

378M/H/10



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

RSM
620.112.6
Kar
5-1
2009

TUGAS AKHIR - RM 1582

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN ANALITIS PENGARUH
PENGELASAN MULTILAYER GTAW-SMAW TERHADAP
UMUR LELAH DAN POLA PATAHAN BAJA SA-53B (PIPA
CIRCULATION HEATER) PADA UJI LELAH LENTUR
BOLAK-BALIK (FATIGUE REVERSED BENDING)**

Karunia Aapriyani Kartikasari
NRP 2104 100 001

Dosen Pembimbing
Ir. Hari Subiyanto, MSc

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2009

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	11-8-2009
Terima Dari	H
No. Agenda Fyp.	59



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - RM 1582

**EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF MULTI
LAYER GTAW-SMAW WELDING INFLUENCE IN FATIGUE
LIFE AND FRACTURE APPEARANCE OF SA-53B
(CIRCULATION HEATER SHELL) UNDER FATIGUE
REVERSED BENDING TEST**

Karunia Apriyani Kartikasari
NRP 2104 100 001

Academic Supervisor
Ir. Hari Subiyanto, MSc

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2009

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN ANALITIS PENGARUH
PENGELASAN MULTILAYER GTAW-SMAW TERHADAP UMUR
LELAH DAN POLA PATAHAN BAJA SA-53B (PIPA CIRCULATION
HEATER) PADA UJI LELAH LENTUR BOLAK-BALIK
(FATIGUE REVERSED BENDING)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Metalurgi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

KARUNIA APRIYANI KARTIKASARI
NRP. 2104 100 001

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Hari Subiyanto, MSc(Pembimbing)
2. Dr. Ir. Soeharto, DEA(Penguji I)
3. Ir. Suprapti(Penguji II)
4. Fahmi Mubarak, ST. MSc(Penguji III)

SURABAYA
AGUSTUS, 2009

**STUDI EKSPERIMENTAL DAN ANALITIS PENGARUH
PENGELASAN MULTILAYER GTAW-SMAW TERHADAP
UMUR LELAH DAN POLA PATAHAN BAJA SA-53B
(PIPA CIRCULATION HEATER) PADA UJI LELAH LENTUR
BOLAK-BALIK (FATIGUE REVERSED BENDING)**

Nama Mahasiswa : Karunia Apriyani K.
NRP : 2104 100 001
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Hari Subiyanto, MSc

Abstrak

Kerusakan shell circulation heater menyebabkan waktu produksi perusahaan pengguna alat tersebut menjadi berkurang. Shell circulation heater yang rusak dapat diperbaiki dengan cara dilas. Pengelasan yang dilakukan harus berkarakter excellent root penetration karena konstruksi dari circulation heater yang tidak memungkinkan dilakukan backgouging. Pengelasan yang buruk akan menimbulkan lack penetration yang dapat dianggap sebagai initial crack, dan akibat adanya pembebanan dinamis akan menyebabkan umur lelah suatu konstruksi menjadi berkurang, terjadi kegagalan lelah. Seperti yang terjadi pada kasus industri, yaitu kegagalan pengelasan SMAW 4 layer pada pipa circulation heater.

Sebagai solusi permasalahan tersebut dilakukan pengelasan baja SA-53B grade B dengan Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)-Shielded Metal Arc Welding (SMAW) dalam satu groove. Gas Tungsten Arc Welding dilakukan untuk root layer dan layer kedua, selanjutnya dilakukan Shielded Metal Arc Welding sebanyak tiga layer. Hasil pengelasan diuji lelah letur bolak-balik (fatigue reversed bending) dengan mesin LFE-150 pada tingkat tegangan 0,8Su dan 0,7Su dan 0,5 Su, lalu dibandingkan dengan material awal tanpa pengelasan pada tingkat tegangan 0,8Su. Kemudian dicari umur lelahnya dan diplotkan pada kurva S-N, serta diamati secara makro pola patahan yang terjadi.

Dari penelitian dapat diketahui bahwa pengelasan multi layer GTAW-SMAW memperbaiki kualitas lasan. Kemudian dari uji lelah yang dilakukan didapat umur lelah hasil pengelasan multi layer dengan tingkat tegangan 0,8Su, 0,7Su dan 0,5Su secara berturut-turut adalah sebagai berikut: $9,5 \times 10^5$ siklus, $2,2 \times 10^6$ siklus dan $5,5 \times 10^6$ siklus (belum patah). Sedangkan dari pengamatan pola patahan didapatkan 87,23% daerah patah statik dan 12,77% daerah patah lelah untuk

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF MULTI LAYER GTAW-SMAW WELDING INFLUENCE IN FATIGUE LIFE AND FRACTURE APPEARANCE OF SA-53B (CIRCULATION HEATER SHELL) UNDER FATIGUE REVERSED BENDING TEST

Name : Karunia Apriyani K.
NRP : 2104 100 001
Department : Teknik Mesin FTI-ITS
Academic Supervisor : Ir. Hari Subiyanto, MSc

Abstract

Damaged circulation heater makes the productivity of its company decrease. The cracked shell can be repaired by welding process. The characteristic of this welding process should be excellent root penetration because the construction of Circulation Heater does not support to do back gouging process. Wrong welding procedure may make new problems, such as lack of penetration which can be determined as initial crack. And because of dynamics loading, the initial crack will propagate and cause a fatigue failure. It decreases the fatigue life of a construction, like in an industrial problem which used 4 layer Shielded Metal Arc Welding Process.

The solution of that case is using a multi layer welding between Gas Tungsten and Shielded Metal Arc Welding at one groove. For the first and second layer using Gas Tungsten Arc Welding and then for the next three layers using Shielded Metal Arc Welding. After that, they are tested under fatigue reversed bending condition with LFE-150 machine in 3 stress grade; 0,8Su, 0,7Su and 0,5Su, and then compared with unwelded grade B of SA-53 steel. As the result, material life are plotted in S-N curve. Besides, the fracture appearances are also examined by macroscopic photograph.

Based on the research, it can be concluded that multi layer welding of GTAW-SMAW increase the quality of welded metal. From fatigue reversed bending test, the welded material life for 0,8Su, 07Su and 0,5Su are $9,5 \times 10^5$ cycles, $2,2 \times 10^6$ cycles and $5,5 \times 10^6$ cycles (still unbreakable). And from macroscopic examination of fracture appearances obtained that there are 87,23% static fracture area and 12,77% fatigue fracture area for 0,8Su stress grade, and 79,97% static fracture area and 20,03% fatigue fracture area for 0,7Su stress grade.

Key word: GTAW, SMAW, Multi layer, crack, fatigue test

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY OF SHELL LAYER
CLAW-KNOT WELDING INFLUENT IN FATIGUE LIFE AND
FRACTURE APPEARANCE OF SA-508 (CIRCULAR) THICK HEATER
SHELL UNDER FATIGUE REVERSED STRESS TEST

Penulis : Kurnia Apriyani K.
NRP : 1101109001
Departemen : Teknik Mesin FT-ITS
Asisten Dosen : Ir. Hadi Sabriyanto, MSCE

Abstract

Claw-knot connection between pipes in the production of oil company structure. The cracked shell can be spotted by welding process. The characteristic of this welding process should be essential and important because the connection of connection between pipes not only in its heat conduction process through welding process but also can produce risk in lack of penetration which can be detected on the surface. This study aims to study the initial fracture and determine the fracture angle. It determines the factors of the fracture and has an important problem which used a finite element analysis (FEA) using Abaqus software.

The objective of this study is to study the initial fracture between two pipes and shell crack the fracture on one groove for the first and second time using the finite element analysis (FEA) method. The first time is to study the fracture angle of the shell. The second time is to study the fracture angle of the shell. The results of the study are obtained in the form of the fracture appearance and also recorded by numerical simulation.

Based on the research it can be concluded that with the method of FEA using Abaqus the angle of welded metal pipes during the weld process can be calculated. The results of the study are obtained in the form of the fracture appearance and also recorded by numerical simulation.

Keywords: FEA, FEM, Welding, Fatigue, Fracture

KATA PENGANTAR

Puji syukur atas rahmat dan karunia Allah SWT sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul "**Studi Eksperimental Dan Analitis Pengaruh Pengelasan Multi Layer GTAW-SMAW Terhadap Umur Lelah Dan Pola Patahan Baja SA-53B (Pipa Circulation Heater) Pada Uji Lelah Lentur Bolak-balik (Fatigue Reversed Bending)**". Tugas Akhir ini dilaksanakan sebagai persyaratan akademis untuk mendapat gelar Sarjana Teknik, pada bidang studi Metalurgi, jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Tugas akhir ini tidak mungkin terselesaikan dengan baik tanpa adanya bantuan dan kerjasama semua pihak, untuk itu pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Keluargaku tercinta, Bapak dan Ibu yang selalu *support*ku materiil dan spirituil, serta adekku Alda yang selalu nanya kapan pulang rumah lagi.
2. Bapak Ir. Hari Subiyanto, MSc selaku pembimbing Tugas Akhir yang banyak memberikan bimbingan dan saran.
3. Bapak DR. Ir. Soeharto, DEA, Ibu Ir. Suprpti dan Bapak Fahmi Mubarak, ST, MSc selaku penguji tugas akhir.
4. Bapak Dr. Ing. Herman Sasongko selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
5. Bapak Ir. Yunarko, Ir. Atok Setyawan, MSc dan Vivien Suphandani Djanali, ST, ME selaku dosen wali yang telah banyak memberikan dorongan moril yang besar.
6. Bapak dan Ibu Dosen selaku staf pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan ilmu dan wawasan.
7. Karyawan lab Metalurgi yang telah membantu dalam penggunaan fasilitas, terutama buat Pak Budi, Pak Gatot, Pak Mantri, Pak Nandang, Mas Daviq dan Mbak Sri. Terima kasih banyak, maaf sering ngrepotin.

8. Anak sapi yang sudah banyak membantu, *mensupport*, menghibur saat *down*, ngingetin & marahin saat *males*, dan nemenin kemana-mana saat dah BT garap TA. Makasih banyak mas Bay...
9. Bude Eni, mbak Va&Vi yang sering saya kompas..hehe..makasih support & uang sakunya. Buat ayu & Wisnu juga, jangan main aja, blajar yang rajin...
10. Super Seiya yang sudah 5 th berjuang dan bermain bersama; DJ, Trini, Cumi (SEMANGAT Cum!!!). Thanks *gurl* dah jadi temanku,,mari kita songsong hari esok yang cerah!!
11. Teman seperjuangan TA dan teman nongkrong di demit, Teguh, akhirnya kita lulus juga. Buat Etak juga yang udah *mbalap* duluan,,*thanks* kerjasamanya..
12. Teman-teman lab.Metal; Tungpey, Punks, Mas Agus, Ru Melon, Om Bas, Erik, Afif, Imam, Rombenk, Eka, Ranik, Eko, Koplrow, Maul, Adri, Tukul, Hasan dan semua *metalllers*, *matur suwun sanget*....
13. Teman-teman sepermainan dan seperjuangan M47; Faree, Babe, Kecap, Anugrah, Kiwir, Kurap, Lemak, Arip, Entung, Ucup dan semuanya yang ga bisa disebut satu2, terima kasih banyak, *nice 2 know u guys*...
14. Cewek-cewek M47; Danik, Lisa, Dian, Pink, Chie', Ade, Lani, Anisa, Uca', Vinda, Vira, Vika, Eva, Farida dan Gayonk (M48) yang udah nemenin maen...
15. Teman-teman kosku (keluargaku selama 4th ini); Ira, Tetty, Kadek, Yekti, Ciprut, Uwie. Terima kasih atas kegilaan kalian...
16. Ndox balap dan Nadia yang sudah mengantarkanku kemana-mana, bomberman juga..
17. Cak To, Cak Bud, Pak Jo, Pak No, Pak Sarosa, Pak Pam, Pak Agus, Mbah Met, Bu Sri, Bu Mar dan seluruh karyawan Mesin. Terima kasih banyak Pak/Bu.
18. Semua Sarekat Merah Rakyat Mesin.
19. Semua pihak yang telah terlibat dalam penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak mungkin disebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu, penulis mengharapkan adanya penyempurnaan lebih lanjut oleh pihak yang berkepentingan agar Tugas Akhir ini bisa lebih dikembangkan.

Surabaya, Agustus 2009

Penulis

Penelitian ini sengaja dikesampingkan

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu, penulis mengharapkan adanya pengurangan lebih lanjut oleh pihak yang bersangkutan. Tugas Akhir ini bisa lebih dikembangkan.

Surabaya, Agustus 2009

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2. DASAR TEORI	
2.1 Pengelasan GTAW & SMAW.....	7
2.1.1 Pengelasan GTAW.....	7
2.1.2 Pengelasan SMAW.....	8
2.2 <i>Heat Input</i>	10
2.3 Metalurgi Las.....	10
2.4 <i>Lack of Penetration</i>	13
2.5 Prinsip Dasar Kelelahan Material.....	14
2.6 Mekanisme Patah Lelah.....	15
2.6.1 Tahap Retak Awal (<i>Crack Initiation</i>)	16
2.6.2 Tahap Perambatan Retak (<i>Crack Propagation</i>)	17
2.6.3 Patah Akhir.....	18
2.7 Faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelah.....	20
2.7.1 Pengaruh pembebanan.....	21
2.7.2 Pengaruh parameter material.....	21
2.7.3 Pengaruh proses pengerjaan.....	22
2.7.4 Pengaruh lingkungan.	23
2.8 Estimasi Umur lelah.....	23
2.8.1 Kurva S-N dengan Metoda Analitis-Grafik.....	24
2.8.2 Estimasi batas lelah pada 10^6 siklus pembebanan (Sn)	30
2.8.3 Estimasi kekuatan pada 10^3 siklus pembebanan (Sn)	31
2.9 Kekuatan lelah pada sambungan las.....	31
2.9.1 Terjadinya tegangan sisa.....	32
2.9.2 Pengaruh tegangan sisa terhadap kekuatan lelah sambungan las.....	33

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	35
3.2 Material Uji.....	36
3.3 Peralatan.....	36
3.3.1 Peralatan pembentukan spesimen.....	36
3.3.2 Perlatan Uji.....	37
3.4 Langkah-langkah Percobaan.....	37
3.4.1 Pembentukan Spesimen.....	37
3.4.1.1 Spesimen Uji Tarik.....	37
3.4.1.2 Spesimen Uji Lelah.....	38
3.4.2 Pengujian.....	38
3.4.2.1 Uji Tarik.....	38
3.4.2.2 Uji Lelah.....	39
3.4.3 Pengamatan makro.....	41
BAB 4. DATA HASIL PENGUJIAN	
4.1 Uji Tarik.....	43
4.2 Uji Lelah.....	44
4.3 Pengamatan Makro.....	46
4.3.1 Lokasi Patahan.....	46
4.3.2 Pola Patahan.....	48
BAB 5. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
5.1 Uji Tarik.....	51
5.2 Uji Lelah.....	53
5.3 Pengamatan Makro.....	58
5.3.1 Lokasi Patahan.....	58
5.3.2 Pola Patahan.....	62
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN	
6.1 Kesimpulan.....	67
6.2 Saran.....	67
DAFTAR PUSTAKA.....	69
LAMPIRAN.....	71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kerusakan pada <i>shell circulation heater</i>	2
Gambar 1.2	<i>Lack of penetration</i>	2
Gambar 2.1	Skema pengelasan GTAW.....	7
Gambar 2.2	Tiga jenis arus listrik GTAW;(a) DCSP (b) DCRP (c) AC.....	8
Gambar 2.3	Skema pengelasan SMAW.....	9
Gambar 2.4	Siklus thermal pada beberapa jarak dari batas las (20 mm: 170 A; 28 V; 15,2 cm/menit)	11
Gambar 2.5	Sub daerah yang terbentuk pada pengelasan multi layer; (a) letak sub daerah relatif terhadap logam induk dan logam las; (b) siklus termal relatif terhadap AC ₃ dan AC ₁ ; (c) struktur mikro dari masing-masing daerah.....	13
Gambar 2.6	<i>Lack of penetration</i>	14
Gambar 2.7	Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan (R=-1)	15
Gambar 2.8	Mekanisme patah lelah.....	16
Gambar 2.9	Model pengintian retak oleh Wood.....	17
Gambar 2.10	Mekanisme perambatan retak.....	18
Gambar 2.11	Bentuk patahan material uji lelah.....	19
Gambar 2.12	Retak dengan pola rambatan transgranular (a), Retak dengan pola rambatan intergranular (b).....	20
Gambar 2.13	Variasi pembebanan pada uji kelelahan.....	21
Gambar 2.14	Pengaruh proses pengelasan terhadap umur lelah.....	22
Gambar 2.15	Kurva S-N hasil pengujian dan prediksi spesimen baja dengan pembebanan aksial.....	25
Gambar 2.16	Harga faktor koreksi pada berbagai pengerjaan permukaan.	28
Gambar 2.17	Pengaruh takikan pada batas lelah material.....	29
Gambar 2.18	Kurva S-N untuk <i>Wrought Steels</i>	31
Gambar 2.19	Distribusi tegangan sisa.....	33
Gambar 2.20	Pengaruh tegangan sisa terhadap kekuatan lelah sambungan las.....	34
Gambar 3.1	Diagram alir penelitian.....	35
Gambar 3.2	Spesimen uji tarik (<i>ASME IX</i>)	37
Gambar 3.3	Spesimen uji lelah.....	38
Gambar 3.4	Mesin uji fatik.....	39
Gambar 4.1	Spesimen uji tarik sesudah sebelum dan sesudah Pengujian (a) Material awal, (b) Material las GTAW+SMAW.....	44



Gambar 4.2 Lokasi patahan; (a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su.....	46
Gambar 4.3 Titik uji tegangan.....	46
Gambar 4.4 Foto makro pola patahan patahan;(a)material awal; (b)material las 0,8Su (c) material las 0,7Su.....	48
Gambar 4.5 Daerah patah statik dan patah lelah.....	48
Gambar 4.6 Foto makro patahan material las 0,7Su.....	49
Gambar 4.7 Foto makro patahan material las 0,8Su.....	49
Gambar 5.1 Kekuatan tarik rata-rata.....	51
Gambar 5.2 Lokasi patahan di industri.....	52
Gambar 5.3 Kurva S-N hasil pengujian.....	54
Gambar 5.4 Kurva S-N teoritis.....	57
Gambar 5.5 Kurva S-N teoritis vs aktual.....	57
Gambar 5.6 Lokasi patahan; (a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su.....	58
Gambar 5.7 Defleksi balok kentilever dengan gaya terkonsentrasi..	60
Gambar 5.8 Foto makro pola patahan (a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su.....	62
Gambar 5.9 <i>Beachmarks</i>	63
Gambar 5.10 Daerah patah statik.....	63
Gambar 5.11 Grafik tegangan-area patah statik.....	64

DAFTAR TABEL

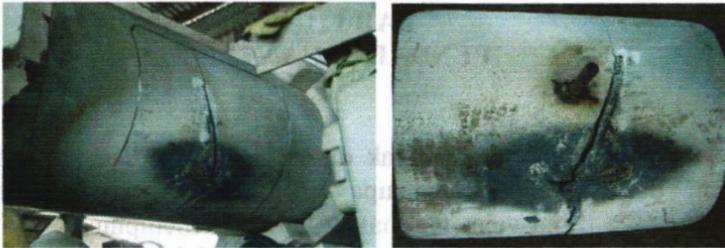
Tabel 2.1	Faktor ukuran material untuk berbagai diameter.....	27
Tabel 2.2	Harga faktor kondisi permukaan (C_S), jenis beban (C_L) dan pengaruh ukuran (C_D) untuk material baja.....	28
Tabel 3.1	Sifat mekanik SA 53B (tanpa pengelasan).....	36
Tabel 3.2	Sifat mekanik SA 53 B dengan pengelasan GTAW+SMAW	
Tabel 3.3	Komposisi kimia baja SA 53 B.....	36
Tabel 4.1	Uji tarik material awal.....	43
Tabel 4.2	Uji tarik material dengan pengelasan multi layer GTAW+SMAW.....	43
Tabel 4.3	Hasil uji lelah material awal.....	44
Tabel 4.4	Hasil uji lelah material dengan pengelasan.....	45
Tabel 4.5	Hasil ukur dimensi titik uji tegangan.....	47
Tabel 4.6	Luas daerah patah lelah dan patah statik pada material las 0,7Su.....	49
Tabel 4.7	Luas daerah patah lelah dan patah statik pada material las 0,8Su.....	50
Tabel 5.1	Harga C_L , C_D dan C_S untuk baja.....	55

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

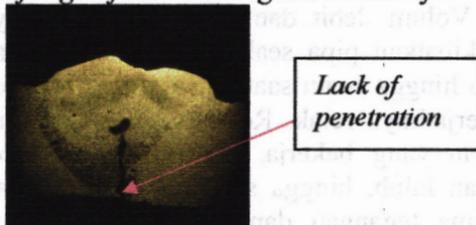
Penggunaan pipa banyak dijumpai dalam dunia industri dengan desain sedemikian rupa sesuai dengan fungsi dan kebutuhannya. Pipa yang digunakan haruslah mempunyai unjuk kerja yang optimal dan mempunyai umur lelah yang panjang. Salah satu industri yang memerlukan pipa dengan kinerja optimal adalah industri produksi Nitrogen, Oksigen dan Argon dalam fase gas maupun cair. Salah satu peralatan yang paling penting dalam industri tersebut adalah *circulation heater*, yaitu elemen pemanas bahan baku gas yang diselubungi atau ditutup oleh pipa. Kerusakan pipa ini akan berakibat pada menurunnya produksi perusahaan dan berimbas pada bertambahnya biaya operasional perusahaan.

