan yang digunakan dalam las SAW adalah :

1. Fluks yang digunakan
2. Kawat elektrode dan sistim pengaturannya.
3. Sumber tenaga yang digunakan.
4. Mesin las SAW.

2.2.1. FLUKS

Fluks adalah serbuk yang berbentuk granular yang digunakan sebagai pelindung logam las yang mencair dari kontaminasi dengan udara luar, agar hasil las baik. Ada 2 macam jenis fluks yaitu jenis leburan dan jenis ikatan. Jenis leburan dibuat dari bijih yang dicairkan dahulu kemudian ditumbuk. Fluks jenis ini tidak mengandung unsur-unsur paduan yang dapat masuk ke dalam logam cair, sehingga kawat las yang digunakan harus sudah mengandung unsur paduan yang diperlukan.

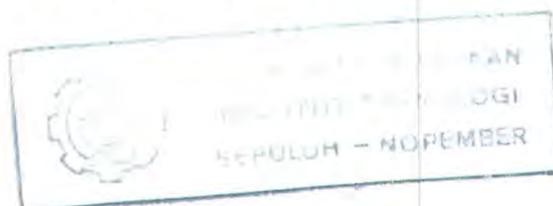
Jenis fluks ikatan dibuat dari bijih dan serbuk paduan yang dicampur dengan natrium silikat dan dijadikan adonan, kemudian dibakar pada suhu rendah sehingga tidak terjadi leburan. Unsur-unsur deoksidasi ditambahkan bersama-sama dengan unsur-unsur paduan yang diperlukan untuk menjaga kualitas hasil pengelasan.

Bila dibandingkan dengan jenis leburan, penetrasi dari jenis ikatan lebih dangkal dan manik las yang terbentuk menjadi lebih besar. Pemilihan macam-macam fluks harus sesuai dengan elektrode yang digunakan. Di dalam fluks mengandung beberapa unsur kimia antara lain :

- | | |
|--------------|---------------------------------|
| 1. Mangan | 5. Calcium |
| 2. Silikon | 6. Magnesium |
| 3. Aluminium | 7. Titanium |
| 4. Zirconium | 8. Unsur-unsur campuran lainnya |

Pemilihan fluks dan elektrode yang tepat akan memberikan beberapa kebaikan pada hasil lasan antara lain :

- Tahan terhadap cracking
- Tahan terhadap karat
- Tahan terhadap porositas



Fluks yang mencair harus mempunyai kekentalan yang cukup sesuai dengan fungsinya yaitu untuk menghindari tertembusnya las-lasan oleh udara, disamping itu juga sebagai penahan mengalirnya logam las ke suhu busur (*arc*). Tetapi selama pengelasan harus cukup mencair untuk memberikan kesempatan gas-gas yang terbentuk agar dapat membebaskan diri.

Pemakaian fluks yang terpenting adalah :

1. Fluks harus tahan terhadap temperatur tinggi.
2. Fluks harus uniform.
3. Harus dihindari dari penggumpalan.
4. Fluks harus dalam keadaan kering.

Di bawah ini, terdapat beberapa jenis fluks yang distandarkan menurut JIS :

1. G - 50, YF - 40 : adalah jenis fluks leburan, banyak mengandung MnO, mempunyai sifat mampu las, tidak merusak komposisi logam cair dan sambungan las yang dihasilkan tidak mudah karata. Banyak dipakai untuk pengelasan kecepatan tinggi pada pelat-pelat tipis, tetapi tidak dapat digunakan untuk arus las yang tinggi.
2. MF - 38 : adalah fluks jenis leburan, dapat digunakan dengan bermacam-macam jenis kawat untuk pengelasan lapis tunggal, lapis banyak dan las sudut untuk baja lunak dan baja kuat. Hasil las-lasan baik dalam uji radiografi dan uji tumbuk.
3. Yf - 15 : adalah fluks jenis leburan untuk pengelasan baja lunak dan baja kuat dalam konstruksi-konstruksi berat, dimana uji tumbuk merupakan persyaratan penting.
4. PFH - 45 : adalah fluks jenis ikatan untuk pengelasan baja lunak, cukup baik untuk pengelasan lapis tunggal 2 sisi dari penyambungan pelat baja tebal, tetapi sedikit digunakan dalam pengelasan lapis banyak dengan arus tinggi.

2.2.2. ELEKTRODE

Komposisi kimia elektrode / kawat las akan menentukan komposisi kimia hasil las-lasan. Komposisi kimia dari beberapa elektrode yang distandarkan menurut JIS ditunjukkan dalam tabel 2.1 dan berdasarkan AWS dalam tabel 2.2 .

Elektrode untuk pengelasan SAW dapat berbentuk kawat atau pita, tergantung pada keperluannya dan dikemas dalam gulungan. Besar kecilnya gulungan tergantung dari besar kecilnya elektrode. Elektrode atau kawat las tersebut biasanya dibuat dengan diameter 2.4 , 3.2 , 4.0 , 4.5 , 5.6 , 6.4 dan 8.0 mm. Tetapi berdasarkan efisiensi pengelasan, elektrode yang banyak digunakan adalah kawat dengan diameter 4.0 sampai 6.4 mm. Hubungan antara besarnya arus yang diijinkan dan ukuran kawat ditunjukkan dalam tabel 2.3

Klasifikasi	Komposisi Kimia Kawat Las (%)				
	C	Si	Mn	P	S
SAW 11	≤0,10	≤0,05	0,20-0,80	≤0,030	≤0,030
SAW 21					
SAW 22	≤0,13	0,05-0,25	0,80-1,30	≤0,030	≤0,030
SAW 23					
SAW 31	≤0,15	≤0,05	1,30-1,80	≤0,030	≤0,030
SAW 32					
SAW 41	≤0,17	≤0,05	0,80-2,20	≤0,030	≤0,030

Tabel 2.1 Spesifikasi kawat las SAW (JIS Z 3311 - 1964)

Klasifikasi	Komposisi Kimia Kawat Las (%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Lainnya
EL 8	≤0,10	≤0,05	0,30-0,55	≤0,03	≤0,035	≤0,3	≤0,50
EL 8K		0,10-0,20					
EL 12	0,07-0,15	≤0,05	0,35-0,60	≤0,03	≤0,035	≤0,3	≤0,50
EM 5K ¹⁾	≤0,06	0,40-0,70	0,90-1,40				
EM 12	0,07-0,15	≤0,05	0,85-1,25	≤0,03	≤0,035	≤0,3	≤0,50
EM 12K		0,15-0,35					
EM 13M	0,07-0,19	0,45-0,70	0,90-1,40	≤0,03	≤0,035	≤0,3	≤0,50
EM 15K	0,12-0,20	0,15-0,35	0,85-1,25				
EH 14	0,10-0,18	≤0,05	1,75-2,25	≤0,03	≤0,035	≤0,3	≤0,50

¹⁾ EM 5K mengandung 0,05-0,15% Ti, 0,02-0,12% Zr, 0,05-0,15% Al, sedang yang lainnya tidak.

Tabel 2.2 Spesifikasi kawat las SAW (AWS A.517 - 1976)

Diameter kawat (mm)	1,2	1,6	2,0	2,3	3,2	4,0	4,8	6,4	7,9
Arus las (Amp.)	<280	200 -350	300 -500	350 -600	400 -800	450 -1000	500 -1500	700 -1800	>1000

Tabel 2.3 Hubungan diameter kawat dan besar dan besarnya arus

2.2.3. MESIN LAS DAN SUMBER TENAGA SAW

Jenis mesin las SAW bermacam-macam salah satunya ditunjukkan dalam gambar 2.3. Pada mesin las jenis ini kepala las dibawa oleh kereta yang berjalan melalui rel penuntun sepanjang garis las. Fluks yang diperlukan diumpankan melalui pipa penyalur dari penampungan fluks yang terletak di atas kereta. Biasanya mesin las ini menggunakan 1 elektrode saja, tetapi pada mesin las jenis lain untuk memperbaiki efisiensi pengelasan kadang-kadang menggunakan 2 atau 3 elektrode.

Mesin las SAW dapat menggunakan sumber listrik arus bolak-balik (AC) yang lamban atau arus searah (DC) dengan tegangan tetap. Yang terpenting sumber tenaga tersebut harus menghasilkan arus listrik yang kontinyu agar busur listrik yang dihasilkan menjadi konstan.

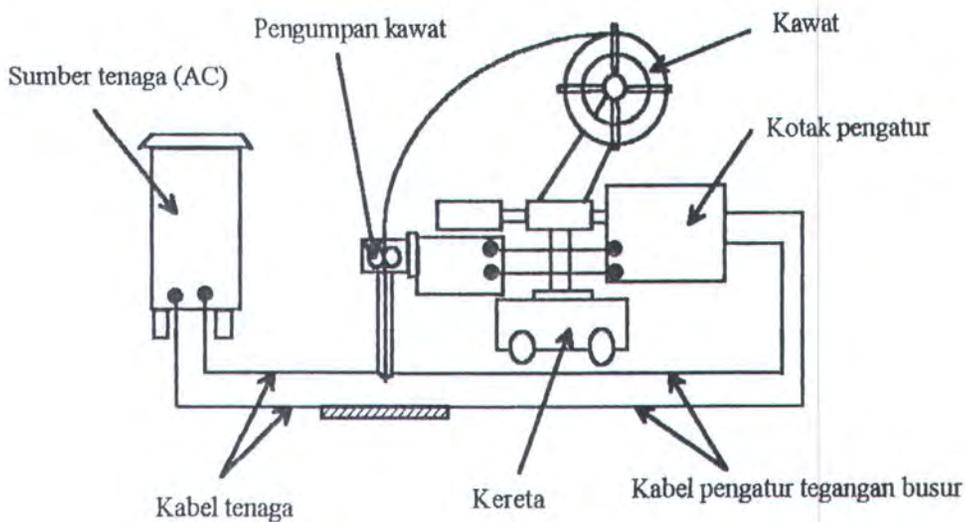
1. Generator dan transformator rectifier untuk memperoleh output arus searah (DC).

2. Transformator untuk output arus bolak-balik (AC).

Kedua sumber tenaga tersebut menghasilkan produk yang baik, tetapi masing-masing mempunyai kekhususan dalam pemakaiannya tergantung tinggi rendahnya arus, besar kecilnya kawat elektrode dan kecepatan dalam pengelasan.

Bila menggunakan listrik bolak-balik (AC) perlu adanya pengaturan kecepatan pengumpanan kawat las yang dapat diubah-ubah untuk mendapatkan panjang busur yang diperlukan. Hal ini dapat diatur dengan mengukur tegangan busur yang kemudian dipakai dasar untuk menentukan kecepatan pengumpanan kawat.

Bila menggunakan listrik searah (DC) dengan tegangan tetap, kecepatan pengumpanan dapat dibuat tetap dan biasanya memakai polaritas balik. Mesin las DC kadang-kadang digunakan untuk mengelas pelat tipis dengan kecepatan tinggi atau untuk mengelas dengan elektrode lebih dari satu.



Gambar 2.3 Mesin Las Busur rendam

2.3. KONDISI PENGELASAN

Bentuk manik dan sifat lasan sangat dipengaruhi oleh kondisi pengelasan. Dalam las SAW daerah penggunaan arusnya sangat luas sekali, sehingga pengaturan parameter-parameter pengelasannya harus tepat dan sesuai penggunaan. Sehingga

kemungkinan timbulnya cacat (*defect*) akibat pengelasan seperti cracking, porositas, undercut, dapat dihindari. Kondisi pengelasan juga berpengaruh pada ukuran dan bentuk dari manik las (*bead*), serta kedalaman penetrasi kadangkala berpengaruh pada komposisi kimia dari logam las.

2.3.1. ARUS PENGELASAN

Arus las memberikan pengaruh yang besar pada penembusan (*penetrasi*) dan penguatan. Arus yang terlalu kecil akan menghasilkan penembusan dan penguatan yang rendah. Tetapi bila arus terlalu besar akan menghasilkan manik las berbentuk seperti buah pir dan akan mudah terjadi retak panas. Bahkan arus yang terlalu besar kadang-kadang menyebabkan jebolnya sambungan (*burnthrough*). Gambar 2.4 menunjukkan pengaruh penggunaan besarnya arus las terhadap bentuk manik las.

2.3.2. TEGANGAN BUSUR

Tegangan busur las akan menentukan bentuk leburan (*fusi*). Pertambahan tegangan busur akan membuat lebar las (*bead*) bertambah rata dan lebar yang dapat menyebabkan terjadinya retak tegang, serta penggunaan fluks juga akan bertambah. Disamping itu tegangan yang terlalu tinggi akan merusak penutupan logam las oleh cairan fluks yang dapat memberikan peluang kontak dengan udara luar, sehingga menyebabkan terjadinya porositas. Pengaruh kenaikan tegangan busur terhadap penetrasi dan bentuk manik ditunjukkan dalam gambar 2.5

2.3.3 KECEPATAN PENGELASAN

Kecepatan pengelasan adalah parameter yang penting dalam proses pengelasan SAW, karena akan menentukan jumlah produk dan metalurgi lasnya. Penambahan kecepatan akan mengurangi masukan panas (*heat input*), menurunkan lebar manik, meningkatkan kemungkinan terjadinya porositas. Bahkan bila kecepatan terlalu tinggi akan mengakibatkan terjadinya undercut, irregular bead, dan bentuk manik manik yang cekung dan takik. Pengaruh kecepatan pengelasan terhadap bentuk manik las dapat dilihat pada gambar 2.6

2.3.4. POLARITAS PENGELASAN

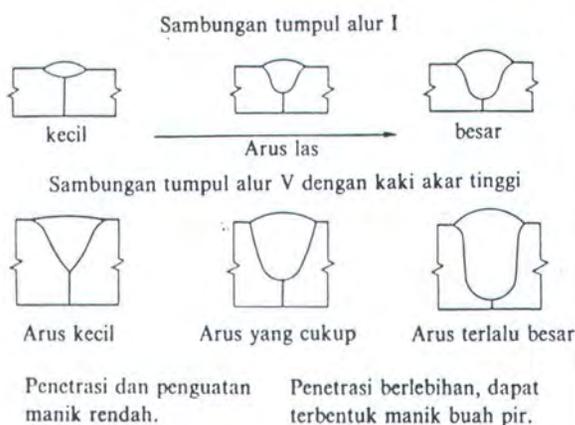
Penetrasi yang baik biasanya dapat dicapai dengan las jenis DCEP (*Direct Current Electrode Positive*) yang juga menghasilkan permukaan yang baik dan ketahanan terhadap porositas. Sedangkan pada DCEN (*Direct Current Electrode Negative*) menyebabkan busur las cepat padam sehingga mengurangi penetrasi. Karena alasan ini DCEN sering digunakan untuk keperluan terbatas yaitu pengelasan pada pelat tipis.

2.3.5. DIAMETER ELEKTRODE

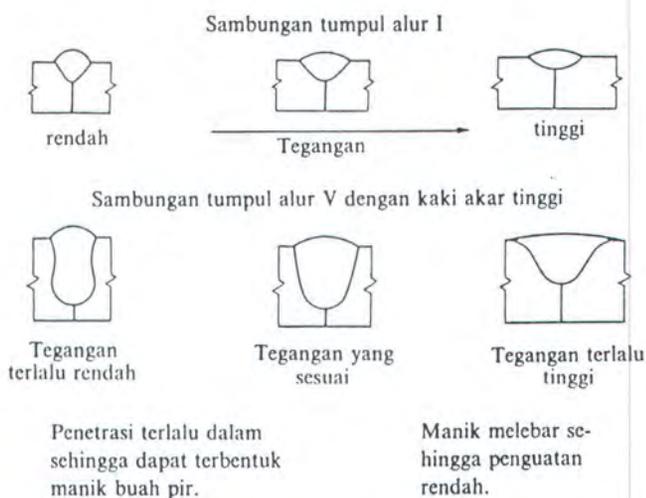
Pada umumnya elektrode yang digunakan sekitar 4.0 sampai 6.4 mm. Hubungan antara elektrode dan arus pengelasan dapat dilihat pada tabel 2.3. Dengan arus yang sama dan diameter elektrode yang lebih kecil akan menghasilkan penetrasi yang lebih baik dan manik yang lebih sempit bila dibandingkan dengan penggunaan diameter yang lebih besar. Hal ini disebabkan oleh adanya efek konsentrasi, demikian juga dengan busur awal dan stabilitas secara umum akan lebih baik dengan elektrode diameter kecil.

2.3.6. SUDUT ELEKTRODE

Sudut antar elektrode dengan pelat sangat mempengaruhi kemungkinan terjadinya undercut dan besarnya penetrasi. Bila elektrode membentuk sudut mundur maka akan terjadi penembusan yang dalam dan manik yang sempit. Sebaliknya dengan sudut maju maka penembusannya akan dangkal dan manik yang lebar. Dalam pengelasan kecepatan tinggi, sudut maju akan memberikan bentuk manik yang lebih baik. Hubungan antara kemiringan sudut elektrode dengan bentuk manik ditunjukkan dalam gambar 2.7



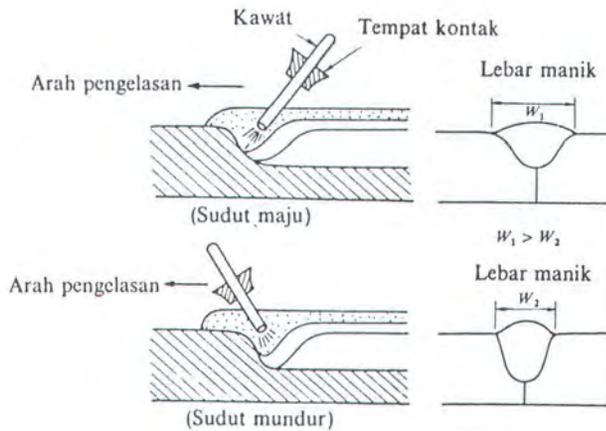
Gambar 2.4 Pengaruh arus las terhadap bentuk manik las



Gambar 2.5 Pengaruh tegangan busur terhadap bentuk manik las



Gambar 2.6 Pengaruh kecepatan pengelasan terhadap bentuk manik las



Gambar 2.7 Hubungan antara kemiringan sudut elektrode dengan bentuk manik las

2.3.7. KETEBALAN FLUKS

Pada beberapa kasus pengelasan ketebalan dari fluks sering diabaikan , padahal untuk mencapai hasil yang optimal maka ketebalan fluks harus cukup untuk menutup busur las. Jika fluks terlalu dangkal, kilatan cahaya akan menembus fluks dan menyebabkan porositas serta permukaan yang kurang baik karena fluks tidak cukup untuk menutupi molten metal. Sedang bila fluks terlalau tebal akan menghasilkan bentuk manik yang jelek.

2.4. PERSIAPAN SAMBUNGAN

Sebelum pengelasan dilaksanakan perlu dilakukan persiapan sambungan untuk mendapatkan hasil pengelasan yang baik. Persiapan sambungan las sangat penting tergantung pada ketebalan pelat dan tipe sambungan las. Sambungan tumpul (*butt joint*) pada pelat dengan ketebalan sampai dengan 1.5 mm dapat dilakukan tanpa persiapan sisi (*groove* bentuk I) dengan 1 atau 2 lapisan las. Celah las (*gap*) tidak lebih dari 1 mm atau 10 % dari tebal pelat. Dalam persiapan sambungan juga perlu diperhatikan pada kemungkinan terjadinya distorsi dan jebolnya sambungan /cairan logam bocor keluar (*burntrough*) . Untuk itu perlu adanya pelat penyangga (*backing bar*) . Pelat penyangga ini bentuknya bermacam-macam tergantung desain sambungan dan bentuk konstruksinya . Macam-macam penyangga itu antara lain :

1. Penyangga yang tidak mencair
2. Penyangga yang turut mencair
3. Penyangga dengan fluks
4. Penyangga dengan akar las
5. Penyangga dengan las

2.5 METALURGI PENGELASAN

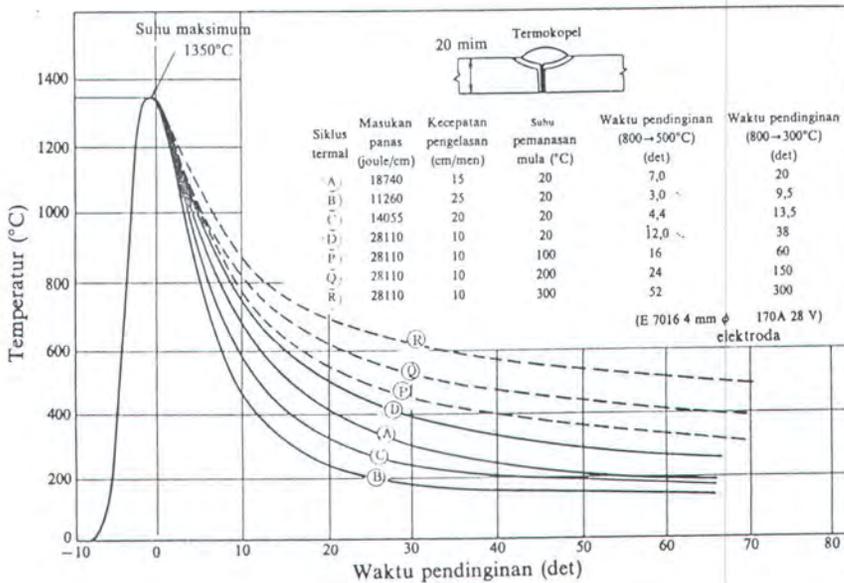
2.5.1 TINJAUAN UMUM

Dalam proses pengelasan logam yang terjadi adalah memanaskan logam tersebut sampai temperatur puncak dan memasukan logam pengisi pada daerah sambungan las. Kemudian logam tersebut berangsur-angsur dingin karena sumber panas bergerak ke arah bagian lain sambungan dan adanya penyerapan panas oleh logam induk yang lebih rendah temperaturnya. Logam induk dan logam pengisi mempunyai susunan elemen tertentu.

