



TESIS - TM185400

**PENGARUH *VARIABEL* PENGELASAN TERHADAP
SIFAT MEKANIK DAN MIKRO STRUKTUR PADA
SAMBUNGAN DALAM AIR - BAJA KARBON**

**RIZALI AHMADIN
NRP : 6007201007**

Dosen Pembimbing:
Suwarno S.T., M.Sc., Ph.D

Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022



TESIS - TM185400

**PENGARUH *VARIABEL* PENGELASAN TERHADAP
SIFAT MEKANIK DAN MIKRO STRUKTUR PADA
SAMBUNGAN DALAM AIR - BAJA KARBON**

**RIZALI AHMADIN
NRP : 6007201007**

**Dosen Pembimbing:
Suwarno S.T., M.Sc., Ph.D**

**Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
2022**



THESIS - TM185400

***EFFECT OF WELDING VARIABLES ON
MECHANICAL AND MICRO-STRUCTURAL
PROPERTIES OF CARBON STEEL UNDERWATER
WELD JOINT***

**RIZALI AHMADIN
NRP : 6007201007**

**Advisor:
Suwarno S.T., M.Sc., Ph.D**

**Mechanical Engineering Department
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Sepuluh Nopember Institute of Technology
2022**

(Halaman sengaja dikosongkan)

LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Magister Teknik (M.T)

Di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

RIZALI AHMADIN

NRP: 6007201007

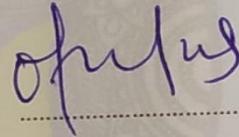
Tanggal Ujian: 14 Juli 2022

Periode Wisuda: September 2022

Disetujui oleh:

Pembimbing

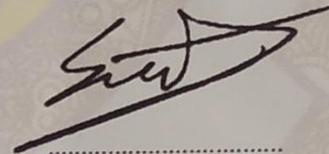
1. Suwarno, S.T.,M.Sc.,Ph.D.
NIP: 198005202005011003



.....

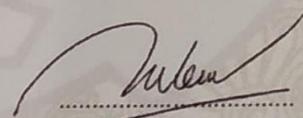
Penguji:

1. Putu Suwarta, S.T.,M.Sc.,Ph.D
NIP: 198203032009121007



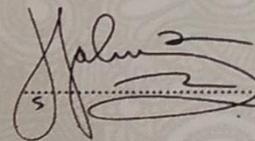
.....

2. Dr.Ir. Helena Carolina Kis Agustin
NIP: 196308151989032001



.....

3. Fahmi Mubarak,ST.,M.Sc.,Ph.D.
NIP: 197801152003121002



.....

Kepala Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



Dr. Atok Setiyawan, M.Eng.Sc
NIP. 196604021989031002

(Halaman sengaja dikosongkan)

PENGARUH *VARIABEL* PADA PENGELASAN TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN MIKRO STRUKTUR PADA SAMBUNGA DALAM AIR - BAJA KARBON

Nama Mahasiswa : Rizali Ahmadin
NRP : 6007201007
Pembimbing : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRAK

Proses pengelasan merupakan teknik standar untuk memperbaiki komponen yang rusak, pengelasan dalam air merupakan salah satu jenis metode yang digunakan dalam perbaikan struktur logam di dalam air, penelitian ini berfokus pada pengaruh arus las dan jenis elektroda terhadap sifat mekanik dan mikro struktur pada kedalaman proses pengelasan 3 meter dan 10 meter yang dilakukan pada material baja karbon ASTM A36 dan pipa ASTM A106.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh parameter pengelasan terhadap sifat mekanik dan mikrostruktur. Pengelasan dilakukan dengan menggunakan elektroda E6013 dan E7018 dengan diameter 4mm, dan arus las 90 A dan 120 A pada kedalaman bawah air 3 meter dan 10 meter.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa cacat yang muncul didominasi oleh porositas dan undercut akibat proses pengelasan dengan kedalaman 3 meter dan 10 meter. Kedalaman mempengaruhi sifat mekanik dan mikrostruktur logam las di udara. Sifat mekanik yang dihasilkan dari proses pengelasan pada pelat ASTM A36 adalah 444 MPa, dan untuk ASTM A106 adalah 489 MPa. Hasil pengujian impak menunjukkan bahwa pelat ASTM A36 dapat menahan energi impak sebesar 40 Joule dan pipa ASTM A106 sebesar 33 joule, meningkatkan arus dan kedalaman. Proses pengelasan akan mempengaruhi perubahan struktur butir pada HAZ yang menyebabkan perubahan kekerasan material kekerasan pada area HAZ pelat HVN ASTM A36 249 dan pipa ASTM A106 244 HVN. Hasilnya menunjukkan pengaruh yang kuat dari parameter pengelasan pada sifat mekanik material yang di lihat dari segi analisa anova.

Kata Kunci: *Pengelasan, ASTM A106 dan A36, Underwater Welding, SMAW. Cacat pengelasan.*

(Halaman sengaja dikosongkan)

EFFECT OF WELDING VARIABLES ON MECHANICAL AND MICRO-STRUCTURAL PROPERTIES OF CARBON STEEL UNDERWATER WELD JOINT

By : Rizali Ahmadin
Student Identity Number : 6007201007
Advisor : Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D

ABSTRACT

The welding process is a standard technique to repair damaged components which are often carried out in maintenance. Underwater welding is one type of method to repair metallic structures in water. This study focuses on the effect of welding current and electrode type on the mechanical and microstructure of carbon steel weldment. The underwater welding depth of 3 meters and 10 meters was carried out on carbon steel ASTM A36 plate material and ASTM A106 pipe. The main purpose of this study was to determine the effect of welding parameters on the mechanical and microstructural properties. The welding was done using electrodes E6013 and E7018 with a diameter of 4mm, and welding current of 90 A and 120 A at an underwater depth of 3 meters and 10 meters. The results show that the defects that appear are dominated by porosity and undercut due to the welding process with a depth of 3 meters and 10 meters. The depth affected the mechanical properties and microstructure of the weld metal in the air. The mechanical properties resulting from the welding process on the ASTM A36 plate were 444 MPa, and for the ASTM A106 was 489 MPa. The impact testing results show that the ASTM A36 plate can withstand the absorbed load of 40 Joules and the ASTM A106 pipe of 33, increasing current and depth. The welding process will affect the change in the grain structure of the HAZ, which causes changes in the hardness of the hardness material in the HAZ area of the ASTM A36 249 HVN plate and ASTM A106 244 HVN pipe. The result showed a strong effect of welding parameters on the mechanical properties of the materials. in terms of ANOVA analysis.

Keyword: *Welding, ASTM A106 and A36, Underwater Welding, SMAW. Welding defects.*

(Halaman sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul “*Pengaruh Variabel Pada Pengelasan Terhadap Sifat Mekanik Dan Mikro Struktur Pada Sambunga Dalam Air - Baja Karbon*”. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat kelulusan akademis dalam menempuh pendidikan Program Studi Magister S2 Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah mendukung dalam penulisan Tesis ini. Secara khusus penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak M.Bustanul Arifin dan Ibu Anik Wiji Astuti yang selalu memberikan semangat dan doa kepada penulis. Tanpa kasih sayang dari mereka penulis tidak akan bisa menyelesaikan Tesis ini.
2. Bapak Suwarno, S.T., M.Sc., Ph.D selaku dosen pembimbing Tesis yang telah memberikan ilmu, nasihat, dan bimbingan kepada penulis selama ini dengan penuh kesabaran.
3. Bapak dan Ibu dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk penulis dalam penyempurnaan Tesis ini.
4. Segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS ITS yang telah mencurahkan segala tenaga dan pikiran dalam rangka proses akademik dan nonakademik selama penulis menempuh pendidikan magister di Departemen Teknik Mesin.
5. Seluruh rekan-rekan S2 Teknik Mesin angkatan 2020 yang selalu menjadi garda terdepan dalam memberikan inspirasi dan aspirasi kepada penulis selama pembuatan Tesis ini.
6. Seluruh anggota Laboratorium Metalurgi yang telah memberikan segala jenis dukungan moral, motivasi, dan mengajarkan arti kebersamaan selama menyelesaikan Tesis ini.
7. Semua pihak yang telah membantu dalam proses dalam penyusunan Tesis yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Dengan selesainya laporan Tesis ini, penulis menyadari bahwa penelitian ini belum sempurna sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang

bersifat membangun untuk perbaikan demi kesempurnaan Tesis ini. Semoga apa yang ditulis pada Tesis ini memberikan manfaat dan dapat menambah wawasan keilmuan bagi semua pihak.