Pipa selubung *circulation heater* bekerja pada range temperatur dan tegangan tertentu. Pipa akan mengalami kenaikan dan penurunan temperatur secara berkala yang diukur menggunakan sensor temperatur, yaitu *termocouple* tipe J. Adanya kerusakan pada *termocouple* tersebut mengakibatkan temperatur pipa selubung *heater* tidak terkontrol, sehingga agar tidak terjadi *overheating* maka yang dikontrol adalah debit fluida input. Volum debit dan temperatur fluida yang naik-turun ini mengakibatkan pipa seakan mengalami gaya tarik-tekan secara berkala hingga suatu saat terdapat *initial crack*, yang merupakan awal terjadinya retak. Retak akan terus menjalar akibat adanya tegangan yang bekerja, meskipun jauh lebih kecil dibanding tegangan luluh, hingga suatu saat nanti pipa tidak mampu lagi menerima tegangan dan mengalami ledakan (sobek). Hal ini mengakibatkan umur lelah material menjadi berkurang, tidak sesuai dengan perhitungan teknis sebelumnya.



Gambar 1.1 Kerusakan pada shell circulation heater

Kerusakan berupa retak tersebut dapat diperbaiki dengan proses pengelasan. Pengelasan pada *shell circulation heater* yang rusak akibat ada retakan sebelum penelitian ini sudah pernah dilakukan, namun sambungan las tersebut retak kembali pada *usionline*. Timbulnya retak ini dikarenakan pengelasan yang tidak benar, sehingga kualitas lasan buruk. Pengelasan yang buruk dapat menimbulkan *lack of penetration*. *Lack of penetration* dapat diidentifikasi sebagai *initial crack* yang baru, karena dapat dianggap sebagai konsentrasi tegangan. Akibat adanya tegangan yang bekerja, retak tersebut akan menjalar dan pada akhirnya pipa yang telah dilas akan membuka lagi seperti keadaan semula. Fenomena seperti ini dapat dikategorikan sebagai mekanisme patah lelah, yaitu patah yang terjadi akibat pembeban berulang-ulang. Patah seperti ini bisa terjadi tanpa ada tanda-tanda sebelumnya, sehingga *fatigue failure* seringkali berbahaya.



Gambar 1.2 Lack of penetration

Untuk memperbaiki kualitas lasan, maka dalam penelitian sebelumnya digunakan metode pengelasan *multi layer GTAW* (*Gas Tungsten Arc Welding*) dan *SMAW* (*Shielded Metal Arc Welding*). Perpaduan kedua proses pengelasan tersebut akan

menghasilkan *excellent root pass penetration*, tidak perlu *backgouging*, dan lain-lain. Metode GTAW+SMAW digunakan untuk memperbaiki *shell circulation heater* ini karena adanya elemen pemanas di dalamnya yang tidak memungkinkan *welder* untuk melakukan *backgouging*. Pada penelitian dilakukan GTAW-SMAW masing-masing sebanyak 2 *layer* dan 3 *layer*. Pengambilan jumlah *layer* mengacu pada WPS (*Welding Procedure Specification*) dari perusahaan fabrikasi di daerah Gresik. Pengelasan dilakukan pada 3 variasi arus SMAW yang berbeda, yaitu 100A, 120A dan 140A, sedangkan arus pengelasan GTAW konstan (120A-140A). Dari penelitian diketahui bahwa pengelasan *multi layer* berpengaruh pada sifat mekanik hasil lasan GTAW-SMAW, sehingga pada saat diuji tarik patah di logam induk dengan nilai kekuatan tarik (rata-rata) untuk masing-masing arus SMAW 100 A, 120 A, dan 140 A adalah 497,5 MPa, 488,6 MPa, dan 484,2 MPa. Proses pengelasan *multi layer* terbukti memperbaiki kualitas las.

Sebagai validasi kondisi aktual dan untuk menjawab masalah di atas diperlukan pengujian lelah lentur bolak-balik (*fatigue reversed bending*) dan pengamatan pola patahan material logam yang berguna sebagai referensi bagi logam tersebut dalam aplikasinya, khususnya pada pipa yang telah mengalami pengelasan. Dari uji lelah akan diperoleh kurva S-N, yaitu kurva yang menjelaskan hubungan antara jumlah siklus dari pipa dengan besarnya beban yang ditanggung oleh pipa tersebut. Kemudian akan didapatkan umur lelah. Memprediksi umur yang diakibatkan oleh besarnya tegangan yang diberikan pada pipa sangat penting untuk perawatan, pergantian komponen mesin dan penghematan biaya operasional.

1.2 Perumusan Masalah

Permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini adalah mencari umur lelah pada material SA-53 grade B hasil pengelasan GTAW+SMAW dan membandingkan dengan

material SA-53 B kondisi awal (tanpa pengelasan). Kemudian diamati pola patahan masing-masing dan dianalisa.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh pengelasan GTAW+SMAW terhadap umur lelah suatu material.
2. Mengetahui kualitas pengelasan *multi layer* GTAW+SMAW.
3. Mengetahui pola patahan yang terjadi akibat pembebanan dinamis.

1.4 Batasan Masalah

Agar masalah yang muncul dapat diselesaikan dengan baik dan penelitian ini mencapai tujuan yang diinginkan, maka diperlukan batasan-batasan masalah antara lain:

1. Material yang digunakan SA 53 B dianggap homogen dan mempunyai komposisi kimia serta sifat mekanik yang sama dengan material di lapangan.
2. Kondisi pengelasan merujuk pada penelitian sebelumnya.
3. Uji lelah dilakukan pada temperatur kamar (28°C) dan mengabaikan fluktuasi temperatur dan kelembaban yang terjadi (pengaruh lingkungan diabaikan).
4. Kecepatan lenturan dianggap konstan pada setiap pengamatan.
5. Kekasaran permukaan untuk setiap spesimen dianggap sama.
6. Pengaruh pengerjaan material diabaikan.
7. Parameter-parameter lain yang tidak diamati dianggap konstan.
8. Kondisi mesin las, alat uji dan alat ukur diasumsikan terkalibrasi.



1.5 Sistematika Penulisan

BAB 1. PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB 2. DASAR TEORI

Pada bab ini dibahas prinsip kerja *Gas Tungsten Arc welding* dan *Shielded Metal Arc welding*, *heat input*, metalurgi las, *lack of penetration*, prinsip dasar kelelahan, mekanisme patah leleh, umur leleh material, kekuatan leleh pada sambungan las.

BAB 3. METODOLOGI

Pada bab ini berisi langkah-langkah dalam melakukan penelitian.

BAB 4. DATA HASIL PENELITIAN

Pada bab ini ditampilkan data-data hasil pengujian leleh (*fatigue reversed bending*) dan foto makro pola patahan.

BAB 5. ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini data-data yang diperoleh dari pengujian akan dibahas serta dihubungkan dengan teori yang telah ada.

BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan juga saran.



1.2. Sistematika Penulisan

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas latar belakang, permasalahan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan.

BAB II DASAR TEORI

Bab ini membahas prinsip-prinsip dasar teori yang berkaitan dengan penelitian ini, meliputi definisi, sifat-sifat, dan karakteristik dari material yang digunakan. Bab ini juga membahas tentang metode penelitian yang digunakan dan alasan pemilihan metode tersebut.

BAB III METODOLOGI

Bab ini berisi langkah-langkah dalam melakukan penelitian.

BAB IV DATA HASIL PENELITIAN

Bab ini di dalamnya berisi data-data hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data-data yang diperoleh dari penelitian dan dibahas serta ditafsirkan dengan teori yang ada.

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan dan juga saran.

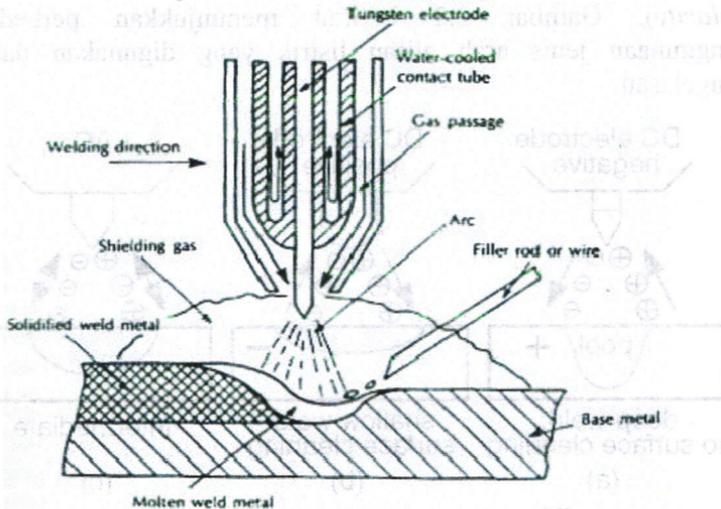
Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 2 KAJIAN PUSTAKA

2.1 Pengelasan GTAW & SMAW

2.1.1 Pengelasan GTAW

Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) atau sering juga disebut *Tungsten Inert Gas* (TIG) merupakan salah satu dari bentuk las busur listrik (*Arc Welding*) yang menggunakan *inert gas* sebagai pelindung dengan tungsten atau wolfram sebagai elektrode. Skema dari GTAW dapat dilihat dalam Gambar 2.1. Pengelasan ini dikerjakan secara manual maupun otomatis.

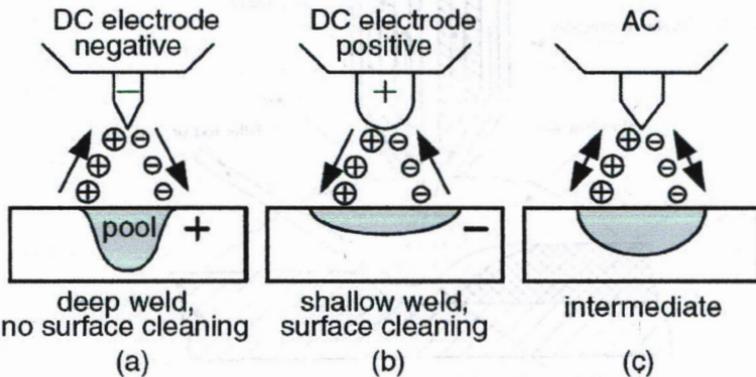


Gambar 2.1 Skema pengelasan GTAW^[12]

Gas pelindung yang digunakan biasanya gas mulia yang sulit sekali bereaksi dengan udara luar. Tetapi kadang-kadang dipakai juga gas yang lain seperti nitrogen (N_2), oksigen (O_2), hidrogen (H_2) dan karbondioksida (CO_2). Fungsi utama dari gas pelindung adalah melindungi logam las dari kontaminasi udara luar, disamping itu juga sebagai fluida pendingin elektrode tungsten.

Elektroda pada GTAW termasuk elektroda tidak terumpan (*non consumable*) berfungsi sebagai tempat tumpuan terjadinya busur listrik. GTAW menggunakan elektrode tungsten. GTAW mampu menghasilkan lasan berkualitas tinggi pada hampir semua jenis logam mampu las.

Sumber listrik GTAW dapat menggunakan generator AC maupun DC. Ciri khas generator jenis AC yaitu merupakan kombinasi antara *cleaning* dengan penetrasi medium dan mencegah elektrode tungsten *overheating*. Penggunaan arus DC dibedakan menjadi dua yaitu polaritas lurus (*Direct Current Straight Polarity*) dan polaritas balik (*Direct Current Reverse Polarity*). Gambar 2.2 berikut menunjukkan perbedaan penggunaan jenis arah aliran listrik yang digunakan dalam pengelasan.

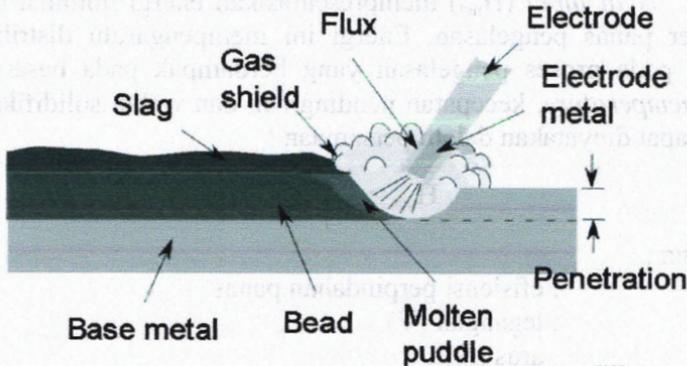


Gambar 2.2 Tiga jenis arus listrik pada GTAW; (a) DCSP (b) DCRP (c) AC^[2]

2.1.2 Pengelasan SMAW

Las busur elektroda terbungkus atau *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) adalah proses pengelasan yang menggunakan busur listrik dimana panas yang didapat diperoleh dari busur nyala yang memancar antara elektroda dengan selubung fluks dan benda kerja. Skema pengelasan SMAW dapat diamati pada

Gambar 2.3. Proses pemindahan logam elektroda terjadi pada saat ujung elektroda mencair dan membentuk butir-butir yang terbawa oleh arus busur listrik yang terjadi.



Gambar 2.3 Skema pengelasan SMAW^[12]

Elektroda yang digunakan adalah jenis elektroda terumpan atau sekaligus berfungsi sebagai logam pengisi (*filler*). Elektroda ini terbungkus oleh fluks. Pada saat elektroda mencair, fluks akan membentuk selubung seperti terak yang berfungsi menutupi logam cair yang terkumpul pada tempat sambungan sehingga dapat mencegah masuknya pengotor dari lingkungan. Disamping itu, pada saat elektroda mencair, fluks akan menghasilkan selubung gas yang akan mencegah busur dari kontak dengan udara luar. Dengan adanya fluks, maka diharapkan hasil pengelasan tidak mengalami pengotoran oleh unsur luar.

Sumber listrik yang digunakan dalam pengelasan SMAW dapat berupa DC atau AC. Sumber listrik arus searah (DC) dibedakan lagi menjadi polaritas lurus (DCSP) dimana kutub positif dihubungkan dengan logam induk dan kutub negatif dengan batang elektrode dan rangkaian sebaliknya yang disebut polaritas balik (DCRP). Untuk arus bolak-balik (AC) mempunyai hasil yang merupakan kombinasi dari DCSP dan DCRP. Kedalaman penetrasi yang dihasilkan untuk DCSP (*Direct Current Straight Polarity*) dangkal dengan deposit logam cair

yang besar. Sedangkan untuk DCRP (*Direct Current Reserve Polarity*) mempunyai penetrasi cukup dalam.

2.2 Heat Input

Heat input (H_{net}) mempresentasikan energi nominal dari sumber panas pengelasan. Energi ini mempengaruhi distribusi panas pada proses pengelasan yang berdampak pada besarnya *peak temperature*, kecepatan pendinginan dan waktu solidifikasi. H_{net} dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{V}$$

Dimana :

- η : efisiensi perpindahan panas
- E : tegangan (V)
- I : arus (A)
- V : kecepatan pengelasan (mm/s)

2.3 Metalurgi Las

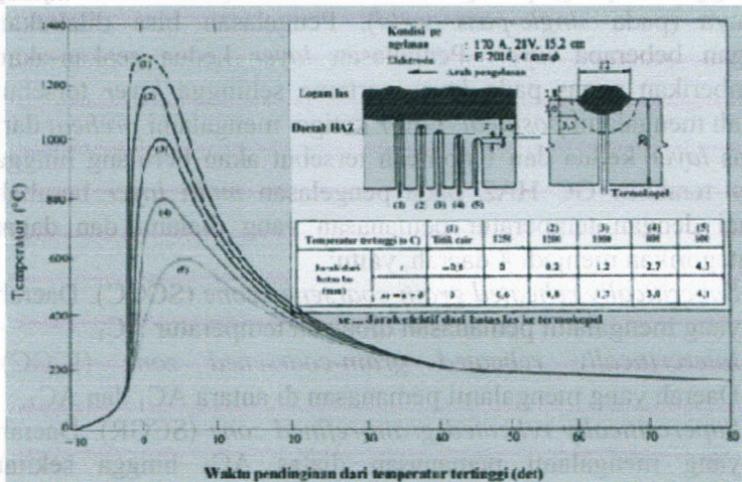
Definisi pengelasan menurut DIN (*Deutsche Industrie Normen*) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain, las adalah sambungan setempat dengan menggunakan energi panas disertai dengan atau tanpa tekanan dan material tambahan (*filler material*).

Struktur mikro logam mempengaruhi sifat mekanisnya. Struktur mikro sangat dipengaruhi oleh proses pemanasan dan pendinginan. Penambahan logam pengisi pada proses pengelasan akan mengubah struktur mikro yang terjadi sehingga akan berpengaruh pada sifat mekanisnya.

Sambungan las secara umum dapat dibagi menjadi 3 daerah, yaitu logam las, HAZ (*Heat Affected Zone*), dan logam induk. Logam las adalah logam pengisi (*filler*) dan sebagian logam induk yang pada saat pengelasan mengalami pencairan kemudian membeku. HAZ adalah daerah yang terpengaruh panas dari sebuah proses pengelasan dan mengalami perubahan struktur

mikro. Logam induk adalah logam dasar yang tidak mengalami perubahan struktur mikro.

Panas dalam proses pengelasan dapat diperoleh dari energi listrik, gas, *high energy beam* dan lain-lain. Dengan pemberian panas ini, maka pada logam akan terjadi suatu siklus panas yang menunjukkan perubahan temperatur sebagai fungsi waktu. Siklus panas ini akan dialami oleh daerah lasan dan daerah sekitar lasan (HAZ). Siklus panas yang dialami oleh daerah-daerah ini berbeda-beda sesuai dengan jarak daerah tersebut terhadap sumber panas. Siklus panas ditunjukkan seperti gambar 2.4 berikut.