Percampuran kedua logam tersebut pada proses pengelasan akan mengakibatkan susunan baru pada logam las. Jika pada logam las dan sekitarnya seolah-olah mengalami perlakuan panas dan pembentukan struktur baru sehingga memungkinkan terjadinya struktur kristal yang berbeda dengan struktur sebelumnya. Timbulnya kristal-kristal yang berbeda tergantung dari distribusi temperatur akibat proses pengelasan. Hal tersebut sangat berpengaruh terhadap pembentukan sifat mekanis pada logam hasil pengelasan yang berkaitan dengan keamanan ataupun kondisi dari suatu konstruksi logam. Sifat mekanis logam hasil pengelasan sangat ditentukan oleh hasil akhir dari struktur mikronya. edangkan struktur mikro yang terjadi sangat tergantung pada 3 faktor yaitu :

1. Kecepatan pendinginan
2. Temperatur awal
3. Komposisi kimia logam induk

Sebagai contoh bila suatu material baja mengalami pemanasan akibat pengelasan sampai temperatur austenisasi, kemudian mengalami proses pendinginan sampai pada temperatur kamar, maka struktur akhir yang terbentuk adalah perlit dan ferlit. Bila kecepatan pendinginannya agak dipercepat akibatnya struktur akhir yang terbentuk adalah campuran dari ferit, perlit, bainit dan martensit. Dari kedua contoh di atas tampak bahwa walaupun temperatur awal dan komposisi kimia sama, akan tetapi kecepatan pendinginannya berbeda, maka akan menghasilkan campuran fase yang berbeda di dalamnya. Yang pada akhirnya akan mempengaruhi sifat mekanisnya. Perubahan sifat mekanis untuk logam yang selesai dilas akan terjadi di daerah HAZ. Berikut ini dapat dilihat distribusi temperatur pengelasan dan distribusi panas pada daerah pengelasan



Gambar 2.8 Siklus thermal las pada beberapa jarak dari batas las

2.5.2. DAERAH PENGELASAN

Setelah proses pengelasan pada logam dilakukan, maka pada logam hasil pengelasan akan terbentuk daerah pengelasan. Daerah pengelasan ini terbentuk karena adanya perbedaan temperatur yang diterima logam saat pengelasan. Pada umumnya daerah pengelasan terdiri dari 3 bagian yaitu :

1. Logam las (*weld metal*)
2. Daerah pengaruh panas (*heat affected zone*)
3. Logam induk (*base metal*)

Pada saat pemanasan dan pendinginan yang terjadi akibat pengelasan dapat menyebabkan perubahan sifat pada bahan yang terkena pengaruh panas. Maka pada pengelasan dikenal adanya daerah pengaruh panas (*heat affected zone*). Daerah ini perlu mendapatkan perhatian, karena selain adanya perubahan pada struktur mikro akibat pemanasan juga adanya tegangan sisa. Sehingga daerah ini merupakan daerah las yang sulit

diawasi dan umumnya adalah bagian yang terjelek dari seluruh bagian sambungan las.

Daerah HAZ dari baja karbon mempunyai bagian yang berbeda-beda sesuai proses

metalurginya : - Bagian yang tumbuh kristalnya.

- Bagian yang halus struktur kristalnya.

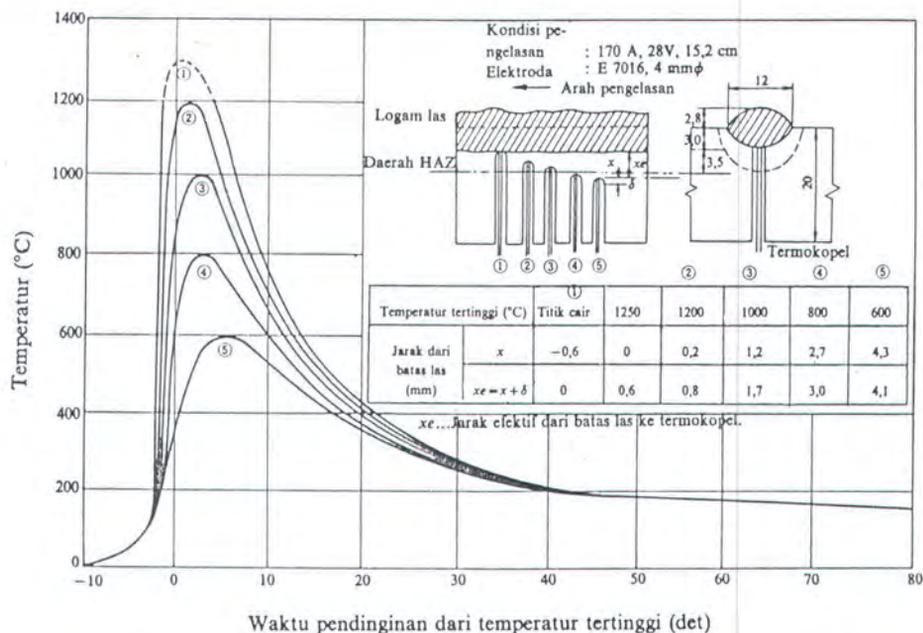
- Bagian yang sebagian mengalami transformasi.

Logam las atau disebut endapan las (*weld deposit*) adalah bagian dari logam pengisi (*filler material*) yang saat pengelasan mencair dan kemudian membeku.

Logam induk yang tidak terpengaruh adalah bagian dari logam dasar (*base metal*), dimana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur .

2.5.3. SIKLUS THERMAL PENGELASAN

Siklus thermal las adalah proses pemanasan dan pendinginan pada daerah pengelasan. Pemakaian panas pada suatu proses pengelasan akan mengakibatkan terjadinya siklus pada setiap titik di daerah yang dikenai panas. Pada suatu logam mula-mula berada pada temperatur ruang, maka temperaturnya akan naik hingga mencapai temperatur puncak dan kemudian turun kembali ke temperatur semula. Kecepatan pemanasan, temperatur puncak yang dicapai dan kecepatan pendinginan dari suatu titik akan menentukan siklus panas dari titik tersebut, gambar 2.9 menunjukkan siklus panas dari beberapa lokasi di daerah pengelasan dengan temperatur panas tertentu.



Gambar 2.9 Siklus thermal pada beberapa lokasi di daerah pengelasan

Dengan melihat gambar di atas kita dapat menyimpulkan bahwa temperatur puncak dari masing-masing siklus panas menurun sebagai fungsi jarak dari pusat pengelasan. Hal ini sesuai dengan jarak lokasi-lokasi tersebut dari sumber panas yang berada di tengah lasan. Siklus panas yang terjadi pada pengelasan ini dipengaruhi oleh masukan panas (*heat input*) dan temperatur pemansan mula.

Lamanya pendinginan dalam suatu daerah temperatur tertentu, dari suatu siklus thermal las sangat mempengaruhi kualitas sambungan las. Karena itu banyak sekali usaha-usaha pendekatan untuk menentukan lamanya waktu pendinginan tersebut. Pendekatan ini biasanya dinyatakan dengan rumus empiris atau nomograf seperti terlihat dalam tabel 2.4

$$S = \frac{K \cdot J^n}{(\bar{T} - T_0)^2 \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{t - t_0}{\alpha} \right) \right\}}$$

Cara pengelasan	Indeks masukan panas <i>n</i>	Konstanta							
		Waktu pendinginan dari 800°C ke 500°C				Waktu pendinginan dari 800°C ke 300°C			
		<i>K</i>	<i>t</i> ₀	<i>α</i>	<i>T</i>	<i>K</i>	<i>t</i> ₀	<i>α</i>	<i>T</i>
Las busur terbungkus	1,5	1,35	14,6	6	600	2	14,6	4,5	400
Las busur gas CO ₂	1,7	1/2,9	13	3,5	600	1/2,5	14	5	400
Las busur dengan kawat berisi fluks.	1,35	—	—	—	600	11	14	5	400
Las busur rendam.....	$f(t < 32) 2,5 - 0,05t$	$9,5/10^5 - 0,22t$	—	—	600	$7,3/10^5 - 0,22t$	—	—	—
	$f(t \geq 32) 0,95$	950	12	3	600	730	20	7	400

J: Masukan panas = $\frac{60EI}{V}$ (Joule/cm)

E: Tegangan busur (Volt)

I: Arus Las (Amper)

V: Laju las (cm/men)

T: Suhu daerah HAZ (°C)

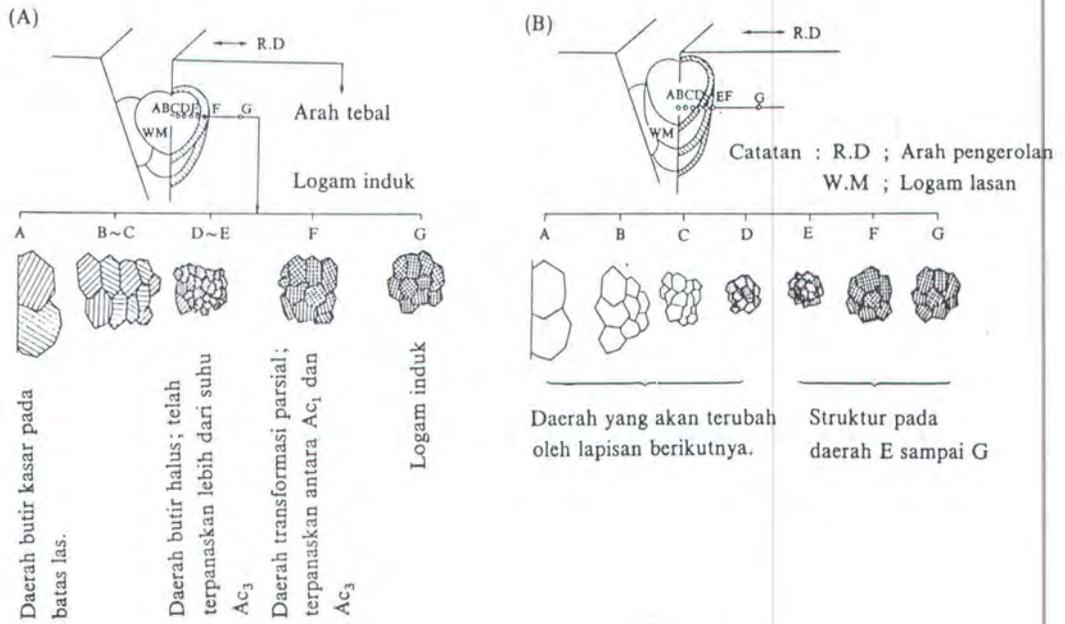
*T*₀: Suhu mula pelat (°C)

t: Tebal pelat (mm)

Tabel 2.4 Perkiraan waktu pendinginan pada beberapa cara las busur

2.5.4. STRUKTUR MIKRO DAERAH HAZ

Struktur logam pada daerah pengaruh panas (HAZ) berubah secara berangsur-angsur dari struktur logam induk ke struktur logam las, seperti terlihat dalam gambar 2.10 . Pada daerah HAZ yang dekat dengan garis lebur kristalnya tumbuh cepat dan membentuk butiran-butiran kasar, daerah ini dinamakan batas las. Di dalam daerah pengaruh panas besar butir dan struktur sesuai dengan siklus thermal yang terjadi saat pengelasan. Karena siklus thermal yang terjadi sangat rumit, maka dengan sendirinya perubahan ketangguhannya pun sangat rumit. Hal ini dapat dilihat dalam gambar 2.10



Gambar 2.10. Skema struktur mikro daerah HAZ

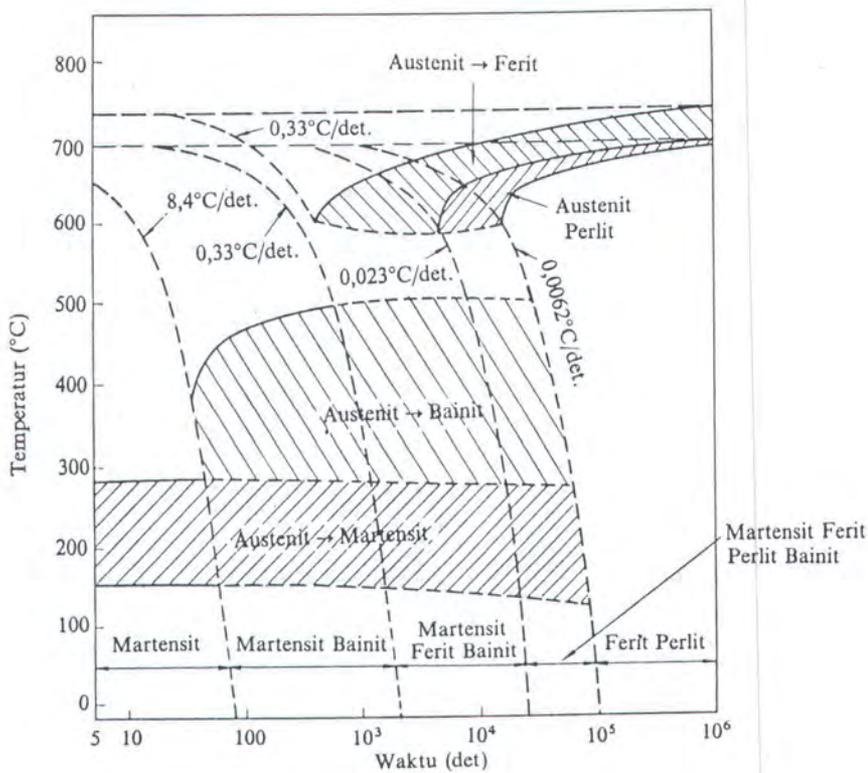
Pada batas las dimana butirnya sangat kasar, logam menjadi sangat getas yang disebut sebagai penggetasan batas las.

Struktur kekerasan dan berlangsungnya transformasi di daerah HAZ dapat dibaca pada diagram Transformasi Pendinginan Berlanjut (*Continuous Cooling Transformation*).

Diagram ini dapat digunakan untuk membahas pengaruh struktur terhadap retak las dan keuletan. Disamping itu juga diagram CCT dapat digunakan untuk menunjukkan tahap-tahap transformasi selama pendinginan dan dapat dipakai untuk meramalkan struktur akhir yang akan terbentuk.

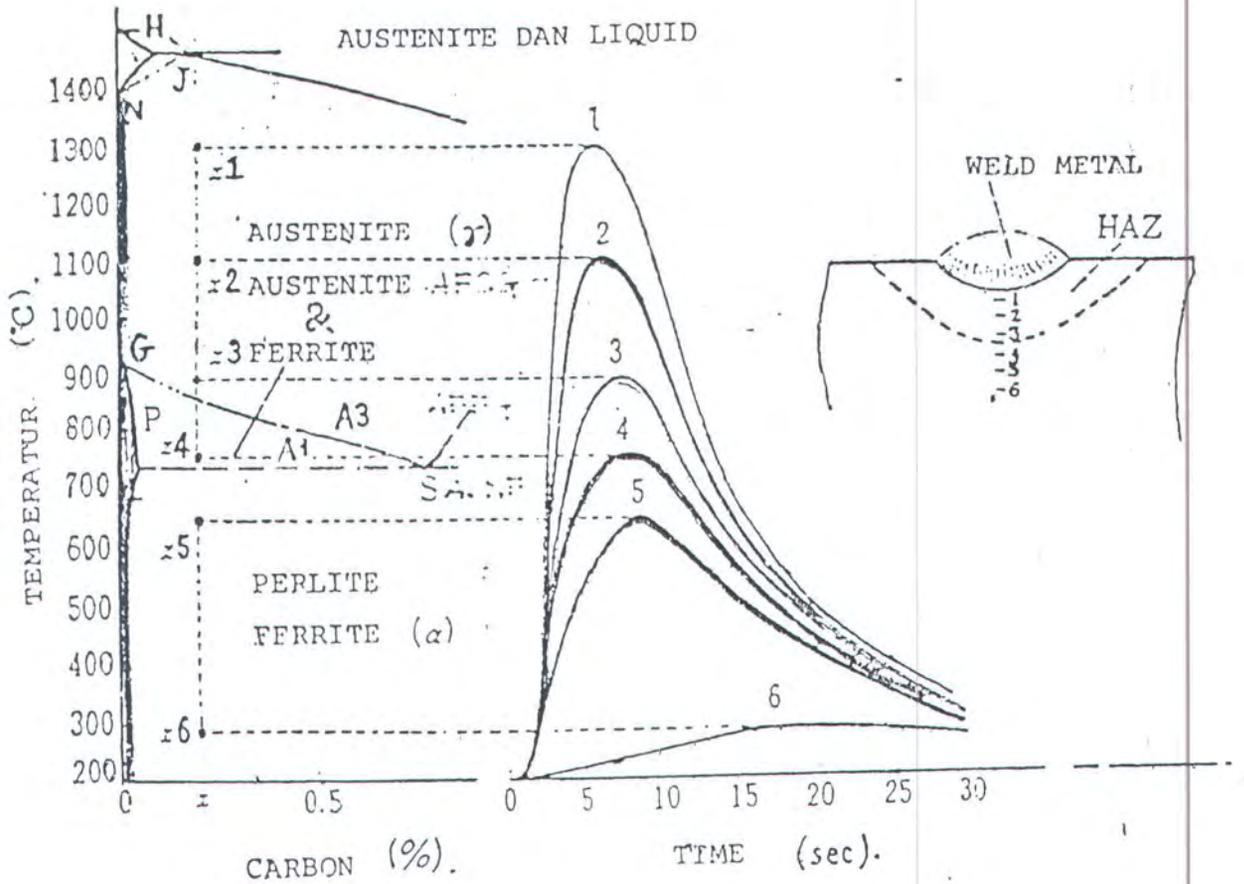
Pada umumnya struktur mikro dari baja tergantung dari kecepatan pendinginan dari temperatur 800 derajat C sampai 500 derajat C atau daerah austenit sampai suhu kamar. Karena perubahan struktur mikro ini, maka dengan sendirinya sifat-sifat mekaniknya pun berubah. Pada CCT diagram dapat dilihat dari austenit turun, struktur mikro yang terjadi berubah dari campuran ferit-perlit ke campuran ferit-perlit-bainit. Dan bila kecepatan sedikit lebih tinggi, maka struktur menjadi ferit-bainit, lebih tinggi lagi menjadi

martensit-bainit. Dan bila kecepataannya tinggi sekali akan menghasilkan struktur akhir martensit. Bila hal ini terjadi maka hasil pengelasan menjadi lebih keras. Dengan demikian diagram CCT penting dalam melakukan proses perlakuan panas untuk menentukan struktur mikro dan kekerasan yang akan terjadi terutama pada bagian sambungan las.



Gambar 2.11 Diagram pendinginan kontinyu atau diagram CCT (baja ASTM 4340)

Bila diamati perubahan temperatur pemanasan daerah pengaruh panas dan kecepatan pendinginan yang disesuaikan dengan diagram Fe-C, maka kita dapat mengetahui daerah yang terpengaruh panas



Gambar 2.12. Daerah-daerah yang terpengaruh panas

Daerah 1.

Adalah daerah yang terkena percampuran tidak sempurna bagian yang cair dan tidak. Batas daerah ini dari titik leleh baja sampai temperatur solidus , dan disini akan terlihat persenyawaan kristal yang terjadi dengan biji kristal logam yang dilas sehingga daerah ini menentukan sambungan lasan.

Daerah 2.

Dari titik solidus sampai temperatur kira-kira 1100°C . Biji kristal cepat tumbuh dan pada waktu proses pendinginan kristal tidak sempat mengecilkan struktur sehingga yang terjadi masih tetap kristal besar-besar dan biasanya terdiri dari austenit dikelilingi ferrit.

Sifat mekanisnya rendah terutama kekuatan tarik dan elastisnya.

Daerah 3.

Dari 1100°C sampai A3. Daerah ini karena perubahan temperatur yang tidak besar sehingga pengaruhnya terhadap kristal tak bisa mengembang dan pada waktu pendinginan terjadi struktur yang kecil dan bersumbu sama panjang .

Daerah ini mempunyai sifat mekanis yang tinggi.

Daerah 4.

Dari titik A3-A1, di daerah ini pada biji-biji austenit timbul butir-butir ferrit yang baru, sehingga struktur terdiri dari biji ferrit yang dikelilingi dengan gugusan kecil dari ferrit dan perlit.