Surabaya, 27 Juli 2022

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xviii
DAFTAR SIMBOL	xix
BAB 1 Pendahuluan	1
1.1.Latar Belakang	1
1.2.Rumusan Permasalahan	3
1.3.Tujuan Penelitian	3
1.4.Batasan Masalah	4
1.5.Manfaat Penelitian	4
BAB 2 Kajian Pustaka dan Dasar Teori	5
2.1.Pengelasan Dalam Air.....	5
2.2. <i>Shielded Metal Arc Welding</i> (SMAW)	6
2.3.Filler Metal.....	8
2.4.Baja Carbon	9
2.5.Siklus Thermal Pengelasan	10
2.6.Pengujian	13
2.7.Pengujian Tarik.....	13
2.8.Pengujian Bending.....	14
2.9.Pengujian Impak	15
2.10.Pengujian Metalografi.....	16
2.11.Pengujian kekeransa Material	17
2.12.Metode Desain Eksperimen	18

2.13. Penelitian Sebelumnya	19
BAB 3 Metode Penelitian	20
3.1 Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2 Studi literatur.....	23
3.3 Identifikasi Kebutuhan Dan Masalah	23
3.4 Persiapan Alat dan Bahan.....	24
3.4.1 Persiapan Peralatan	24
3.4.2 Persiapan Bahan	24
3.6 Proses Pengelasan Dalam Air.....	25
3.7 Pembuatan Spesimen.....	26
3.8 Pengujian	28
3.8.1 Pengujian Sifat Mekanik	28
3.8.2 Pengujian Mikro Struktur	33
3.9 Analisa data hasil pengujian	34
3.10 Pembahasan	35
3.11 Kesimpulan dan saran.....	35
BAB 4 Analisa dan Pembahasan	36
4.1 Analisa Visual Geometri <i>Weld metal</i>	37
4.1.1 Visual Surface <i>Weld metal</i>	37
4.2 Analisa Sifat Mekanik	39
4.2.1 Analisa Pengujian Tarik	40
4.2.1.1 Pengujian Tarik Pada Plat A36	40
4.2.1.2 Pengujian Tarik Pada Pipa A106	43
4.3 Analisa Pengujian Bending	45
4.4 Analisa Pengujian Impak	47
4.4.1 Pengujian Impak pada Plat A36	47
4.3 Analisa Pengujian Kekerasan.....	51
4.5 Perngujian Microstruktur	53

4.6 Pengujian Anova.....	54
BAB 5 Kesimpulan dan Saran	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran	60
DAFTAR PUSTAKA	61
BIODATA PENULIS.....	63

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR GAMBAR

1. Gambar 2.1: Diagram Skema pengelasan dalam air.....	8
2. Gambar 2.2: Ilustrasi Trasformasi fasa baja HSLA.....	12
3. Gambar 2.3: Ilustrasi Perbandingan laju pendinginan pengelasan.....	13
4. Gambar 2.4: Ilustrasi Pantulan Sinar Metalografi	18
5. Gambar 3.1: Diagram Alir penelitian	22
6. Gambar 3.2: Hasil Proses pembuatan Grove V	25
7. Gambar 3.3: Cutting plant Spesimen.....	27
8. Gambar 3.5: Dimensi Spesimen Uji Tarik	27
9. Gambar 3.6: Dimensi Spesimen Uji Bending.....	27
10. Gambar 3.7: Dimensi Spesimen Uji Impak	28
11. Gambar 3.8: Dimensi Spesimen Uji Metalografi	28
12. Gambar 3.9: Proses Pengujian Tarik	30
13. Gambar 3.10: Proses Pengujian bending	31
14. Gambar 3.11: Proses Pengujian Impak.....	32
15. Gambar 3.12: Posisi Pengambilan Nilai Kekerasan	33
16. Gambar 3.13: Proses Pengambilan data kekerasan	34
17. Gambar 4.1: Hasil pengelasan	37
18. Gambar 4.2: Grafik perbandingan kekuatan tarik Plat A36	40
19. Gambar 4.3: Ilustrasi pola Patahan beban tarik plat ASTM A36	41
20. Gambar 4.4: Grafik perbandingan kekuatan tarik Pipa A106	42
21. Gambar 4.5 Ilustrasi pola Patahan beban tarik plat ASTM A106	43
22. Gambar 4.6: Mekanisme Pengujian Face Bending.....	44
23. Gambar 4.7: : Hasil pengujian face bending	45
24. Gambar 4.8: Grafik visual data dampak ASTM A36.....	47
25. Gambar 4.9: Ilustrasi patahan Dampak A36.....	48
26. Gambar 4.10: Grafik visual data dampak ASTM A106.....	49
27. Gambar 4.11: Ilustrasi patahan Dampak A106.....	50
28. Gambar 4.12: Grafik hasil uji kekerasan	51
29. Gambar 4.13: Hasil Mokro struktur pengelasan dalam air.....	53
30. Gambar 4.14: Hasil Uji Anova	54

DAFTAR TABEL

1. Tabel 2.1 Classification Elektroda	8
2. Tabel 2.2 Komposisi Kimia	11
3. Tabel 3.1 Komposisi kimia Material dan Elektroda	25
4. Tabel 3.2 Parameter Pengelasan	27
5. Tabel 3.3 Parameter Pengujian Bending.....	30
6. Tabel 3.4 Parameter Pengujin Impak.....	31
7. Tabel 3.5 Tabel desain Eksperimen	36
8. Tabel 4.1 Hasil Analisa Defect Pengelasan	38
9. Tabel 4.2 QW/QB ASME IX 2019.....	39
10. Tabel 4.3 Kriteria penerimaan Uji mekanik ASWD3.6.....	39
11. Tabel 4.4 Hasil Pengujian Tarik Plat A36	40
12. Tabel 4.5 Hasil Pengujian Tarik Pipa A106 -	42
13. Tabel 4.6 Hasil pengujian bending	44
14. Tabel 4.7 Data Energi impak material Plat A36	46
15. Tabel 4.87 Data Energi impak material Pipa A106	48
16. Tabel 4.9 Data Nilai Kekerasan Material.....	51

DAFTAR SIMBOL

E = tegangan (volt)

I = arus (Ampere)

σ = Tegangan Nominal (N/mm^2)

F = beban (N)

A_0 = luas penampang (mm^2)

HI = Nilai Impak (Joule/mm^2)

E = Energi yang diserap (Joule)

A = Luasan Penampang dibawah takik (mm^2)

F = Beban (Kg)

L = Panjang Diagonal Rata-rata (mm)

Θ = Sudut Piramida (136°)

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 1

PENDAHULUAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai hal-hal yang melatar belakangi pembuatan tesis, rumusan masalah yang digunakan untuk menyelesaikan tesis, batasan masalah pada tesis, tujuan dan manfaat.

1.1. Latar Belakang

Sebagai pendukung untuk memenuhi perkembangan eksplorasi sumber daya mineral hingga ke daerah pesisir dan lepas pantai, membutuhkan pembangunan infrastruktur kelautan sebagai pendukung seperti rig pengeboran minyak, jembatan penyeberangan laut dan sistem perpipaan bawah air, serta perbaikan dan perawatan yang perlu dilakukan sebagai pendukung pontesi sumber daya laut yang ada. Oleh karena itu pemilihan material dan kualitas penyambungan struktur menjadi hal yang sangat penting. Peroses pengelasan menjadi salah satu pilihan atau metode untuk memenuhi kebutuhan tersebut, pengelasan dalam air merupakan pengembangan dari metode pengelasan yang ada pengelasan ini di kembangkan bertujuan sebagai salah satu metode untuk manufaktur serta perbaikan yang dilakukan pada area basah dan didalam air.

Teknik pengelasan dalam air dapat diklasifikasikan menjadi dua metode mengelas yaitu Dry underwater welding atau juga sering disebut dengan pengelasan hiperbarik dan Wet underwater welding (Godwin Barnabas et al., 2020), kedua metode pengelasan dalam air ini dapat diaplikasikan dengan teknik pengelasan komersial yang ada di industri antara lain; SMAW (Shielded Metal Arc Welding), GTAW (Gas Tungsten Arc Welding), FCAW (Flux Cored Arc Welding), baik itu berupa sambungan dengan logam sejenis ataupun beda jenis logam. Umumnya Pengelasan dalam air menggunakan teknik pengelasan jenis SMAW karna dianggap memiliki fleksibilitas dalam penggunaannya. Namun teknik pengelasan dalam air memiliki kelemahan pada aplikasinya antara lain adanya pendinginan cepat dari logam las disebabkan air disekitarnya sehingga menurunnya sifat daktilitas dari material, meningkatnya kekerasan pada area yang terkena panas (HAZ) dan dapat menurunkan sifat mekanik sambungan las, menurut Xu et al.,

(2020) pada proses pengelasan dalam air akan terjadi disosiasi molekul air dalam bentuk oksigen dan hidrogen yang terlarut dalam logam cair akibat busur las, sehingga dapat membentuk porositas yang menyebabkan cacat pada hasil pengelasan dan dapat merubah struktur mikro dari hasil pengelasan.

Namun teknik pengelasan dalam air masih digunakan karena memiliki kelebihan dalam pengoperasiannya sehingga biaya yang dibutuhkan relatif lebih murah (Chen et al., 2020), dikarenakan pengelasan ini memiliki ketidakstabilan nyala busur las dan adanya gelombang pada daerah sekitar las, sehingga penting untuk menyelidiki sifat-sifat mekanik dan variabel yang mempengaruhi sambungan las berdasarkan kedalaman air dalam skala meter (Yohanes, P., et al., 2019).