Gambar 2.4 Siklus thermal pada beberapa jarak dari batas las (20 mm: 170 A; 28 V; 15,2 cm/menit) ^[4]

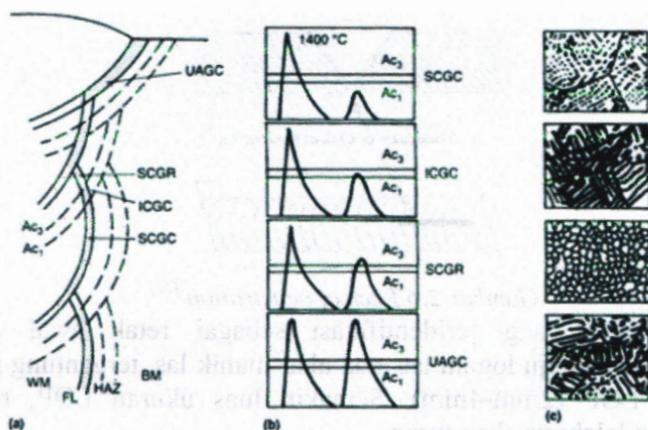
Input panas berhubungan dengan temperatur puncak yang dicapai, serta kecepatan pemanasan dan pendinginan dari masing-masing daerah. Daerah dekat lapisan logam las akan mengalami temperatur yang tinggi dengan laju pemanasan dan pendinginan yang cepat. Daerah yang berada sedikit lebih jauh akan berada pada suatu temperatur puncak medium dengan laju pemanasan dan pendinginan yang relatif lebih lambat. Daerah yang jauh dari

lapisan logam las akan mengalami temperatur puncak yang rendah dengan laju pemanasan dan pendinginan yang lebih lambat lagi.

Temperatur puncak yang dicapai daerah HAZ bisa lebih dari temperatur AC_3 (temperatur dimana *ferrite* bertransformasi menjadi *austenite* pada proses pemanasan) dengan laju pemanasan yang sangat besar dalam waktu singkat. Hal tersebut menyebabkan butiran *austenite* yang dihasilkan di daerah HAZ menjadi kasar. Daerah HAZ dengan butiran yang kasar ini disebut *grain coarsened zone* (GC HAZ). GC HAZ memiliki ketangguhan yang paling rendah dibandingkan daerah yang lainnya (pada *single-pass weld*). Pengelasan bisa dilakukan dengan beberapa *layer*. Pengelasan *layer* kedua seakan-akan memberikan panas pada *layer* pertama sehingga *layer* tersebut seolah mengalami *postheat*. *Layer* ketiga mengalami *preheat* dari panas *layer* kedua dan fenomena tersebut akan berulang hingga *layer* terakhir. GC HAZ pada pengelasan *multi layer* berubah sesuai dengan temperatur pemanasan yang dialami dan dapat dikategorikan menjadi 4 daerah, yaitu:

1. *Subcritically reheated grain-coarsened zone* (SCGC). Daerah yang mengalami pemanasan dibawah temperatur AC_1 .
2. *Intercritically reheated grain-coarsened zone* (ICGC). Daerah yang mengalami pemanasan di antara AC_1 dan AC_3 .
3. *Supercritically reheated grain-refined zone* (SCGR). Daerah yang mengalami pemanasan diatas AC_3 hingga sekitar 1200°C .
4. *Unaltered grain-coarsened zone* (UAGC). Daerah yang mengalami pemanasan lebih dari 1200°C .

Keempat daerah tersebut diatas ditunjukkan seperti gambar 2.5 berikut.

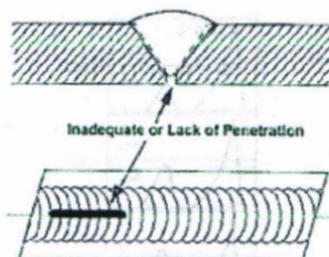


Gambar 2.5 Sub daerah yang terbentuk pada pengelasan multi layer; (a) letak sub daerah relatif terhadap logam induk dan logam las; (b) siklus termal relatif terhadap AC_3 dan AC_1 ; (c) struktur mikro dari masing-masing sub daerah^[2]

GC HAZ jika mengalami pemanasan dibawah AC_1 akan berubah menjadi SCGC, dimana butirannya masih kasar tetapi ketangguhannya bertambah. Bila pemanasan terjadi diantara AC_3 dan AC_1 , maka GC HAZ akan berubah menjadi ICGC yang memiliki ketangguhan paling rendah dibandingkan ketiga daerah lainnya. GC HAZ akan berubah menjadi SCGR yang berbutir halus bila mengalami pemanasan kembali diatas AC_3 sampai 1200°C . UAGC memiliki butiran yang masih kasar karena mengalami pemanasan kembali lebih dari 1200°C .

2.4 Lack of Penetration

Proses pengelasan yang tidak sempurna akan menghasilkan daerah/bagian yang tidak tertutup logam las (*lack of penetration*). *Lack of penetration* (LOP) merupakan daerah konsentrasi tegangan yang akan mempengaruhi umur leleh suatu material. LOP dapat diidentifikasi sebagai initial crack pada mekanisme patah leleh.



Gambar 2.6 Lack of penetration^[17]

LOP yang teridentifikasi sebagai retak awal akan merambat menuju logam las atau akar manik las, tergantung pada ukuran LOP (2mm-4mm). Semakin luas ukuran LOP, maka kekuatan lelehnya akan turun.

Sedangkan pada pengelasan *full* penetrasi, meskipun tidak teridentifikasi adanya LOP, namun tetap memungkinkan timbulnya retak awal. Retak awal terjadi pada akar manik las dan merambat menuju HAZ. Sehingga bentuk manik las juga akan mempengaruhi kekuatan leleh logam.

Kekuatan leleh pengelasan dengan penetrasi dangkal lebih rendah dibanding pada pengelasan full penetrasi. Kekuatan leleh tergantung dari ukuran/luas bagian yg tidak terkena proses las. Menurut Zachary dan Burger (1976); Jika lebar bagian tidak terlas kurang dari 20% tebal plat (material), maka retak terjadi akibat LOP dan akan merambat menuju weld metal. Sebaliknya, jika lebar daerah tidak terlas kurang dari 20% tebal plat, maka awal retak adalah akar manik las dan merambat menuju logam las atau HAZ.

2.5 Prinsip Dasar Kelelahan Material

Kelelahan (*fatigue*) adalah suatu proses secara progresif pada suatu area struktur permanen dimana terjadi perubahan dalam material yang disebabkan karena suatu keadaan yang menghasilkan suatu fluktuasi dari tegangan atau regangan pada satu atau beberapa titik yang mungkin akan memuncak dengan

terjadinya suatu retak atau perpatahan secara penuh setelah jumlah fluktuasi tertentu. (ASTM E-206 1986).

Kelelahan diartikan sebagai kegagalan yang diakibatkan oleh beban dinamik yang diaplikasikan pada suatu konstruksi (material). Kegagalan lelah (*fatigue failure*) suatu material dapat terjadi pada tegangan yang jauh dari tegangan luluhnya, tergantung pada orientasi kisi-kisi kristal dan bentuk butiran.

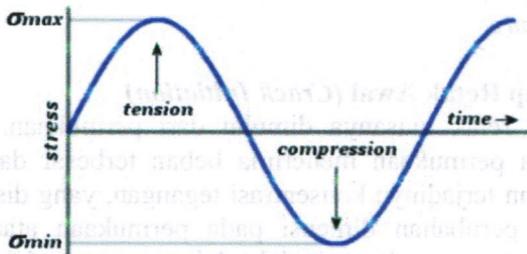
Uji lelah yang sederhana dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan yang relatif sederhana, yaitu beban uniaksial atau lenturan. Dengan beban tersebut akan diperoleh tegangan tarik dan tegangan tekan yang berfluktuasi.

Notasi tegangan yang biasa dipakai ditunjukkan pada gambar 2.7. Dari kondisi beban yang berulang tersebut dapat dikenai berbagai parameter tegangan, yaitu :

$$\text{Rasio tegangan (stress ratio) : } R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{maks}}$$

Dimana : σ_{min} = tegangan minimum

σ_{maks} = tegangan maksimum

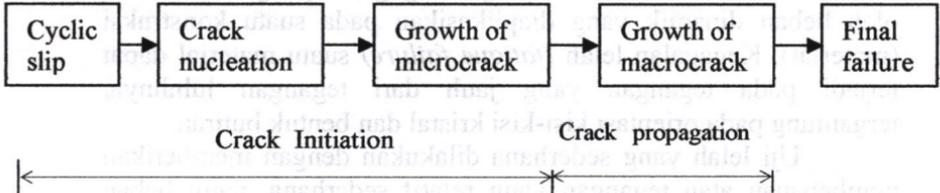


Gambar 2.7. Notasi untuk beban siklus amplitudo konstan ($R=-1$)^[8]

2.6 Mekanisme Patah Lelah

Kelelahan akan mengakibatkan terjadinya patah lelah. Patah lelah terjadi melalui tiga tahapan, yaitu tahap retak awal (*crack initiation*), tahap penjaralan retak (*crack propagation*), dan tahap patah statis. Dan setelah retak lelah merambat cukup jauh, maka beban yang bekerja hanya akan didukung oleh penampang tersisa yang belum retak dan akhirnya komponen akan patah

(tahap *final failure* atau patah statik) seperti yang terlihat pada gambar 2.8.



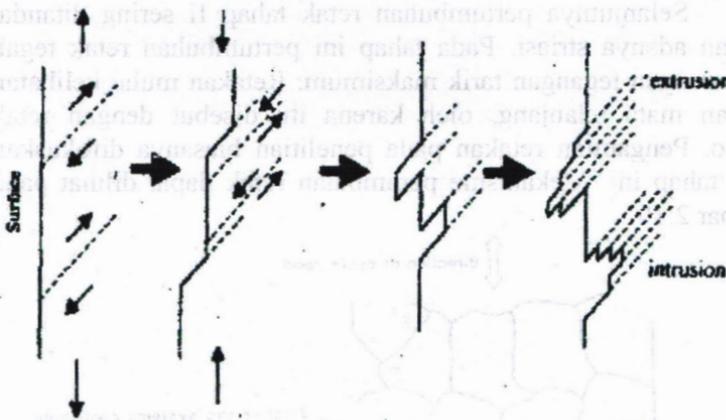
Gambar 2.8 Mekanisme patah lelah^[8]

Menurut Schijve, ada 5 fase yang terjadi selama proses *fatigue*, yaitu:

1. *Cyclic slip*
2. *Crack nucleation*
3. *Growth of microcrack*
4. *Growth of macrocrack*
5. *Final failure*

2.6.1 Tahap Retak Awal (*Crack Initiation*)

Awal retak biasanya dimulai dari permukaan. Hal ini terjadi karena permukaan menerima beban terbesar dan paling memungkinkan terjadinya konsentrasi tegangan, yang disebabkan oleh adanya perubahan dimensi pada permukaan atau proses pengerjaan tertentu pada material. Adanya cacat dalam akan menyebabkan juga konsentrasi tegangan. Fenomena awal retak, secara sederhana diberikan oleh Wood. Model pengintian retak oleh Wood ini dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Model pengintian retak oleh Wood^[10]

Pada beban tarik pertama, slip terjadi dengan membentuk permukaan bertingkat yang membentuk sudut 45° dengan sumbu tegangan. Hal ini akibat tegangan geser maksimal yang terjadi pada sudut tersebut. Pembebanan selanjutnya menyebabkan slip pada arah yang berlawanan. Slip ini terjadi pada bidang yang berdekatan dengan yang pertama. Dan selanjutnya merupakan proses pengulangan dalam pembebanan siklus yang sama.

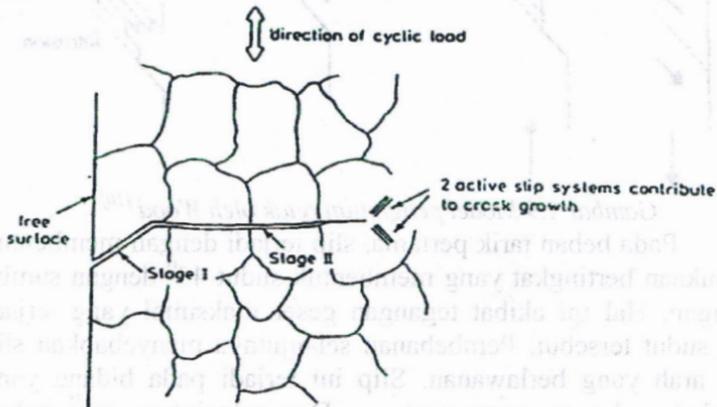
Tahap retak awal ini meliputi fase *cyclic slip*, fase pembentukan inti retak (*crack nucleation*) dan pertumbuhan retak mikro (*growth of microcrack*).

2.6.2 Tahap Perambatan Retak (*Crack Propagation*)

Perambatan retak pada suatu komponen terjadi jika tegangan maksimum pada ujung retakan berada di atas kekuatan material. Hal tersebut mengakibatkan peningkatan konsentrasi tegangan pada ujung retak.

Awal retakan mula-mula akan menjalar pada bidang slip di dalam beberapa butir dengan kecepatan yang sangat lambat. Pengamatan secara makro tidak akan menampakkan perambatan ini. Peristiwa ini disebut perambatan retak tahap I.

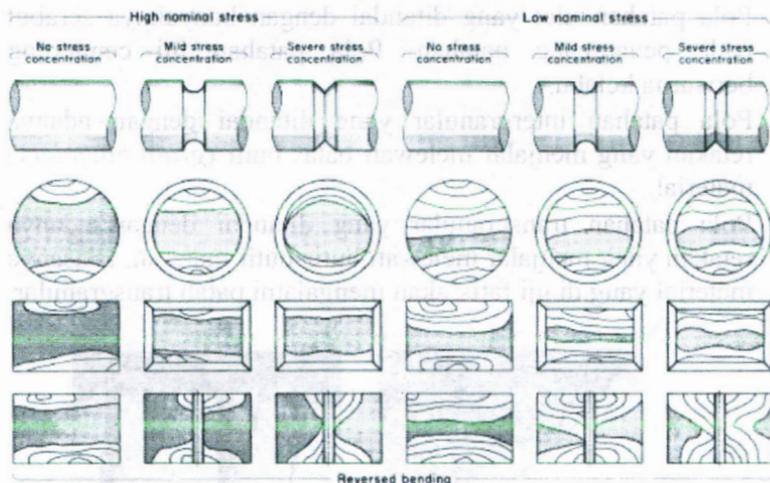
Selanjutnya pertumbuhan retak tahap II sering ditandai dengan adanya striasi. Pada tahap ini pertumbuhan retak tegak lurus dengan tegangan tarik maksimum. Retakan mulai kelihatan dengan mata telanjang, oleh karena itu disebut dengan retak makro. Pengamatan retakan pada penelitian biasanya difokuskan pada tahap ini. Mekanisme perambatan retak dapat dilihat pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Mekanisme perambatan retak ^[8]

2.6.3 Patah Akhir

Retak makro merambat sedikit demi sedikit dan bertambah panjang pada setiap siklus pembebanan yang selanjutnya menghasilkan keretakan yang semakin lama semakin panjang. Penampang logam semakin kecil dan tidak lagi mampu mendukung beban yang diterima. Akhirnya logam akan patah. Bentuk-bentuk patahan untuk material pada *fatigue reversed bending test* seperti pada gambar 2.11.



Gambar 2.11. Bentuk patahan material uji lelah^[6]

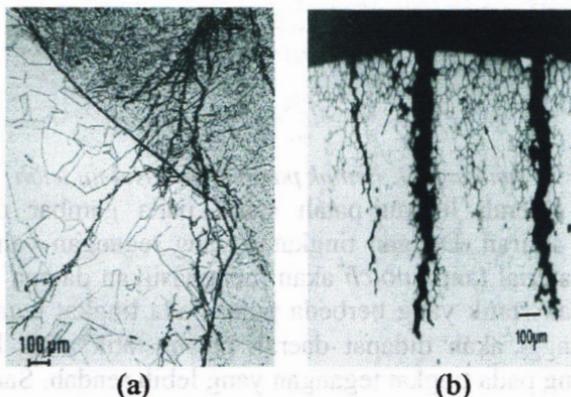
Daerah luasan patah statik pada gambar ditunjukkan dengan arsiran. Dengan tingkatan yang tegangan yang berbeda, pada material tanpa *notch* akan menghasilkan daerah patah lelah dan patah statik yang berbeda pula. Pada tingkat tegangan yang lebih tinggi akan didapat daerah patah statik yang lebih besar dibanding pada tingkat tegangan yang lebih rendah. Saat tegangan besar, material akan lebih cepat mengalami kelelahan, striasi yang terjadi relatif sedikit dan daerah patah statiknya besar.

Penampang material yang mengalami patah akhir ini akan memperlihatkan tanda-tanda tertentu yang merupakan karakteristik patahan akibat kegagalan lelah. Setiap material yang telah patah memiliki pola patahan yang berbeda. Pengamatan jenis pola patahan dapat dilakukan dengan mikroskop optis. Pola patahan ini dibedakan menjadi 4, yaitu :

- Pola patahan getas yang ditandai dengan banyaknya butiran pada penampang patahan. Pola patahan ini cenderung berwarna putih dan mengkilat.



- Pola patahan ulet yang ditandai dengan banyaknya serabut pada penampang patahan. Pola patahan ini cenderung berwarna kelabu.
- Pola patahan intergranular yang ditandai dengan adanya retakan yang menjalar melewati batas butir (*grain boundary*) material.
- Pola patahan transgranular yang ditandai dengan adanya retakan yang menjalar melewati butir-butir material. Biasanya material yang di uji fatik akan mengalami patah transgranular.



Gambar 2.12. Retak dengan pola rambatan transgranular (a), Retak dengan pola rambatan intergranular (b) ^[13]

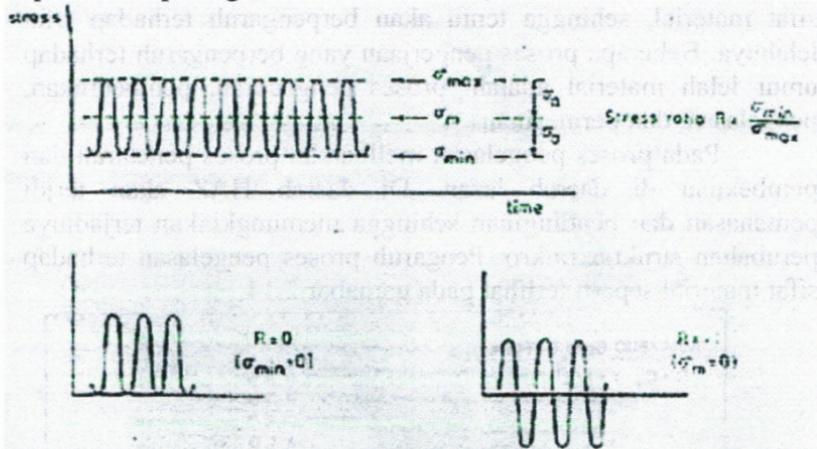
2.7 Faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelah

Secara umum, faktor-faktor yang mempengaruhi umur lelah dari suatu material adalah:

1. Pengaruh pembebanan
2. Pengaruh parameter material
3. Pengaruh proses pengerjaan
4. Pengaruh lingkungan

2.7.1 Pengaruh pembebanan

Parameter pembebanan yang berpengaruh terhadap kelelahan adalah tegangan rata-rata (σ_m), tegangan variabel (σ_a) dan frekuensi pembebanan. Beberapa contoh variasi pembebanan dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Variasi pembebanan pada uji kelelahan^[10]

Adapun siklus tegangan bolak-balik terdiri dari 2 komponen tegangan, yaitu tegangan maksimum (σ_{max}) dan tegangan minimum (σ_{min}). Dari kondisi beban berulang tersebut didapat beberapa hubungan antara parameter-parameter:

- Rasio tegangan (R) = $\sigma_{min} : \sigma_{max}$
- Tegangan variabel (σ_a) = $(\sigma_{max} - \sigma_{min}) : 2$
- Tegangan rata-rata (σ_m) = $(\sigma_{max} + \sigma_{min}) : 2$
- Rasio amplitudo (A) = $\sigma_a : \sigma_m$

2.7.2 Pengaruh parameter material

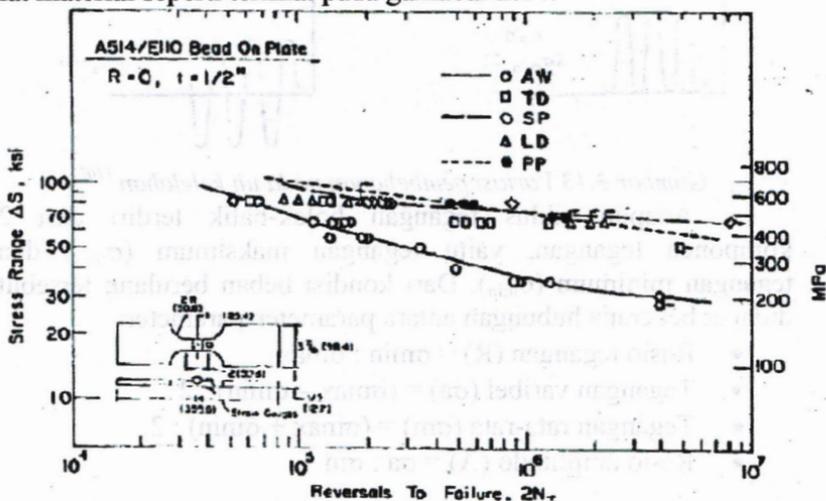
Awal retak lelah dan penjarangan retak pada kelelahan terjadi akibat deformasi plastis setempat yang skalanya mikroskopis. Sedangkan struktur mikro mempengaruhi terjadinya deformasi plastis, sehingga akan berpengaruh terhadap kekuatan lelahnya. Parameter material yang berpengaruh terhadap umur

lelahnya adalah ukuran butir, kekuatan logam, penguatan dengan larutan padat, penguatan regangan dan perubahan struktur mikro.