Sifat mekanis dari daerah ini lebih rendah dari daerah 3.

Daerah 5.

Dari A1 sampai temperatur 500°C mempunyai struktur yang terdiri dari ferrit dan perlit (F+P). Pada daerah ini tak terjadi allotropi lagi kecuali sambungan las dikenyalakan lagi seolah-olah *Strain Hardening* sehingga timbul deformasi elastis.

Daerah 6.

Daerah ini dimulai dari temperatur 500°C ke bawah. Struktur dari daerah ini adalah sama dengan logam yang dilas meskipun begitu sifat elastisnya sedikit lebih kecil dan kekerasannya agak sedikit bertambah.

Disini dapat dilihat bahwa pengaruh panas pada daerah ini adalah hanya menurunkan sifat mekanis saja. Lebar dari daerah pengaruh panas ini tergantung dari :

- Perambatan panasnya.
- Besarnya arus listrik.
- Kecepatan mengelasnya.

2.5.5. MASUKAN PANAS (*HEAT INPUT*)

Keberhasilan dalam proses pengelasan tergantung juga pada masukan panas yang diberikan. Pada saat busur mulai menyala, maka pada saat itu juga panas mulai masuk ke dalam logam las. Panas ini akan merambat secara konduksi, menyebar ke logam induk (*base metal*). Masukan panas yang rendah menyebabkan perambatan panas ke segala arah sehingga menambah jumlah panas yang dibutuhkan untuk mencairkan logam, akibatnya proses pencairan logam menjadi agak lambat. Sedangkan masukan panas yang tinggi menyebabkan baja cepat mencair sehingga kecepatan pengelasan biasanya lebih tinggi. Masukan panas itu sendiri dipengaruhi oleh beberapa parameter yaitu:

1. Arus pengelasan (ampere)
2. Tegangan busur (voltage)
3. Kecepatan pengelasan (mm/det)

Di dalam praktek dan pada beberapa standar pengelasan, pemilihan masukan panas sangat bervariasi tergantung kedalaman penetrasi yang diinginkan. Pemilihan masukan panas harus benar-benar tepat, karena hal ini berpengaruh sekali pada kualitas sambungan las.

Disamping itu perlu juga diperhatikan sifat konduktor dari logam induk, karena Bergeraknya panas ke arah logam induk maka logam yang mempunyai sifat konduktor yang tinggi memerlukan panas yang lebih tinggi untuk dapat membentuk cairan logam lasan sebelum kehilangan panas akibat menyebarnya panas. Karena alasan itulah maka sifat konduktor dari logam perlu diperhatikan sebelum menentukan kondisi pengelasan. Pada beberapa logam mempunyai sifat-sifat konduktor yang berbeda-beda, di bawah ini terdapat tabel yang menunjukkan sifat konduktor dari beberapa jenis logam dengan skala 10.

Table 3.1 Relative thermal conductivities

Metal	Relative thermal conductivity
Copper	100
Aluminium	62
Steel	14
Lead	8

Tabel 2.5. Sifat konduktor dari beberapa jenis logam

Dari tabel di atas terlihat bahwa copper mempunyai sifat konduktor yang paling tinggi dibanding bahan lainnya ini berarti untuk mencapai fusi yang bagus, copper memerlukan panas yang jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan baja (*steel*) atau yang lain. Karena

alasan itulah maka bahan copper biasanya digunakan sebagai bahan penyangga (*backing bar*) pengelasan agar logam las cair tidak menetes, sehingga pada saat proses pengelasan copper tidak ikut melebur.

2.5.5.1. Pengukuran Masukan Panas Pada Busur Las

Untuk mengetahui atau mengukur secara langsung besarnya masukan panas dari suatu proses pengelasan, tentu sangat sulit. Tetapi sebagai pendekatan kita dapat mengetahuinya dari besarnya energi listrik yang diberikan pada busur las. Sebagaimana telah diketahui bahwa suatu energi dapat dirubah ke dalam bentuk energi yang lain, tetapi tentu ada sebagian energi yang hilang akibat perubahan bentuk energi tersebut. Di dalam proses pengelasan, hampir semua energi listrik dirubah ke dalam bentuk energi panas, hanya sebagian kecil yang berubah ke bentuk energi cahaya dan radiasi ultra violet. Masukan energi listrik pada busur las ditulis dalam satuan watt.

$$\text{Masukan energi pada busur} = \text{tegangan busur (V)} \times \text{ arus busur (A)}$$

Sebagai contoh untuk pengelasan dengan menggunakan arus 150 A dan tegangan busur 25 V

$$\begin{aligned}\text{Masukan energi} &= 25 \text{ V} \times 150 \text{ A} \\ &= 3750 \text{ watt}\end{aligned}$$

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/detik}$$

Sehingga masukan energi pada busur las sebesar 3750 joule tiap detik. Tetapi energi tersebut adalah hanya energi yang diberikan pada busur las, sedangkan pada proses pengelasan dilakukan dengan menjalankan busur las dari satu titik ke titik yang lain sepanjang garis las (sambungan pelat). Sehingga panas dari busur las didistribusikan sepanjang garis las. Distribusi panas yang diberikan pada suatu bagian logam tergantung dari kecepatan

perpindahan busur las. Sehingga yang dimaksud atau pengertian dari masukan panas (*heat input*) adalah sejumlah energi panas per satuan unit panjang pengelasan, yang diberikan oleh ujung elektrode (busur) selama proses pengelasan berlangsung.

Bila dalam contoh di atas, kecepatan pengelasan 120 mm/menit maka :

$$120 \text{ mm/menit} = 2 \text{ mm/detik}$$

$$\text{masukan panas (joule/mm)} = \frac{\text{Arus (ampere)} \times \text{Tegangan busur (volt)}}{\text{Kecepatan pengelasan (mm/det)}}$$

$$\text{masukan panas} = \frac{3750}{2}$$

$$= 1875 \text{ joule/mm}$$

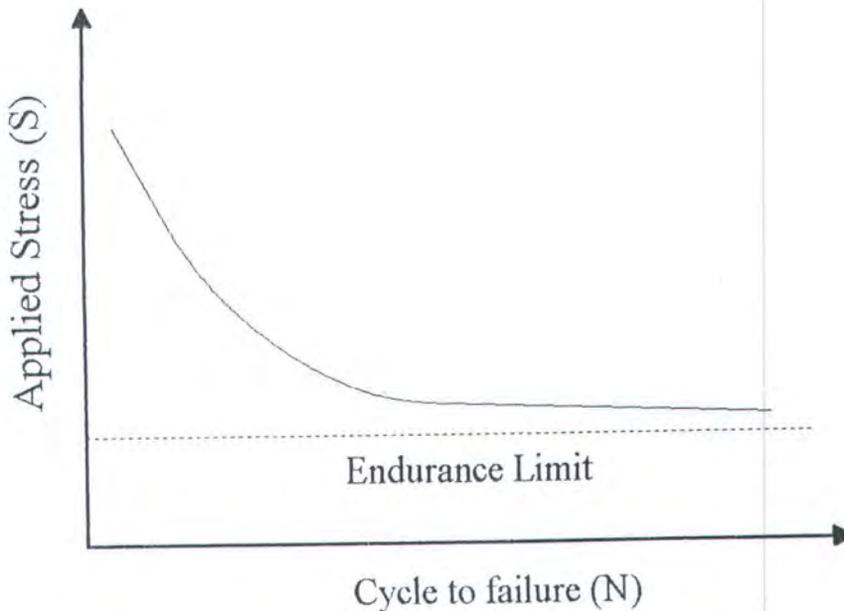
BAB III

KEGAGALAN KELELAHAN

3.1 PENDAHULUAN

Terjadinya kelelahan pada daerah sekitar lasan yaitu pada daerah HAZ, menuntut adanya suatu metode yang dapat diandalkan untuk memperkirakan umur kelelahan (*fatigue life*). Ada dua macam metode yang sangat populer dalam bidang kelelahan konstruksi yaitu metode S-N dan metode Mekanika Kepecahan (*fracture mechanic*).

Pada metode S-N yang menjadi sasaran dari setiap pengujian spesimen adalah mencatat tegangan siklik dan jumlah pembebanan, hingga spesimen tersebut patah atau terjadi kegagalan. Hubungan ini dapat digambarkan sebagai kurva S-N yang ditunjukkan dalam gambar 3.1



Gambar 3.1. S-N Diagram

Pada tegangan sangat kecil spesimen akan mempunyai jumlah daur pembebanan yang tak terhingga. Batasan tegangan demikian itu disebut sebagai daya tahan (*endurance limit*) dari material terhadap kelelahan. Untuk spesimen yang sederhana (*ferrous material*) hal tersebut dihasilkan kira-kira 2 sampai 5 juta cycle, sehingga kurva akan paralel terhadap sumbu N. Metode ini sederhana dan mudah tetapi mengabaikan informasi fisik pada ujung retak, sehingga kurang dapat dipakai untuk material yang telah mengalami keretakan.

Metode Mekanika Kepecahan banyak dipakai untuk memperkirakan umur kelelahan suatu konstruksi yang telah mengalami keretakan karena metode ini memperhatikan kondisi lokal dari tegangan dan regangan pada ujung retak.

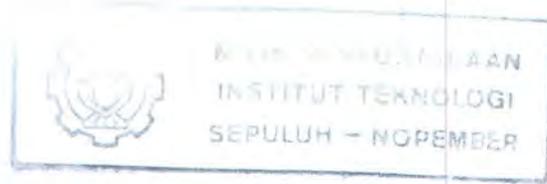
Dalam penulisan Tugas Akhir ini menggunakan metode Mekanika Kepecahan dalam memperkirakan umur kelelahan dan sebagai retak awal diberikan suatu takikan pada daerah HAZ.

3.2 TERJADINYA KELELAHAN

Kelelahan merupakan suatu kegagalan struktur akibat tegangan atau regangan berulang yang besarnya jauh dibawah tegangan luluh (*yield*). Suatu beban tunggal mungkin tidak akan berbahaya terhadap struktur karena masih di bawah kekuatan material, tetapi bila terjadi secara berulang-ulang dan terus-menerus, maka kegagalan struktur tidak bisa dihindari. Perlu diketahui proses-proses yang terjadi di dalam struktur material selama usia kelelahan (*fatigue life*) dan untuk menentukan umur kelelahan tersebut kita tinjau dalam 5 fase antara lain [10]:

1. Penggelinciran berulang (*cyclic slip*)
2. Retak inti (*crack nucleation*)
3. Pertumbuhan retak mikro (*microcrack growth*)

4. Pertumbuhan retak makro (*macrocrack growth*)
5. Kegagalan akhir (*final failure*)



3.2.1. PENGGELINCIRAN BERULANG

Pada pembebanan berulang yang relatif rendah dibanding pembebanan statis, penggelinciran berulang akan terjadi dalam sejumlah kecil dari butir polycrystalline material (garis kristal majemuk/ganda).

Butir ini merupakan fenomena lokal, karena hanya pada beberapa pita saja tegangan geser berulang cukup tinggi untuk menghasilkan slip/gelinciran. Gelinciran berulang ini yang dapat menyebabkan terjadinya fatik atau kelelahan.

3.2.2. RETAK INTI

Setelah sejumlah beban berulang, retak mikro dapat ditemukan dalam pita-pita penggelinciran. Suatu penelitian mikroskopik menyatakan bahwa retak inti terjadi pada awal usia kelelahan, kemungkinannya adalah beberapa persen dari usia kelelahan.

2 aspek penting yang dapat menerangkan masalah retak inti antara lain :

1. Butir pada permukaan material tidak selalu dikelilingi oleh butir lain. Pada sisi luar adalah lingkungan yang tidak solid. Pada sisi ini menyebabkan rendahnya penahanan microplastisitas. Pada permukaan bebas slip lebih mudah terjadi dengan jarak penggelinciran jauh lebih besar karena tidak ada penahanan butir-butiran didekatnya.

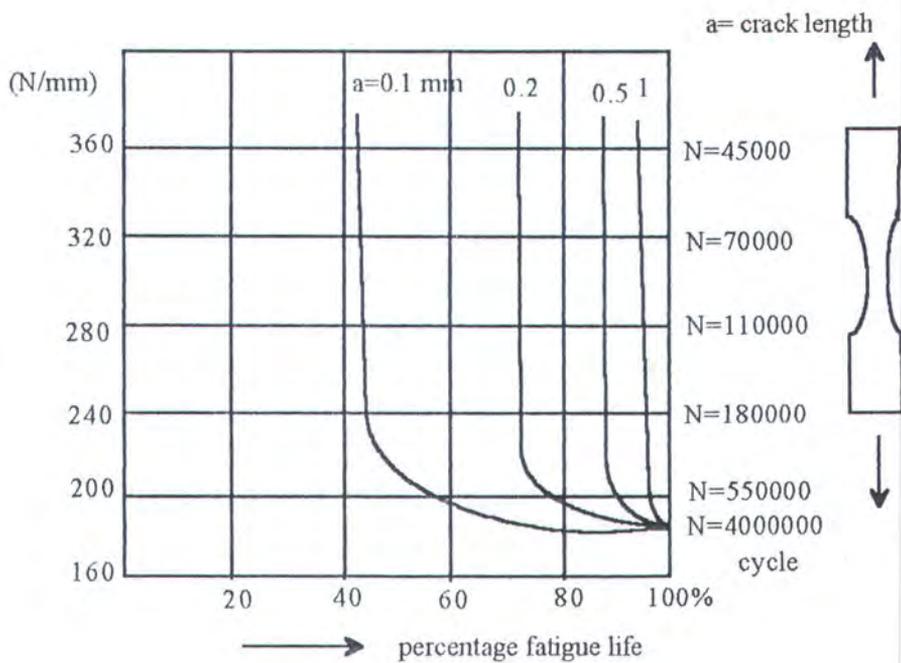
2. Butir-butiran permukaan selalu berhubungan dengan lingkungan bahkan untuk udara normalpun keberadaan oksigen dan uap air dapat menyatu dengan penggelinciran berulang untuk menghasilkan retak inti.

Contoh yang penting untuk retak ini dipermukaan bebas seperti pemasukan (*inklusi*) pada inti. Ini dapat terjadi pada *low alloy high strength steel* pada inklusi yang kecil. Berbagai campuran tersebut mengakibatkan kecenderungan butiran dan susunan kristal yang terjadi akibat pemasukan pada daerah permukaan akan mengalami retak inti. Hal ini mungkin merupakan hasil dari argumen pertama dimana terdapat hambatan yang lebih rendah di dekat permukaan bebas.

3.2.3. PERTUMBUHAN RETAK MIKRO

Dalam suatu retak mikro menggambarkan konsentrasi tegangan pada ujung retak (*crack tip*) yang akan terjadi. Penggelinciran berulang akan terkonsentrasi pada ujung retak menuju ke penjalaran retak selanjutnya. Seperti ditunjukkan pada studi mikroskopik pertumbuhan retak mikro dapat meliputi bagian yang relatif besar dari usia kelelahan. Dengan kata lain pada beberapa saat awal usia kelelahan, retak dapat dilihat dengan mata telanjang dan kemudiandisebut retak makro. Hal ini dapat dilihat pada gambar yang menunjukkan setelah 1 mm retakan dapat dilihat hanya dalam prosentase yang kecil dari usia kelelahan sampai terjadi kegagalan. Hasil yang maksimal dapat terlihat pada spesimen tanpa takik, diman pada spesimen dengan takik retak makro dapat terjadi pada kondisi awal.

Pernyataan lain menyebutkan bahwa pertumbuhan retak mikro pada atau di dekat permukaan meliputi bagian yang besar dari usia kelelahan. Berarti bahwa kondisi lokal pada permukaan material dan kualitas permukaan material sangat berarti bagi umur kelelahan yang sebagian besar ada pada fase retak makro.



Gambar 3.2 retak kecil yang digambarkan lebih awal dari usianya kecuali pada tingkatan Low stress

3.2.4. PERTUMBUHAN RETAK MAKRO

Perpindahan dari retak mikro ke makro tidak dapat didefinisikan secara kuantitatif secara nominal retak makro adalah retak yang dapat dilihat dengan telanjang. Sebagai tambahan dinyatakan pertumbuhan retak tidak lagi tergantung pada permukaan lokal dan kondisi material berperan dalam retak inti dan pertumbuhan retak mikro, namun retak mikro dapat mewakili nilai dari pertumbuhan retak itu sendiri.

Pertumbuhan retak yang ada menyarankan transisi dari mikro ke makro sekitar 1 mm, namun tidak ada ketentuan bahwa harga tersebut harus diambil. Pada beberapa kasus fatigue crack nucleation muncul pada permukaan yang berkualitas tinggi dan retak tersebut akan muncul sebagai retak makro yang relatif awal dari usia yang diperkirakan. Juga apabila perambatan retak diawali dari cacat makro, maka hal itu adalah retak makro dari permulaan.

Pada kasus lain kerusakan permukaan telah menyebabkan perambatan retak makro pada awal umur pelayanan (*service life*).

3.2.5. KEGAGALAN AKHIR

Pada saat retak makro menjalar lebih besar, penampang melintang struktur yang tidak mengalami retak menjadi lebih kecil. Akhirnya karena penampang terlalu kecil untuk menerima beban berulang maksimal, maka kegagalan terjadi sebagai siklus akhir dari usia kelelahan.

Kegagalan akhir biasanya menunjukkan makroplastis tertentu seperti kegagalan karena beban statis.

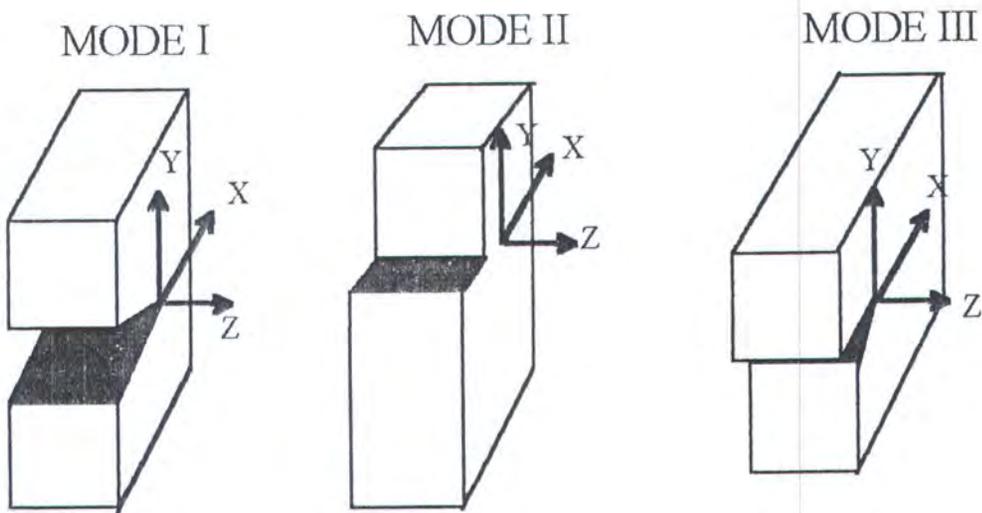
3.3. MEKANIKA KEPECAHAN ELASTIS LINIER (LEFM)

Teknologi kepecahan merupakan salah satu teknik untuk mempelajari kegagalan suatu material yang disebabkan oleh adanya cacat. Metode kepecahan ini sangat tepat untuk perencanaan konstruksi yang menggunakan material mutu tinggi, dimana dianggap telah mempunyai cacat mula (*crack initiation*).

LEFM adalah suatu konsep yang didasarkan pada suatu prosedur analitis yang menghubungkan besarnya daerah tegangan dan distribusi tegangan elastis di sekitar ujung retak (*elastis stress field*) dengan tegangan nominal yang dikenakan pada struktur dengan ukuran retak (*diskontinuitas*), bentuk retak dan sifat-sifat dari material itu sendiri. Dalam penulisan ini perhitungan lebih ditekankan pada pendekatan LEFM karena daerah plastis di sekitar ujung retak mendekati nol. Dengan maksud untuk mempermudah mengestimasi besarnya faktor intensitas tegangan (K) yang merupakan parameter utama terhadap laju perambatan retak.

3.3.1. ANALISA TEGANGAN DI UJUNG RETAK

Retak adalah suatu struktur yang mendapatkan pembebanan, dapat dibuka oleh satu atau kombinasi dari 3 mode displasemen seperti pada gambar berikut .



Gambar 3.3. Mode dasar bukaan permukaan retak

Mode I disebut mode terbuka (*opening mode*), dimana 2 bidang permukaan retak dipindahkan tegak lurus terhadap X-Z dalam arah yang saling berlawanan.

Mode II yaitu mode geser (*sliding mode*), dimana 2 bidang permukaan retak tergelincir/ bergeser satu dengan yang lainnya dengan arah tegak lurus terhadap ujung retak.

Mode III yaitu mode sobekan (*tearing mode*), dimana pergeseran bidang permukaan retak sejajar dengan garis ujung retak.

Mode I disebabkan oleh beban tarik sedangkan mode yang lainnya disebabkan oleh beban geser dengan arah yang berbeda sebagaimana terlihat pada gambar di atas.