Dalam prosesnya teknik pengelasan dalam air dilakukan pada area basah atau area yang memiliki kontak langsung dengan air pada proses pengerjaannya akan dipengaruhi oleh tegangan busur, besar arus, kecepatan pengelasan, besarnya penembusan dan polaritas listrik. Faktor yang mempengaruhi hasil dari pengelasan dalam air berupa arus aliran air, suhu air, dan tekanan air yang berdampak signifikan pada kestabilan busur las sehingga kualitas pengelasan akan berubah sesuai kondisi lingkungannya, jenis air (air tawar atau asin) yang berbeda seperti unsur pada air (PH) yang berbeda. Adanya arus aliran air menyebabkan penurunan stabilitas busur yang akan mempengaruhi hasil lasan. Laju pendinginan yang sangat cepat mengganggu pertumbuhan butir yang menyebabkan ukuran butir lebih kecil sehingga pada area terkena panas (HAZ) didominasi oleh martensite. Hal tersebut meningkatkan kekuatan tarik lasan, namun mengurangi keuletan dan kekuatan impak dari lasan serta meningkatkan kekerasan. Selain itu, karena disosiasi air oleh busur las menyebabkan inklusi oksigen dan hidrogen di logam cair lasan yang menyebabkan porositas dan retak. Hydrogen assisted cracking (HAC) merupakan permasalahan umum pada pengelasan baja. Efek merusak dari hidrogen pada baja, umumnya dikenal sebagai hydrogen embrittlement atau retak pada HAZ.

Tujuan utama dari pengelasan dalam air dengan variasi jenis elektroda, heat input dan kedalaman air adalah untuk memastikan kekuatan dan keuletan dari hasil pengelasan sehingga dapat digunakan sebagai referensi prosedur pengelasan dan perbaikan pada industri. Melalui Laboratorium metalurgi Institut Teknologi

Sepuluh Nopember (ITS) sebagai kontribusi dalam aplikatif proses pengelasan pada industri dengan mempertimbangkan aspek hasil dari pengelasan yang memenuhi standar american welding society (AWS) underwater welding D3. 6M:2010.

Pada tesis ini pengelasan dalam air dengan teknik SMAW, dilakukan dengan memvariasikan jenis elektroda dengan bahan flux pelindung high titania potassium dan Low-hidrogen potassium pengelasan dilakukan dengan kedalaman air 3 dan 10 meter. Hasil pengelasan nantinya memiliki nilai keuletan dan kekerasan yang tinggi serta cacat yang timbul pada area pengelasan yang rendah, sehingga dapat diaplikasikan pada proses kerja pada bidang pengelasan dalam air sebagai metode perbaikan dan perawatan pada Industri, sistem pemipaan dengan material jenis API dan material baja lain yang memiliki kadar karbon atau material sejenisnya dengan kesamaan bahan ASTM A106, yang memiliki, sifat mekanik, dan pengaplikasinya, karna material jenis ini banyak digunakan pada sistem pemipaan dan industri lepas pantai sebagai transportasi hasil produksi yang berupa minyak atau gas dan konstruksi lepas pantai dengan merujuk pada ISO 3183.

1.2. Rumusan Permasalahan

Berdasarkan uraian dari latar belakang perumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil pengelasan dalam air menggunakan metode SMAW pada material baja karbon Plat A36 dan Pipa A106.
2. Bagaimana pengaruh Amper, elektroda dan proses pengelasan dengan kedalaman 3 meter dan 10 meter terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mampu menganalisa hasil pengelasan dalam air dengan metode SMAW pada material baja karbon Plat A36 dan Pipa A106.
2. Mampu menganalisa pengaruh Amper, elektroda dan proses pengelasan dengan kedalaman 3 meter dan 10 meter terhadap sifat mekanik dan struktur mikro pada material Plat A36 dan Pipa A106.

1.4. Batasan Masalah

Batasan Masalah Pada penelitian ini adalah :

1. Pengelasan dilakukan menggunakan metode pengelasan dalam air yang dilakukan pada kolam latihan pengelasan dalam air STP Technopark Solo.
2. Material yang digunakan adalah material baja karbon Plat A36 dan Pipa A106..
3. Pengelasan menggunakan teknik Shield Metal Arc Welding (SMAW) dengan metode pengelasan dalam air dengan kedalaman pengelasan 3 dan 10 meter.
4. Elektroda yang digunakan E7018 dan E6013 mengikuti AWS pada pengelasan SMAW yang dibuat berdasarkan penelitian sebelumnya .
5. Pengujian yang dilakukan mekanik (tarik, bending, impak dan microharness), dan metalografi (mikrostruktur).

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

1. Menjadi referensi prosedur perbaikan dan perawatan pengelasan dalam air pada sistem pemipaan dan konstruksi pada industri maritim yang ada khususnya industri gas dan minyak dengan pipa baja carbon.
2. Mengurangi risiko kegagalan pengelasan dalam air pada proses pengelasan dan perbaikan.
3. Mampu menganalisa hasil dari pengelasan dalam air dari baja karbon dengan kedalaman 3 dan 10 meter pada kolam air tawar.
4. Mengetahui kekuatan sambungan las pada kedalaman 3 dan 10 meter, serta perubahan fase yang terjadi sehingga membentuk struktur mikro.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pengelasan adalah teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan tekanan atau tanpa tekanan dengan hasilkan sambungan yang lurus (Putri, E. D. W. S et al., 2021). Teknik pengelasan merupakan proses penyambungan material logam yang sering digunakan sebagai salah satu penunjang dalam hal perbaikan maupun perawatan dibidang industri khususnya industri maritim. American Welding Society (AWS) mendefinisikan bahwa pengelasan merupakan “proses penyambungan yang menghasilkan peleburan logam dengan cara dipanaskan hingga temperatur pengelasan, dengan penggunaan filler metal yang berfungsi sebagai bahan pengisi yang mencair bersama dengan benda kerja dan setelah dingin akan menjadi satu kesatuan dan membentuk paduan logam las.

Pada saat logam las masih berupa cairan kemudian perlahan akan membeku dan terlapis oleh terak yang berfungsi melindungi logam las dari oksidasi udara luar sehingga kualitas logam las dapat terjaga. Terak terbentuk dari bahan lapisan elektroda, terak terdapat pada permukaan logam las pasca pengelasan yang dapat dihilangkan setelah logam las dingin, jika pendinginan sambungan las yang terlalu cepat dapat mengikat terak pada logam las.

2.1. Pengelasan Dalam Air

Teknologi pengelasan dalam air adalah pengelasan yang dilakukan pada area basah sehingga menyebabkan busur las dan benda kerja bersentuhan langsung dengan air, umumnya dilakukan dilingkungan air tawar maupun air asin, namun pengelasan dalam air sering dilakukan pada air asin (dalam laut), pengelasan dalam air biasa digunakan untuk memperbaiki kerusakan yang terjadi pada badan kapal dan perbaikan struktur kapal, konstruksi pipa air, konstruksi pipa minyak dan gas, konstruksi jembatan diatas air maupun konstruksi rig atau pengeboran lepas pantai,

bangunan lepas pantai serta konstruksi lainnya yang terendam air (AWS D3.6M., 2017).

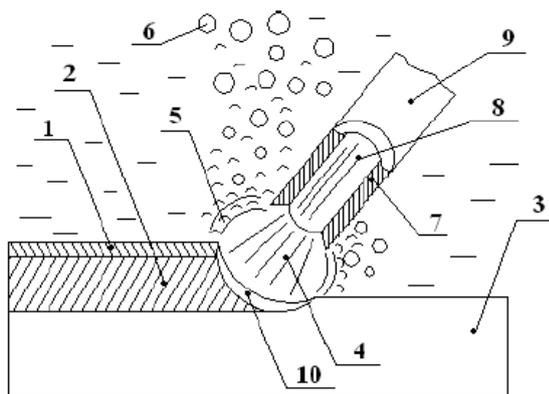
Pengelasan dalam air adalah tindakan alternatif lain yang dipilih jika tidak memungkinkan untuk dikerjakan pada permukaan air. Keuntungan yang dimiliki dari teknik pengelasan dalam air berupa biaya yang relatif lebih murah dengan persiapan yang dibutuhkan lebih singkat dibanding dengan teknik sejenisnya yaitu pengelasan hyperbarik ataupun mengangkat benda kerja ke permukaan untuk dilakukan perbaikan. Namun pengelasan dalam air juga memiliki kendala yang mengacu pada AWS D3.6:2017, dimana menyatakan kendala yang harus dihadapi welder adalah kurangnya visibilitas, munculnya gelembung hydrogen akibat elektrolisis air pada saat pengelasan dan kurangnya kestabilan dari busur las akibat posisi yang kurang sempurna, sehingga menyebabkan hasil pengelasan dalam air akan menghilangkan sifat ductility dari material akibat laju pendinginan, selain itu muncul cacat seperti porosity yang disebabkan terjebaknya gelembung udara pada logam las, discontinuities dan lack of fusion. Liberato et al., (2018) berpendapat kendala yang disebutkan dalam AWS D3.6 : 2017 juga menjadi faktor utama penyebab buruknya hasil pengelasan dalam air, selain itu gelembung hydrogen juga akan beresiko tingginya menyebabkan ireguler crack pada area HAZ terutama untuk jenis material baja karbon dengan Equevalent Karbon (Eceq) sebesar 0.40% . Sehingga pengelasan dalam air dilakukan untuk pengelasan yang sifatnya darurat dan bersifat sementara (temporary) pada dalam perbaikan di industri.