2.7.3 Pengaruh proses pengerjaan

Proses-proses pengerjaan akan mengubah bentuk dan sifat material, sehingga tentu akan berpengaruh terhadap sifat lelahnya. Beberapa proses pengerjaan yang berpengaruh terhadap umur lelah material adalah: proses pengecoran, pembentukan, pengelasan, dan permesinan.

Pada proses pengelasan melibatkan proses pencairan dan pembekuan di daerah lasan. Di daerah HAZ akan terjadi pemanasan dan pendinginan sehingga memungkinkan terjadinya perubahan struktur mikro. Pengaruh proses pengelasan terhadap sifat material seperti terlihat pada gamabar 2.14.



(AW = As-Welded, TD = TIG Dressed, SP = Shot Peened, LD = Laser Dressed, PP = Plain Plate).

Gambar 2.14 Pengaruh proses pengelasan terhadap umur lelah^[14]

2.7.4 Pengaruh lingkungan

Kondisi lingkungan sangat mempengaruhi sifat kelelahan material. Faktor lingkungan yang mempengaruhi kekuatan lelah material adalah temperatur operasi dan lingkungan korosif. Pada temperatur tinggi, kekuatan logam akan berkurang dan deformasi plastis lebih mudah terjadi, sehingga akan menurunkan kekuatan lelah. Lingkungan korosif akan merusak material dan menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan, sehingga akan menurunkan kekuatan material dan kekuatan lelahnya.

2.8 Estimasi Umur lelah

Umur lelah dinyatakan sebagai jumlah siklus tegangan yang dicapai sampai spesimen patah pada pembebanan tertentu. Dengan demikian umur total tersebut telah mencakup tahap awal retak dan penjarangan retak yang bila telah cukup jauh penjarangannya akan menyebabkan spesimen patah menjadi dua.

Kekuatan lelah (*fatigue strength*) dinyatakan sebagai besarnya tegangan yang mengakibatkan terjadinya kegagalan lelah (*fatigue failure*) pada suatu jumlah siklus beban tertentu. Sedangkan batas lelah (*fatigue limit* atau *endurance limit*) didefinisikan sebagai besarnya beban maksimal yang menghasilkan umur lelah tak berhingga.

Umur lelah dapat bervariasi dari puluhan siklus (*pada low-cycle fatigue*) sampai sejumlah jutaan siklus (*pada high-cycle fatigue*). Umur lelah yang pendek dihasilkan dari tegangan rata-rata yang tinggi. Perbedaan regangan yang tinggi (akibat tegangan rata-rata yang tinggi), pada beberapa kasus akan menyebabkan deformasi plastis yang cukup besar (makroskopis). Selama *high-cycle fatigue* deformasi plastis hanya pada skala mikroskopis.

Ada tiga metoda utama untuk menentukan batas lelah material, yaitu *Stress-Life Method*, *Strain-Life Method*, dan *Linier-Elastic Fracture Method*. Ketiga metoda tersebut dapat digunakan untuk memprediksi umur lelah material dalam jumlah siklus terhadap pembebanan tertentu. Metoda *Stress-Life* didasarkan pada tingkat tegangan, metoda ini akurasinya paling

rendah terutama jika diaplikasikan pada pembebanan dengan jumlah siklus yang sedikit yaitu kurang dari 1000 siklus pembebanan. Namun demikian metoda ini paling mudah dan paling banyak digunakan dalam aplikasinya.

Metoda *Strain-Life* akurasiya lebih baik dari metode pertama dan dapat diterapkan pada jumlah siklus rendah yaitu kurang dari 1000 siklus pembebanan. Metoda ini dapat menentukan tegangan dan regangan pada daerah terjadinya deformasi plastis pada material. Sedangkan metoda *Linier-Elastic Fracture Mechanics* metoda untuk menentukan umur material jika ada retak awal pada material tersebut, metoda ini untuk menentukan perambatan retak material sampai material mengalami patah akhir.

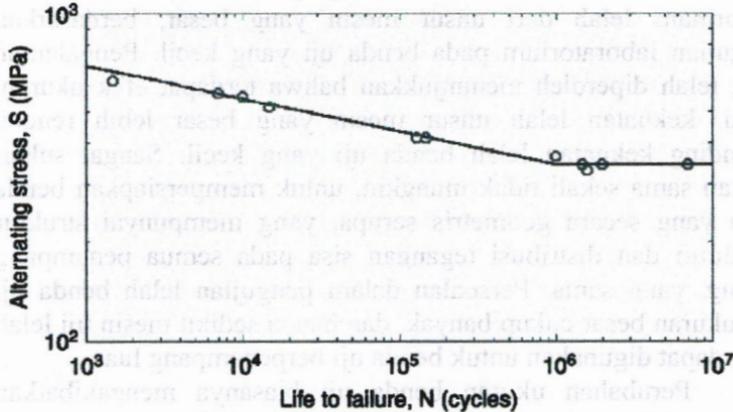
Selanjutnya, dalam penelitian ini yang digunakan adalah metoda *Stress-Life* yang mana *output*-nya adalah kurva S-N yang mempresentasikan hubungan antara tegangan (S) dan umur material dalam jumlah siklus (N), pada level pembebanan tertentu.

Metoda eksperimen yang umum digunakan adalah dengan menggunakan Mesin Uji Lentur Putar R.R.Moore sedangkan untuk menentukan kurva S-N dapat dilakukan dengan berbagai cara antara lain dengan menggunakan grafik hasil penelitian terhadap beberapa parameter dominan yang mempengaruhi umur lelah suatu material seperti yang diperkenalkan oleh Juvinall.

2.8.1 Kurva S-N dengan Metoda Analitis-Grafik

Data yang dihasilkan dari pengujian kelalahan akan dipresentasikan dengan menggunakan kurba tegangan – umur lelah (Kurva S-N) sehingga seperti tampak pada gambar 2.15. Kurva ini menyatakan hubungan antara nilai tegangan terhadap jumlah siklus untuk patah. Pada tegangan di bawah batas lelahnya (*fatigue limit*) spesimen akan mempunyai umur tak terhingga. Garis lurus yang miring pada kurva S-N menyatakan jumlah siklus pembebanan yang dicapai spesimen pada tingkat tegangan

tertentu, dengan demikian pada daerah ini umur lelah spesimen akan terbatas.



Gambar 2.15. Kurva S-N hasil pengujian dan prediksi spesimen baja dengan pembebanan aksial [16]

Kurva S - N dapat juga diprediksi dari kekutan tarik, serta faktor koreksi yang dipakai pada pengujian spesimen. Kurva S - N teoritis ini bekerja mulai jumlah putaran 10^3 sampai dengan batas kelelahan (*fatigue limit*), untuk baja diambil sebanyak 10^6 putaran. Pada range jumlah putaran tersebut, kekuatan lelah spesimen akan terhubung berupa garis lurus.

Faktor-faktor yang mempengaruhi perhitungan kekuatan lelah meliputi faktor jenis beban, faktor ukuran material, dan faktor pengerjaan material.

Faktor jenis beban (C_L)

Harga-harga faktor jenis beban ini adalah :

1. Untuk beban bolak-balik atau rotating *bending*, $C_L = 0,9$
 2. Untuk pembebanan aksial :
 - $C_L = 0,9$ apabila tidak ada *bending*, dan
 - $C_L = 0,6$ sampai dengan $0,8$ apabila ada pengaruh *bending*
- Untuk beban torsi :
- $C_L = 0,58$ untuk material ulet, dan
 - $C_L = 0,8$ untuk besi tuang (dan untuk material getas yang lain)

Faktor ukuran material (C_D)

Salah satu persoalan yang penting adalah menilai performans lelah dari unsur mesin yang besar, berdasarkan pengujian laboratorium pada benda uji yang kecil. Pengalaman yang telah diperoleh menunjukkan bahwa terdapat efek ukuran; yakni, kekuatan lelah unsur mesin yang besar lebih rendah dibanding kekuatan lelah benda uji yang kecil. Sangat sukar, bahkan sama sekali tidak mungkin, untuk mempersiapkan benda kerja yang secara geometris serupa, yang mempunyai struktur metalurgi dan distribusi tegangan sisa pada semua penampang lintang, yang sama. Persoalan dalam pengujian lelah benda uji berukuran besar cukup banyak, dan hanya sedikit mesin uji lelah yang dapat digunakan untuk benda uji berpenampang luas.

Perubahan ukuran benda uji biasanya mengakibatkan variasi dalam 2 faktor. Pertama, penambahan diameter menyebabkan penambahan volume atau luas penampang benda uji. Perubahan luas penampang merupakan hal yang penting, karena biasanya kegagalan lelah mulai terjadi pada permukaan. Kedua, untuk benda uji tak bertakik dan bertakik yang diberi beban lentur atau beban torsi, penambahan diameter biasanya menurunkan gradien tegangan di sepanjang diameter dan menambah volume bahan yang mengalami tegangan-tegangan tinggi.

Data-data hasil percobaan efek ukuran pada kelelahan, tidak lengkap dan kadangkala bertentangan satu dengan lainnya. Untuk pengujian lentur dan puntiran bolak-balik, beberapa peneliti telah menemukan bukti tidak terjadinya perubahan batas lelah terhadap perubahan diameter. Tetapi pada umumnya, dengan bertambahnya diameter maka batasan lelahnya akan turun. Untuk baja lunak, penurunan batas lelah beban lentur untuk diameter antara 0,1 hingga 0,2 in, tidak melebihi 10%. Data-data untuk baja poros yang diuji dengan beban lentur terdapat pada tabel berikut. Faktor C_D adalah faktor reduksi fatik.

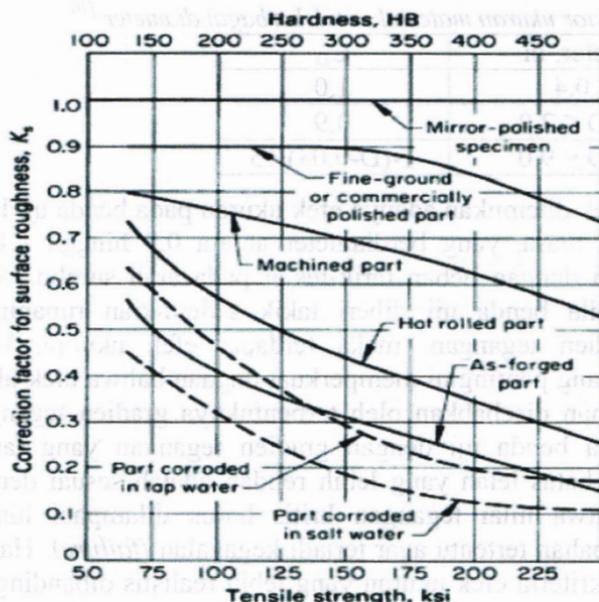
Tabel 2.1 Faktor ukuran material untuk berbagai diameter ^[10]

Diameter, in	C_D
$D \leq 0,4$	1,0
$0,4 \leq D \leq 2,0$	0,9
$2,0 \leq D \leq 9,0$	$1-(D-0,03)/15$

Tidak ditemukan adanya efek ukuran pada benda uji leleh baja karbon biasa, yang berdiameter antara 0,2 hingga 1,4 in, apabila diuji dengan beban tarik-tekan pada arah sumbu. Akan tetapi, apabila benda uji diberi takik sedemikian rupahingga terjadi gradien tegangan, maka terdapat efek ukuran. Hasil percobaan yang penting ini memperkuat dugaan bahwa efek ukuran pada kelelahan disebabkan oleh terbentuknya gradien tegangan. Fakta bahwa benda uji dengan gradien tegangan yang landai mempunyai batas leleh yang lebih rendah adalah sesuai dengan gagasan bahwa nilai tegangan kritis harus dilampaui hingga kedalaman bahan tertentu agar terjadi kegagalan (*failure*). Hal ini merupakan kriteria efek ukuran yang lebih realistis dibandingkan kriteria berupa perbandingan antara perubahan luas permukaan terhadap perubahan diameter benda uji. Pengaruh gradien tegangan pada efek ukuran, membantu memberikan penjelasan mengapa hubungan antara hasil laboratorium dan kelelahan pada pemakaian tidak jelas. Leleh sebenarnya pada struktur yang besar biasanya secara langsung dapat dikaitkan dengan konsentrasi tegangan, baik secara kebetulan maupun sengaja. Namun tidak mungkin untuk menirukan konsentrasi tegangan dan gradien tegangan yang sama pada benda uji laboratorium yang berukuran kecil.

Faktor kondisi permukaan (C_s)

Faktor koreksi pengerjaan permukaan (C_s) adalah rasio antara batas leleh material pada berbagai jenis pengerjaan permukaan dengan batas leleh material standar R.R.Moore pada permukaan *mirror polish*. Harga faktor koreksi pada berbagai pengerjaan permukaan dapat dilihat pada gambar 2.16 berikut.



Gambar 2.16. Harga faktor koreksi pada berbagai pengerjaan permukaan^[7]

Hubungan C_L , C_D dan C_S

Harga faktor kondisi permukaan serta tabel harga faktor jenis beban dan pengaruh ukuran dapat dilihat pada tabel 2.2 berikut :

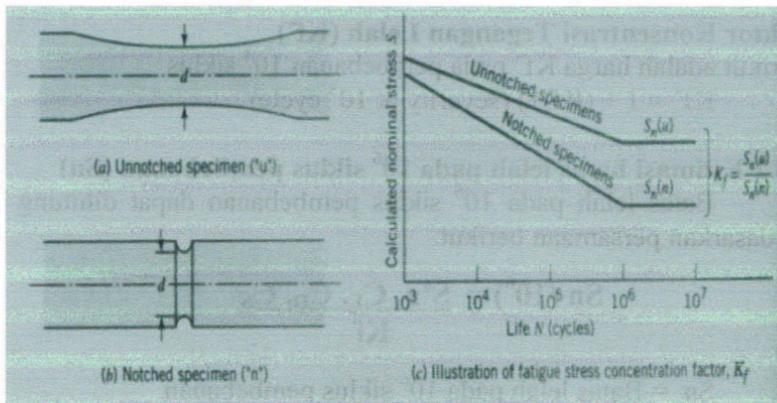
Tabel 2.2. Harga faktor kondisi permukaan (C_S), jenis beban (C_L) dan pengaruh ukuran (C_D) untuk material baja.

Factor	Load Type		
	Bending	Torsion	Axial
C_L	1.0	0.58	0.9
C_D	1.0 for $D \leq 0.4$ in 0.9 for $0.4 \text{ in} \leq D \leq 2$ in		1.0
C_S	Dari gambar 2.19		

Faktor Konsentrasi Tegangan (Kt)

Takikan, alur, lubang, filet, ulir, dan poros bintang adalah bentuk umum yang sering dijumpai dalam komponen mesin. Untuk menggambarkan distribusi tegangan pada perubahan bentuk di atas, tegangan dianalogkan dengan aliran yang melewati suatu penampang di mana pada bagian lain penampang tersebut mengalami perubahan dimensi, tekanan mengalir dan dapat diwakili sebagai suatu rangkaian dari garis sejajar, di mana konsentrasi tegangan berbanding terbalik dengan jarak, artinya jika jarak garis-garis sejajar semakin jauh maka konsentrasi tegangan semakin kecil dan apabila jarak antara garis-garis sejajar semakin dekat maka konsentrasi tegangan semakin tinggi. Harga konsentrasi tegangan untuk spesimen yang tidak mempunyai takikan adalah $K_t = 1$.

Gambar 2.17 berikut adalah pengaruh konsentrasi tegangan terhadap umur suatu material yang dikenai beban dinamis. Jika diberi tegangan yang sama besar untuk material yang sama dan identik, terlihat bahwa material yang tidak mengalami konsentrasi tegangan memiliki jumlah siklus yang lebih banyak jika dibandingkan dengan material yang mengalami konsentrasi tegangan.



Gambar 2.17. Pengaruh takikan pada batas leleh material^[9]

Besarnya harga *fatigue stress concentration factor* (K_f) pada 10^6 siklus dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$K_f = 1 + (K_t - 1)q \cdot C_s$$

K_t = Faktor konsentrasi tegangan

Q = Notch sensitifitas

C_s = Faktor koreksi pengerjaan permukaan

Faktor Sensivitas Takikan (q)

Kurva Peterson's didasarkan pada sensitivitas takikan yang merupakan fungsi dari takikan dengan Neuber ekuivalen (a), dalam bentuk persamaan dapat ditulis sebagai berikut :

$$q = \frac{K_f - 1}{K_t - 1}$$

$$K_f = 1 + (K_t - 1)q$$

K_f = faktor konsentrasi tegangan lelah

K_t = faktor konsentrasi tegangan

Harga sensitivitas takikan berkisar antara 0-1. Untuk material yang mempunyai takikan maka harga sensitivitas takikan terbesar $q=1$. Jika material tersebut tidak mempunyai takikan maka harga $q=0$ dan harga $K_f = 1$.

Faktor Konsentrasi Tegangan Lelah (K_f')

Berikut adalah harga K_f' pada pembebanan 10^3 siklus

$$K_f' = 1 + (K_f - 1) (\text{severity at } 10^3 \text{ cycle})$$

2.8.2 Estimasi batas lelah pada 10^6 siklus pembebanan (S_n)

Batas lelah pada 10^6 siklus pembebanan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$S_n (10^6) = \frac{S'_n \cdot C_L \cdot C_D \cdot C_S}{K_f}$$

S_n = Batas lelah pada 10^6 siklus pembebanan

S'_n = Batas lelah standar R.R Moore, untuk baja

$$S'_n = 0.5 \times S_u$$

S_u = Ultimate strength

C_L = Faktor koreksi untuk berbagai type pembebanan

C_D = Faktor koreksi dimensi/ukuran

C_S = Faktor koreksi pengerjaan permukaan

2.8.3 Estimasi kekuatan pada 10^3 siklus pembebanan (S_n)

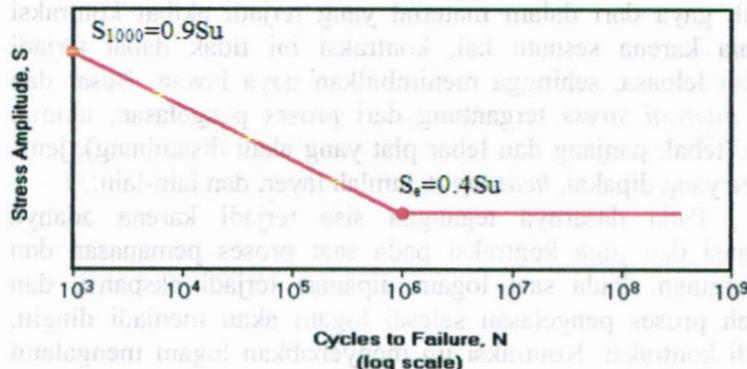
Batas leleh pada 10^3 siklus pembebanan dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$S_n(10^3) = \frac{0.9 S_u}{K'f}$$

S_u = Ultimate strength

Besarnya harga *fatigue stress concentration factor* pada pembebanan 10^3 siklus ($K'f$) dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut.

$$K'f = 1 + (Kf-1)(\text{severity at } 10^3 \text{ cycle})$$



Gambar 2.18. Kurva S-N untuk Wrought Steels ^[14]

2.9 Kekuatan Lelah Pada Sambungan Las

Pada sambungan las, banyak sekali faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan leleh, antara lain: prosedur pengelasan, struktur mikro, bentuk manik las, dan adanya tegangan sisa.