Dalam pembahasan disini digunakan mode I karena pada umumnya masalah keretakan di lapangan terutama berbentuk mode I dan akibat beban tarik. setiap mode

menunjukkan hubungan deformasi terhadap bentuk dasar dari daerah tegangan di sekitar retak. Dalam beberapa masalah deformasi di ujung retak dapat diperlakukan sebagai bentuk salah satu mode di atas atau kombinasi dari displasemen lokal tersebut.

Dengan menggunakan metode yang dikembangkan oleh Westergaard dan Irwin, maka daerah tegangan dan displasemen dalam mode I dapat digambarkan secara matematis adalah sebagai berikut :[4]

Mode I

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.1)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.3)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.4)$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad (3.5)$$

$$U = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi}\right]^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + (\sin \frac{\theta}{2})^2\right] \quad (3.6)$$

$$V = \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi}\right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu - (\cos \frac{\theta}{2})^2\right] \quad (3.7)$$

$$W = 0 \quad (3.8)$$

Mode II

$$\sigma_x = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.9)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \quad (3.10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (3.11)$$

$$\sigma_z = \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.12)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0 \quad (3.13)$$

$$U = \frac{K_{II}}{G} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 - 2\nu + (\cos \frac{\theta}{2})^2 \right) \quad (3.14)$$

$$V = \frac{K_{II}}{G} \left(\frac{r}{2\pi} \right)^{1/2} \cos \left(-1 + 2\nu + (\sin \frac{\theta}{2})^2 \right) \quad (3.15)$$

$$W = 0 \quad (3.16)$$

Mode III

$$\tau_{xz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.17)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \quad (3.18)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \quad (3.19)$$

$$W = \frac{K_{III}}{G} \left(\frac{2r}{2\pi r} \right)^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \quad (3.20)$$

$$U = V = 0 \quad (3.21)$$

dimana :

U = displasemen untuk arah sumbu X

V = displasemen untuk arah sumbu Y

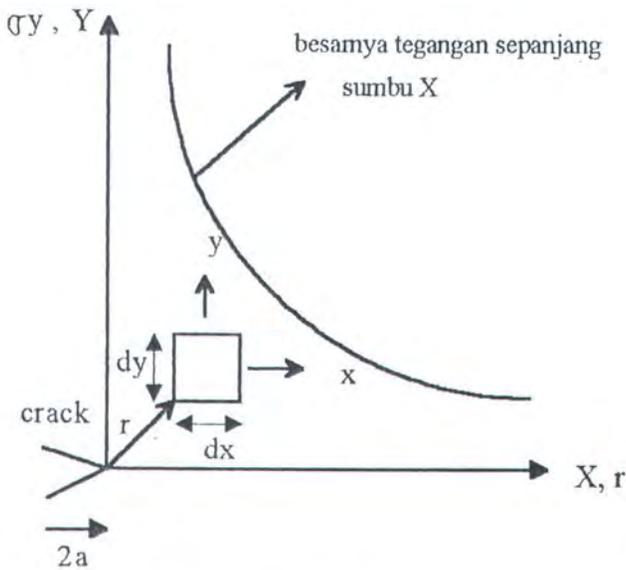
W = displasemen untuk arah sumbu Z

G = modulus geser elastisitas

K_I = faktor intensitas tegangan mode I

ν = angka poisson

Komponen-komponen tegangan dan sitim koordinat r dan θ dapat dilihat dalam gambar 3.4



Gambar 3.4. Distribusi tegangan elastis dekat ujung retak (mode I)

Mode I dan II menyatakan kasus plane strain yaitu perpindahan dalam arah sumbu Z sama dengan nol ($W=0$), dan menganggap bahwa persamaan yang mengandung pangkat tinggi dari r diabaikan. Karena mengabaikan pangkat tinggi dari r tersebut maka persamaan-persamaan tersebut eksak untuk r mendekati nol pada ujung retak.

Besarnya tegangan disekitar ujung retak dapat ditentukan dengan pendekatan secara matematis dari persamaan Westergaard yang diformulasikan dalam bentuk umum sebagai

berikut :

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (3.22)$$

dimana :

σ_{ij} = tegangan disekitar ujung retak

K_I = Faktor intensitas tegangan

r = jarak titik yang ditinjau terhadap ujung retak

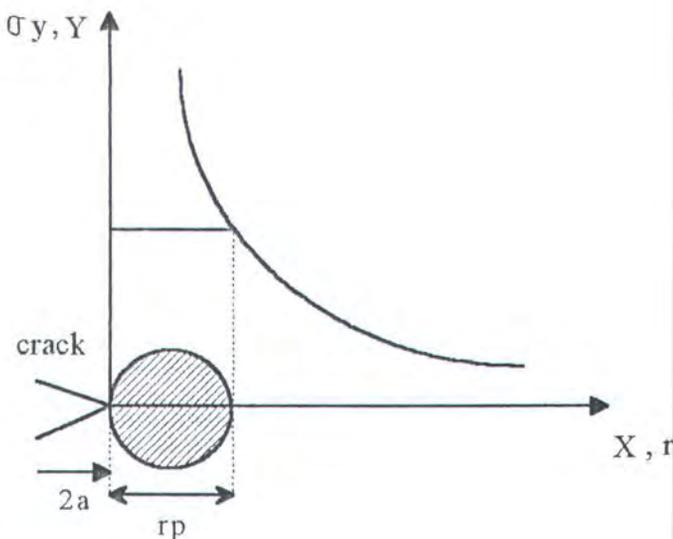
θ = sudut titik yang ditinjau terhadap ujung retak

a = ukuran retak

3.3.2. PLASTISITAS UJUNG RETAK

Dari persamaan tegangan disekitar ujung retak (pers. 3.22), bahwa untuk pelat yang mempunyai retak sepanjang (a) dan dibebani dengan tegangan (σ), maka distribusi tegangan disekitar ujung retak (σ_y) adalah merupakan fungsi dari (r) pada $\theta=0$. Untuk (r) yang sangat besar ($r = \infty$), maka besarnya tegangan (σ_y) mendekati nol. Hal ini tidak benar, seharusnya $\sigma_{ij} = \sigma$. Jadi pers. (3.22) hanya berlaku untuk daerah tertentu disekitar ujung retak.

Bila $r = 0$, maka tegangan di ujung retak menjadi tak terhingga. Pada kenyataannya hal ini tidak mungkin terjadi, karena material pada ujung retak akan mengalami deformasi plastis, jika tegangan yang bekerja lebih besar dari tegangan mulur. Adanya daerah plastis ini akan merubah distribusi daerah tegangan di daerah elastis seperti yang ditunjukkan dalam gambar 3.5 Meskipun demikian tegangan tidak akan banyak berubah jika daerah plastis yang terjadi cukup kecil dibandingkan dengan daerah elastis, dimana persamaan di atas masih berlaku



Gambar 3.5. Daerah plastis di ujung retak

Besarnya deformasi plastis yang terjadi pada material adalah dari σ_{ys} , substitusi $\sigma_y = \sigma_{ys}$ pada persamaan 3.22 dan memberi bidang $\theta = 0$ didapat

$$\sigma_y = \sigma_{ys} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.23)$$

Estimasi daerah plastis (r_y) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan tegangan disekitar retak. Untuk kondisi plane stress dengan komponen tegangan searah sumbu Y (σ_y), dari persamaan (3.23) untuk yield strength (σ_{ys}) menghasilkan persamaan ukuran daerah plastis sebagai berikut :

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (\text{plane stress}) \quad (3.24)$$

Untuk kondisi plane strain, estimasi daerah plastis dapat dilakukan dengan memasukkan kriteria mulur, misalnya kriteria Von Moses. Karena kontradiksi lateral pada kondisi plane strain, maka tegangan mulur efektif akan lebih tinggi lagi. Hal ini menyebabkan daerah plastis pada plane strain jauh lebih kecil dari keadaan plane stress, umumnya besarnya daerah plastis untuk keadaan ini diestimasi dengan persamaan :

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left[\frac{K_I}{\sigma_{ys}} \right]^2 \quad (\text{plane strain}) \quad (3.25)$$

3.3.3. FAKTOR INTENSITAS TEGANGAN

Faktor intensitas tegangan adalah suatu parameter yang digunakan untuk menggambarkan kondisi seluruh daerah tegangan di ujung retak, asalkan masih dalam kondisi elastis. Artinya panjang retak yang terjadi ukurannya masih lebih besar dari ukuran daerah plastis. Parameter ini dilambangkan dengan huruf K dengan subscript mode pembebanannya. Besar harga K ini tergantung pada pembebanannya, konfigurasi bentuk (geometri), ketajaman retak, dan mode pertambahan retak.

Sebagaimana telah dijelaskan di atas persamaan (3.22), tegangan pada daerah ujung retak adalah :

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

$$K_I = \sigma \sqrt{2\pi a}$$

Nilai K untuk bermacam-macam pembebanan dan konfigurasi dapat dihitung dengan menggunakan teori elastisitas, termasuk diantaranya secara perhitungan analitis dan numerik dengan metode penelitian .

Untuk masalah retak tepi, Westergaard, Irwin dan Koiter telah menentukan harga faktor intensitas tegangan yang ada hubungannya dengan faktor konsentrasi tegangan. [7]

$$K_I = 1.12\sigma \sqrt{\pi a} \quad (\text{small } a/w) \quad (3.26)$$

$$K_I = Y\sigma \sqrt{\pi a} \quad (3.27)$$

dimana:

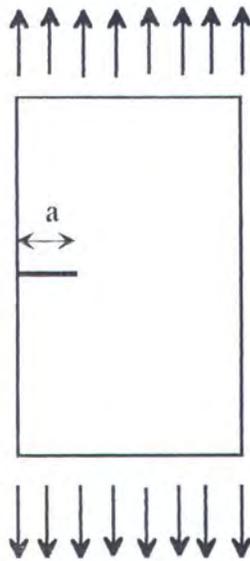
$$Y = 1.99 - 0.41 \frac{a}{W} + 18.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 38.48 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 53.85 \left(\frac{a}{W} \right) \quad (3.28)$$

$$(1.99 = 1.12 \sqrt{\pi}) \quad (3.29)$$

a = Panjang retak (mm)

W = Lebar material (mm)

σ = Tegangan nominal



Gambar 3.6. Geometri retak tepi

3.4. UMUR LELAH (*FATIGUE LIFE*)

Untuk memperkirakan umur lelah suatu komponen adalah suatu hal yang sulit.

Kesukaran ini disebabkan oleh banyak faktor yang mempengaruhi umur lelah.

Faktor-faktor tersebut adalah :

1. Beban :
 - a. Jenis beban : uniaksial, lentur, puntir
 - b. Frekuensi siklus beban
 - c. Pola beban : periodik, random
 - d. Besar tegangan
2. Kondisi material
3. Proses pengerjaan

4. Bentuk dan ukuran komponen
5. Temperatur operasi
6. Kondisi lingkungan

Perubahan kecil pada faktor tersebut di atas akan menyebabkan perubahan pada umur lelahnya. Oleh karena itu seringkali perlu dilakukan uji lelah pada suatu struktur yang lengkap ataupun pada suatu komponen dengan kondisi beban dan lingkungan yang mirip dengan situasi sebenarnya.

Meskipun demikian, uji lelah terhadap spesimen kecil tetap bermanfaat, karena datanya dapat digunakan untuk :

- a. Sumber kriteria patah lelah
- b. Mengisolasi berbagai variabel material
- c. Membandingkan karakteristik material
- d. Membandingkan besarnya pengaruh proses pengerjaan, kehalusan permukaan, proses perlakuan panas, metoda penyambungan terhadap fatik.

Umur lelah biasanya dinyatakan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai sampai spesimen atau komponen patah. Dengan demikian umur lelah total tersebut telah mencakup pula tahap awal retakan dan penjararan retakan yang bila telah cukup jauh penjararannya akan menyebabkan patah menjadi dua.

3.4.1. PENGARUH PARAMETER MATERIAL

Telah diuraikan diatas, bahwa awal retak lelah dan penjararannya terjadi akibat deformasi plastis setempat pada skala mikroskopik. Dengan demikian maka struktur mikro yang dapat mempengaruhi terjadinya deformasi plastis akan berpengaruh terhadap kekuatan lelah ataupun batas lelahnya. Parameter material tersebut antara lain adalah: ukuran butir,

kekuatan logam, penguatan dengan larutan padat, fase kedua, penguatan regang dan struktur mikro dari material.

A. Pengaruh Ukuran Butir

Hasil eksperimen [2] menunjukkan bahwa pada low cycle fatigue (*high cycle strain*), yaitu siklus regangan yang besar, maka ukuran butir tidak berpengaruh terhadap umur lelah. dilain pihak, pada high-cycle fatigue (*low cyclic starin*) yaitu pada siklus regangan kecil, besar butiran justru berpengaruh berpengaruh terhadap umur lelehnya. Butir yang halus akan menaikkan umur lelahnya.

Namun begitu pengaruh yang demikian belum tentu selalu terjadi. Butir yang halus di satu pihak akan meningkatkan umur lelah, di lain pihak justru akan meyebabkan logam menjadi peka terhadap takikan (*notch*). Dengan demikian, maka spesimen yang halus permukaannya memang akan naik umur lelahnya apabila halus butirnya. Spesimen yang diberi takikan akan berumur lebih pendek lagi bila butirnya halus.

B. Pengaruh Struktur Mikro

Akibat adanya siklus thermal selama proses pengeasan , maka akan mengubah sifat mekanik. Hal ini secara mikro dapat dipandang sebagai proses yang mengubah struktur mikro logam. Kekerasan yang tinggi dapat dicapai bila baja mempunyai fase martensit hasil dari proses pendinginan yang cepat dari fase austenit. Kekuatan takiknya akan tinggi tetapi fase martensit bersifat getas, sehingga umur lelahnya menjadi lebih rendah.

C. Kekuatan Logam

Pada beban statis, kekuatan logam adalah identik atau berbanding lurus dengan kekerasannya. selanjutnya pada kondisi fatik, hubungan antara kekuatan logam dengan batas kelelahan tidaklah demikian sederhana. Sebagai patokan kasar, baja memiliki batas lelah $\sigma_f = 0,5 \cdot \sigma_u$. Logam-logam non ferro seperti nikel, tembaga dan magnesium mempunyai batas lelah $\sigma_f = 0,35 \cdot \sigma_u$. Perbandingan antara σ_f dengan σ_u disebut rasio kelelahan. Angka-angka tersebut diperoleh pada kondisi permukaan spesimen yang halus (dipoles). Untuk spesimen dengan takikan, maka rasio kelelahan untuk baja turun menjadi 0.20 - 0.30.

3.4.2. PERKIRAAN UMUR LELAH

Untuk mendapatkan umur lelah dari struktur butt joint yang mengandung cacat undercut, dipakai pendekatan mekanika kepecahan dalam percobaannya di laboratorium untuk mengetahui perambatan retaknya. dari perambatan retaknya ini dapat diketahui harga konstanta m dan c. Dimana perambatan retaknya dianalisa menggunakan " Paris Formula " sebagai berikut : [4]

$$\frac{da}{dN} = c(\Delta K)^m \quad (3.30)$$

Dari persamaan (3.30) ini umur perambatan retaknya dapat dihitung, yaitu

$$N_f = \int dN = a_i \int^{a_f} \frac{da}{c(\Delta K)^m} \quad (3.31)$$

$$N_f = \frac{2}{(m-2)c(Y\Delta\sigma\sqrt{\pi})^m} \quad (3.32)$$

dimana :

N_f = umur perambatan retak

a_i = retak awal (kedalaman takikan)

a_f = retak akhir setelah merambat

c & m = konstanta yang tergantung dari material

da = perambatan retak

ΔK = range dari faktor intensitas tegangan

$\Delta K = K_{maks} - K_{min}$, untuk $R \neq 0$

$\Delta K = K_I$, untuk $R = 0$

R = ratio tegangan

Besarnya retak awal yang berupa takikan dapat ditentukan dengan menggunakan jangka sorong. Sedangkan (a_f) merupakan panjang rambatan retak atau bisa juga sebagai panjang retak akhir saat mengalami kegagalan.

Dalam dokumen IIW NO.XII, disebutkan bahwa kepecahan ductile terjadi apabila sisa tegangan mencapai batas tegangan mulur dari material, diformulasikan dalam bentuk :

$$\frac{a_f}{W} = \left(1 - \frac{\sigma_{eff}}{\sigma_{yield}} \right) / 2 \quad (3.33)$$

dimana:

a_f = Panjang retak awal (mm)

W = Lebar material (mm)

σ_{eff} = Tegangan efektif

σ_{yield} = Tegangan mulur



Sedangkan untuk pecah brittle terjadi pada saat harga faktor intensitas tegangan (K_I) retak besarnya sama dengan batas limit dari faktor intensitas tegangan untuk pecah brittle yaitu fracture Toughnes (K_{Ic}), diformulasikan dalam bentuk:

$$\frac{a_f}{W} = \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{1}{W} \left(\frac{K_c}{\sigma_{eff}} \right)^2 \right) \quad (3.34)$$

dimana:

K_c = Fracture toughness

Tegangan efektif dipakai untuk penentuan jenis kegagalan yang terjadi. Karena dalam kenyataannya tegangan yang dapat mnjalarkan retak hanya tegangan tarik saja, bila tegangan yang bekerja tersebut merupakan tegangan tarik dan tekan. Sedangkan tegangan tekan tidak dapat menjalarkan retak, karena pada saat terjadi tegangan tekan maka retak yang ada akan mengalamipemampatan (menutup). Bila sebaliknya maka retak yang akan terjadi akan membuka dan menjalar.

$$\sigma_{eff} = U \times \Delta\sigma \quad (3.35)$$

diamana:

$$\Delta\sigma = \sigma_{maks} - \sigma_{min} \quad (3.36)$$

$$U = \frac{1}{1-R} \quad (3.37)$$

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{maks}} = \text{ratio tegangan} \quad (3.38)$$

Beban berulang yang terjadi pada komponen konstruksi pada kenyataannya tidak teratur baik besarnya maupun periodenya. Namun demikian penentuan harga crack propagation dari suatu struktur diambil dari hasil percobaan dengan beban standar. Ratio tegangan berulang dapat dikelompokkan dalam 3 bagian, yaitu :

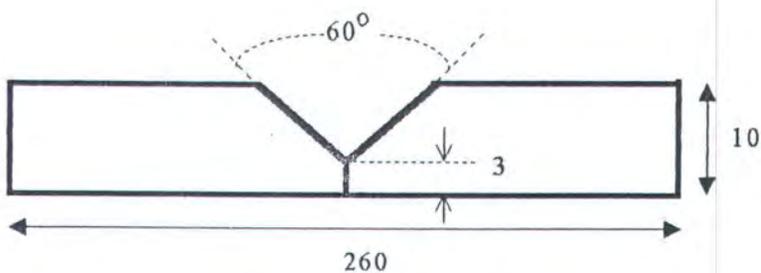
1. Perubahan tegangan dari harga maksimum positif ke harga minimum negatif ($R = -1$)
2. Perubahan tegangan dari harga meksimum positif ke nol ($R=0$)
3. Perubahan harga dari harga maksimum positif ke harga minimum positif ($0 < R < 1$)

BAB IV

PERCOBAAN

4.1. MATERIAL UJI

- Material uji dipilih dari jenis baja karbon menengah dengan standar JIS yaitu S 45 C dengan komposisi kimianya adalah sebagai berikut : 0.45 % C, 0.40 % Si, 0.90 % Mn.
- Menyiapkan material uji dengan ukuran 220 x 130 x 10 mm, sebanyak 6 buah.
- Material harus bersih dan bebas dari cacat permukaan.
- Masing-masing material uji dibuat kampuh las yang berbentuk tirus single V, seperti pada gambar 4.1. Pembuatan kampuh las dengan menggunakan mesin sekrup, kemudian dihaluskan dengan gerinda tangan.



Gambar 4.1 Bentuk kampuh las

4.2. PENGELASAN

4.2.1. PERSIAPAN

A. Material

Sebelum dilakukan pengelasan, pada bagian kampuh las harus dibersihkan dari jenis kotoran seperti kerak, oksida, minyak, cat dan lain-lain.

B. Elektrode (kawat las) dan fluks

- Kawat las yang digunakan adalah :

Tipe elektrode : OK Autrod 12.20

Diameter elektrode : 4 mm

Klasifikasi

AWS. A5.17 : EM 12 K

DIN 8557 : S2

- Fluks yang digunakan adalah :

Tipe fluks : OK Flux 10.40

Klasifikasi :

AWS A5.17 : F 62 EL12 , F72 EM 12 K

DIN 8557 : FMS 198 AC 8 m

Karakteristik dari fluks dan elektrode dapat dilihat dalam lampiran.