2.2. *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

Proses pengelasan SMAW adalah pengelasan busur listrik pada proses pengelasan dengan menggunakan arus listrik sebagai sumber panas untuk melelehkan material dasar (BM) dan bahan pengisi (FM). Panas tersebut dihasilkan oleh busung pendek yang timbul antara katoda dan anoda (ujung elektroda dan permukaan baja yang akan dilas). Sumber tegangan yang digunakan pada pengelasan SMAW arus listrik dengan tegangan AC (alternating current) / arus

bolak balik dan DC (Direct Current) / arus searah. Untuk proses pengelasan dalam air dengan teknik SMAW menggunakan arus DC.

Mesin Las dengan arus DC memiliki dua cara dalam penggunaannya yaitu polaritas lurus dan polaritas terbalik. Mesin las DC (-) polaritas lurus digunakan pada material yang memiliki titik leleh yang tinggi dengan kapasitas besar seperti benda kerja dengan ketebalan tertentu dan panjang jalur las yang lebar, untuk prosesnya elektroda diletakan pada kutup negatif dan material dasar pada kutup positif, sedangkan pada untuk penggunaan DC (+) polaritas terbalik penggunaannya pada material yang memiliki titik leleh yang lebih rendah dengan kapasitas sedikit seperti plat plat tipis dan jarak lasannya relatif pendek (area), dengan prosesnya terbalik dari DC(-) polaritas Lurus. Besarnya arus listrik untuk pengelasan bergantung pada ukuran diameter dan macam-macam elektroda las. Pengelasan SMAW adalah penyambungan antara logam dengan menggunakan panas yang ditimbulkan dari aliran listrik, pengelasan SMAW memiliki banyak kelebihan salah satunya karena dapat digunakan pada semua posisi pengelasan sehingga mendukung dalam pengerjaan pengelasan dalam air. Skema pengelasan SMAW pada pengelasan dalam air dapat diilustrasikan dari pada gambar 2.1, dimana busur las yang meleleh akibat panas dari arus listrik akan membentuk terak dan area las dari benda kerja, dampak dari panas yang muncul akan menimbulkan gelembung gas yang terjadi akibat reaksi hidrogen menjadi H_2 dan O_2 elektrolisis air.



Gambar 2.1 : Skema pengelasan dalam air dengan elektroda terbungkus pada benda kerja : (1) terak, (2) lasan, (3) logam dasar, (4) busur listrik, (5) uap air, (6) gelembung gas, (7) fluks, (8) kawat las, (9) elektroda, (10) Logam las.

2.3. Filler Metal

Filler metal (Elektroda) merupakan sumber logam pengisi pada proses pengelasan, yang menjadikan elektroda menjadi sangat penting untuk diperhatikan karena elektroda nantinya akan bercampur dengan logam las sehingga dapat menjadi suatu sambungan. Terdapat beberapa kriteria yang harus diperhatikan ketika memilih elektroda, seperti memiliki kesamaan komposisi kimia dengan logam las (*base metal*), memiliki sifat mekanik yang baik, kebutuhan aplikasi dengan ketersediaan yang ada serta memiliki ketahanan dan ketangguhan yang baik, pada pengelasan dengan elektroda terbungkus (SMAW), elektroda untuk jenis SMAW sudah banyak yang distandarkan berdasarkan penggunaannya. Standarisasi elektroda dalam AWS A5.1 (*Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*) didasarkan pada jenis fluks, posisi pengelasan dan arus las. Pada pengelasan dalam air hidrogen dan laju pendinginan yang cepat merupakan suatu permasalahan yang tidak dapat di hindari serta kestabilan posisi pengelasan atau busur merupakan permasalahan yang sangat mempengaruhi dari hasil pengelasan dan cacat yang timbul pada hasil pengelasan, berdasarkan kriteria pemilihan filer metal dan penggunaannya elektroda dengan flux high titanium dan flux low hidrogen dengan bahan pengisi jenis rutel bisa menjadi pilihan. Pada tabel 2.1 terdapat karakteristik dari elektroda yang digunakan pada tesis ini menurut AWS A5.1/A5.1M :2012.

Tabel 2.1: Elektroda Classification

AWS Classification				
A5.1	A5.1M	Type of Covering	Welding Position	Type of Current ^b
E6013	E4313	Hight titania potassium	F, V, OH, H	AC, DCep or DCen
E7018	E4918	Low-hydrogen potassium, iron powder	F, V, OH, H	AC or DCep

(Sumber : AWS A5.1 tahun 2012)

Tesis ini menggunakan elektroda terbungkus dengan kode E6013 sebagai filer metal pengelasan dalam air dikarenakan memiliki fungsi untuk industri kontruksi, repair & maintenance, serta dapat digunakan pada arus yang rendah dan tinggi serta memiliki hasil manik pengelasan yang bagus. dan pengelasan dengan

segala posisi yang mengacu pada AWS 5.1, sedangkan untuk elektroda dengan kode E7018 dipilih karena elektroda tipe ini memiliki flux dengan bahan hydrogen yang rendah (kurang dari 0.5 %), dan dapat digunakan pada amper yang tinggi dan cocok untuk pengelasan pipa dan bejana tekan mengacu pada AWS 5.1 sehingga nantinya dapat menghindari cacat yang timbul akibat hidrogen.

2.4. Baja Carbon

Baja karbon merupakan paduan dari beberapa unsur besi dan karbon yang mendominasi dengan beberapa campuran paduan lain seperti Si, Mn, P, S dan Cu yang bertujuan agar material tersebut memiliki sifat mekanik yang lebih baik. Sifat baja karbon sangat bergantung pada kadar karbonnya karena semakin besar persentase dari karbon akan semakin keras dan kuat baja tersebut, oleh karena itu baja karbon ini dikelompokkan menjadi beberapa jenis berdasarkan persentase kadar karbonnya. *American Iron and steel Institute* (AISI) mendefinisikan persentase campuran karbon pada baja sekitar 0.12 – 2.0 % dengan campuran elemen lain untuk mendapatkan hasil tertentu. Untuk penelitian ini baja yang menggunakan pipa ASTM A106 dan plat A36 yang termasuk dalam golongan baja karbon, yang mewakili material untuk manufaktur dibidang industri maritim dengan kesamaan fungsi dan banyak digunakan pada area industri maritim dan hulu migas dengan *chemical requirements* yang ditunjukkan pada tabel berikut :

Tabel 2.2 : Komposisi Kimia Baja Karbon ASTM

Pengujian Komposisi Kimia								
Komposisi (%)								
ASTM	C	Si	Mn	Cr	Cu	Me	P	S
A106	0.307	0.199	0.82	0.0551	2.42	0.0077	0.01	0.035
ASTM	C	Si	Mn	Cr	Cu	Me	P	S
A36	0.2	0.15	0.29	-	0.2	-	0.01	0.006

(Sumber: Mill Test Krakatau Steel)

Unsur karbon dan lainnya yang ditambah dalam proses pembuatan baja tidak serta merta membuat material tersebut menjadikan material tersebut dipilih, dalam dunia pengelasan ada istilah sifat mampu las dari material, sifat mampu las merupakan kemampuan dari material agar dapat dilakukan proses pengelasan tanpa mengalami perubahan sifat yang di miliki material tersebut.

Sifat mampu las dari material baja karbon A106 dan A36 dapat dihitung menggunakan persamaan 2.1 karbon ekivalen ($E_{k_{ceq}}$) menurut AWS, perhitungan kandungan ekivalen karbon dilakukan untuk mengetahui kemampuan las dari baja tersebut karna akan mempengaruhi titik lebur dari baja itu sendiri.

$$CE = C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Cu + Ni)/15 \quad (2.1)$$