Pengelasan melibatkan proses pencairan dan pembekuan, sehingga jelas bahwa di daerah logam las, segala macam cacat pengecoran dapat terjadi disitu. Di daerah HAZ terjadi proses pemanasan dan pendinginan. Perubahan struktur mikro atau transformasi fasa dapat berlangsung di HAZ. Fasa yang getas serta butir yang kasar dapat terjadi di HAZ. Oleh karena itu, tidaklah heran bahwa kekuatan leleh sambungan las adalah lebih rendah dibanding logam induknya.

Selain itu, proses pengelasan juga menimbulkan tegangan sisa, terutama pada daerah HAZ. Tegangan sisa tersebut akan menurunkan kekuatan leleh logam. Untuk itu, perlu dilakukan proses *postweld heat treatment* untuk menaikkan kekuatan leleh benda kerja yang dilas. Proses *postweld* dapat dilakukan dengan cara pengelasan *multi layer*.

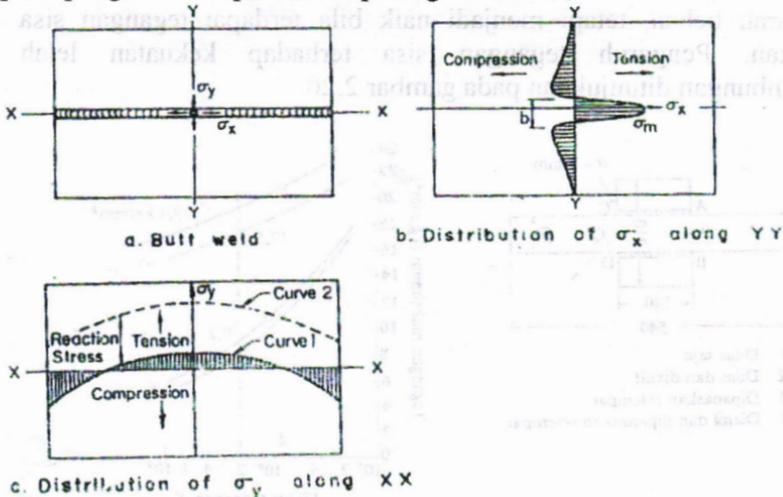
2.9.1 Terjadinya Tegangan Sisa

Internal stress atau *residual stress* atau tegangan sisa adalah gaya dari dalam material yang terjadi akibat kontraksi dimana karena sesuatu hal, kontraksi ini tidak dapat terjadi dengan leluasa, sehingga menimbulkan gaya lawan. Besar dan arah *internal stress* tergantung dari proses pengelasan, ukuran lasan (tebal, panjang dan lebar plat yang akan disambung), jenis *fixture* yang dipakai, *heat input*, jumlah layer, dan lain-lain.

Pada dasarnya tegangan sisa terjadi karena adanya ekspansi dan juga kontraksi pada saat proses pemanasan dan pendinginan. Pada saat logam dipanasi terjadi ekspansi, dan setelah proses pengelasan selesai logam akan menjadi dingin, terjadi kontraksi. Kontraksi ini menyebabkan logam mengalami distorsi.

Internal stress dapat berupa *compressive residual stress* (tekan) atau *tensile residual stress* (tarik), tergantung dari besarnya kecepatan pendinginan (*cooling rate*). Distribusinya ada pada arah memanjang ataupun melintang terhadap sumbu lasan. Distribusi pada arah memanjang (*longitudinal*) lebih besar

dibanding arah melintang (*transversal*). Distribusi tegangan sisa pada pengelasan dapat dilihat pada gambar berikut.



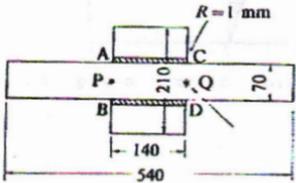
Gambar 2.19 Distribusi tegangan sisa^[9]

Fenomena di atas tidak berlaku pada benda kerja yang mengalami pengelasan *multi layer*, kecuali pada layer terakhirnya. Pengelasan *multi layer* akan menghilangkan tegangan sisa karena memberikan efek *post heat* pada layer sebelumnya dan *pre heat* untuk layer berikutnya, sehingga meminimalisir timbulnya tegangan sisa. Jadi, pengelasan *multi layer* akan memperbaiki kualitas lasan.

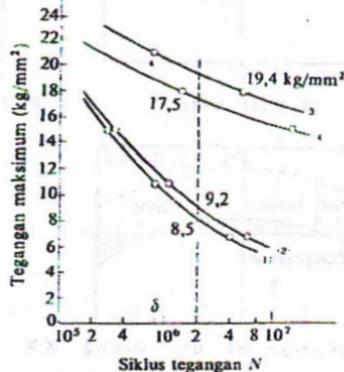
2.9.2 Pengaruh Tegangan Sisa Terhadap Kekuatan Lelah Sambungan Las

Pengujian kelelahan biasanya dilakukan pada batang uji yang dipotong dari bagian lasan. Sebenarnya dengan pemotongan ini sebagian tegangan sisa hilang. Dengan kenyataan ini jelas bahwa hampir tidak mungkin untuk meneliti pengaruh tegangan sisa tersendiri terhadap kekuatan lelah. Tetapi meskipun demikian, tampaknya tegangan sisa mempunyai pengaruh yang

tidak baik terhadap batas leleh sambungan. Kekuatan leleh sambungan las menjadi turun bila ada tegangan sisa tarik yang searah beban, tetapi menjadi naik bila terdapat tegangan sisa tekan. Pengaruh tegangan sisa terhadap kekuatan leleh sambungan ditunjukkan pada gambar 2.20.



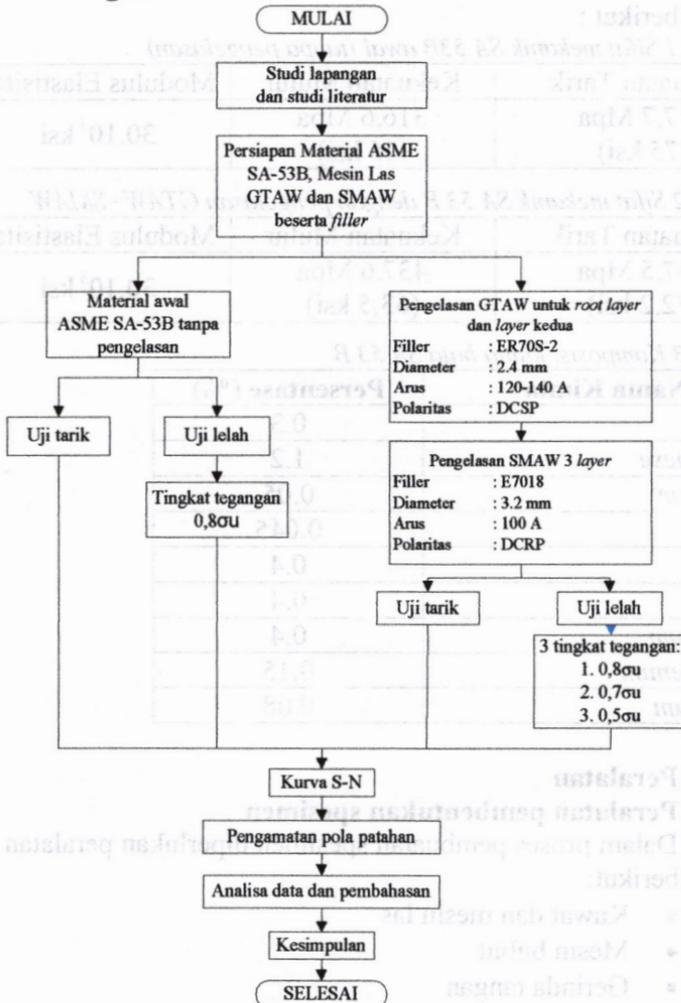
- 1 Dilas saja
- 2 Dilas dan dianil
- 3 Dipanaskan setempat
- 4 Dianil dan dipanaskan setempat



Gambar 2.20 Pengaruh tegangan sisa terhadap kekuatan leleh sambungan las^[10]

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Material Uji

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja ASME SA 53 grade B (*pipa seamless pada circulation heater*). Standar ini memberikan sifat mekanik dan komposisi kimia sebagai berikut :

Tabel 3.1 Sifat mekanik SA 53B awal (tanpa pengelasan)

Kekuatan Tarik	Kekuatan Mulur	Modulus Elastisitas
517,7 Mpa (75 ksi)	316,6 Mpa (46 ksi)	$30 \cdot 10^3$ ksi

Tabel 3.2 Sifat mekanik SA 53 B dengan pengelasan GTAW+SMAW

Kekuatan Tarik	Kekuatan Mulur	Modulus Elastisitas
497,5 Mpa (72,2 ksi)	437,6 Mpa (63,5 ksi)	$30 \cdot 10^3$ ksi

Tabel 3.3 Komposisi kimia baja SA 53 B

Nama Kimia	Persentase (%)
Carbon	0.3
Manganese	1.2
Phosphor	0.05
Sulfur	0.045
Copper	0.4
Nickel	0.4
Chromium	0.4
Molybdenum	0.15
Vanadium	0.08

3.3 Peralatan

3.3.1 Peralatan pembentukan spesimen

Dalam proses pembuatan spesimen diperlukan peralatan sebagai berikut:

- Kawat dan mesin las
- Mesin bubut
- Gerinda tangan
- Sekrap

- *Cutting wheel*
- Kamera digital
- Penggaris
- Jangka sorong

3.3.2 Perlatan Uji

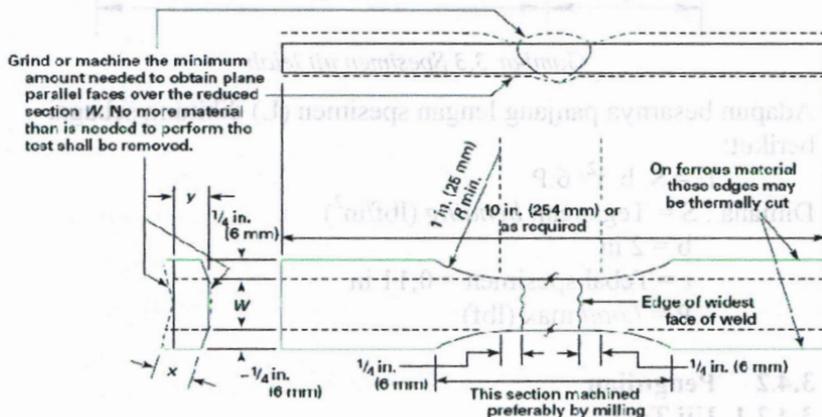
- Mesin uji tarik *Wolpert*
- Mesin uji kelelahan *LFE-150 fatigue machine test*
- Kamera digital
- Kunci Inggris
- Oli mesin
- *Stopwatch* / jam digital

3.4 Langkah-langkah Percobaan

3.4.1 Pembentukan Spesimen

3.4.1.1 Spesimen Uji Tarik

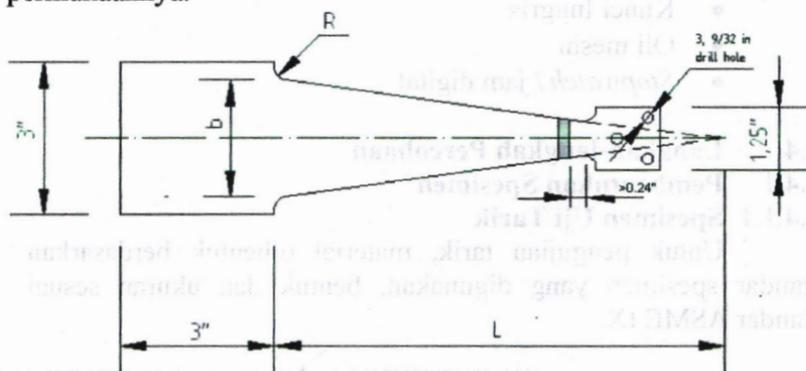
Untuk pengujian tarik, material dibentuk berdasarkan standar spesimen yang digunakan, bentuk dan ukuran sesuai standar ASME IX.



Gambar 3.2 Spesimen uji tarik [Boiler and Pressure Vessel, ASME IX, 2001]

3.4.1.2 Spesimen Uji Lelah

Spesimen dibentuk sesuai dengan manual handbook operational for LFE-150 *fatigue machine test*. Sebelumnya pipa dipotong sesuai dengan lebar spesimen (3in), kemudian dibubut dan disekrap secara melintang menggunakan gerinda hingga dicapai ketebalan yang diinginkan, yaitu 3 mm. Sehingga didapatkan sesimen berupa plat lurus. Kemudian plat dibentuk sesuai dengan gambar 3.3 dan digerinda halus pada permukaannya.



Gambar 3.3 Spesimen uji lelah

Adapun besarnya panjang lengan spesimen (L) dihitung sebagai berikut:

$$L = S \cdot b \cdot t^2 / 6 \cdot P$$

Dimana : S = Tegangan *bending* (lbf/in²)

$$b = 2 \text{ in}$$

$$t = \text{Tebal spesimen} = 0,11 \text{ in}$$

$$P = \text{Load max (lbf)}$$

3.4.2 Pengujian

3.4.2.1 Uji Tarik

Uji tarik dilakukan dengan mesin uji tarik universal *Woolpert Machine* tipe 30 TUZ 750 di laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS. Tujuan pengujian tarik adalah agar dapat

ditentukan tegangan yang akan dipakai dalam spesimen uji lelah. Material yang diuji tarik adalah material awal baja SA-53 Grade B. Material dengan pengelasan telah dilakukan pengujian tarik pada penelitian sebelumnya.

3.4.2.2 Uji Lelah

Pengujian kelelahan yang dilakukan adalah *fatigue reversed bending test* dengan menggunakan mesin LFE-150 di Laboratorium Metalurgi Teknik Mesin ITS. Pengujian lelah ini dilakukan dengan memberikan pembebanan atau tegangan yang relatif sederhana, yaitu beban uniaksial atau lenturan. Dengan pembebanan tersebut, maka akan diperoleh tegangan tekan dan tarik yang berfluktuasi.



Gambar 3.4 Mesin uji fatik

Pengujian kelelahan ini dilakukan untuk dua kondisi spesimen, yaitu

1. Uji lelah pada logam awal, dengan tingkat beban $0,8\sigma_u$.
 2. Uji lelah pada logam yang dilas dengan GTAW+SMAW pada tingkat beban $0,8\sigma_u$, $0,7\sigma_u$ dan $0,5\sigma_u$.
- ❖ Keterangan: masing-masing pengujian digunakan 3 *test piece*.

Sebelum dilakukan pengujian, defleksi harus dihitung terlebih dahulu untuk mengetahui tegangan *bending* yang dibutuhkan.

$$D = S(L)^2/E.t$$

dimana :

D = Defleksi (in)

S = Tegangan *bending* (lb/in²)

E = Modulus Elastilitas bahan (lb/in²)

L = Panjang spesimen (in)

t = Tebal spesimen (in)

Persiapan Peralatan

- Cek kondisi mesin sebelum dinyalakan.
- Lumasi poros dan baut-baut pada mesin.
- Cek semua kabel dan sambungan ke *power*.

Prosedur Pengujian

1. Atur simpangan (defleksi) sesuai dengan tingkat tegangan yang diinginkan.
2. Spesimen uji dipasang pada tumpuan kemudian kencangkan spesimen uji dengan seperangkat kunci Inggris.
3. Set *cycle caunter* ke posisi awal (angka menunjukkan 99999).
4. Power dihidupkan untuk memulai pengujian dan atur kecepatan lenturan.
5. Saat spesimen patah, motor akan mati secara otomatis kemudian atur kecepatan kembali ke posisi nol.
6. Angka yang tertera pada *caunter* dicatat dan spesimen yang sudah patah dilepas dari tumpuan.

Keterangan :

- Skala angka pada *cycle caunter* adalah 1 : 100
- Cara menghitung *siklus* adalah dengan mengurangi jumlah siklus maksimal dengan angka yang tertera pada *caunter* dikali 100 (9.999.999 - (100 x angka pada *caunter*))

7. Ulangi langkah 2-6 sebanyak 3 kali untuk satu variasi beban (duplikasi).
8. Ulangi langkah 1-7 dengan variasi beban sesuai yang diinginkan.
9. Jumlah siklus (putaran) pada pembebanan tertentu yang bersesuaian dicatat untuk menggambarkan kurva S-N.

3.4.3 Pengamatan makro

Pengamatan makro yang dimaksud adalah pengamatan retak pada *sample* awal dengan *crack* pada daerah lasan. Untuk mengetahui retak awal, material awal yang mengalami *crack* dipotong secara melintang pada bagian lasan, kemudian digerinda, dipoles dan dietsa dengan *etching reagent* untuk kemudian diambil foto makronya dengan bantuan mikroskop dan kamera digital. Selain itu juga dilakukan pengamatan makro pada pola patahan masing-masing kondisi pembebanan. Setiap patahan spesimen difoto dengan perbesaran tertentu, diamati untuk kemudian dibandingkan dan dianalisa untuk mengetahui jenis pola patahan yang terjadi.

BAB 4

DATA HASIL PENGUJIAN

4.1 Uji Tarik

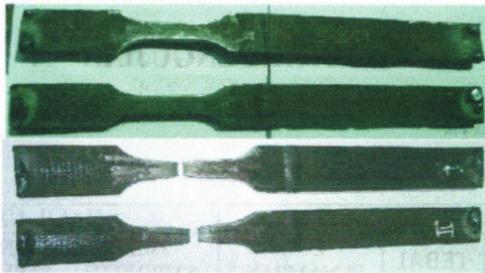
Tabel 4.1 Uji tarik material awal

KODE	SPESIFIKASI SAMPEL			HASIL UJI TARIK		
	LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	LUAS PENAMPANG (mm ²)	YIELD STRENGTH (Mpa)	TENSILE STRENGTH (MPa)	KET (lokasi patah)
1A	20	11	220	318,2	520,5	logam induk
1B	20	10	200	315,0	515,0	logam induk
Rata-rata				316,6 (46 ksi)	517,7 (75 ksi)	

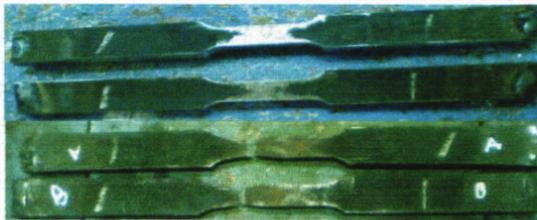
Tabel 4.2 Uji tarik material dengan pengelasan multi layer GTAW+SMAW

KODE	SPESIFIKASI SAMPEL			HASIL UJI TARIK		
	LEBAR (mm)	TEBAL (mm)	LUAS PENAMPANG (mm ²)	YIELD STRENGTH (Mpa)	TENSILE STRENGTH (MPa)	KET (lokasi patah)
2A	19,7	11,3	222,61	417,6	491,9	logam induk
2B	19,1	11,5	219,65	457,5	503,1	logam induk
Rata-rata				437,6 (64 ksi)	497,5 (72 ksi)	

Dari uji tarik yang dilakukan didapat nilai kekuatan tarik rata-rata untuk material awal adalah 517,7 Mpa (75 ksi) dan kekuatan luluh rata-rata sebesar 316,6 Mpa (46 ksi). Sedangkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh rata-rata untuk material hasil pengelasan secara berturut-turut adalah 497,5 Mpa (72 ksi) dan 437,6 (64 ksi). Adapun lokasi patah dari pengujian adalah pada logam induk, seperti pada gambar 4.1.