4.2.2. PELAKSANAAN PENGELASAN

- Di dalam percobaan ini dilakukan pengelasan dengan 3 variasi masukan panas (heat input) yang berbeda untuk tiap pelat uji. Dimulai dari pengelasan dengan heat input sedang sesuai standar ESAB (pelat uji II), kemudian heat input diturunkan dengan mengurangi besarnya arus pengelasan (pelat uji I), dan yang terakhir pengelasan dengan heat input yang paling tinggi dengan cara menaikkan besarnya arus pengelasan (pelat uji III).
- Dari pengelasan dengan parameter yang berbeda tersebut, kemudian dapat dihitung masukan panas (heat input) nya dengan menggunakan rumus :

$$\text{Heat Input (HI)} = \frac{A \times E}{V} f_i \tag{4.1}$$

mana :

Heat Input (joule/mm)

A = Amper pengelasan (Ampere)

E = Tegangan pengelasan (Volt)

V = Kecepatan pengelasan (mm/det)

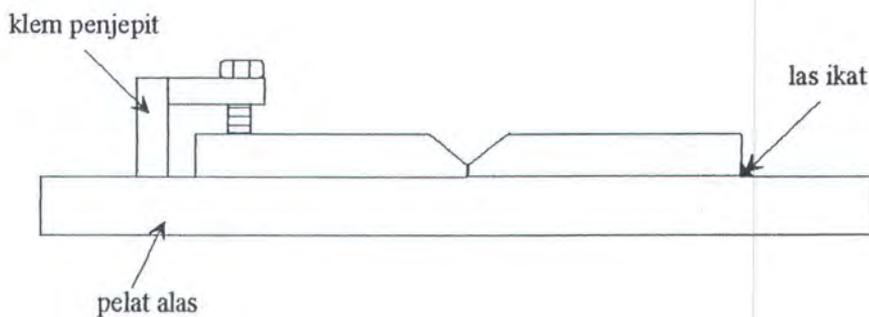
f_i = efisiensi perpindahan panas (0.8 - 1.0)

Tiga parameter pengelasan tersebut adalah :

PESIMEN NO	PASS	ELEKTRODE (mm)	A (Ampere)	E (Volt)	V (mm/s)	HI (Joule/mm)	HI total (Joule/mm)
I	1	4	400	35	10,83	1292,71	1373,5
	2	4	450	35	10,83	1454,29	
II	1	4	500	35	11,67	1499,57	1574,5
	2	4	550	35	11,67	1649,53	
III	1	4	600	35	12,5	1680,00	1750,0
	2	4	650	35	12,5	1820,00	

Tabel 4.1 Parameter pengelasan

- Polaritas pengelasan yang digunakan DC
- Jenis pengelasan yang digunakan adalah pengelasan dua sisi dengan penetrasi penuh , sehingga pada saat pengelasan diperlukan klem penahan untuk menjaga agar tidak terjadi deformasi selama dan sesudah pengelasan.
- Melakukan las ikat (*tack weld*) pada bagian ujung dan tengah pelat.
- Meletakkan pelat uji tersebut pada klem penjepit dan pada sisi yang bebas di las ikat (*tack weld*) pada alas, seperti pada gambar (4.2)



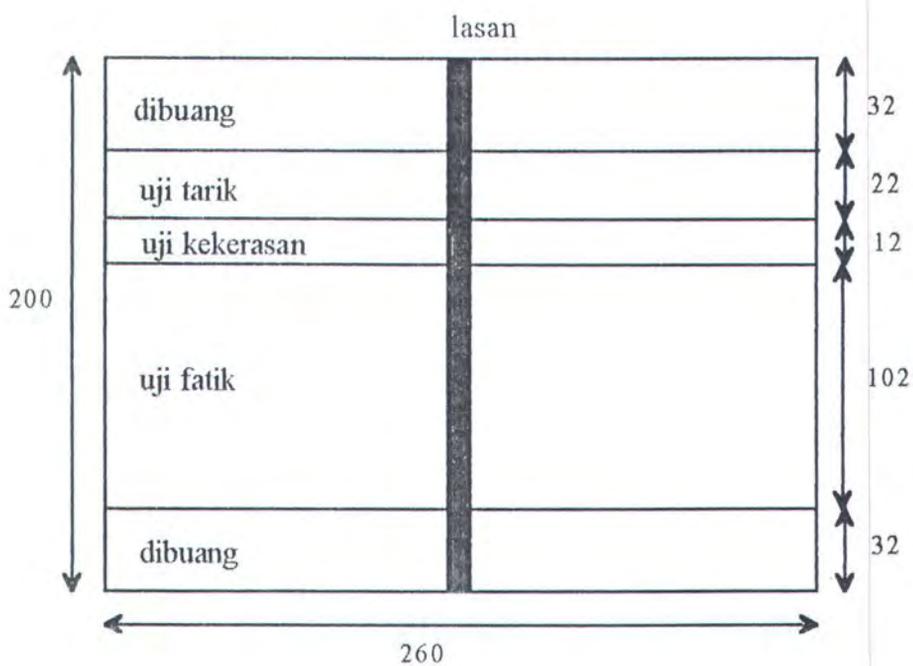
Gambar 4.2 Posisi pelat dengan klem penjepit

- Melakukan centering antara elektrode dengan kampuh las. Ini dilakukan berulang kali ,hingga benar-benar dipastikan jalannya elektrode lurus pada kampuh las.
- Setting parameter pengelasan (amper, tegangan dan kecepatan pengelasan) sesuai prosedur pengelasan di atas.
- Membuka katup fluks, sehingga ujung dari elektrode tertutup seluruhnya dengan fluks.
- Menjalankan mesin las dengan menekan tombol start.
- Menghentikan mesin las, setelah elektrode mencapai akhir pelat (pelat tambahan).
- Membersihkan fluks dan lapisan slag yang menutupi daerah lasan dengan palu dan sikat baja.

- Membiarkan material hingga dingin, setelah itu pengelasan untuk lapisan selanjutnya dapat dilaksanakan.

4.3. PENGUJIAN

Setelah pengelasan selesai dilakukan, kemudian pelat uji yang sudah dilas tersebut dibagi atau dipotong-potong dengan mesin gergaji untuk dibuat spesimen, meliputi uji tarik, uji kekerasan dan uji fatik. Adapun pembagiannya adalah :



Gambar 4.3 Pembagian pelat untuk pembuatan spesimen

4.3.1. MAKRO ETSA

Tujuan dari makro etsa ini adalah untuk melihat lebar daerah HAZ yang terbentuk pada pelat uji yang telah dilakukan pengelasan dengan masukan panas (*heat input*) yang berbeda. Adapun langkah-langkah pengerjaannya adalah sebagai berikut :

- Setelah pelat uji dipotong-potong dengan gergaji mesin, selanjutnya sisi yang akan di etsa diratakan permukaannya dengan menggunakan mesin sekrap.
- Setelah diratakan dengan mesin sekrap, kemudian dihaluskan dengan menggunakan kikir dengan arah pengikiran melintang arah penyekrapan, hingga benar-benar goresan-goresan hasil penyekrapan hilang.
- Penghalusan selanjutnya dengan menggunakan kertas gosok, dimana penggosokan dilakukan sesuai tingkat kehalusan yang berbeda. Mulai dari kertas gosok nomer 3, 120, 280, 400, 600, 800, 1000, 1200. Dengan arah penggosokkan tiap-tiap kertas gosok melintang arah penggosokkan sebelumnya.
- Setelah selesai dilakukan penggosokkan, kemudian dicuci dengan sabun untuk menghilangkan butiran-butiran dari kertas gosok.
- Pembuatan larutan etsa, berdasarkan standar dari ASTM E 340 (*Macroetching Metals dan Alloy*) dengan komposisi :

- | | |
|--------------------|-------|
| - HCl | 50 ml |
| - HNO ₃ | 25 ml |
| - H ₂ O | 50 ml |

Larutan-larutan tersebut dicampur dan diaduk hingga benar-benar bercampur sempurna.

- Daerah yang telah dihaluskan tadi, kemudian digosok dengan campuran etsa, hingga pada daerah tersebut dapat terlihat jelas bagian logam las dan daerah HAZ nya.

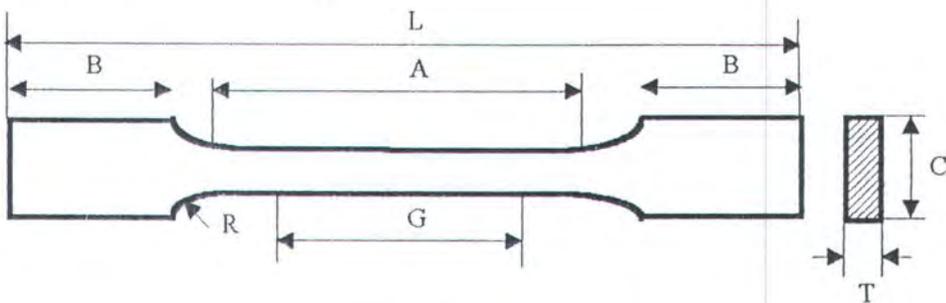
- Setelah terlihat dengan jelas bagian-bagian daerah lasnya, penggosokkan dihentikan kemudian spesimen dicuci dengan air hangat dan dibilas dengan alkohol 96 %, selanjutnya dikeringkan dengan alat pengering.

4.3.2. PENGUJIAN TARIK

Pengujian tarik adalah merupakan salah satu jenis pengujian merusak (*Destructive Test*) yaitu pengujian statis yang dilakukan untuk mendapatkan sifat mekanis pada konstruksi las. Dari hasil pengujian tarik ini akan di dapatkan tegangan *ultimate*, tegangan *yield*, *elongation*, dan *reduction area* hasil dari konstruksi alas.

4.3.2.1 Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen uji tarik ini, menurut standar ASTM E8 edisi th 1986. Adapun dimensinya adalah sebagai berikut :



Gambar 4.4 Spesimen Uji Tarik ASTM E8

$$G = 50 \text{ mm}$$

$$L = 200 \text{ mm}$$

$$A = 57 \text{ mm}$$

$$W = 12,5 \text{ mm}$$

$$T = \text{Tebal pelat uji} = 10 \text{ mm}$$

$$B = 50 \text{ mm}$$

$$R = 12,5 \text{ mm}$$

$$C = 20 \text{ mm}$$

Dimensi dari spesimen tersebut menggunakan tipe sheet, dengan ketebalan pelat uji maksimum $3/4$ inch (19 mm).

Langkah-langkah pembuatan spesimen :

- Tiap-tiap pelat uji yang telah dilas tersebut, dipotong melintang arah garis las dengan menggunakan mesin gergaji. selebar 22 mm.
- Manik las bagian muka (*face*) maupun akar las (*root*) digerinda merata setebal tebal pelat untuk mendapatkan luas penampang melintang dari spesimen uji yang sama.
- Perataan sisi yang telah dipotong tadi dengan menggunakan mesin sekrap sekaligus juga mengurangi lebar spesimen 20 mm sesuai standar di atas.
- Pengukuran dan penggambaran spesimen uji tarik sesuai standar, pada pelat-pelat yang telah dipotong tersebut.
- Dengan menggunakan mesin sekrap, dibentuk potongan pelat tersebut sesuai gambar.
- Bagian yang telah disekrap tersebut dihaluskan dengan kikir dan gerinda tangan, untuk mendapatkan permukaan yang halus.

4.3.2.2. Pelaksanaan Pengujian Tarik

A. Persiapan Spesimen

- Pengukuran kembali lebarnya dan tebal dari masing-masing spesimen. Data ini digunakan untuk mencari luas penampang spesimen uji.

B. Persiapan Mesin Uji Tarik

- Pemasangan klem penjepit yang disesuaikan dengan ketebalan spesimen uji.
- Pemasangan kertas milimeter blok pada drum penggambar grafik pengujian.

- Pemberian tanda absis sebagai sumbu X dari grafik hasil pengujian, dengan cara menekankan pena pada kertas milimeter blok dan drum diputar dengan tangan sehingga akan tergambar garis, sepanjang sekitar 1 cm.
- Pemilihan skala beban yang digunakan untuk melakukan percobaan tarik, sehingga spesimen akan patah dalam jarak pembebanan yang diberikan oleh mesin. Dalam hal ini skala pembebanan yang digunakan adalah 200 KN, ini berarti pembebanan dari nol sampai 200 KN dan diperkirakan sebelum 200 KN spesimen telah patah.

C. Pelaksanaan Pengujian

- Pemasangan spesimen uji pada klem penjepit atas dan bawah. Daerah jepitan maksimal tidak sampai mengenai daerah pengujian (*test section*).

Pemberian beban dilakukan secara bertahap dan perlahan-lahan, kemudian konstan hingga spesimen patah.

- Setiap besarnya beban yang diberikan akan tergambar pada kertas milimeter, sehingga dapat diketahui besarnya beban *yield* maupun *ultimate*.

Data hasil uji tarik untuk material induk dan spesimen dengan pengelasan ditunjukkan dalam tabel.

Hasil Uji Tarik Material Induk

DATA SEBELUM PENGUJIAN

Lo (mm)	To (mm)	Wo (mm)	Ao (mm ²)
50	16	12,5	200

DATA SESUDAH PENGUJIAN

L (mm)	T (mm)	W (mm)	A	F yield (KN)	F ult (KN)
62,9	11,8	9,4	110,92	84,5	140,7

Tabel 4.2 Hasil Uji Tarik Material Induk

$$\sigma_{yield} = \frac{F_{yield}}{9,807} \times \frac{1}{A_o} = \frac{84,55 \cdot 10^3}{9,807} \times \frac{1}{200} = 43,107 \text{ Kg/mm}^2 \quad (4.2)$$

$$\sigma_{ult} = \frac{F_{ult}}{9,807} \times \frac{1}{A_o} = \frac{140,7 \cdot 10^3}{9,807} \times \frac{1}{200} = 71,734 \text{ Kg/mm}^2 \quad (4.3)$$

$$RA = \frac{A_o - A}{A} \times 100\% = \frac{200 - 110,92}{200} \times 100\% = 44,54\% \quad (4.4)$$

$$\varepsilon = \frac{L - L_o}{L_o} \times 100\% = \frac{62,9 - 50}{50} \times 100\% = 25,8\% \quad (4.5)$$

4.3.3. PENGUJIAN KEKERASAN (BRINELL)

Pengujian kekerasan adalah jenis pengujian yang bersifat merusak. Jenis pengujian kekerasan ini ada 3 macam yaitu dengan metode Brinell, Vickers dan Rockwell. Dalam pengujian kekerasan kali ini menggunakan jenis pengujian kekerasan jenis Brinell. Tujuan

pengujian ini adalah untuk mengetahui tingkat kekerasan dari suatu jenis logam atau material yang diuji. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan memberikan gaya pada penetrator (bola baja) pada permukaan material uji dengan waktu standar yang telah ditentukan, kemudian diameter lubang hasil penekanan bola baja pada material uji diukur dan dihitung nilai kekerasan Brinell-nya dengan menggunakan rumus atau tabel nilai kekerasan Brinell.

$$HB = 2.P \left[\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right] \quad (4.6)$$

4.3.3.1. Pembuatan Spesimen

- Masing-masing pelat uji yang telah dilas tersebut, dipotong melintang arah garis las dengan menggunakan gergaji mesin selebar 10 mm
- Daerah penampang potongan diratakan dengan mesin sekrap.
- Penampang yang akan diuji, dihaluskan dengan kikir kemudian digosok dengan kertas gosok no 3, 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200. Tiap penggosokkan melintang arah penggosokan sebelumnya.
- Setelah permukaannya halus dan rata, spesimen dicuci dngan air untuk membersihkan gram-gram yang menempel.
- Melakukan pengetsaan dengan larutan yang merupakan campuran dari :

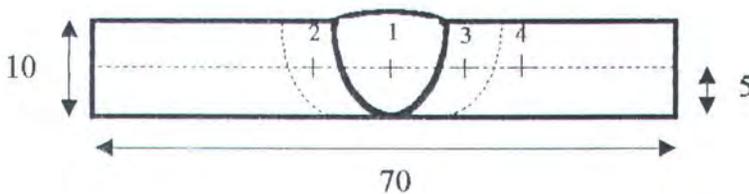
HNO ₃	25 ml
HCl	50 ml
H ₂ O	25 ml
- Waktu pengetsaan 10 - 20 detik.

- Setelah bagian-bagian dari daerah las terlihat jelas, selanjutnya spesimen dicuci dengan air dan dibilas dengan alkohol 96 %. Kemudian dikeringkan dengan alat pengering.
- Penentuan titik pengujian kekerasan (*HAZ, Base metal, weld metal*).

4.3.3.2. Pelaksanaan Pengujian Kekerasan

A. Persiapan Spesimen

- Penentuan titik pengujian , dengan memberikan tanda silang pada titik yang akan diuji.



Gambar 4.5 Spesimen Uji kekerasan

B. Persiapan Peralatan

- Penentuan diameter bola penekan dan beban uji (*test load*) yang digunakan. Dalam hal ini dipilih bola penekan berdiameter 1 mm dan *test load* 30 Kg.
- Waktu penetrasi untuk pengujian 10 detik.

C. Pelaksanaan Pengujian

- Switch pengujian pada mesin dipilih untuk uji kekerasan brinell.
- Lampu pada daerah pengamatan (*iluminator*) dinyalakan.
- Pemilihan beban uji (*test load*), dengan menekan tombol pilihan beban yang ada.
- Pemasangan bola penekan yang telah dipilih (1 mm), pada tempatnya.

- Spesimen diletakkan pada *test bench*, kemudian *test bench* digerakkan naik turun untuk mendapatkan fokus pada screen yang paling jelas.
- Putar ke bawah *bracing assembly* pada spesimen uji untuk mengikat spesimen uji pada *bench* dan kencangkan klem.
- Long lever ditekan (dilepas) sehingga menuju ke posisi penekanan. Waktu penekanan 10 detik.
- Tarik long lever pada posisi semula, swivel diarahkan ke lubang akibat penekanan sehingga akan terlihat bulatan (*impression*), atur fokusnya untuk mendapatkan kualitas gambar yang paling baik (jelas).
- Ukur besarnya diameter bulatan yang terlihat pada screen.

4.3.4. PENGUJIAN FATIK

Pengujian fatik ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana dan seberapa jauh pengaruh panas akibat pengelasan terhadap umur lelah pada daerah HAZ. Pengujian ini dilakukan pada 3 spesimen hasil pengelasan dengan heat input yang berbeda.

1. Spesimen I, Heat Input = 1373,5 joule/mm

2. Spesimen II, Heat Input = 1574,5 joule/mm

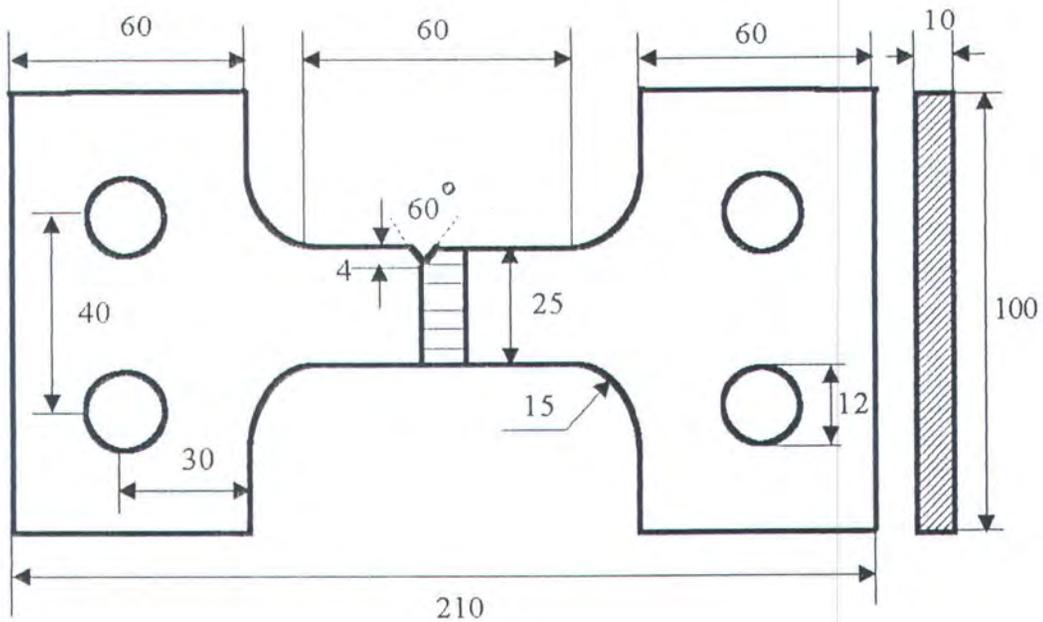
3. spesimen III, Heat Input = 1750 joule/mm

Prinsip kerjanya adalah dengan memberikan beban yang relatif kecil ($1/3 \sigma_{yield}$) dan berulang (dinamis) hingga terjadi kelelahan, yaitu timbulnya initial crack, retak merambat dan akhirnya terjadi kepatahan.

Dari pengujian fatik tersebut kita dapat mengetahui jumlah cycle yang terjadi sampai akhirnya spesimen tersebut mengalami patah lelah.