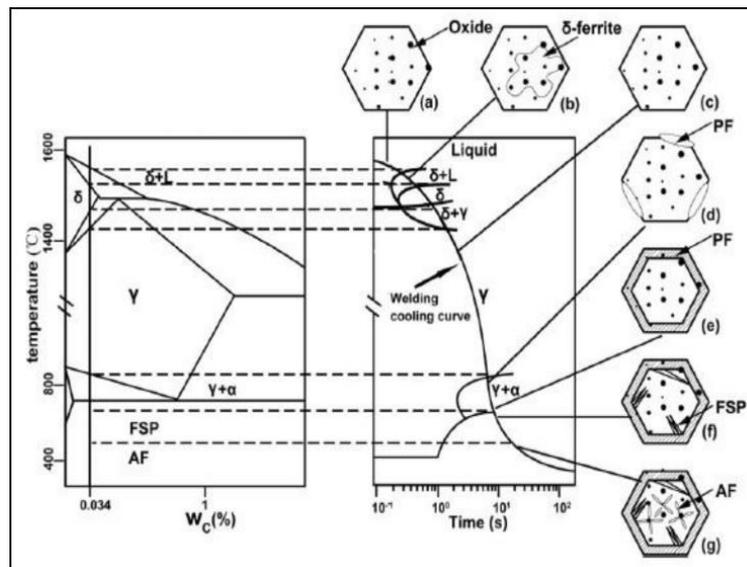
Kemampuan las dari material dapat dilihat dari karbon ekivalen dan ketebalan dari material tersebut karna ini akan berdampak pada *heat input* yang akan diberikan serta laju kecepatan pendinginana setelah pengelasan. Struktur yang dimiliki oleh baja dipengaruhi oleh kandungan karbonnya karna semakin tinggi karbon yang dimiliki baja maka titik lebur yang dimiliki semakin rendah, umumnya baja karbon memiliki struktur yang terdiri dari ferit dan sedikit perlit. Pada tesis ini pipa A106 memiliki C_{ek} sebesar 0.65 % sedangkan plate A36 memiliki C_{ek} sebesar ≤ 35 % dari perhitungan menggunakan persamaan 2.1 rentang karbon ekivalen yang dimiliki material baja sangatlah berbeda, hal ini akan berpengaruh pada proses pengerasan setelah pengelasan dan dapat menimbulkan retak pada hasil pengelasan, material dengan karbon ekuivalen $< 0.40\%$ memiliki proses pengerasan lebih baik dibandingkan dengan proses pengelasan dengan karbon ekuivalen diatas $> 0.50\%$. Tomkow et al., (2019) menyatakan pada penelitiannya ketebalan bahan dan kemampuan las dari material baja tidak berpengaruh dalam teknik pengelasan dalam air. Hal ini menunjukkan pada pengelasan dalam air belum berfokus pada kemampuan las dari material karena pengelasan dalam air bersifat perbaikan sementara.

2.5. Siklus Thermal Pengelasan

Siklus termal las merupakan proses terjadinya laju pemanasan yang dihasilkan dari *heat input* dan pendinginan pada daerah pengelasan, lamanya laju proses pendinginan dalam daerah pengelasan dari suatu siklus termal las sangat mempengaruhi baik dan buruknya hasil dari sambungan las. Dikarnakan hal tersebut pendekatan untuk menentukan lamanya waktu pendinginan bervariasi dari rumus empiris hingga nomograf atau dalam bentuk tabel dilakukan sebagai

konfirmasi dari laju pengelasan. Umumnya struktur mikro dan sifat mekanik sebagian besar bergantung pada proses laju dari pendinginan dari temperatur 800 °C – 500 °C. Sedangkan retak dingin dimana hidrogen memegang peranan penting, terjadinya sangat tergantung dengan lama proses pendinginan antar suhu 800 °- 300 °C atau 100 °C.

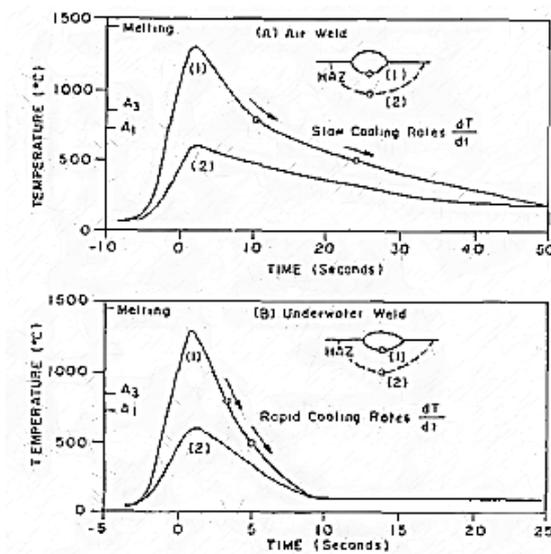
Pengaruh pendinginan pada hasil pengelasan dalam air menyebabkan perubahan karakteristik dari logam las sebagai dampak dari laju pendinginan cepat. Laju pendinginan sangat dipengaruhi oleh prosedur pengelasan yang digunakan karena berhubungan dengan masukan panas dan desain sambungan las, pada umumnya struktur mikro yang terbentuk dari baja bergantung dengan laju pendingin dari suhu daerah las, sehingga akan mempengaruhi sifat mekanik yang dimiliki juga akan berubah. pada Gambar 2.1 mengilustrasikan transformasi fasa akibat laju pendinginan pada logam las yang membentuk konstituen pada area pengelasan.



Gambar 2.2: Ilustrasi sistematis transformasi fase logam las baja HSLA (Sumber : wang J., et al., 2018)

Laju pendinginan yang cepat dapat menghasilkan pembentukan konstituen seperti martensit dan bainit untuk pengelasan baja konvensional. Konstituen ini memiliki kekuatan tinggi dan rapuh dan rentan terhadap retak hidrogen (Omajene, J., et al., 2014). Pendinginan yang terjadi pada pengelasan udara terbuka memiliki perbedaan dengan pengelasan dalam air dimana pengelasan dalam air memiliki laju

pendinginan yang lebih cepat tergantung dari jarak dan sumber panas pengelasan pada area las, yang berdampak pada perubahan bentuk dari struktur mikro sehingga sifat mekanik dari suatu material akan mengalami perubahan pada area pengelasan. Pada Gambar 2.2 mengilustrasikan perbandingan laju pendinginan yang terjadi pada pengelasan dalam air dan pengelasan di udara terbuka.



Gambar 2.3 : Perbandingan laju pendinginan pengelasan udara dan dalam air
(Sumber : Omajene, J., et al., 2014)

Laju pendinginan yang terjadi pada pengelasan dalam air memiliki pendinginan yang lebih cepat dibandingkan dengan pengelasan diudara dengan perbandingan waktu 10 sampai 15 kali lebih cepat sehingga menyebabkan non-equilibrium struktur transformasi bainit dan martensit atau produk campuran seperti *Widmanstatten* struktur. yang menyebabkan struktur HAZ cenderung berubah, pengelasan dalam air tidak seperti pengelasan udara terbuka yang strukturnya lebih homogen. Lebar HAZ untuk pengelasan udara terbuka adalah 20% sampai 50% lebih lebar dari pengelasan dalam air, hal ini menyebabkan area HAZ dan logam las dari material baja karbon akan menghasilkan bentuk struktur yang rapuh dengan kekerasan rendah. Struktur seperti ini sensitif terhadap retak dingin (HICC), cacat las akan terjadi bila lasan terbentuk pada struktur yang sensitif terhadap retak, selain itu tingkat pendinginan yang tinggi menyebabkan logam las lebih lebih keras dibandingkan dengan las pada

udara terbuka, sehingga menimbulkan cacat porositas. Berbagai teknik digunakan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Prosedur pengelasan dengan input panas tinggi digunakan untuk mengurangi tingkat pendinginan dan mengurangi laju kecepatan busur las yang bertujuan memperlambat laju pendinginan pada area HAZ dalam pengelasan dalam air sehingga mendapatkan hasil pengelasan dengan sifat mekanik yang memenuhi standar dari AWS maupun ASME yang telah di standarkan berdasarkan kebutuhan.

2.6. Pengujian

Pengujian yang dilakukan pada tesis ini meliputi pengujian mekanik dan metalografi yang mana hasil dari pengujian ini memberikan informasi mengenai sifat mekanik dari material uji serta susunan struktur mikro yang terjadi setelah proses pengelasan. Adapun pengujian yang dilakukan :

2.7. Pengujian Tarik

Tensile Strength (UTS) merupakan kemampuan maksimum material dalam menahan beban. Titik luluh atau *yield point* yakni dimana logam mengalami pertambahan panjang tanpa pertambahan beban yang berarti. Dengan kata lain titik luluh merupakan keadaan dimana spesimen terdeformasi dengan beban minimum.

Uji tarik merupakan salah satu pengujian untuk mengetahui sifat-sifat suatu bahan. Dengan menarik suatu bahan kita akan segera mengetahui bagaimana bahan ini bereaksi terhadap tenaga tarikan dan mengetahui sejauh mana material itu bertambah panjang. Alat eksperimen untuk uji tarik ini harus memiliki cengkaman yang kuat dan kekakuan tinggi. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat-sifat mekanis suatu material khususnya logam, sifat mekanis yang dapat diketahui dari hasil pengujian tarik adalah sebagai berikut:

1. Kekuatan tarik
2. Kuat luluh dari material
3. Keuletan dari material

Pengujian tarik dilakukan dengan pemberian beban secara perlahan hingga mencapai tegangan maksimal (*Ultimate tensile Strength*), pengamatan yang dilakukan berupa penambahan dari panjang material sehingga menghasilkan tegangan – regangan umumnya kekuatan nilai regangan yang diterima oleh material dengan persamaan 2.1.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

(2.1)

Di mana:

σ = Tegangan Nominal (N/mm²)

F = beban (N)

A₀ = luas penampang (mm²)

Nilai regangan (pertambahan panjang) dapat di tuliskan dengan persamaan 2.2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Dimana :

ε = Regangan (%)

L₁ = Panjang Akhir (mm)

L₀ = Panajng Awal (mm)

2.8. Pengujian Bending

Uji bending merupakan suatu proses pengujian material dengan diberikan beban tekanan yang bertujuan untuk mengetahui kekuatan lengkung (bending) suatu material. Proses pengujian bending memiliki 2 teknik pengujian, yaitu 3 dan