(a)

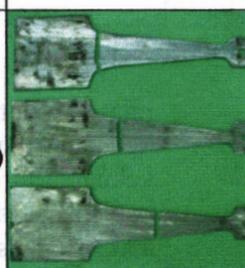


(b)

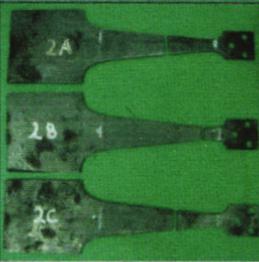
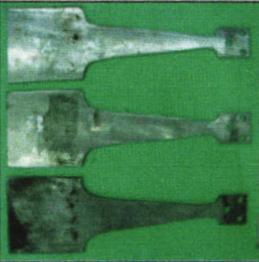
Gambar 4.1 Spesimen uji tarik sesudah sebelum dan sesudah pengujian
 (a) Material awal, (b) Material dengan las GTAW+SMAW^[15]

4.2 Uji Lelah

Tabel 4.3 Hasil uji lelah material awal

No	Tingkat teg	Tegangan σ (ksi)	Defleksi D (in)	Kode Specimen	Umur Lelah Nf (siklus)	Rata-rata Nf	Lokasi patahan
1	0,8 σ_u	58	1,02	A	1658200	1298700 (1,3 x 10 ⁶)	
				B	1024500		
				C	1213400		

Tabel 4.4 Hasil uji lelah material dengan pengelasan

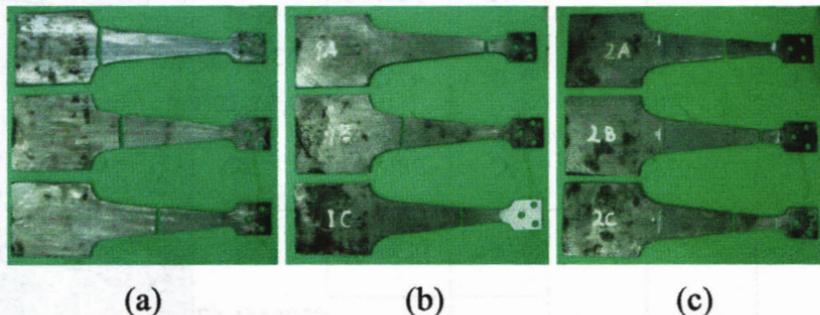
No	Tingkat teg	Tegangan σ (ksi)	Defleksi D (in)	Kode Specimen	Umur Lelah Nf (siklus)	Rata-rata Nf	Lokasi patahan
1	0,8 σ_u	58	1,02	A	900500	953133,33 (9,5 x 10 ⁵)	
				B	973200		
				C	985700		
2	0,7 σ_u	50,75	0,9	A	1850400	2206466,67 (2,2 x 10 ⁶)	
				B	2327500		
				C	2441500		
\$3	0,5 σ_u	36,25	0,64	A	Tidak patah pada Nf = 5,5 x 10 ⁶		
				B			
				C			

Dari tabel 4.4 dan 4.5 di atas dapat diketahui umur lelah rata-rata untuk setiap tingkat tegangan. Umur lelah ini selanjutnya akan diplotkan dalam kurva S-N pada bab berikutnya.

4.3 Pengamatan Makro

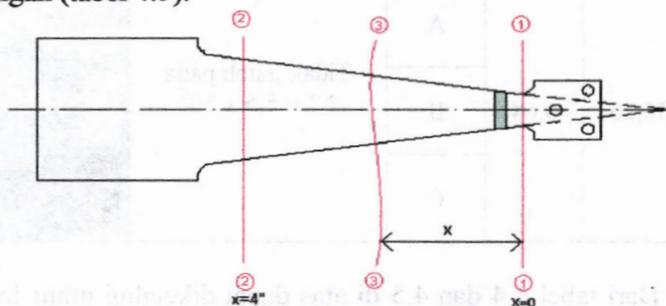
4.3.1 Lokasi Patahan

Dari pengujian leleh yang dilakukan diamati lokasi patahan yang terjadi. Lokasi patah yang terjadi berbeda untuk setiap spesimen, seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Lokasi patahan; (a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su

Kemudian setiap titik diukur jarak dan dimensinya untuk uji tegangan (tabel 4.5).



Gambar 4.3 Titik uji tegangan

Keterangan : Titik 1 diambil sebagai acuan, $x=0$
 Titik 2 diambil sebagai titik akhir acuan, $x=4''$
 Titik 3 merupakan lokasi patah, dihitung dari titik 1

Tabel 4.5 Hasil ukur dimensi titik uji tegangan

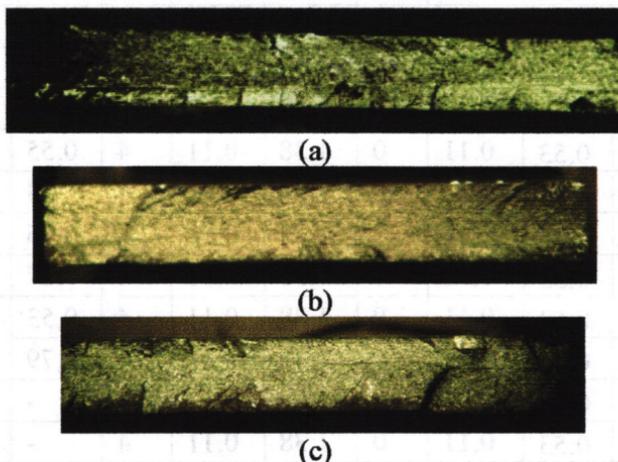
Kode spesimen	1			2			3		
	b	h	x	b	h	x	b	h	x
A1	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	1,63	0,11	2,36
A2	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	1,29	0,11	3,75
A3	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	1,02	0,11	4,64
1A	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	0,55	0,11	0,31
1B	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	1,3	0,11	3,72
1C	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	0,76	0,11	1,41
2A	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	0,87	0,11	1,71
2B	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	0,53	0,11	0,35
2C	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	0,79	0,11	1,44
3A	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	-	-	-
3B	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	-	-	-
3C	0,53	0,11	0	1,38	0,11	4	-	-	-

*Ket: dimensi dalam *inch*

Data di atas digunakan untuk mengetahui tegangan di masing-masing titik pada setiap spesimen, yaitu untuk membuktikan apakah besar tegangan di setiap titik adalah sama untuk setiap tingkat tegangan.

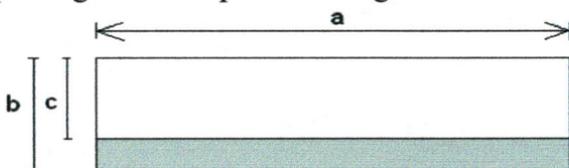
4.3.2 Pola Patahan

Hasil pengamatan makro material awal dan material hasil pengelasan *multi layer* adalah sebagai berikut:



Gambar 4.4 Foto makro pola patahan patahan; (a) material awal; (b) material las 0,8Su (c) material las 0,7Su

Untuk mengetahui area patah statik dan patah leleh pada tingkat tegangan yang berbeda maka dilakukan pengamatan untuk setiap spesimen hasil pengelasan *multi layer* (0,7Su dan 0,8Su) dengan pembagian daerah patahan sebagai berikut:



Gambar 4.5 Daerah patah statik dan patah leleh

Keterangan:



= daerah patah leleh

a = lebar patahan

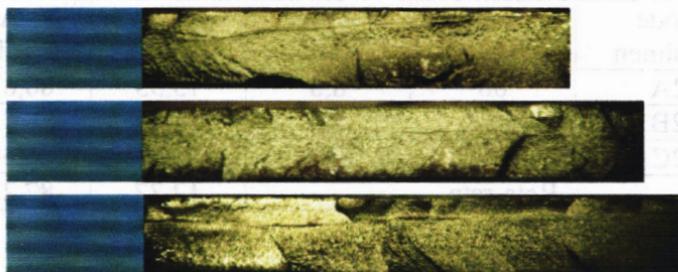


= daerah patah statik (sisa patahan)

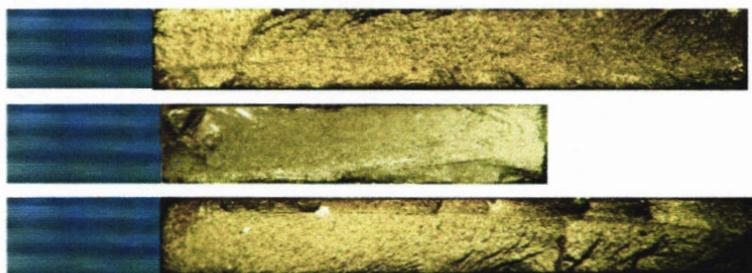
b = tebal spesimen

c = tebal sisa patahan

Pengamatan makro yang dilakukan pada material hasil pengelasan *multi layer* GTAW-SMAW untuk 0,7Su dan 0,8Su adalah sebagai berikut:



Gambar 4.5 Foto makro patahan material las 0,7Su



Gambar 4.6 Foto makro patahan material las 0,8Su

Adapun hasil pengukuran daerah luas patahan statik dan patah leleh untuk tingkat tegangan 0,7Su dan 0,8Su pada material hasil pengelasan *multi layer* GTAW-SMAW dapat dilihat pada tabel 4.6 dan tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.6 Luas daerah patah leleh dan patah statik pada material las 0,7Su

Kode spesimen	A_{total} (mm^2)	A_{leleh} (mm^2)	% A_{leleh}	% A_{statik}
1A	42	7,8	18,57	81,43
1B	99	21,45	21,67	78,33
1C	57	11,32	19,85	80,15
Rata-rata			20,03	79,97

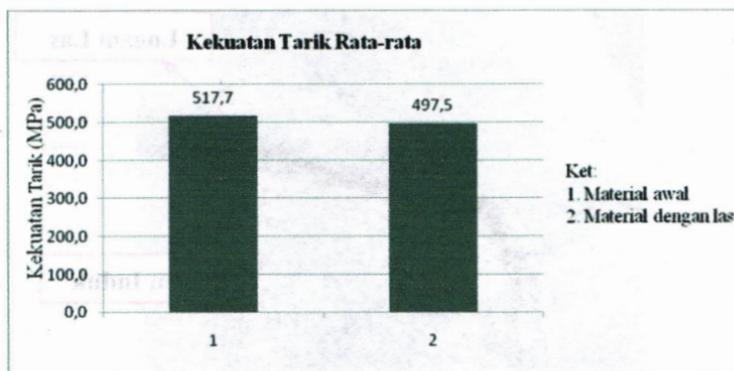
Tabel 4.8 Luas daerah patah leleh dan patah statik pada material las 0,8Su

Kode spesimen	A _{total} (mm ²)	A _{leleh} (mm ²)	%A _{leleh}	%A _{statik}
2A	66	8,8	13,33	86,67
2B	40,5	5,5	13,58	86,42
2C	60	6,84	11,40	88,60
Rata-rata			12,77	87,23

BAB 5 ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

5.1 Uji Tarik

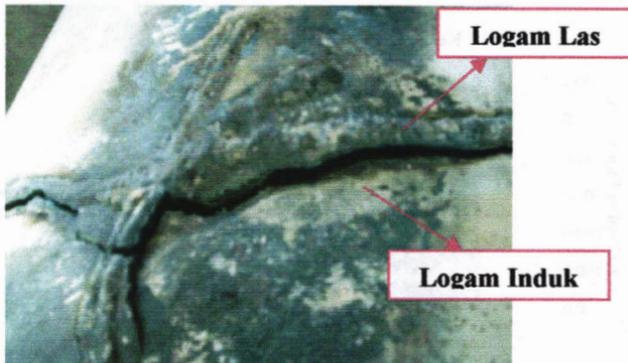
Gambar 5.1 menunjukkan kekuatan tarik rata-rata material awal dan material hasil pengelesan *multi layer* GTAW-SMAW. Nilai kekuatan tarik rata-rata untuk material awal adalah 517,7 Mpa (75 ksi) dan kekuatan luluh rata-rata sebesar 316,6 Mpa (46 ksi). Sedangkan kekuatan tarik dan kekuatan luluh rata-rata untuk material hasil pengelasan secara berturut-turut adalah 497,5 Mpa (72 ksi) dan 437,6 (64 ksi).



Gambar 5.1 Kekuatan tarik rata-rata

Meskipun dari data uji tarik terlihat bahwa kekuatan tarik material yang telah dilas kurang dari material awal, namun angka tersebut masih masuk dalam *acceptance criteria*, yaitu jika patah yang terjadi di logam induk maka kekuatan tarik hasil lasan tidak lebih dari 5% dibawah kekuatan logam induk agar spesimen tersebut bisa diterima. Kekuatan tarik material adalah 517,7 MPa, jadi kekuatan tarik minimal sambungan jika patah di logam induk adalah 491,8 MPa. Hasil uji tarik untuk hasil lasan GTAW-SMAW dengan arus SMAW 100 A adalah 497,5 MPa sehingga hasil lasan tersebut bisa diterima.

Dari pengujian tarik yang dilakukan diketahui bahwa patah yang terjadi berada di logam induk (gambar 4.1), bukan pada *weld metal* seperti pada kasus industri sebelumnya (gambar 5.2). Lokasi patah pada logam induk membuktikan bahwa panas yang dihasilkan pengelasan *multi layer* membuat daerah logam las dan HAZ mengalami peningkatan sifat mekanik. Ini menunjukkan bahwa pengelasan GTAW untuk *root layer* dan *layer* kedua dengan arus 120-140 A dan pengelasan SMAW 3 *layer* dengan arus 100 A, memiliki kualitas lasan yang lebih baik dibanding pengelasan di industri, yaitu 4 layer SMAW yang diindikasikan mengalami *lack of penetration* (lampiran G).



Gambar 5.2 Lokasi patahan di industri

Pada pengelasan *multi layer*, panas yang dihasilkan saat pengelasan pada tiap *layer* berperan dalam perbaikan sifat mekanik pada *layer* sebelum dan sesudahnya. Panas pada *layer* kedua seolah merupakan *postweld* untuk *layer* pertama dan *preheat* untuk *layer* ketiga. Fenomena ini akan terus berulang hingga *layer* terakhir. Fenomena ini akan menghasilkan struktur mikro yang berbeda sesuai dengan temperatur pemanasan kembali yang dialami *layer*.

Pengelasan dengan *multi layer* memiliki struktur mikro logam las dan HAZ yang berbeda dengan *single layer*, dalam hal ini yang berbeda adalah ukuran butiran. Struktur mikro logam las

berbentuk menyerupai struktur mikro hasil coran yang dendritik dan kasar. Pada pengelasan *multi layer*, jika pendepositan *layer* kedua dilakukan sesaat setelah pendepositan *layer* pertama, tidak akan mengakibatkan perbaikan butiran (*grain refinement*) pada *layer* pertama. Perbaikan butiran maksimal akan terjadi jika *layer* pertama telah mencapai temperatur di bawah temperatur kritis tetapi belum mencapai temperatur kamar. Jika *layer* pertama sudah mencapai temperatur kamar, maka perbaikan butiran yang terjadi lebih sedikit dibandingkan saat *layer* tersebut masih panas tetapi masih di bawah temperatur kritis. Selain pada logam las, panas pada pengelasan *multi layer* juga berpengaruh pada ukuran butiran di daerah HAZ. Pengelasan *multi layer* mengakibatkan sifat mekanik di daerah logam las dan HAZ menjadi lebih baik.

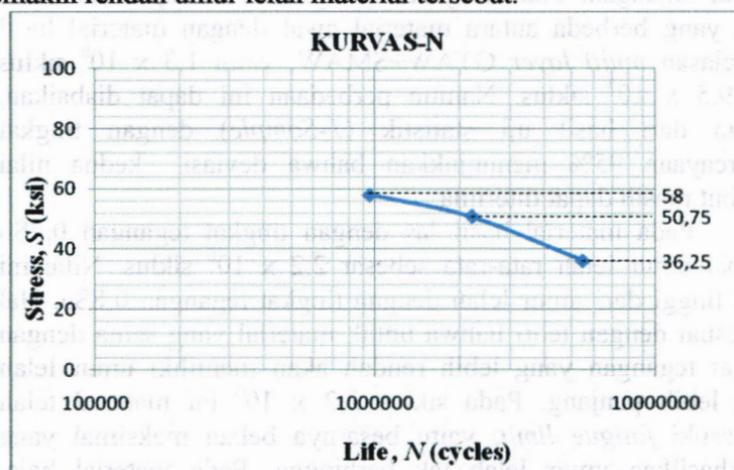
5.2 Uji Lelah

Dari pengujian lelah lentur bolak-balik yang dilakukan dapat diketahui umur lelah masing-masing spesimen pada setiap tingkat tegangan. Pada tingkat tegangan 0,8Su diperoleh umur lelah yang berbeda antara material awal dengan material hasil pengelasan *multi layer* GTAW+SMAW, yaitu $1,3 \times 10^6$ siklus dan $9,5 \times 10^5$ siklus. Namun perbedaan ini dapat diabaikan, karena dari hasil uji statistik (*T-Sample*) dengan tingkat kepercayaan 95% menunjukkan bahwa deviasi kedua nilai tersebut masih dapat diterima.

Pada material hasil las dengan tingkat tegangan 0,7Su didapat umur lelah rata-rata sebesar $2,2 \times 10^6$ siklus. Nilai ini lebih tinggi dari umur lelah dengan tingkat tegangan 0,8Su. Hal ini sesuai dengan teori bahwa untuk material yang sama dengan tingkat tegangan yang lebih rendah akan memiliki umur lelah yang lebih panjang. Pada siklus $2,2 \times 10^6$ ini material telah memasuki *fatigue limit*, yaitu besarnya beban maksimal yang menghasilkan umur lelah tak berhingga. Pada material baja, *fatigue limit* terjadi pada 10^6 siklus. Jadi sebenarnya saat spesimen mencapai 10^6 siklus, spesimen tersebut telah memasuki *fatigue limit*.

Maka untuk material yang sama dengan tingkat tegangan di bawah $0,7S_u$ kekuatan lelahnya telah memasuki *fatigue limit*. Dalam penelitian ini terbukti dengan tidak patahnya spesimen hingga $5,5 \times 10^6$ siklus pada tingkat tegangan $0,5S_u$. Sehingga pada tingkat tegangan $0,5S_u$ pembebanan dihentikan saat mencapai $5,5 \times 10^6$ siklus.

Dari data-data yang diperoleh dari uji lelah lentur bolak-balik didapat umur lelah material pada nilai tegangan tertentu, yaitu pada tegangan 58 ksi didapat umur lelah $9,5 \times 10^5$ siklus, sedangkan pada tegangan 50,75 ksi dibutuhkan $2,2 \times 10^6$ siklus untuk mematahkan spesimen, dan untuk tegangan 36,25 ksi spesimen tidak patah hingga $5,5 \times 10^6$ siklus, sehingga diasumsikan grafik sudah berupa garis lurus (*fatigue limit*). Nilai-nilai tersebut kemudian diplotkan pada kurva tegangan-umur lelah (S-N), seperti pada gambar 5.3. Kurva ini menyatakan hubungan antara nilai tegangan terhadap jumlah siklus untuk patah, dimana semakin tinggi beban yang diberikan maka semakin rendah umur lelah material tersebut.