4.3.4.1. Pembuatan Spesimen

- Dimensi dan bentuk spesimen sesuai dengan standar ASTM E 466 - 82 (*Conducting Constant Amplitude Axial Fatigue Test Of Metallic Material*). Adapun bentuk dan ukurannya adalah sebagai berikut :



Gambar 4.6 Spesimen uji fatik ASTM 466 - 82

- Masing-masing pelat uji yang telah dilas, dipotong melintang garis las dengan menggunakan gergaji mesin selebar 100 mm. Demikian juga dengan panajng dari spesimen dipotong sesuai ukuran di atas dengan letak las-lasan di tengah-tengah.
- Perataan sisi-sisi yang telah dipotong tersebut dengan menggunakan mesin sekrap.
- Pengukuran dan penggambaran bentuk spesimen uji fatik sesuai ukuran di atas pada pelat tersebut.

- Dengan menggunakan mesin bor , dilakukan pengeboran sepanjang spesimen dengan maksud untuk mempermudah pemotongan dan pembentukan spesimen, terutama pada bagian yang melengkung.
- Setelah itu dipukul dengan menggunakan palu hingga bagian yang dilubangi tadi terlepas. Kemudian permukaan bekas potongan tersebut dihaluskan dengan gerinda dan kikir.
- Pembuatan takik (*notch*) pada daerah HAZ dengan kedalaman takik 4 mm dan sudut takik 60 derajat.
- Pembuatan lubang untuk baut pengikat(pin) pada klem mesin uji fatik, dengan posisi dan ukuran lubang seperti pada gambar.
- Pemolesan permukaan spesimen untuk mendapatkan permukaan yang datar, mengkilap dan halus (hilang dari cacat permukaan).

4.3.4.1. Pelaksanaan Pengujian Fatik

A. Persiapan Mesin Uji Fatik

- Penentuan besarnya beban yang akan diaplikasikan pada pengujian , berdasarkan hasil uji tarik material induk.

Hasil uji tarik material induk :

$$\sigma_{yield} = 43,107 \text{ Kg/mm}^2$$

$$\sigma_{ultimate} = 71,734 \text{ Kg/mm}^2$$

Tegangan yang diaplikasikan adalah 0,5 dari σ_{yield}

$$\begin{aligned}\sigma_{app} &= 0,5 \times \sigma_{yield} \\ &= 0.5 \times 43,107 \\ &= 21,5535 \text{ kg/mm}^2\end{aligned}\tag{4.7}$$

Beban yang diaplikasikan adalah :

$$\begin{aligned}
 F_{app} &= A \times \sigma_{app} & (4.8) \\
 &= (9 \times 21) \times 21,5535 \times 9,807 \\
 &= 39949,908 \text{ N} \\
 &= 39,94991 \text{ KN}
 \end{aligned}$$

- Beban yang telah didapatkan tersebut, selanjutnya disesuaikan dengan hasil kalibrasi sehingga didapatkan besarnya Strain Indikator yang akan diterapkan pada mesin uji fatik.

Perhitungan besarnya Strain Indikator

Persamaan kalibrasi beban :

$$Y = -0,4114286 + 50,53613 X \quad (4.9)$$

dimana :

Y = Strain Indikator

X = Beban yang diaplikasikan (KN)

Sehingga didapatkan :

$$Y_{maks} = 2080 \quad ; \quad Y_{min} = 370 \quad (4.10)$$

- Penentuan besarnya frekwensi pembebanan yang akan diterapkan dalam pengujian

$$f = 1,6 \text{ Hz} \quad (4.11)$$

- Pemasangan alat pembesar sekaligus pengukur panjang retak, untuk mengamati perambatan retak dan mengukur panjang retak yang terjadi.

B. Pelaksanaan Pengujian

- Setelah mesin dipanaskan , spesimen dipasang dengan posisi lurus dengan arah pembebanan.
- Posisi pembesar diatur, sehingga dapat melihat perambatan retak pada ujung takikan.

- Percobaan dimulai dengan mengatur amplifier mesin uji fatik, dengan cara menaikkan Strain Indikator secara perlahan-lahan bersamaan dengan pengaturan frekwensi dan juga amplitudo.
- Kemudian penunjukkan siklus dihidupkan dan spesimen diamati setelah beberapa cycle diterapkan, dengan melihat ujung retak.

BAB V

ANALISA DAN PENGOLAHAN DATA

5.1. PENDAHULUAN

Dari pengujian yang telah dilakukan baik uji kekerasan, tarik maupun uji fatik diperoleh data hasil pengujian yang berbeda-beda pada ketiga jenis spesimen.

Spesimen I dengan total Heat Input = 1373,5 joule/mm

Spesimen II dengan total Heat Input = 1574,5 joule/mm

Spesimen III dengan total Heat Input = 1750 joule/mm

Didalam bab ini akan disajikan data hasil pengujian, berikut analisa perbandingannya

5.2. HASIL UJI TARIK

Hasil uji tarik yang pelaksanaannya telah dijelaskan pada bab IV, didapatkan harga-harga yaitu : tegangan ultimate, tegangan yield, elongation dan reduction area pada masing-masing spesimen yang telah dilakukan pengelasan dengan heat input yang berbeda .

Data hasil uji tarik tersebut adalah sebagai berikut :

Data Sebelum Pengujian

L0 (mm)	T0 (mm)	W0 (mm)	A0 (mm ²)
50	10	12,5	125

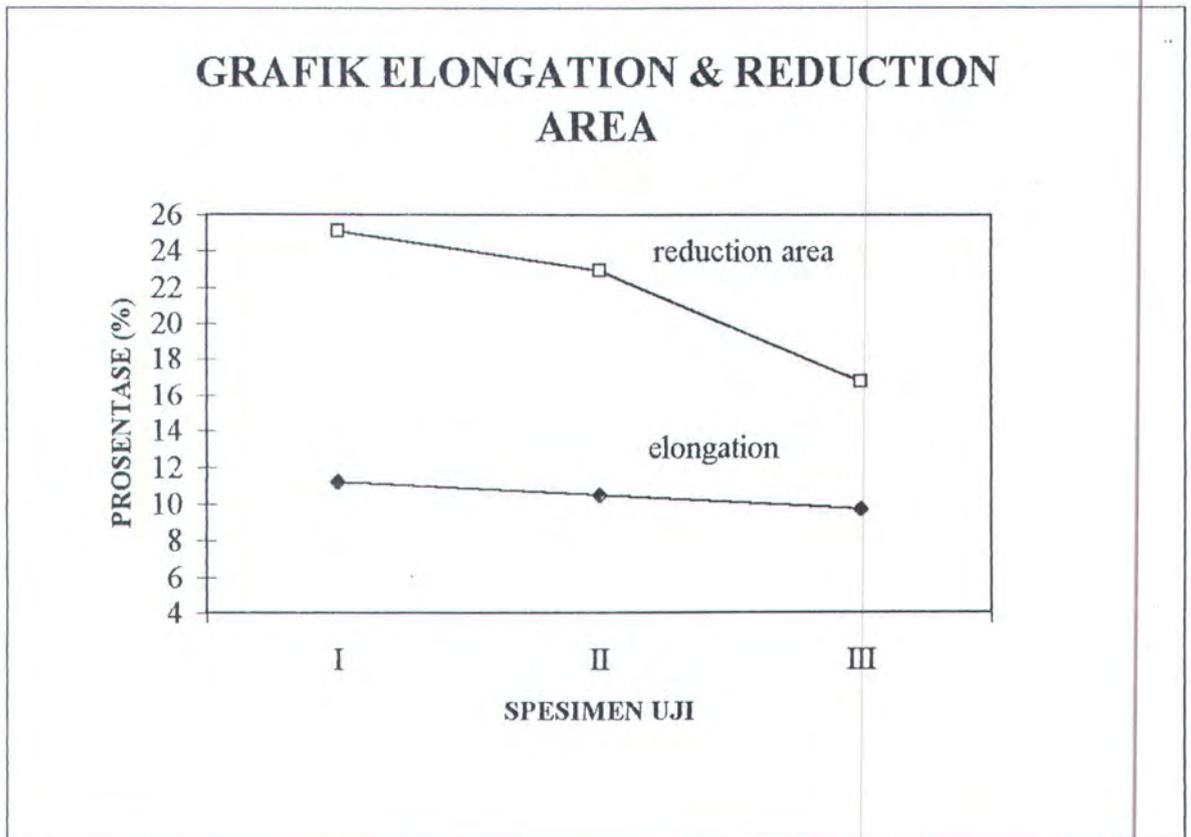
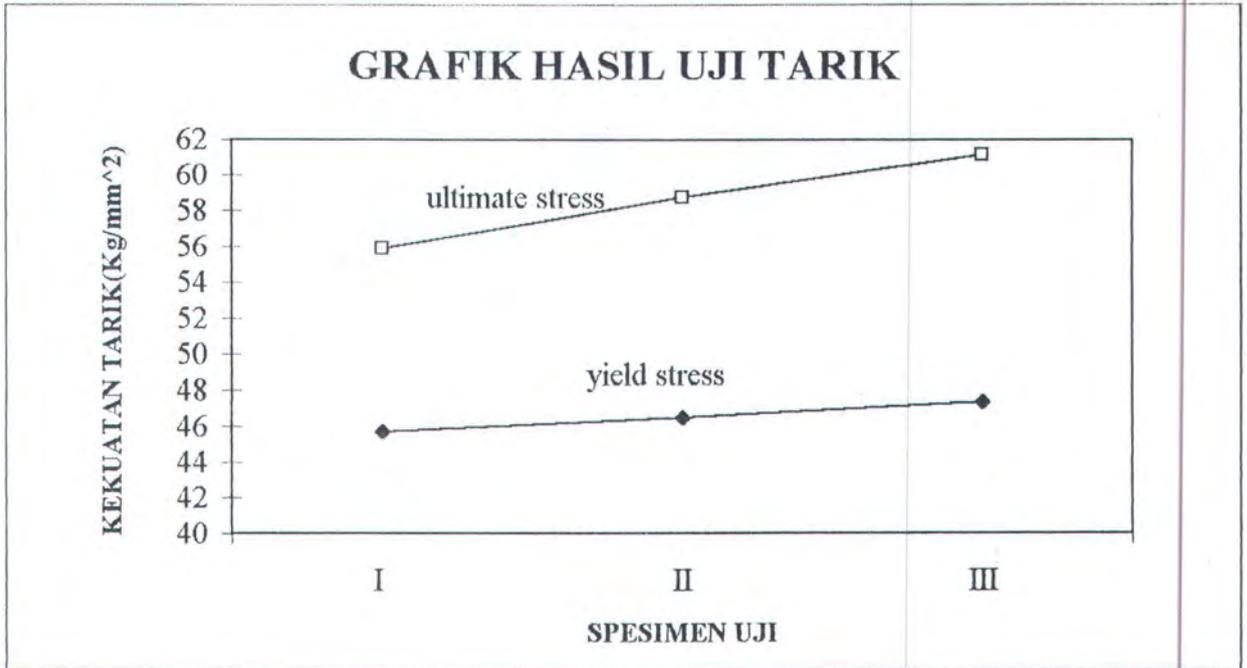
Data Sesudah Pengujian

Spesimen no	Heat Input (joule/mm)	L1 (mm)	T1 (mm)	W1 (mm)	A1 (mm ²)	Fy _{ield} (KN)	F _{ult} (KN)
I	1373,5	55,60	8,55	10,95	93,62	56	68,5
II	1574,5	55,25	8,60	11,20	96,32	57	72,0
III	1750	54,85	8,90	11,70	104,13	58	75

Hasil Uji Tarik

Spesimen no	Heat Input (joule/mm)	yield Stress (Kg/mm)	ultimate Stress (Kg/mm)	Elongation %	RA %
I	1373,5	45,682	55,88	11,2	25,104
II	1574,5	46,497	58,73	10,5	22,944
III	1750	47,313	61,18	9,7	16,696

Tabel 5.1. Hasil uji tarik material dengan perbedaan heat input pengelasan



Gambar 5.1 Grafik hasil uji tarik

5.2.1. ANALISA HASIL UJI TARIK

Gambar 5.1. memperlihatkan grafik kekuatan tarik dan keuletan dari masing-masing spesimen hasil pengelasan dengan heat input yang berbeda. Pada spesimen 1 yaitu material dengan heat input pengelasan paling rendah (1373,5 joule/mm) mempunyai kekuatan tarik yang paling rendah yaitu dan . Hal ini disebabkan karena pada pengelasan dengan heat input yang rendah menggunakan arus pengelasan yang rendah sehingga penetrasinyapun juga rendah. Disamping itu heat input yang rendah akan mengurangi suhu pemanasan dan laju pendinginan, sehingga butir kristal yang terbentuk kecil-kecil dan kekuatan tariknya paling rendah, tetapi mempunyai keuletan dan yang paling tinggi. Ini terlihat dari grafik reduction area dan elongation-nya yang paling tinggi yaitu elongation = 11,2 % dan reduction area = 25,104 %.

Sedangkan pada spesimen 3 yaitu material dengan heat input pengelasan paling tinggi (1750 joule/mm) mempunyai kekuatan tarik paling tinggi dan , tetapi keuletannya paling rendah yaitu elongation = 9,7 % dan reduction area = 16,696 %. Hal ini karena disamping menggunakan arus pengelasan yang tinggi sehingga penetrasinyapun tinggi juga heat input yang tinggi akan meningkatkan suhu pemanasan dan laju pendinginan sehingga kristal yang terbentuk besar-besar. Struktur kristal ini bersifat keras dan getas.

5.3. HASIL UJI KEKERASAN

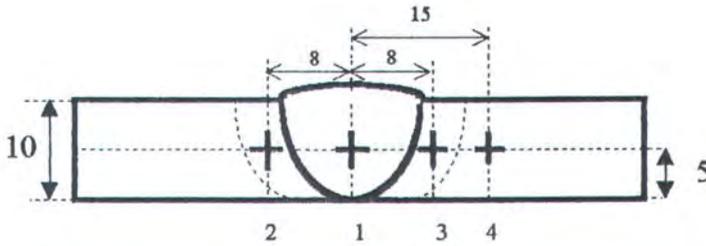
Tujuan dari pengujian kekerasan ini adalah untuk mengetahui seberapa jauh nilai kekerasan yang terjadi pada daerah lasan (HAZ, Weld Metal, Base Metal) akibat proses pengelasan dengan variasi heat input yang berbeda. Tiap spesimen dilakukan pengujian pada 4 titik yaitu :

2 titik pada daerah HAZ (kiri dan kanan jalur pengelasan)

1 titik pada daerah Weld Metal

1 titik pada daerah Base Metal

Jarak dan posisi titik pengujian dapat dilihat pada gambar 5.2



Gambar 5.2 Jarak dan posisi pengujian kekerasan

Setelah dilakukan pengujian pengujian kekerasan (Brinell) dan mengukur besarnya diameter penekanan di titik pengujian, maka besarnya nilai kekerasan Brinell dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$HB = 2.P \left[\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \right]$$

dimana :

HB = Nilai Kekerasan Brinell

P = Beban pengujian yang digunakan = 30 Kg

D = Diameter bola penekan = 1 mm

d = Diameter penekan di titik pengujian (mm)

Dari hasil pengujian kekerasan Brinell yang dilakukan pada tiap spesimen dengan heat input pengelasan yang berbeda didapatkan data-data sebagai berikut :

Total Heat Input = 1373,5 Joule / mm

Posisi No.	Jarak (mm)	Ket.daerah	ØLubang Penekanan (mm)	Nilai Kekerasan (HB)
1	0	Weld Metal	0,477	157,71
2	8	HAZ	0,400	228,77
3	8	HAZ	0,412	215,04
4	15	Base Metal	0,418	208,61

Total Heat Input = 1574,5 Joule / mm

Posisi No.	Jarak (mm)	Ket.daerah	ØLubang Penekanan (mm)	Nilai Kekerasan (HB)
1	0	Weld Metal	0,470	162,77
2	8	HAZ	0,377	258,84
3	8	HAZ	0,375	261,71
4	15	Base Metal	0,417	209,66

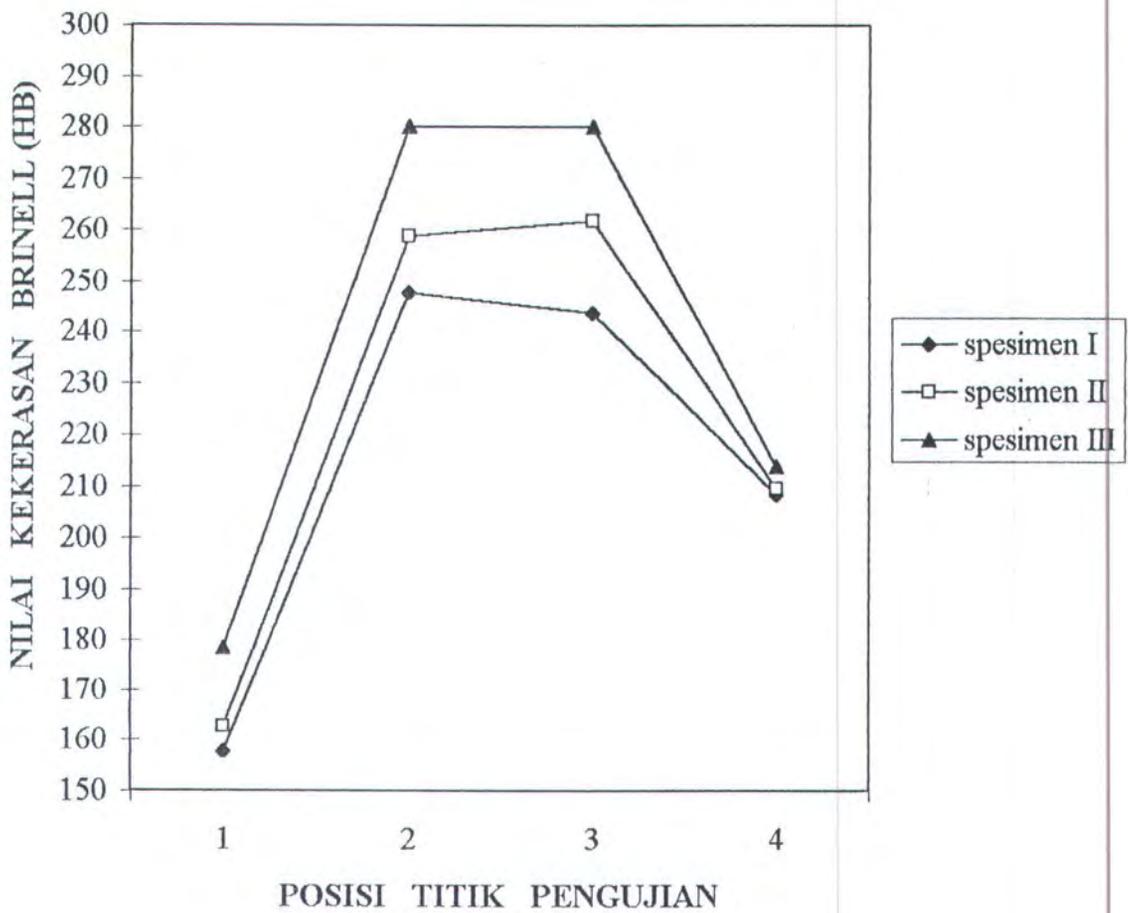
Total Heat Input = 1750 Joule / mm

Posisi No.	Jarak (mm)	Ket.daerah	ØLubang Penekanan (mm)	Nilai Kekerasan (HB)
1	0	Weld Metal	0,450	178,54
2	8	HAZ	0,363	280,00
3	8	HAZ	0,363	280,00
4	15	Base Metal	0,413	2 13,94

Tabel 5.2 Hasil uji kekerasan Brinell material dengan perbedaan heat input

Untuk lebih memudahkan dalam menganalisa, data yang telah didapat dari hasil pengujian dibuat grafik tingkat kekerasan pada masing-masing spesimen terhadap posisi titik pengujian

GRAFIK HASIL UJI KEKERASAN



Gambar 5.3 Grafik hasil uji kekerasan

Keterangan posisi titik pengujian :

1 = Daerah Weld Metal

2 dan 3 = daerah HAZ (kiri & kanan jalur las)

4 = Daerah Base Metal

5.3.1. ANALISA HASIL UJI KEKERASAN

a. Berdasarkan Posisi Titik Pengujian

Pada Gambar 5.3. memperlihatkan nilai kekerasan yang dicapai pada daerah HAZ, Weld metal dan Base metal untuk masing-masing spesimen. Dari grafik tersebut terlihat bahwa terdapat perbedaan nilai/tingkat kekerasan pada ketiga daerah tersebut. Hal ini disebabkan oleh perbedaan distribusi temperatur dan laju pendinginan serta komposisi kimia. Untuk komposisi kimia, kandungan unsur karbon (C) sangat menentukan tinggi,rendahnya nilai kekerasan yang dicapai. Semakin tinggi kandungan karbonnya, maka tingkat kekerasan yang dicapai akan semakin tinggi pula dan sebaliknya.

Pada percobaan (pengelasan) ini menggunakan elektrode dengan kadar karbon sebesar 10 % (OK Autrod 12.20), sedangkan pada logam induk (base metal) mempunyai kandungan karbon sebesar 45 % (baja S 45 C). Kadar karbon dari elektrode lebih kecil dibandingkan kadar karbon dari logam induk (base metal) sehingga nilai / tingkat kekerasan dari weld metal akan lebih rendah dibandingkan 2 daerah las lainnya (HAZ dan Base Metal).