4 point (titik) bending, umumnya teknik bending 3 point yang sering digunakan, terutama untuk pengujian hasil pengelasan. Dalam proses pengujian bending ada beberapa faktor yang harus harus diperhitungkan seperti :

1. Tekanan
2. Benda Uji
3. Point Bending

Pengujian bending dilakukan dengan pemberian beban tekan pada bagian atas benda uji sehingga pada bagian bawah benda uji mengalami proses tarik dan mengalami patah karna tidak mampu menahan tegangan tarik. Kekuatan bending dapat dirumuskan dengan persamaan 2.3.

$$\sigma_b = (3 P L) / (2 b d^2) \quad (2.3)$$

Di mana:

σ_b = Kekuatab Bending (MPa)

P = beban (N)

L = luas penampang (mm)

b = Lebar (mm)

d = Tebal (mm)

2.9. Pengujian Impak

Tujuan utama dari pengujian impak adalah untuk mengukur kegetasan atau keuletan bahan terhadap beban yang diberikan secara tiba-tiba dengan cara mengukur energi potensial sebuah pendulum yang dijatuhkan pada ketinggian tertentu. Ada dua macam pengujian iMPact yaitu Charpy dan Izod. Perbedaan Charpy dengan Izod adalah peletakan spesimen. Pengujian dengan menggunakan Charpy lebih akurat karena pada Izod, pemegang spesimen juga turut menyerap

energi, sehingga energi yang terukur bukanlah energi yang mampu diserap material seutuhnya. Pada spesimen yang telah dilakukan pengujian impak, akan dapat diketahui jenis patahan yang dihasilkan serta deformasi yang terjadi akibat dari pembebanan secara tiba tiba. Untuk menghitung energi yang terserap dan diterima oleh material dapat dirumuskan dengan persamaan 2.4.

$$HI = E/A \quad (2.4)$$

Dimana :

HI = Nilai Impak (Joule/mm²)

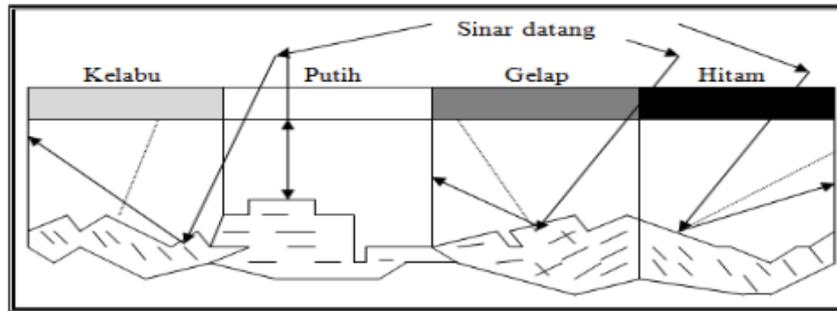
E = Energi yang diserap (Joule)

A = Luasan Penampang dibawah takik (mm²)

2.10. Pengujian Metalografi

Pengujian mikro adalah suatu pengujian mengenai struktur bahan melalui pembesaran dengan menggunakan mikroskop khusus metalografi. Dengan pengujian mikrostruktur dapat mengamati bentuk dan ukuran kristal logam, kerusakan logam akibat proses deformasi, proses perlakuan panas, dan perbedaan komposisi. Sebelum dilakukan pengamatan metalografi, spesimen uji terlebih dahulu dilakukan preparasi dengan beberapa tahapan

Metalografi merupakan suatu metode untuk mengamati struktur mikro logam dengan menggunakan mikroskop optik dan mikroskop elektron. Sedangkan struktur yang terlihat pada mikroskop tersebut disebut mikrostruktur. Pengamatan tersebut dilakukan terhadap spesimen yang telah diproses sehingga bisa diamati dengan perbesaran tertentu menggunakan mikroskop optik, dengan prinsip kerja memantulkan sinar cahaya melewati lensa untuk dipantulkan pada spesimen. Dalam prosesnya cahaya akan dipantulkan kembali ke mikroskop optik dan diteruskan ke lensa okuler untuk diamati. Gambar 2.3 : Sekema pantulan cahaya untuk metalografi pada mikroskop optik.



Gambar 2.4 : Ilustrasi pantulan sinar pada pengujian metalografi

2.11. Pengujian kekerasan Material

Kekerasan adalah salah satu sifat mekanis dari suatu material. Kekerasan suatu material harus diketahui khususnya untuk material yang dalam penggunaannya akan mengalami pergeseran dan deformasi plastis. Deformasi plastis adalah suatu keadaan dari suatu material ketika material tersebut diberikan gaya maka struktur mikro dari material tersebut sudah tidak bisa kembali ke bentuk asal. Lebih ringkasnya kekerasan itu dapat diartikan sebagai kemampuan suatu bahan/material untuk menahan beban induksi atau penetrasi (penekanan). Uji keras dilakukan untuk mendapatkan sifat kekerasan material.

Kekerasan biasanya dapat dinyatakan dalam tiga skala yaitu, Brinell, Rockwell, atau Vickers. Perbedaan utama dari ketiga skala ini adalah pada beban dan indentor yang digunakan dalam pengukurannya. Masing-masing skala ini mempunyai kelebihan dimana Vickers hanya butuh satu setup pengujian untuk semua material, Rockwell akan memberikan kesalahan operator yang lebih kecil karena tidak perlu mikroskop, sedangkan Brinell dapat dengan mudah dikonversikan kedalam kekuatan ultimate-nya

Uji kekerasan Vickers menggunakan indentor berbentuk piramida intan dengan berbentuk dasar bujur sangkar dengan besar sudut 136° terhadap kedua sisi yang berhadapan. Besar sudut itu digunakan karena merupakan perkiraan rasio terideal indentasi diameter bola uji brinell. Besar beban indentor bervariasi antara 1 kg sampai 120 kg yang disesuaikan dengan tingkat kekerasan material. mengambil

nilai kekerasan dengan hasil Vickers Hardness Number (VHN), dapat dirumuskan dengan persamaan 2.5.

$$VHN = \frac{2F \tan^2(\theta/2)}{L^2} \quad (2.5)$$

Dimana :

F = Beban (Kg)

L = Panjang Diagonal Rata-rata (mm)

θ = Sudut Piramida (136°)

2.12. Metode Desain Eksperimen

Desain eksperimen merupakan metode evaluasi dengan memperhatikan variabel yang mempengaruhi terhadap hasil yang didapatkan dari suatu eksperimen. Umumnya dalam penelitian ini menggunakan ANOVA sebagai pendekatan secara statistik untuk mengetahui pengaruh dari faktor atau kondisi yang digunakan dalam suatu penelitian, metode ini sangat sesuai untuk sebuah penelitian dengan metode ini pengaruhnya akan terlihat jelas dari setiap variabel.

Analisa varian (Anova) merupakan suatu metode analisa statistik yang digunakan sebagai uji hipotesa dari suatu eksperimen dengan membedakan rerata dari suatu kelompok atau lebih dengan cara membandingkan variasi dari setiap kelompok.

Metode Anova dapat digunakan dalam setiap desain eksperimen sehingga lebih mudah digunakan, secara umum pengujian Anova mengujia dua varian data berdasarkan hipotesis nol agar lebih valid dalam menganalisa data. Nantinya Anova digunakan untuk mengetahui pengaruh dari setiap faktor yang digunakan dalam penelitian ini sebagai acuan dalam menganalisis pengaruh variabel pengelasan dalam air sehingga informasi yang didapatkan memiliki data yang valid.

2.13. Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengurangi cacat yang terjadi pada pengelasan dalam air . Penelitian-penelitian sebelumnya terkait pengelasan dalam air dan baja karbon rendah diantaranya adalah:

- a. Zhang Maofu., et al., 2021 meneliti tentang stabilitas dari proses pengelasan dalam air, dengan memberikan lapisan bahan anti air berupa water glass dan epoxy setebal 2.5 mm pada permukaan plat karbon Q235B agar memiliki lapisan tahan air, sehingga pada saat proses pengelasan elektroda dan plat tidak terkena kontak langsung dengan air. Teknik ini mampu meningkatkan kestabilan hasil dari proses pengelasan dalam air.
- b. Tomków Jacek., et al., 2020 meneliti tentang pengelasan dalam air dengan material S460ML dan S460N untuk mengetahui pengaruh perbedaan equivalent carbon content (C.E) dan pengaruh temper bead welding (TBW), pada kekerasan dan struktur mikro yang terdapat pada heat efektif zone (HAZ). Namun *equivalent* dari carbon tidak berpengaruh pada hasil pengelasan akan tetapi teknik TBW mampu mengurangi retak pada HAZ dan mengurangi daktilitas pada daerah HAZ.
- c. Tomków Jacek ., et al., 2020 meneliti kemampuan las dengan bentuk lasan fillet pada lingkungan basah dengan metode *heat input* yang dikendalikan atau *controlled thermal severity* (CTS) serta mengetahui pengaruh *temper bead welding* (TBW) pada lasan baja serta mikrostruktur yang terbentuk dari hasil pengelasan, teknik TBW mampu meningkatkan daktilitas pada area HAZ dan dan mengurangi retak dibandingkan dengan (CTS)
- d. Eko Surujo., et al., 2022 melakukan penelitian pengelasan pada dalam air dengan kedalaman 50 cm (0.5 m) dengan aliran air yang tidak seragam didapatkan bahwa hasil pengelasan dengan dengan aliran yang lebih lambat memiliki kekuatan mekanik yang baik.
- e. Rogalski Grzegorz., et al., 2017, pernah melakukan penelitian pengelasan pengelasan dalam air pada material pipa API 5L X65, dengan cara melapisi pipa dengan lapisan polimer setebal 2.5 mm, melapisi material dengan lapisan polimer terbukti mampu meningkatkan daktilitas dari pengelasan namun tampilan pengelasa secara visual tidak baik.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