Gambar 5.3 Kurva S-N hasil pengujian

Kurva S-N di atas didapat setelah dilakukan pengujian, sedangkan untuk memperkirakan umur lelah sebelum pengujian

dapat dilakukan dengan membuat kurva S-N teoritis. Kurva ini diprediksi dari kekuatan tarik, serta faktor koreksi yang dipakai pada pengujian spesimen. Kurva S – N teoritis ini bekerja mulai jumlah siklus 10^3 sampai dengan batas kelelahan (*fatigue limit*), untuk baja diambil sebanyak 10^6 siklus. Pada range siklus tersebut, kekuatan lelah spesimen akan terhubung berupa garis lurus. Adapun langkah-langkah perhitungan kurva S-N teoritis adalah sebagai berikut :

- Batas lelah pada 10^6 siklus pembebanan

$$S_n (10^6) = \frac{S' \cdot n \cdot C_L \cdot C_D \cdot C_S}{K_f}$$

Dimana

S_n = Batas lelah teoritis

$S' \cdot n$ = Batas lelah standar R.R. Moore, untuk baja $S' \cdot n = 0.5 Su$

C_L = Faktor jenis pembebanan

C_D = Faktor dimensi benda kerja

C_S = Faktor kondisi permukaan

S_u = Kekuatan tarik

K_f = Faktor koreksi konsentrasi tegangan lelah

$K_f = 1 + (K_t - 1) Q \cdot C_s$

K_t = Faktor konsentrasi tegangan

Q = *Notch* sensitifitas

Adapun nilai untuk masing-masing variabel adalah sebagai berikut:

Tabel 5.1 Harga C_L , C_D dan C_S untuk baja

Factor	Load Type		
	<i>Bending</i>	<i>Torsion</i>	<i>Axial</i>
C_L	1.0	0.58	0.9
C_D	1.0 for $D \leq 0.4$ in 0.9 for $0.4 \text{ in} \leq D \leq 2$ in		1.0
C_S	Lihat gambar 1		

Maka dari tabel dan grafik di atas didapat:

$$C_L = 1 \text{ (tabel 4.5, bending)}$$

$$C_D = 1 \text{ (tabel 4.5, bending)}$$

$$C_S = 1 \text{ (gambar 2.16, mirror polished)}$$

$$K_t = 1, Q = 0 \text{ (tidak ada notch)}$$

$$K_f = 1$$

Maka

$$S_n(10^6) = \frac{0,5 S_u \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1}{1} = 0,5 S_u$$

- Batas leleh pada 10^3 siklus pembebanan

$$S_n(10^3) = \frac{0,9 S_u}{K_f}$$

Dimana

$$K_f = 1 + (K_f - 1)$$

$$K_f = 1$$

Maka

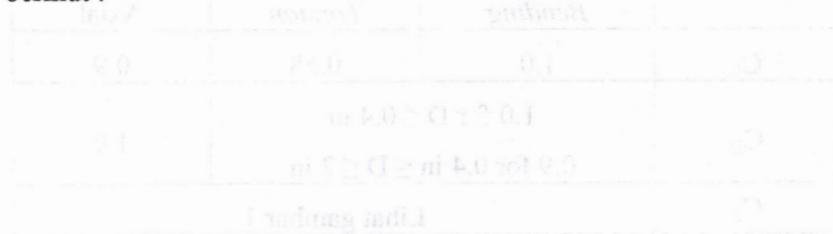
$$S_n(10^3) = 0,9 S_u$$

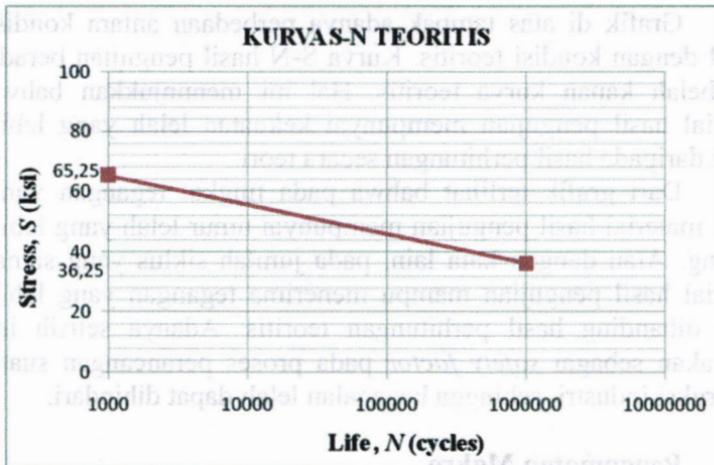
- Untuk $S_u = 72,5$ ksi, maka nilai kekuatan leleh untuk tiap siklus pembebanan adalah sebagai berikut:

$$S_n(10^3) = 0,9 S_u = 0,9 \times 72,5 = 65,25 \text{ ksi}$$

$$S_n(10^6) = 0,5 S_u = 0,5 \times 72,5 = 36,25 \text{ ksi}$$

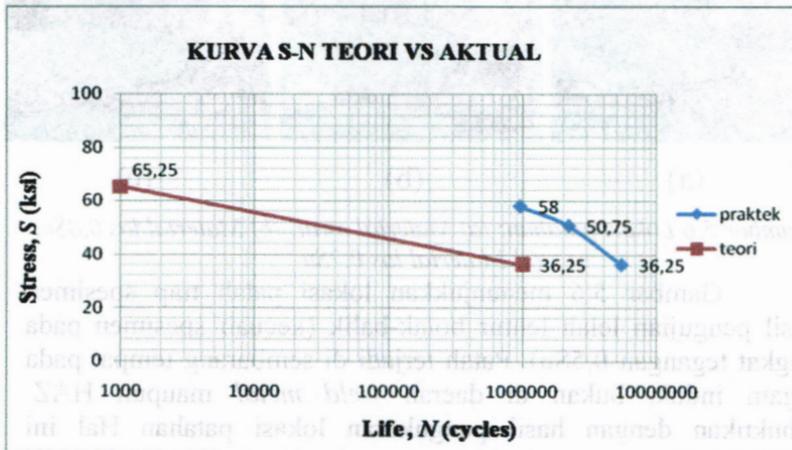
Dari hasil perhitungan di atas didapat kurva S-N teoritis sebagai berikut :





Gambar 5.4 Kurva S-N teoritis

Sebagai komparasi antara kondisi aktual hasil pengujian lelah dengan kondisi teoritis, maka kedua kurva ditampilkan sebagai berikut:



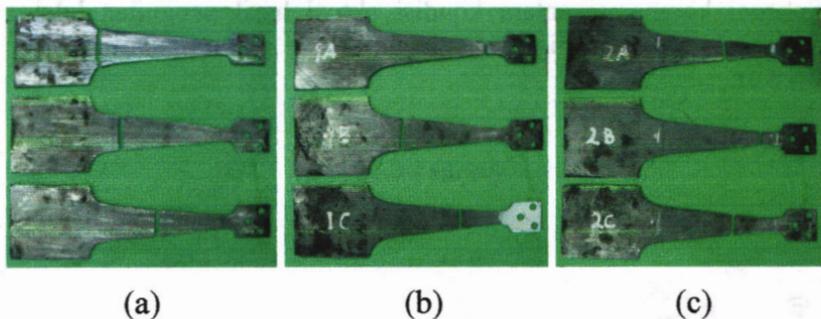
Gambar 5.5 Kurva S-N teoritis vs aktual

Grafik di atas tampak adanya perbedaan antara kondisi aktual dengan kondisi teoritis. Kurva S-N hasil pengujian berada di sebelah kanan kurva teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa material hasil pengujian mempunyai kekuatan lelah yang lebih tinggi daripada hasil perhitungan secara teori.

Dari grafik terlihat bahwa pada tingkat tegangan yang sama, material hasil pengujian mempunyai umur lelah yang lebih panjang. Atau dengan kata lain, pada jumlah siklus yang sama, material hasil pengujian mampu menerima tegangan yang lebih besar dibanding hasil perhitungan teoritis. Adanya selisih ini digunakan sebagai *safety factor* pada proses perancangan suatu konstruksi industri, sehingga kegagalan lelah dapat dihindari.

5.3 Pengamatan Makro

5.3.1 Lokasi Patahan



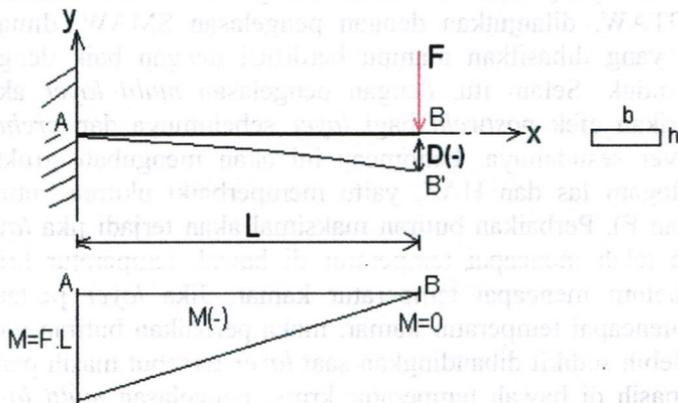
Gambar 5.6 Lokasi patahan; (a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su

Gambar 5.6 menunjukkan lokasi patah tiap spesimen hasil pengujian lelah lentur bolak-balik (kecuali spesimen pada tingkat tegangan 0,5Su). Patah terjadi di sembarang tempat pada logam induk, bukan di daerah *weld metal* maupun HAZ, dibuktikan dengan hasil pengukuran lokasi patahan. Hal ini menunjukkan bahwa pengelasan *multi layer* GTAW+SMAW yang dilakukan berkualitas baik.

Pengelasan dilakukan dengan dua metode yang berbeda, yaitu GTAW pada 2 layer pertama dan SMAW pada 3 layer sesudahnya. Pengelasan GTAW memberikan penetrasi yang baik pada *root layer*, sehingga kemungkinan terjadinya *lack of penetration* sangat kecil. Maka pada daerah *root layer* tidak terdapat titik yang dapat terindikasi sebagai awal retak. Setelah 2 layer GTAW, dilanjutkan dengan pengelasan SMAW, dimana deposit yang dihasilkan mampu berdifusi dengan baik dengan logam induk. Selain itu, dengan pengelasan *multi layer* akan memberikan efek *postweld* bagi *layer* sebelumnya dan *preheat* bagi *layer* sesudahnya. Fenomena ini akan mengubah struktur mikro logam las dan HAZ, yaitu memperbaiki ukuran butiran (lampiran F). Perbaikan butiran maksimal akan terjadi jika *layer* pertama telah mencapai temperatur di bawah temperatur kritis tetapi belum mencapai temperatur kamar. Jika *layer* pertama sudah mencapai temperatur kamar, maka perbaikan butiran yang terjadi lebih sedikit dibandingkan saat *layer* tersebut masih panas tetapi masih di bawah temperatur kritis. Pengelasan *multi layer* mengakibatkan sifat mekanik di daerah logam las dan HAZ menjadi lebih baik. Fenomena semacam inilah yang pada akhirnya memperbaiki sifat mekanik di daerah lasan dan HAZ, sehingga saat dilakukan uji leleh, lokasi patah bukan lagi di weld metal ataupun HAZ. Lokasi patahan selalu berada di logam induk. Selain itu juga membuktikan bahwa tidak ada konsentrasi tegangan pada daerah lasan sebagai hasil dari adanya tegangan sisa akibat pengelasan seperti pada pengelasan *single layer* umumnya.

Lokasi patah hasil pengujian berbeda-beda. Ini menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada spesimen adalah sama (tidak terdapat konsentrasi tegangan). Hal ini juga berarti bahwa bentuk, dimensi dan ketirusan adalah benar. Bukti bahwa tegangan yang terjadi pada spesimen adalah sama yaitu dengan melakukan perhitungan tegangan di beberapa titik pada setiap spesimen (gambar 4.3).

Dari hasil pengukuran kemudian dihitung tegangan di tiap titik. Untuk titik 1 dan 2 tidak diperlukan perhitungan karena variabelnya bernilai konstan. Tegangan pada masing-masing lokasi patahan (titik 3) dihitung dengan persamaan sebagai berikut :



Gambar 5.7 Defleksi balok kantilever dengan gaya terkonsentrasi

$$\sigma = \frac{Mb.c}{I} \quad \text{dimana } Mb = F.x$$

$$c = \frac{1}{2}.h$$

$$I = \frac{1}{12}.b.h^3$$

Sehingga

$$\sigma = \frac{F.x.\frac{1}{2}.h}{\frac{1}{12}.b.h^3}$$

$$\sigma = \frac{6.F.x}{b.h^2}$$

$$\sigma = \frac{6.F.x}{b.h^2}$$

Cek Tegangan di titik 3

- Material awal

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (2,36)}{(1,02) \cdot (0,11)^2} = 1147,3F$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (3,75)}{(1,29) \cdot (0,11)^2} = 1441,48F$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (4,64)}{(1,63) \cdot (0,11)^2} = 1411,55F$$

- Material lasan 0,8Su

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (0,31)}{(0,55) \cdot (0,11)^2} = 279,5F$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (3,72)}{(1,3) \cdot (0,11)^2} = 1418,94F$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (1,41)}{(0,76) \cdot (0,11)^2} = 913,4F$$

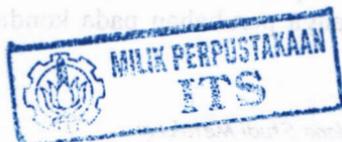
- Material lasan 0,7Su

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (1,71)}{(0,07) \cdot (0,11)^2} = 974,64F$$

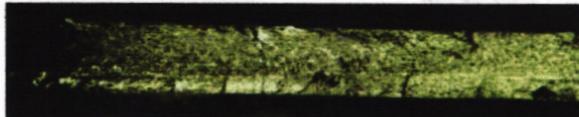
$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (0,35)}{(0,53) \cdot (0,11)^2} = 327,46F$$

$$\sigma = \frac{6 \cdot F \cdot x}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot F \cdot (1,44)}{(0,79) \cdot (0,11)^2} = 903,86F$$

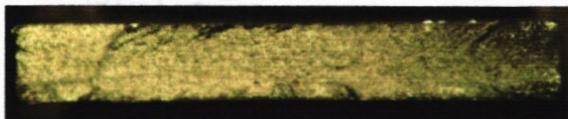
Perhitungan tegangan tersebut kemudian diuji statistik menggunakan metode 'T-Sample' (terlampir). Dan dari hasil uji tersebut semua sampel masuk dalam batas aman, sehingga dapat disimpulkan bahwa tegangan untuk setiap titik pada spesimen adalah sama. Dengan kata lain, dimensi dan ketirusan spesimen pada penelitian ini adalah benar.



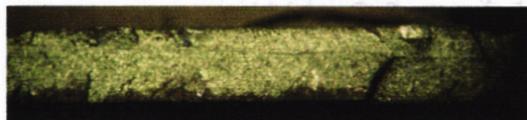
5.3.2 Foto Makro Patahan



(a)



(b)



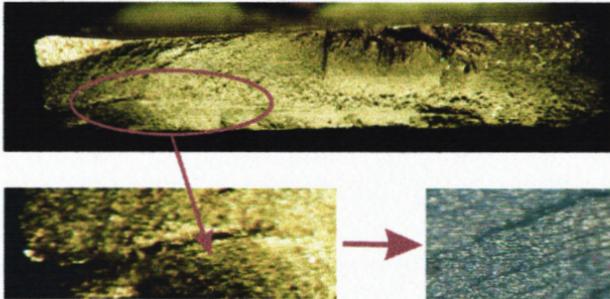
(c)

Gambar 5.8 Foto makro pola patahan patahan
(a) Material awal; (b) Material las 0,8Su; (c) Material las 0,7Su

Dari foto makro di atas tampak bahwa pada tingkat tegangan yang sama, baik material awal maupun material hasil pengelasan akan menghasilkan suatu pola patahan yang sama, serta daerah patahan yang hampir serupa.

Patah akhir pada uji lelah terdiri atas dua daerah patahan, yaitu daerah patah statik dan daerah patah lelah. Daerah patah lelah akan terlihat lebih halus dan warna yang lebih terang jika dibandingkan dengan daerah patah statis, menunjukkan ciri-ciri patah lelah, yaitu striasi dan *beachmarks*. Striasi merupakan garis-garis halus yang menyatakan majunya retakan untuk setiap siklus beban yang dapat diamati melalui mikroskop elektron SEM (*Scanning Electron Microscope*), namun dalam penelitian ini tidak dilakukan pengamatan tersebut. Sedangkan *beachmarks* (garis pantai) terjadi akibat perbedaan lamanya proses oksidasi pada permukaan retakan. Selain itu, *beachmarks* terjadi karena adanya perubahan pada kondisi pembebanan. Untuk mengamati

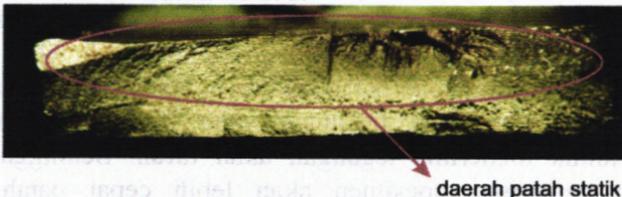
beachmarks dapat dilakukan dengan foto makro seperti pada gambar 5.9 berikut.



Gambar 5.9 *Beachmarks*

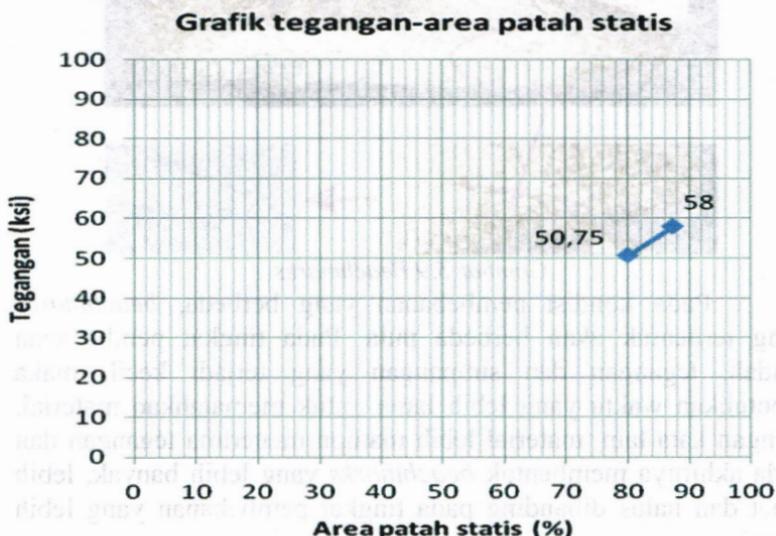
Pada kondisi pembebanan yang berbeda, *beachmarks* yang terbentuk akan berbeda pula. Pada tingkat pembebanan rendah, tegangan dan simpangan yang terjadi kecil, maka dibutuhkan waktu yang lebih lama untuk mematahkan material. Dengan kata lain, material lebih mampu menerima tegangan dan pada akhirnya membentuk *beachmarks* yang lebih banyak, lebih rapat dan halus dibanding pada tingkat pembebanan yang lebih tinggi.

Permukaan patah leleh dengan tingkat pembebanan yang lebih tinggi akan menghasilkan area patahan statik yang lebih luas. Patah statik merupakan tahapan akhir dari mekanisme perambatan retak. Patah statik ini disebabkan oleh tegangan yang bekerja pada penampang tersisa akan mencapai kekuatan tarik material kemudian mengakibatkan material patah menjadi dua. Bidang patahan pada patah statik ini mirip dengan uji impak yaitu berserabut dan berwarna kelabu.



Gambar 5.10 Daerah patah statik

Dari pengukuran dan perhitungan areah patah statik dan patah lelah pada bab 4, diperoleh grafik hubungan tegangan – daerah patah statik pada suatu pola patahan sebagai berikut.