Sedangkan nilai kekerasan tertinggi, terjadi pada daerah HAZ karena nilai kekerasan dari HAZ adalah akumulasi tingkat kekerasan yang dipengaruhi oleh komposisi kimia, laju pendinginan dan tegangan pada sambungan las.

Nilai kekerasan dari base metal lebih rendah dibandingkan daerah HAZ, hal ini karena semakin jauh jaraknya dari weld metal dan HAZ, maka temperatur pemanasan atau distribusi temperatur yang diterima akan semakin rendah, akibatnya nilai kekerasannya pun akan lebih rendah dari daerah HAZ.

b. Berdasarkan Besarnya Heat Input

Dari hasil pengujian kekerasan pada material hasil pengelasan dengan heat input yang berbeda, diperoleh tingkat kekerasan yang berbea-beda. Pada Spesimen 1 yaitu spesimen dengan heat input pengelasan paling rendah (1373,5 joule/mm) mempunyai nilai kekerasan yang paling rendah, hal ini disebabkan oleh heat input yang rendah akan mengurangi suhu pemanasan maksimal (*peak temperatur*), sekaligus memperlambat laju pendinginan (*cooling rate*), sehingga butir kristal yang terbentuk mempunyai ukuran yang kecil-kecil .

Sedangkan pada spesimen 3 yaitu spesimen dengan heat input paling tinggi (1750 joule/mm) mempunyai nilai kekerasan yang paling tinggi , akrena apda heat input yang tinggi akn menaikkan suhu pemanasan (*peak temperatur*) sekaligus memperbesar laju pendinginan (*cooling rate*). Semakin tinggi suhu pemanasan , maka pada diagram CCT kurva-kurva yang menunjukkna terjadinya struktur -struktur akan bergeser ke kanan yang mengarah pada pemantapan pembentukan martensit. Ukuran butir kristal yang terbentuk besar-besar, sehingga tingkat kekerasannya juga semakin besar.

5.4. HASIL UJI FATIK

Tujuan dari pengujian fatik ini adalah untuk mengetahui perambatan retak serta umur lelah pada daerah HAZ dari spesimen -spesimen dengan heat input pengelasan yang berbeda. Spesimen yang dibebani sampai patah fatik dimaksudkan agar dapat menentukan harga K_{IC} atau *fracture toughness* material. Disamping itu hal ini dilakukan untuk menentukan berapa cycle yang dibutuhkan material sampai patah fatik (umur lelah). Pengujian dihentikan tiap -tiap cycle tertentu untuk diamati pertambahan panjang retak yang terjadi.

Sehingga dari pengujian fatik ini akan didapatkan data-data yaitu panjang retak yang terjadi (a) pada tiap-tiap cycle tertentu (N). Dari data hasil pengujian fatik tersebut diolah untuk dapat menentukan kecepatan penjalaran retak da/dN serat untuk menentukan besarnya harga K_I / faktor intensitas tegangan . Dengan demikian akan dapat diperoleh grafik yang menghubungkan antara faktor intensitas tegangan dengan kecepatan penjalaran retak.

DATA DARI PENGUJIAN FATIK

SPESIMEN III

NO	N (cycle)	a (mm)	SI min.	SI max.	SI rata-rata
1	-	4,00			
2	10.000	5,05	370	2.080	1225,0
3	12.000	6,03	372	2.085	1228,5
4	14.000	6,88	370	2.085	1227,5
5	18.000	8,17	375	2.085	1230,0
6	20.000	9,53	370	2.087	1228,5
7	22.000	11,78	370	2.076	1223,0

SPESIMEN II

NO	N (cycle)	a (mm)	SI min.	SI max.	SI rata-rata
1	-	4,00			
2	16.000	5,90	360	2.105	1232,5
3	18.000	7,20	380	2.180	1280,0
4	20.000	8,40	375	2.125	1250,0
5	22.000	9,50	372	2.109	1240,5
6	24.000	10,70	393	2.189	1291,0
7	25.000	11,60	396	2.200	1298,0

Tabel 5.3 Data dari pengujian fatik

5.4.1. PENGOLAHAN DATA HASIL PENGUJIAN

1. Perhitungan Kecepatan Perambatan Retak

Kecepatan perambatan retak diperoleh dengan cara membagi setiap pertambahan panjang (da) dengan pertambahan cycle (dN).

PENENTUAN HARGA da/dN

SPESIMEN III

NO	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1	1,05	10.000	1,05E-04
2	0,98	2.000	4,90E-04
3	0,85	2.000	4,25E-04
4	1,29	4.000	3,23E-04
5	1,36	2.000	6,80E-04
6	2,25	2.000	1,13E-03

SPESIMEN II

NO	da (mm)	dN (cycle)	da/dN (mm/cycle)
1	1,90	16.000	1,19E-04
2	1,30	2.000	6,50E-04
3	1,20	2.000	6,00E-04
4	1,10	2.000	5,50E-04
5	1,20	2.000	6,00E-04
6	0,90	1.000	9,00E-04

Tabel 5.4 Penentuan harga da/dN

Perhitungan Rentang Faktor Intensitas Tegangan .

Rumus yang digunakan untuk menentukan K_I berdasarkan bentuk spesimen. Untuk percobaan ini menggunakan jenis spesimen retak tepi (crack tip spesiment).

$$\Delta K = K_{maks} - K_{min}$$

$$K_I = Y\sigma\sqrt{a}$$

dimana :

K_I = Faktor Intensitas Tegangan

σ = Tegangan yang diberikan (N/mm^2)

a = Panjang retak yang terjadi (mm)

$$Y = 1,99 - 0,41\left(\frac{a}{W}\right) + 18,7\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 38,48\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 53,85\left(\frac{a}{W}\right)^4$$

W = Lebar spesimen (mm)

PERHITUNGAN RENTANG SIF

SPESEMEN III

NO	A mm	F min. N	F max N	TEG min N/mm	TEG max N/mm	KI min.	KI max.	DELTA K
1	189	7329,64	41166,81	38,78	217,81	212,88	1195,64	982,76
2	189	7369,21	41265,75	38,99	218,34	250,98	1405,42	1154,44
3	189	7329,64	41265,75	38,78	218,34	284,85	1603,70	1318,85
4	189	7428,57	41265,75	39,30	218,34	351,00	1949,83	1598,82
5	189	7329,64	41305,33	38,78	218,55	425,80	2399,54	1973,74
6	189	7329,64	41087,66	38,78	217,40	609,30	3415,56	2806,26

SPESIMEN II

NO	A mm	F min. N	F max. N	TEG min N/mm	TEG.ma x N/mm	KI min.	KI max.	DELTA K
1	189	7131,76	41661,51	37,73	220,43	237,94	1389,97	1152,03
2	189	7527,51	43145,60	39,83	228,28	307,17	1760,61	1453,44
3	189	7428,57	42057,27	39,30	222,53	363,40	2057,41	1694,01
4	189	7369,21	41740,66	38,99	220,85	426,13	2413,68	1987,55
5	189	7784,76	43323,69	41,19	229,23	542,99	3021,86	2478,87
6	189	7844,12	43541,35	41,50	230,38	632,96	3513,47	2880,50

Tabel. 5.5. Perhitungan Rentang Faktor Intensitas Tegangan

Grafik Perambatan Retak

Dari hasil perhitungan rentang faktor intensitas tegangan (ΔK_I) dan data kecepatan perambatan retak (da/dN) maka dapat dibuat grafik kecepatan perambatan retak dalam bentuk logaritma dengan $\log da/dN$ sebagai ordinat dan $\log \Delta K$ sebagai absis.

DATA LAJU PERAMBATAN RETAK

SPESIMEN III

NO	Log (DELTA KI)	log (da/dN)
1	2,9924	-3,9788
2	3,0624	-3,3098
3	3,1202	-3,3716
4	3,2038	-3,4915
5	3,2953	-3,1675
6	3,4481	-2,9488

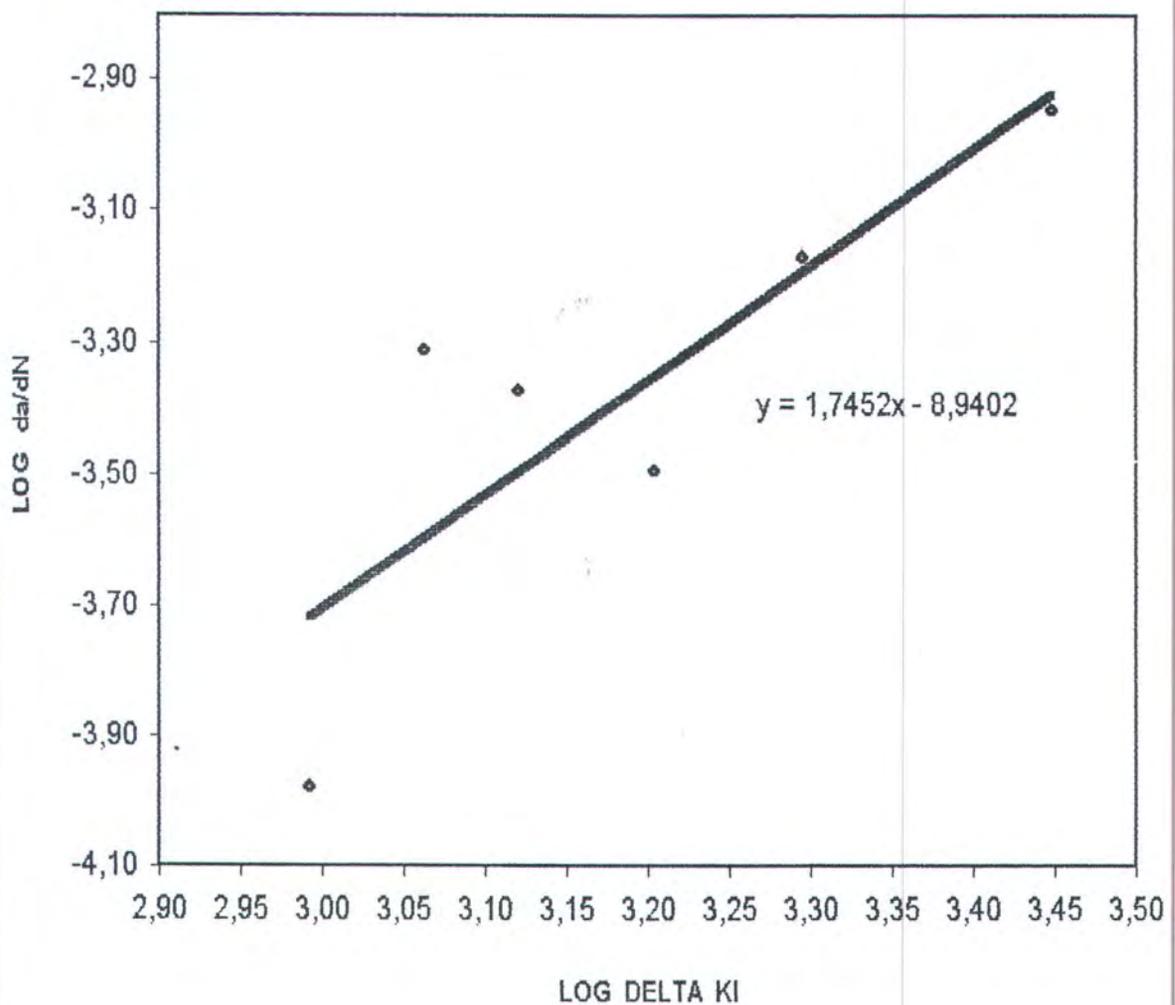


SPESIMEN II

NO	Log (DELTA KI)	log (da/dN)
1	3,0615	-3,9254
2	3,1624	-3,1871
3	3,2289	-3,2218
4	3,2983	-3,2596
5	3,3943	-3,2218
6	3,4595	-3,0458

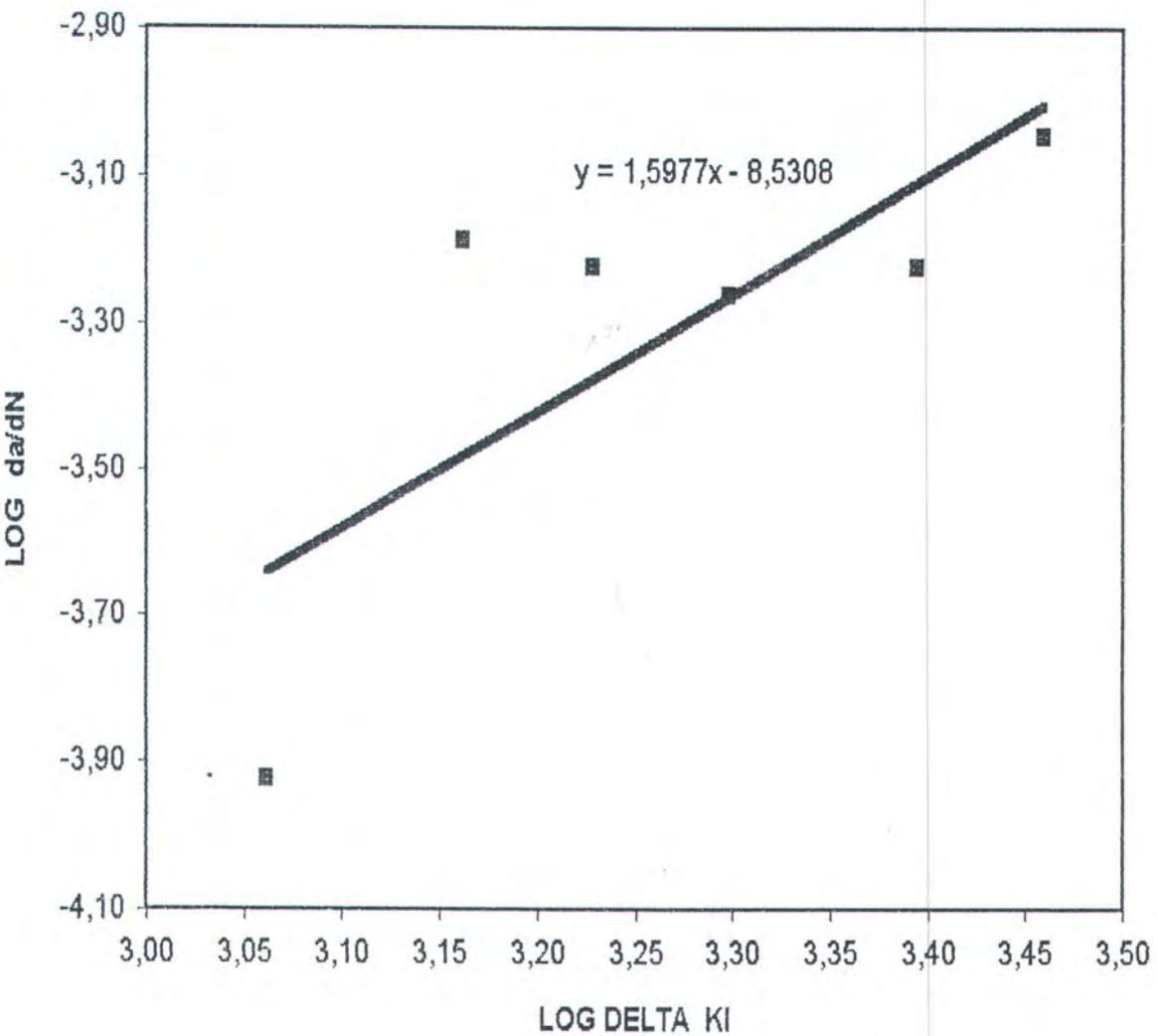
Tabel 5.6 Data grafik laju perambatan retak

GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK
untuk spesimen III (HI total = 1750 joule/mm)

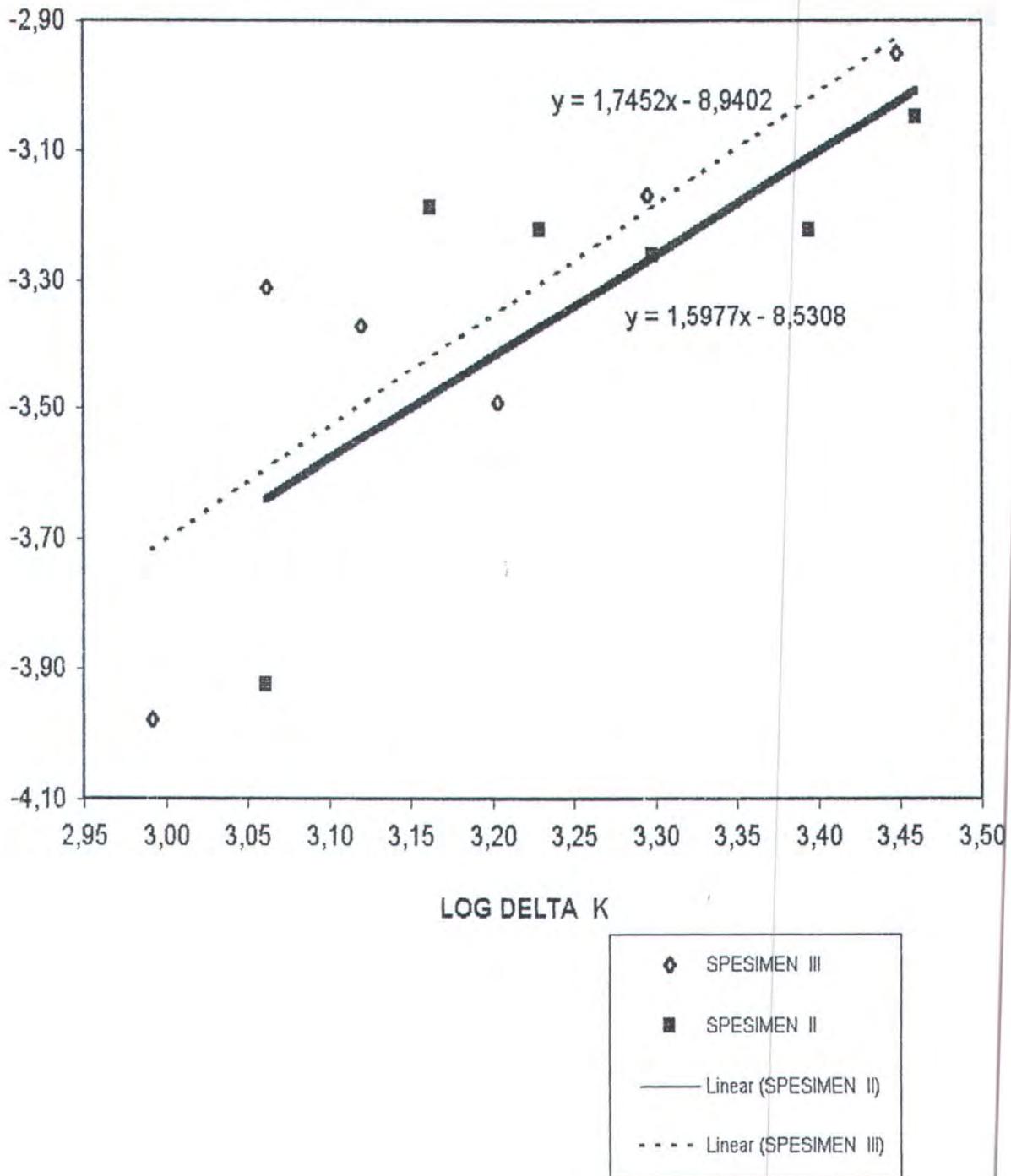


Gambar 5.4 Grafik laju perambatan retak spesimen III

GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK
untuk spesimen II (HI total = 1574,5 joule/mm)



Gambar 5.5 Grafik laju perambatan retak spesimen II

GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK
spesimen II dan spesimen III

Gambar 5.6 Grafik laju perambatan retak spesimen III & II

5.4.2 ANALISA GRAFIK LAJU PERAMBATAN RETAK

Grafik laju perambatan retak adalah grafik yang menunjukkan hubungan antara kecepatan perambatan retak (da/dN) dengan rentang SIF (ΔK_I), sehingga dari grafik tersebut dapat diperkirakan harga perambatan retak (da/dN) untuk nilai SIF tertentu.