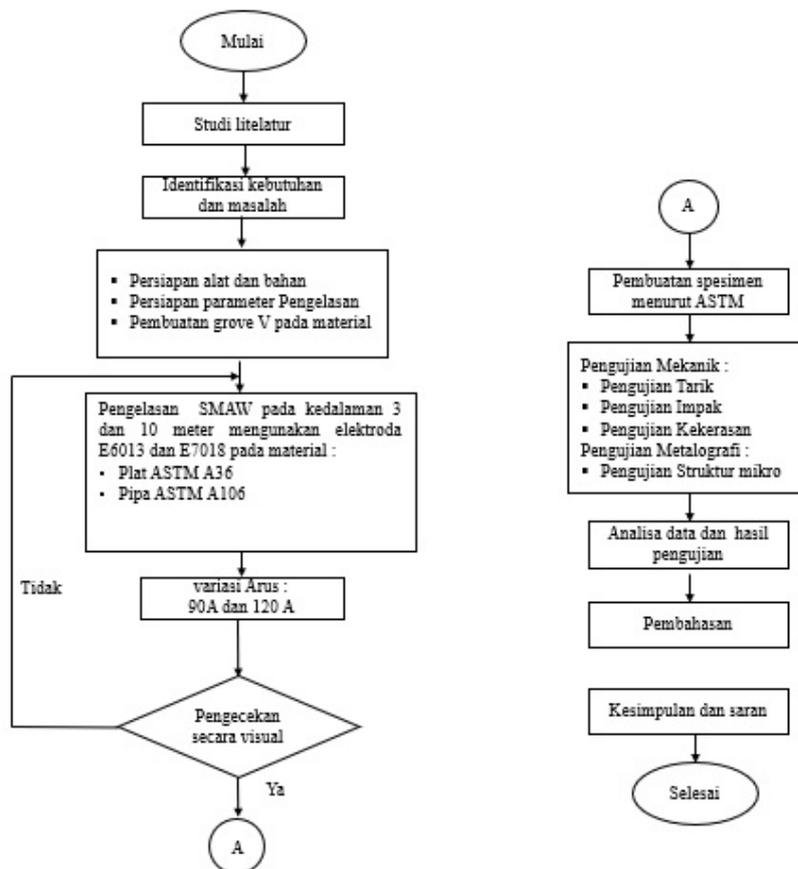
Metodologi penelitian yang berkaitan dengan tesis ini dapat diuraikan secara singkat sebagai berikut :

3.1 Diagram Alir Penelitian

Desain, strategi atau pendekatan yang akan digunakan dalam menjawab permasalahan penelitian sehingga tujuan penelitian bisa tercapai serta beberapa tahapan penelitian dijelaskan secara rinci dan singkat sebagai berikut :

1. Studi literatur berhubungan dengan pengelasan dalam air dengan penerapan sebagai metode perbaikan dan desain struktur bangunan di wilayah industri maritim.
2. Identifikasi kebutuhan pengelasan dalam air mengenai hasil pengelasan yang diterima serta permasalahan yang akan dihadapi ketika proses pengelasan, maka dapat dijadikan obyek penelitian tesis ini.
3. Pengumpulan data sebagai penunjang pelaksanaan penelitian yang meliputi berupa teori teori dasar, *code*, *standard AWS*, jurnal dan handbook.
4. Mempersiapkan alat serta bahan uji yang akan diteliti serta peralatan yang akan mendukung pelaksanaan pengujian pengelasan dalam air alat ukur dan alat pemesinan.
5. Proses pembuatan spesimen uji dengan mengikuti AWS D3.6M:2017 dan ASTM sebagai acuan dalam melakukan pembuatan spesimen uji serta pembuatan WPS.
6. Proses pengelasan pengelasan dalam air dengan kedalaman 3 meter didalam kolam dengan elektroda berbeda serta variasi dari *heat input* pengelasan..
7. Proses inspeksi hasil pengelasan secara visual untuk memastikan hasil dari pengelasan secara visual apakah sudah sesuai dengan kriteria yang diinginkan agar dapat dilakukan pengujian.
8. Pengujian Mekanik untuk mengetahui karakteristik dan kekuatan mekanik dari logam las.

Penjelasan tahapan proses penelitian bisa dilihat sebagai diagram alir penelitian pada gambar 3.1.



Kriteria Penerimaan : Terima jika cacat kurang dari 30% dan tolak jika lebih dari 30%.

Gambar 3.1 : Diagram Alir Penelitian

3.2 Studi literatur

Sebelum melakukan penelitian pada tesis ini dilakukan studi literatur dan mencari referensi yang terkait dengan penelitian ini. Literatur dan referensi tersebut mengenai metode proses pengelasan dalam air yang terfokus pada terbentuk karakteristik akibat dari laju pendinginan cepat dan permasalahan yang terjadi akibat dari proses dan faktor dari parameter pengelasan serta proses pengujian yang mendukung untuk dilakukannya analisa dari hasil pengelasan yang dilakukan didalam air, dengan teori-teori serta metode tentang pengelasan dalam air, konsep dari pengelasan, *code*, *standard AWS*, jurnal dan *handbook*. Dengan pengujian yang akan dilakukan sebagai pendukung dalam penelitian yang akan dilakukan sehingga nantinya dapat menjawab tujuan dari penelitian ini.

3.3 Identifikasi Kebutuhan Dan Masalah

Pengelasan dalam air sudah umum dilakukan pada area industri terutama pada industri yang berada pada daerah pesisir seperti industri minyak dan gas, pembangunan jembatan dan rig, hal ini yang menyebabkan kebutuhan dari pengelasan ini sangatlah dibutuhkan karna beberapa sumber memberikan informasi pengelasan dalam air atau bisa disebut UWW (*Underwater Wet Welding*) memiliki beberapa kelebihan yang salah satunya dalam segi pelaksanaannya mudah untuk dilakukan, namun hasil dari pengelasan ini belumlah sangat baik karena sering terjadi cacat pada HAZ, serta memiliki kekerasan yang tinggi yang menyebabkan material memiliki struktur yang getas (*Brittle structure*) yang diakibatkan oleh laju pendinginan yang cepat, dikarenakan pengelasan jenis ini dilakukan pada kondisi yang tidak ideal, dimana panas hasil pengelasan kemudian didinginkan secara tiba tiba oleh keadaan sekitar. Kendala yang muncul pada saat proses pengelasan mengacu pada AWS D3.6:1999 *Specification for underwater welding*, dimana ductility yang lebih rendah, porosity yang lebih banyak, *discontinuities* yang relatif lebih banyak. Sehingga pengelasan dalam air dilakukan hanya untuk kebutuhan yang sifatnya sementara dan emergency pada industri. Selain itu tingginya resiko *hydrogen cracking* pada area HAZ terutama untuk jenis material dengan kadar carbon equivalent lebih tinggi dari 0.4%.

3.4 Persiapan Alat dan Bahan

3.4.1 Persiapan Peralatan

Peralatan yang digunakan pada saat proses proses pengelasan adalah sebagai berikut :

1. Alat Las SMAW dengan polaritas DC (-)
2. Alat Selam (Tabung *Oxygen* dan *Mask*)
3. Kabel las
4. *Chipping Hammer*
5. Sikat kawat
6. Sarung tangan
7. knife switch

3.4.2 Persiapan Bahan

Material yang digunakan pada tesis ini menggunakan 2 tipe material logam baja karbon dengan kandungan karbon dan bentuk bentuk dimensi yang berbeda adapun *recruitment* material sebagai berikut berikut :

Tabel 3.1 : Komposisi kimia baja karbon dan elektroda :

Material ASTM	Komposisi Kimia (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
Baja A106	0.307	0.199	0.82	0.055	0.199	0.0551	0.0077	<0.0050	2.42	<0.0050	96.1
Baja A36	0.105	0.016	0.82	0.013	0.0149	0.0035	0.0023	0.0073	0.0184	0.0033	98.8
Elektroda AWS	Komposisi Kimia (%)										
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V	Fe
E6013	0.06	0.3	0.37	0.012	0.01	-	-	-	-	-	-
E7018	0.07	0.59	0.97	0.013	0.007	-	-	-	-	-	-

3.5 Desain Pengelasan

Desain grove pengelasan menggunakan proses pemesinan pada material Pipa ASTM A106 dan Plat ASTM A36 dengan. Pembuatan kampuh pengelasan dengan menggunakan mesin bubut dan mesin scrap untuk mendapatkan hasil yang seragam dan sesuai dengan desain dengan bentuk grove V sebesar 60° dengan persentasi 80 % dari ketebalan masing masing material . Prose pembuatan grove V menggunakan mesin bubut dan scrap ditunjukkan pada gambar 3.3 menunjukkan hasil dari proses pemesinan.