Gambar 5.11 Grafik tegangan-area patah statik

Dari perhitungan (tabel 4.7 dan 4.8) serta grafik di atas menunjukkan bahwa pada tingkat tegangan 0,7Su diperoleh daerah patah lelah rata-rata sebesar 20,03% dan daerah patah statik rata-rata sebesar 79,97%. Sedangkan pada tingkat tegangan 0,8Su terdapat 12,77% daerah patah lelah dan 87,23% daerah patah statik. Ini berarti bahwa pada tingkat tegangan yang lebih besar, presentase patah lelahnya akan semakin kecil dan daerah patah statik yang lebih luas. Sebaliknya, pada tingkat tegangan yang lebih rendah akan menghasilkan daerah patah lelah yang lebih luas dibanding daerah patah statiknya. Hal ini terjadi karena saat material mengalami tegangan yang besar, kemampuan material untuk menerima tegangan akan turun. Sehingga saat dilakukan pengujian, spesimen akan lebih cepat patah dan menghasilkan daerah sisa patahan yang lebih besar.

Dari data juga terlihat bahwa deviasi nilai presentase luasan patah leleh dan statik terhadap luasan awal untuk setiap tingkat tegangan mempunyai nilai yang hampir sama, meskipun lokasi patah masing-masing spesimen berbeda. Keseragaman nilai presentase luasan patah ini menunjukkan bahwa dimensi dan ketirusan spesimen adalah benar.

Dari data yang telah dibahas, dapat dilihat bahwa proses peleburan logam pada suhu yang berbeda-beda akan menghasilkan logam dengan komposisi kimia yang berbeda-beda. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi kimia logam yang dihasilkan akan berbeda-beda tergantung pada suhu peleburan yang digunakan. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh suhu peleburan terhadap komposisi kimia logam yang dihasilkan.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dari studi eksperimental dan analitis pengaruh pengelasan multi layer GTAW-SMAW terhadap umur lelah dan pola patahan baja SA-53B pada uji lelah *fatigue reversed bending* ini adalah sebagai berikut:

1. Umur lelah pada material hasil pengelasan *multi layer* dengan tingkat tegangan 0,8Su, 0,7Su dan 0,5Su secara berturut-turut adalah sebagai berikut: $9,5 \times 10^5$ siklus, $2,2 \times 10^6$ siklus dan $5,5 \times 10^6$ siklus (belum patah).
2. Pengelasan *multi layer* GTAW-SMAW memperbaiki kekuatan logam las dan daerah HAZ, terbukti dengan lokasi patah spesimen berada di logam induk, baik pada uji tarik maupun uji lelah.
3. Semakin tinggi tingkat tegangan yang diberikan pada material maka daerah patah statiknya akan lebih besar. Pada tingkat tegangan 0,8Su (58 ksi) terdapat 87,23% daerah patah statik dan 12,77% daerah patah lelah. Sedangkan pada tingkat tegangan 0,7Su (0,7 ksi) diperoleh 79,97% daerah patah statik dan 20,03% daerah patah lelah.

6.2 Saran

Adapun saran yang diperlukan dalam penelitian ini adalah :

1. Demi validitas penelitian, sebaiknya tingkat kehalusan permukaan mencapai *mirror polished* dan pemotongan spesimen menggunakan *wire cut*.
2. Pengadaan kembali *manual handbook* mesin uji lelah LFE-150 agar tidak terjadi kesimpangsiuran informasi.

BAB 6 KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan
 Tujuan penelitian yang dapat tercapai dari studi eksperimental dan analisis pengelasan multi layer GTAW-SMAW terhadap umur lelah dan pola retakan adalah sebagai berikut:

1. Untuk setiap pola geometri hasil pengelasan multi layer dengan tingkat tegangan 0,850, 0,750 dan 0,520 secara berturut-turut adalah sebagai berikut: $0,5 \times 10^5$ siklus, $1,1 \times 10^6$ siklus dan $2,5 \times 10^6$ siklus (dalam jam).

2. Pengelasan multi layer GTAW-SMAW menghasilkan kekuatan logam las dan daerah HAZ, terdistribusi secara merata pada keseluruhan bagian U logam induk dari pola uji tarik.

Halaman ini sengaja dikosongkan.

3. Semakin tinggi tingkat tegangan yang diberikan pada material maka daerah patah semakin akan lebih besar. Pada tingkat tegangan 0,850 (58%) terdapat 87,23% daerah patah tarik dan 12,77% daerah patah lelah. Sedangkan pada tingkat tegangan 0,750 (50%) diperoleh 9,97% dari patah tarik dan 90,03% daerah patah lelah.

6.2 Saran
 Adapun saran yang diberikan dalam penelitian ini adalah:

1. Untuk validasi penelitian sebaiknya lakukan penelitian menggunakan material yang berbeda dan parameter proses pengelasan yang lain.

2. Penelitian kembali mengenai pengaruh umur lelah GTAW-SMAW terhadap ketahanan logam induk.

DAFTAR PUSTAKA

1. ASM International. 1993. *Welding, Brazing, And Soldering vol 6*.
2. Kou, Sindo. 2003. *Welding Metallurgy 2nd Edition*. John Wiley & Sons, Inc., New York
3. Miller Electric Mfg. Co. 2008. *TIG Handbook*. www.MillerWelds.com
4. Okumura, T. 2004. *Teknologi Pengelasan Logam*. Pradnya Paramita. Jakarta
5. The American Society Of Mechanical Engineering. 2001. *Qualification Standard For Welding, And Brazing Procedures, Welders, Brazers, And Welding And Brazing Operator*. The American Society Of Mechanical Engineering, New York.
6. ASM Handbook Committe. 1996. *Fatigue and Fracture*, American Society for Metal, Vol. 19.
7. ASM Handbook Committe. 2002. *Failure Analysis and Prevention*, 9th edition, American Society for Metal, Vol. 11
8. Sulistyowati, Eka. 2009. *Studi Eksperimental Dan Analitis Pengaruh Kekasaran Permukaan Terhadap Umur Lelah dan Pola Patahan Baja Poros AISI 1045 Dengan Pengujian Lentur Putar*. Surabaya : ITS.
9. Juvinall, R.C. 1967. *Engineering Considerations of Stress, Strain, and Strength*. New York : McGraw-Hill, Inc.
10. Djaprie, Sriati. 1988. *Metalurgi Mekanik* Jilid 2 Edisi Ketiga. Jakarta : Erlangga.
11. Fuchs, H.O dan Stephens, R.I. 1980. *Metal Fatigue In Engineering*. New York : John Wiley & Sons, Inc.
12. Taryza. 2008. *GTAW*. www.taryza.wordpress.com
13. Colangelo, V.J (1989), *Analysis of Metallurgical Failures*, second edition, 3rd edition, John Wiley & Sons, Inc., Singapore.

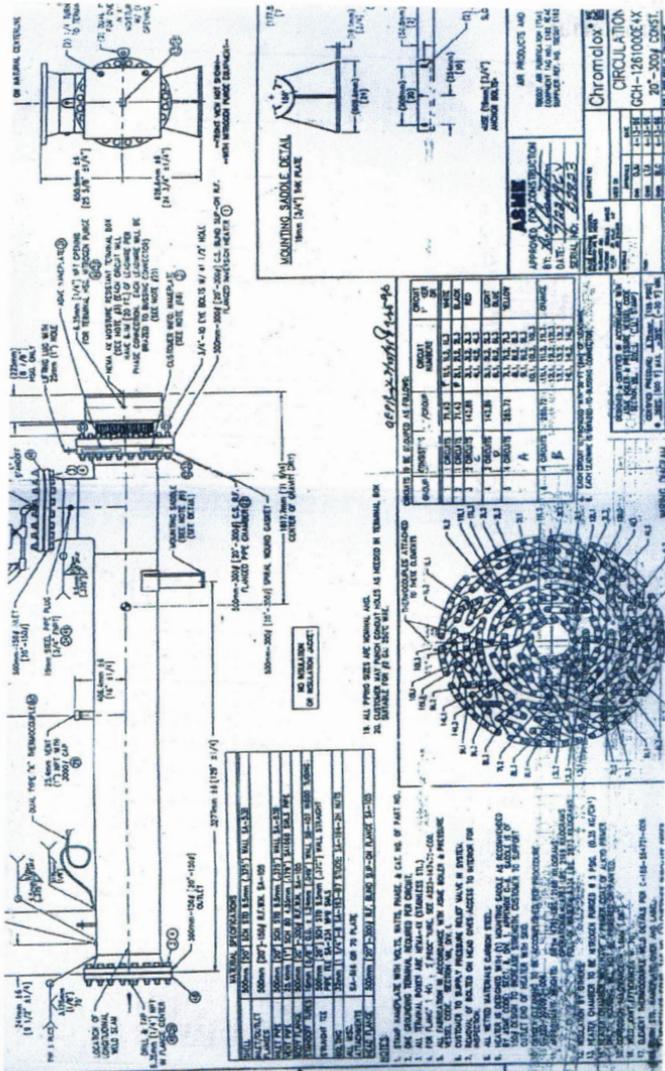
14. An Engineering Toolbox Calculation Module. 2005. ***Stress-Life Fatigue Analysis***. Engrasp, Inc.
15. Harsativa, Berta Ryza. 2009. ***Pengaruh Arus Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Pengelasan GTAW-SMAW***. Surabaya : ITS.
16. Bannantine et al. 1990.
17. www.google.com

LAMPIRAN



Lampiran B

Gambar teknik circulation heater



Lampiran C

Uji statistik

1. Uji lelah

C1	C2	C3
900500	1850400	1658200
973200	2327500	1024500
985700	2441500	1213400

One-Sample T: C1; C2; C3;

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
C1	3	953133	46008	26563	(838842; 1067424)
C2	3	2206467	313587	181049	(1427474; 2985459)
C3	3	1298700	325347	187839	(490492; 2106908)

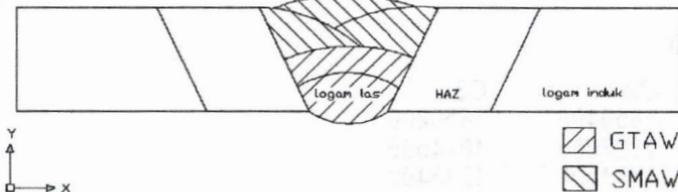
2. Uji tegangan lokasi patah

C4	C5	C6	C7
1414,57	1147,30	279,50	974,64
1213,57	1441,48	1418,94	327,46
1206,92	1411,55	913,40	903,86

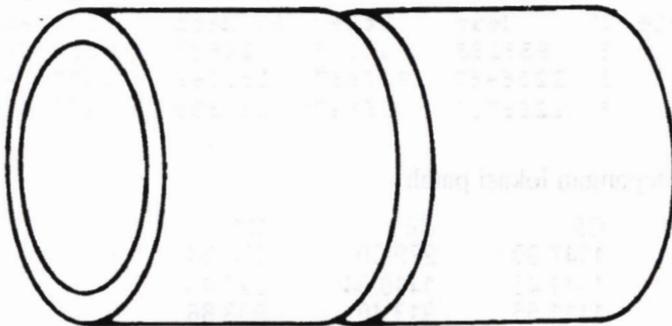
One-Sample T: C4; C5; C6; C7

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
C4	3	1278,35	118,01	68,14	(985,19; 1571,52)
C5	3	1333,44	161,90	93,47	(931,27; 1735,62)
C6	3	870,613	570,924	329,623	(-547,640; 2288,866)
C7	3	735,320	354,986	204,951	(-146,513; 1617,153)

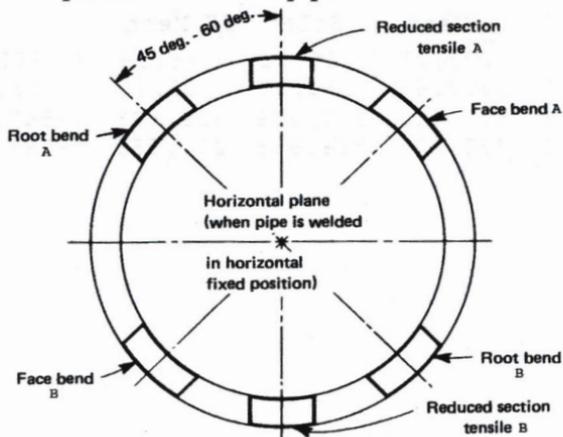
Lampiran D

Skema pengelasan *multi layer*

Posisi pengelasan 5G



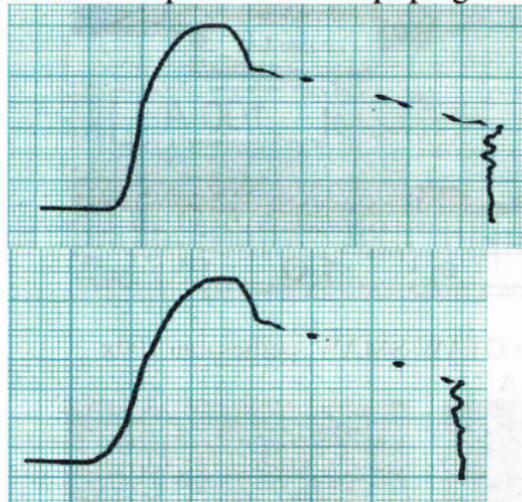
Pengambilan spesimen tes untuk pipa



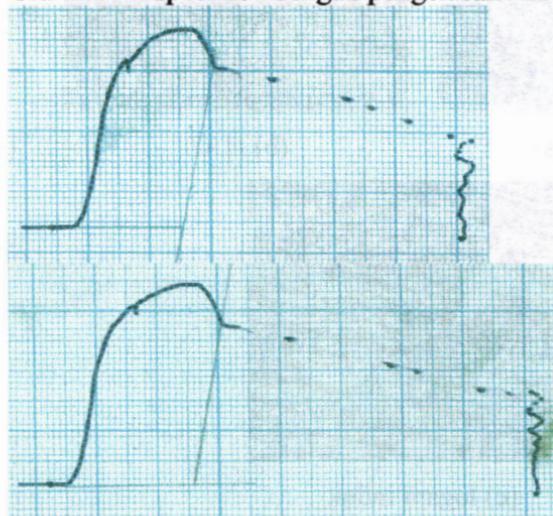
Lampiran E

Hasil uji tarik

Grafik P- Δ spesimen awal tanpa pengelasan

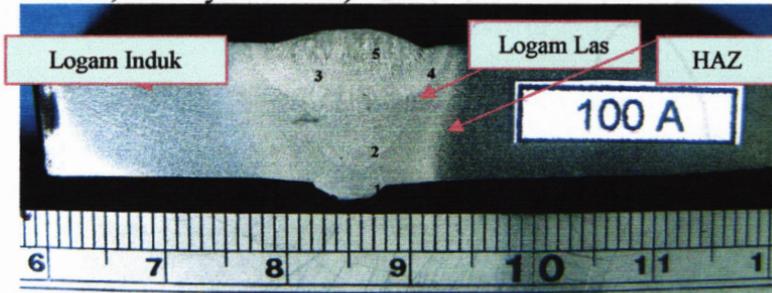


Grafik P- Δ spesimen dengan pengelasan *multi layer*

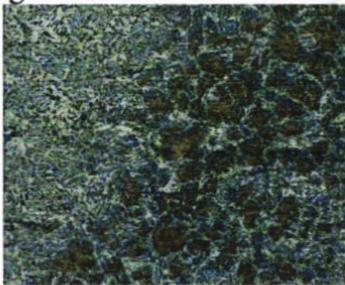


Lampiran F

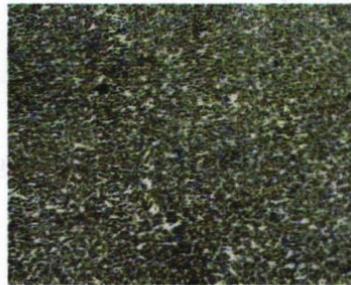
Pengamatan makro untuk arus SMAW 100 A (1-2 Layer GTAW; 3-5 Layer SMAW)



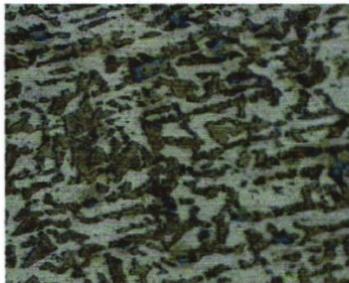
Struktur mikro hasil lasan GTAW-SMAW perbesaran 100x dengan arus SMAW 100 A



(a) Logam las



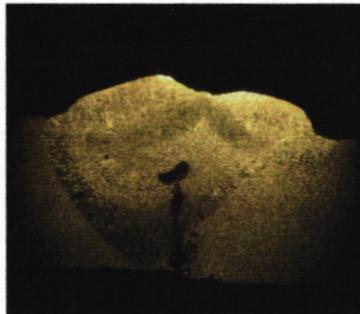
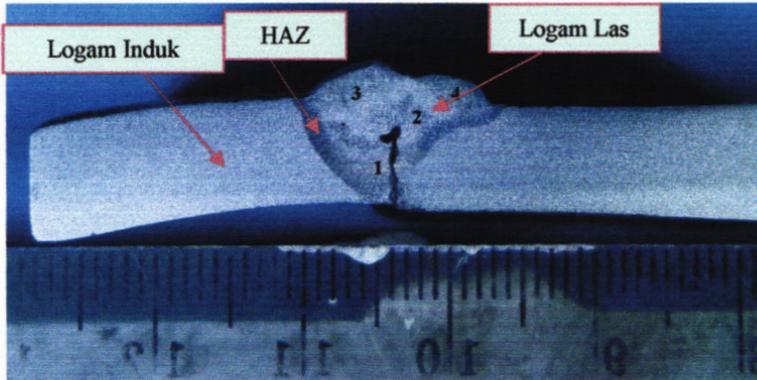
(b) HAZ

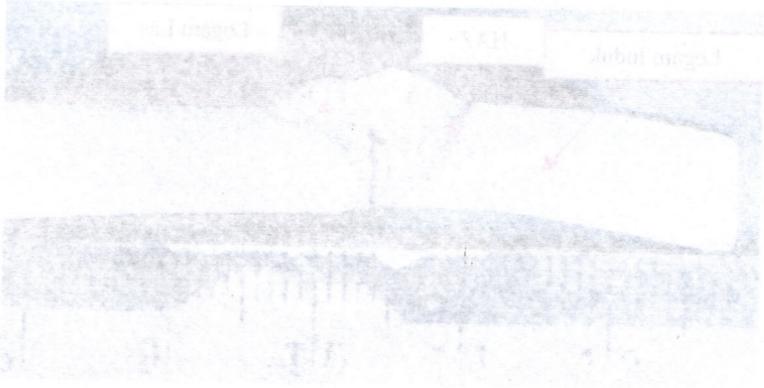


(c) logam induk

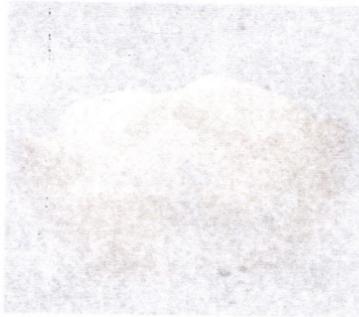
Lampiran G

Pengamatan makro pengelasan industri





Halaman ini sengaja dikosongkan



BIOGRAFI PENULIS



Karunia Apriyani Kartikasari dilahirkan di Kendal pada tanggal 1 April 1986, merupakan anak pertama dari dua bersaudara dengan ayah bernama M. Noor Bambang, BSc dan ibu Dra. Titien Budi Wahyuni. Penulis mulai mengenyam pendidikan di TK Bustanul Athfal 2 Kaliwungu pada tahun 1990, kemudian melanjutkan sekolah di SD Negeri 2 Plantaran Kaliwungu (1992-1998), SLTP Negeri 2 Kendal (1998-2001), dan SMU Negeri 1 Kendal (2001-2004). Pada tahun 2004, penulis masuk Teknik Mesin ITS Surabaya melalui jalur PMDK khusus perempuan, selanjutnya pada semester 5 memilih bidang studi Metalurgi dan lulus pada tahun 2009. Selama masa perkuliahan penulis juga aktif dalam kegiatan kemahasiswaan. Penulis tergabung dalam Mesin ITS Auotosport dan pernah menjabat sebagai bendahara pada tahun 2006.