Dari grafik perbandingan perambatan retak kedua spesimen yaitu spesimen II (HI total = 1574,5 joule/mm) dan spesimen III (HI total = 1750 joule/mm) di atas (gambar 5.6), didapatkan bahwa laju perambatan retak spesimen III sedikit lebih tinggi dibanding dengan spesimen II, ini terlihat dari posisi garis regresi linier perambatan retak spesimen III berada sedikit di atas spesimen II. Disamping itu juga nilai dari gradien berpengaruh terhadap kenaikan laju perambatan retak, semakin tinggi nilai dari gradien maka pertumbuhan da/dN akan semakin besar pula dan sebaliknya nilai gradien yang rendah, maka pertumbuhan da/dN akan semakin rendah pula. Persamaan regresi linier dari masing-masing spesimen adalah :

$$\text{Spesimen III : } Y = 1,7452 X - 8,9402$$

$$\text{Spesimen II : } Y = 1,5977 X - 8,5308$$

Ini berarti nilai gradien spesimen III yaitu 1,7452 lebih tinggi dibanding nilai gradien spesimen II yaitu 1,5977. Sehingga laju perambatan retak spesimen III lebih tinggi dibanding spesimen II. Hal ini disebabkan, karena spesimen III mempunyai nilai kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibanding spesimen II, sedangkan nilai elongation dan reduction area lebih rendah sehingga spesimen III ini lebih bersifat getas dibandingkan spesimen II.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dan analisa hasil pengujian pada material baja kekuatan tinggi (S 45 C) , setelah dilakukan pengelasan dengan perbedaan besar heat input, yaitu :

Spesimen I, dengan Heat Input Total = 1374,5 joule/mm

Spesimen II, dengan Heat Input Total = 1574,5 joule/mm

Spesimen III, dengan Heat Input Total = 1750 joule/mm

maka dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Dari hasil pengujian kekerasan didapatkan hasil bahwa, semakin tinggi Heat Input pengelasan, maka nilai kekerasan yang terjadi akan semakin tinggi pula. Hal ini terjadi baik pada weld metal, base metal dan daerah HAZ. Perubahan nilai kekerasan terbesar terjadi pada daerah HAZ, dimana pada spesimen I sebesar 215,04 sedangkan pada spesimen III sebesar 280 pada skala Brinell.
2. Dari pengujian tarik dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi Heat Input pengelasan , maka kekuatan tariknya (tegangan yield dan tegangan ultimate) semakin tinggi pula, sedangkan nilai elongation dan reduction area -nya akan menurun. Hal ini terjadi pada spesimen III, ini berarti bahwa material tersebut sifat ductility - nya menurun dan cenderung lebih bersifat getas (brittle).
3. Dari hasil pengujian fatik dapat disimpulkan bahwa , berdasarkan grafik laju perambatan retak maka material dengan heat input pengelasan yang tertinggi (spesimen III) mempunyai laju perambatan retak sedikit relatif lebih tinggi dibanding spesimen II. Hal ini disebabkan karena spesimen III mempunyai sifat yang lebih keras dan getas

dibanding spesimen II dan I. Sehingga sifat yang lebih getas ini mengakibatkan perambatan terhadap retak yang besar.

6.2. SARAN

1. Untuk mendapatkan data-data yang lebih akurat diperlukan jumlah spesimen pengujian yang lebih banyak .
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut pada jenis material yang berbeda (mild steel, high tensile steel dan super high tensile steel).
3. Perbedaan heat input pada pengelasan , tidak hanya berpengaruh pada sifat mekanis dan perambatan retaknya saja tetapi perlu juga dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruhnya terhadap besarnya deformasi yang terjadi

DAFTAR PUSTAKA

1. **ASTM, Metal Test Methods & Analytical Procedure**, Annual Book Of ASTM Standard 1986, vol.3.01, 1916 Race / Street Philadelphia 1986.
2. ASM, vol. 10, **Failure Analysis & Prevention**.
3. Achmad Arifin, **Pengaruh Temperatur Pengelasan Pada HAZ Untuk Material ASTM A 131 Secara Experimental**, Tugas Akhir Teknik Kelautan **FTK - ITS**
4. Broek, David., **Elementary Engineering Fracture Mechanics**, Martinus Nijhoff Publisers, Boston/The Haque/Dor drectit/lancaster, 1982.
5. Dieter, George, E., **Mechanical Metallurgy**, Second Edition, Mc Graw Inc, 1976.
6. ESAB, Welding Handbook, **Filler Materials And Welding Equipment For Manual And Automatic Welding**, 1984/1985.
7. Fuchs, H.O. & Stephens, R.I., **Metal Fatigue In Engineering**, A Willey Interscience Publication John Wiley & Sons, 1980.
8. Gurney, T.R., **Fatigue Of Weld Structure**, Cambridge University Press, London 1968.
9. Houldcroft P.T., **Submerge Arc Welding**, Abington Publishing, Workhead Publishing Ltd, Abington, Cambridge England, 1989..
10. Soeweify, **Teknologi Las I**, Jurusan Teknik Perkapalan, FTK -ITS.

DAFTAR PUSTAKA

11. Siswosuwarno, M., **Aspek Metalurgi Pada Kelelahan Logam**, Laboratorium Aerodinamika Pusat Antar Universitas Ilmu Rekayasa ITB, 1989.
12. **The Procedure Handbook Of Arc Welding**, Twelfth Edition, The Lincoln Electric Company 22801, St. Clair Avenue Cleveland, Ohio 44117, 1973.

LAMPIRAN I

KARAKTERISTIK FLUX (OK FLUX 10.40)

OK Flux 10.40

Classification
AWS A5.17: E62 E1 12, F72 EM 12 K
DIN 8557: FMS 198 AC 8 m



A fused manganese alloying submerged arc welding flux.
Density: 1.5 kg/litre approx.

Applications

OK Flux 10.40 is for use with OK Autrod 12.10, OK Autrod 12.20 or OK Autrod 12.40 for submerged arc welding of ordinary structural steels, pressure vessel steels and ship steels having impact requirements down to a minimum of -20°C .

Recommendations for welding

Recommended welding data for Flux 10.40 are given in tables 11 and 12 on pages 26 and 27.

Flux consumption

Flux consumption is almost directly proportional to the arc voltage.
At 30 V the consumption is about 1 kg OK Flux 10.40 per kg electrode.
At 40 V the consumption is about 2 kg OK Flux 10.40 per kg electrode.

Typical weld metal composition % combination

OK Flux 10.40/ OK Autrod	C	Si	Mn
12.10	0.1	0.5	0.9
12.20	0.1	0.5	1.2
12.22	0.1	0.5	1.2
12.40	0.1	0.4	1.6

Typical mechanical properties. All weld metal specimens.

OK Flux 10.40/ OK Autrod	Yield stress		Tensile strength		Charpy V, impact values		
	N/mm ²	kp/mm ²	N/mm ²	kp/mm ²	J	kpm	Temp. °C
12.10	340	35	470	48	40	4	-20
12.20/12.22	350	36	490	50	40	4	-20
12.40	440	45	570	58	40	4	+20

Approvals

Combination

OK Flux 10.40/ OK Autrod	ABS	LR	DnV	BV	GL	PRS Poland	USSR
12.10	2TM	2TM	IITM	A TM	2TM	2TM	IV HP, K III
12.20	3TM 3YTM	3TM+ 3YTM	III YTM	A 3TM A III TM	3YTM	3YTM	II, KII

Packing

OK Flux 10.40 is supplied in plastic-lined paper bags containing 25 kgs.

LAMPIRAN II

KARAKTERISTIK ELEKTRODE (OK AUTROD 12.20)

OK Autrod 12.20

Classification:
AWS A5.17: (EM 12 K)
DIN 8557: 82



Copper coated semi-killed electrode for submerged arc and electroslag welding of medium and high strength structural steel.

Typical weld metal composition %
Combination

OK Autrod 12.20/ OK Flux	10.40	10.50*	10.61	10.62	10.70	10.71	10.80	10.81
Carbon	0.1	0.13	0.1	0.1	0.07	0.07	0.1	0.1
Silicon	0.5	0.1	0.2	0.1	0.5	0.25	0.5	0.5
Manganese	1.2	1.0	1.0	0.8	1.6	1.25	1.5	1.5

* Electroslag welding in 35 mm. Si-killed steel SIS 1411.

Typical mechanical properties. All weld metal specimens
Combination

OK Autrod 12.20/ OK Flux	Yield stress		Tensile strength		Charpy V Impact values		
	N/mm ²	kp/mm ²	N/mm ²	kp/mm ²	J	kpm	temp. °C
10.40	350	36	490	50	40	4	-20
10.50*	290	30	440	45	30	3	-20
10.61	410	42	530	54	50	5	-20
10.62	350	36	450	46	10	8	-20
10.70	470	48	550	56	60	6	-20
10.71	440	45	540	55	50	5	-20
10.80	430	44	530	54	50	5	-20
10.81	430	44	530	54	40	4	-20

* Electroslag welding

Approvals

For approvals by the Classification Societies refer to the OK Flux being used or see table 3, page 18.

Packing

Diameter mm	Spool type No.	Weight of electrode kg
2.0	25	15
3.0	8	30
4.0	8	30
4.0	16	100
5.0	8	30
5.0	16*	100

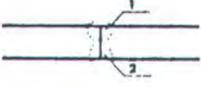
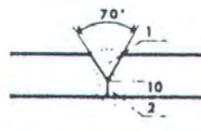
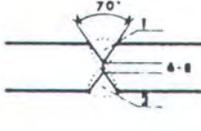
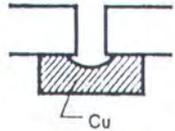
* Not necessarily kept in stock

LAMPIRAN III

PARAMETER PENGELASAN LAS BUSUR RENDAM (ESAB Handbook)

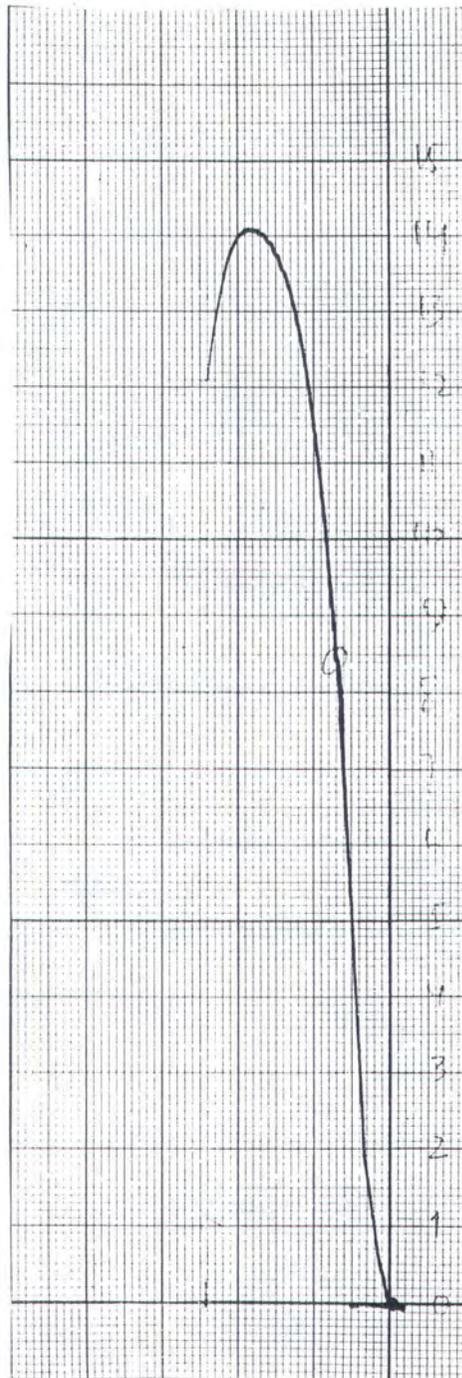
Welding Data and Joint Preparation

Table 9 Typical welding data and recommended joint preparation for submerged arc welding mild steel and carbon-manganese structural steels with OK Flux 10.40, OK Flux 10.70, OK Flux 10.71, OK Flux 10.80 and OK Flux 10.81.

Type of joint	Plate thickness mm	Wire ø mm	Run No.	Arc voltage V	Welding current A	Welding speed m/h
	6	4	1	35	300	50
	8	4	2	35	350	46
			1	35	450	
	10	4	2	35	500	42
			1	35	500	
	12	5	2	35	550	38
1			35	600		
14	5	2	35	700	35	
		1	35	650		
	16	5	1	35	700	35
	18	6	2	36	800	30
			1	36	850	
	20	6	2	38	850	27
			1	38	925	
			2	38	850	
	18	6	1	36	700	30
	20	6	2	36	850	25
			1	36	800	
	25	6	2	36	850	20
			1	36	850	
	30	6	2	36	950	15
1			36	900		
		2	36	1000		
	2	2	1	28	325	75
	4	2,5	1	30	450	40
	6	3	1	31	510	30
	8	3	1	32	525	26
	10	3	1	33	600	23
	12	3	1	33	625	20

LAMPIRAN IV

GRAFIK HASIL UJI TARIK MATERIAL INDUK (S 45 C)



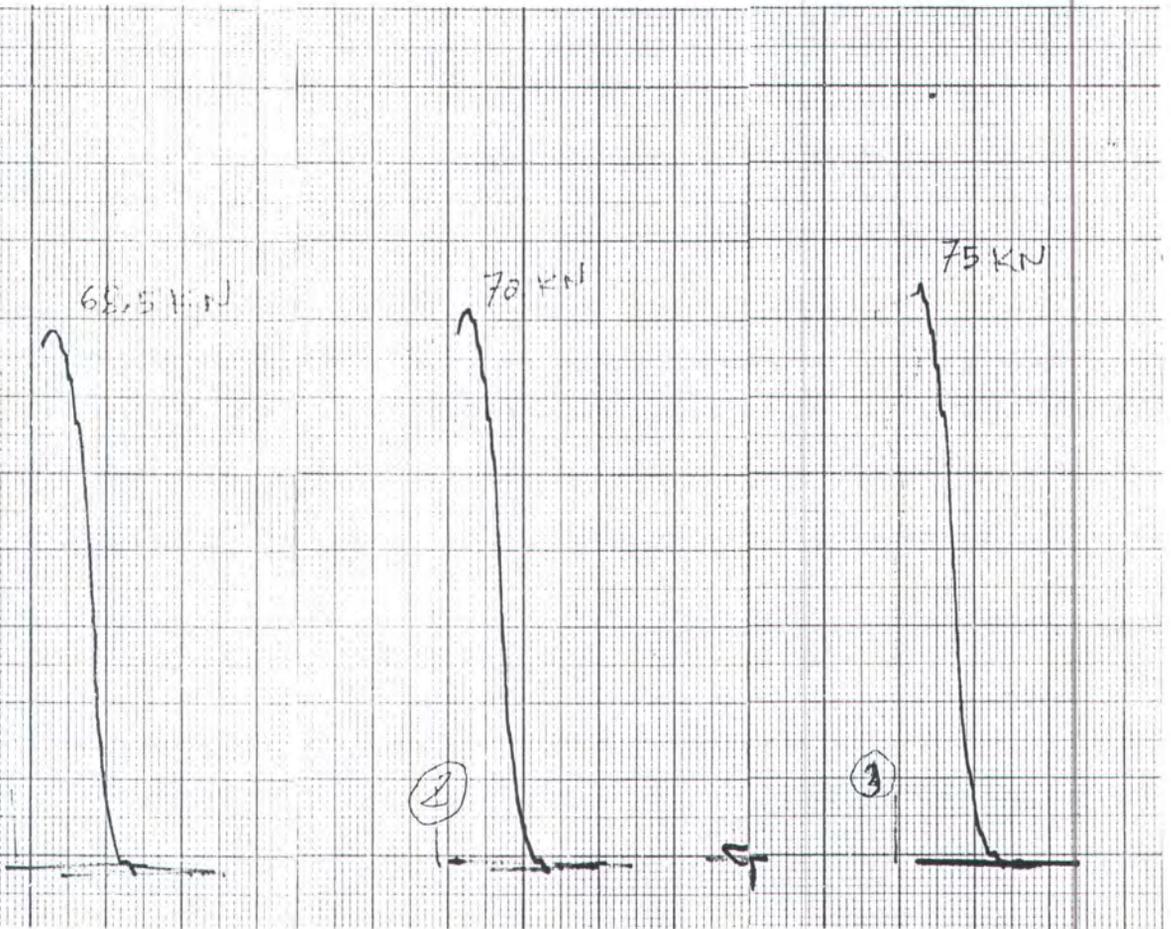
LAMPIRAN V

GRAFIK HASIL UJI TARIK MATERIAL HASIL PENGELASAN

Gambar (a) Material dengan heat input 1373,5 joule/mm

Gambar (b) Material dengan heat input 1574,5 joule/mm

Gambar (c) Material dengan heat input 1750 joule/mm



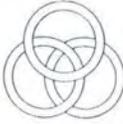
(a)

(b)

(c)

LAMPIRAN VI

SPESIFIKASI MATERIAL BAJA KEKUATAN TINGGI (S 45 C)



KRUPP QUALITY STEELS
GERMANY

	Krupp Grade	Din Code	Color Code	Chemical composition in %								Comparable standard			Max hardness supplied (HB)	Steel type characteristics	
				C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	AISI	BS	JIS			
Machinery Steel	1191	CK 45	⊙	0.43 — 0.45	0.20 — 0.40	0.60 — 0.90	—	—	—	—	—	—	1045	EN 43 or En 9	S45c	210	Medium carbon heat-treatable steel
	7218	25CrMo4	⊙	0.28 — 0.33	0.20 — 0.35	0.40 — 0.60	0.80 — 1.10	0.15 — 0.25	—	—	—	—	4130	—	—	190 — 238	Pre-hardened heat-treatable steel
	7225	42CrMo4	⊙	0.38 — 0.43	0.15 — 0.40	0.60 — 0.90	0.90 — 1.25	0.15 — 0.25	—	—	—	—	4140	EN 19A	SCM4H	310 (Rolled) 275 (Forged)	Pre-hardened and tempered high tensile heat-treatable steel
	6582	34CrNiMo6	⊙	0.35	0.25 — 0.40	0.50 — 0.90	1.40 — 1.60	0.25	1.60	—	—	—	4340	EN 110 or EN 24	SNQM 1	310 (Rolled) 275 (Forged)	Pre-hardened and tempered high tensile heat-treatable steel
	5919	15CrNi6	⊙	0.13 — 0.33	0.15 — 0.40	0.40 — 0.60	0.70 — 1.00	—	1.10 — 1.60	—	—	—	3215	en 35Z	—	190	Case hardening or cementation steel

Note: All Steel P and S ≤ 0.03%

	Mechanical properties			Temperature			Quenching Medium	Application
	Tensile strength (Kp/mm ²)	Yield point (Kp/mm ²)	Elongation (%)	Annealing °C	Hardening °C	Tempering °C		
1191	60-90	36-48	18-22	650-700	830-860 820-850	530-670	Oil Water	Transmission parts, pins, fasteners of medium strength also for hand and cutting tools etc.
7218	70	50	18	680-720	840-870 850-880	540-680	Oil Water	For oil drilling parts component when high pressure and welding is required as christmas trees etc.
7225	90-130	70-90	21	680-720	840-870 850-890	540-680	Oil Water	Part of high strength and severe demands on toughness as connecting rods pinions, gears, crankshaft etc.
6582	90-120	60-90	15	650-700	830-860	530-680	Oil	Highest stressed crankshaft gear components connecting rods, axle tubes, bolts, flanges, turbine rotor etc.
5919	70-110	65-75	12-18	Carburizing 630-720	800-830	170-210	Oil	Coq wheels, chain wheels, driving pinions, gear wheels, links etc.



FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN ITS
JURUSAN TEKNIK PERKAPALAN

DAFTAR KEMAJUAN TUGAS AKHIR (NA 1701)

mahasiswa : Didik Bahtiar
: 4191100020
diberikan : Semester Genap 1996 . / 19 97 .
mulai tugas : 16 Maret 1997
selesai tugas : 26 Juli 1997
Pembimbing : 1. Ir. Soewify, M.Eng
: 2.

gal	Uraian Kemajuan Tugas	Tanda Tangan
'97	Perbaiki Proposal TA	sb
'97	Bab I Pendahuluan selesai	sb
'97	Bab II Selesai	sb
'97	Penentuan jenis material, Standar pengujian, jenis & macam pengujian.	sb
'97	Prosedur pengelasan (persiapan sisi) - Parameter pengelasan (variasi Heat Input).	sb
'97	Pemeriksaan hasil pengelasan Spesimen I (heat input terendah)	sb
'97	Pemeriksaan hasil pengelasan Spesimen II & Spesimen III	sb
'97	Penentuan pembagian/pemotongan pelat yg telas dilas untuk spesimen uji tarik, kele- lahan & fatik	sb

lihat halaman berikutnya

No	Uraian Kemajuan Tugas	Tanda Tangan
'97	Hasil uji tarik material baja kekuatan tinggi (S 45 c)	st
'97	- Penentuan titik pengujian kekerasan - Hasil Mutu S _{45C} .	st
'97	Hasil Uji Kekerasan Brinell	st
'97	- Hasil Uji tarik - Grafik hasil uji tarik & kekerasan.	st
'97	- Bentuk spesimen uji tarik - Penentuan letak & ukuran titik (notes)	st
'97	- Data hasil pengujian fatik spesimen III - Grafik laju perambatan retak spesimen III	st
'97	- Data hasil pengujian fatik spesimen II - Grafik laju perambatan retak spesimen II	st
'97	Persiapan ujian Tugas Akhir	st
'97	Perbaikan data (grafik) pengujian	st
'97	Laporan Tugas Akhir disetujui (telah direvisi)	st

1. Lembar ini harus dibawa pada saat konsultasi
 konsultasi dilaksanakan minimal seminggu
 di.
 Lembar ini harus dikumpulkan kembali pada
 mengumpulkan laporan tugas akhir.

Surabaya, OKTOBER 19 97
 Dosen Pembimbing,

Ir. SOEWEIFY, M. Eng.
 NIP. 130 368 597