Gambar 3.2 : Hasil proses pemesinan pembuatan groove V : (A) menggunakan mesin bubut untuk material pipa A106 dan (B) menggunakan mesin scrap untuk material plat A36 (C) Hasil Pembuatan Grove V pipa ASTM A106 dan (D) Plat ASTM A36.

3.6 Proses Pengelasan Dalam Air

Pengelasan dilakukan di STP Tecknopark Solo yang merupakan pusat pelatihan untuk pengelasan dalam air, pengelasan dilakukan didalam kolam latihan dengan kedalaman 3 dan 10 meter menggunakan pengelasan dengan metode SMAW, dengan mengikuti parameter yang telah dibuat berdasarkan refrens penelitian terdahulu dan tinjauan pustaka mengenai proses pengelasan yang dilakukan dalam air untuk meningkatkan kualitas hasil pengelasan seperti Surojo, (2022) menggunakan bavel (Grove) dalam pengelasan dalam air terbukti meningkatkan hasil kekuatan tarik, Tomkow, (2020) meyarankan metode multipass untuk menambahkan hasil kekuatan mekanik dan pengelasan untuk material dengan $E_q > 40 \%$, Pengelasan dilakukan menggunakan parameter Elektroda E7018 dan E6013, dengan variasi arus 90 A, 120 A, dengan bentuk kampuh V dengan posisi

pengelasan 1G/2G pada material dengan sambungan 3 layer menggunakan elektroda berdiameter 4.0 . Parameter pengelasan yang digunakan yang tertera pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 : parameter pengelasan dalam air

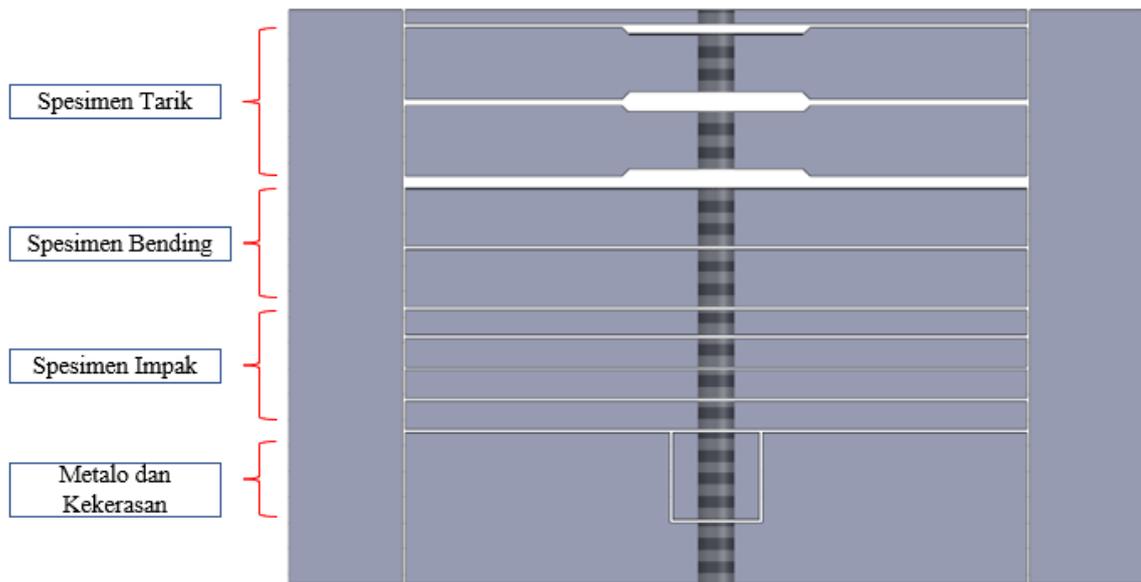
Base Metal	Amper (A)	Voltage (V)	Tipe Current	Elektroda	Type Pass
ASTM A36	90	30	DC (-)	E6013	3 layer
	120			E7018	3 layer
ASTM A106	90	30	DC (-)	E6013	3 layer
	120			E7018	3 layer

Kriteria penerimaan hasil pengelasan :

Setelah proses pengelasan dilakukan pengecekan secara visual dengan menggunakan gauged welding yang dilakukan oleh pihak solo tekno park sebagai jasa pengelasan dalam air. Kriteria penerimaan yaitu cacat las memiliki maksimal cacat sebesar 30 % dari area pengelasan.

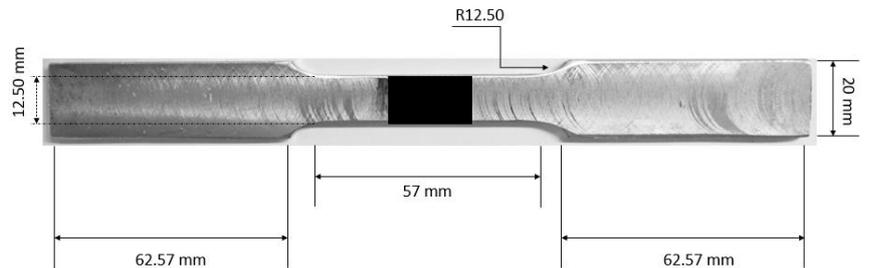
3.7 Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen uji mengikuti *cuting plant* yang disesuaikan dengan setandar ASTM pengujian mekanik, yang akan dilakukan pada tesis ini pengujian mekanik yang akan dilakukan berupa pengujian tarik, bending, impak dan kekerasan, dan sturktur mikro dari setiap pengujian memiliki standar yang berbeda dan bentuk dimensi yang berbeda, berikut merupakan bentuk dan dimensi dari benda uji yang dibuat menggunakan standar ASTM :



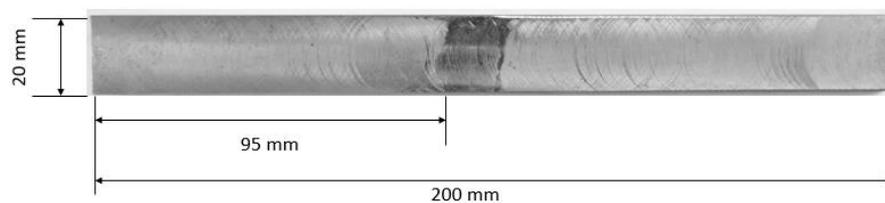
Gambar 3.3 : Cunting plant Spesimen

1. Pengujian Tarik menggunakan ASTM E8



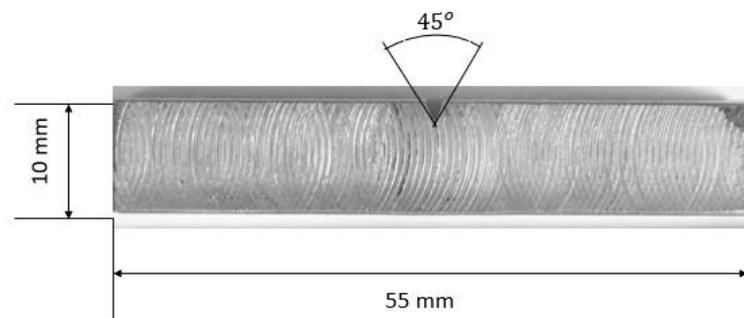
Gambar 3.4 : Dimensi Spesimen Uji tarik

2. Pengujian Bending



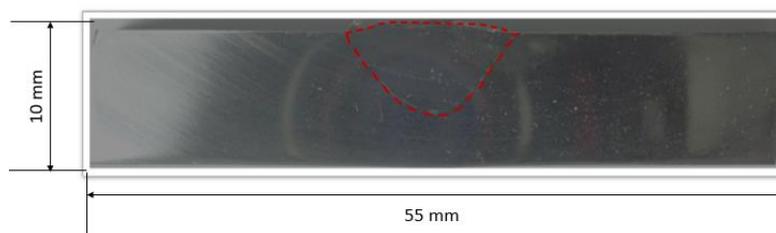
Gambar 3.5 : Dimensi Spesimen Uji Bending

3. Pengujian Impak menggunakan ASTM E23



Gambar 3.6 : Dimensi Spesimen Uji Impak

4. Pengujian Kekerasan dan Metalographic



Gambar 3.7 : Dimensi Spesimen Uji Kekerasan dan Metalographic

3.8 Pengujian

3.8.1 Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian mekanik dilakukan untuk mengetahui sifat mekanik dari suatu bahan/material untuk menerima beban dan energi yang menimbulkan kerusakan dari material tersebut. Karna sifat mekanik merupakan suatu hal yang penting pada material untuk itu dilakukan beberapa pengujian mekanik diantaranya :

1. Pengujian Tarik

Uji tarik merupakan salah satu pengujian material untuk mengetahui kekuatan tarik dari material tersebut, dalam hal ini pengujian tarik untuk mengetahui kekuatan sambungan hasil pengelasan yang berupa nilai *ultimate* kekuatan tarik sambungan las, informasi dari uji tarik berupa grafik tegangan-regangan, dimana dari grafik ini digunakan untuk mengetahui titik *ultimate* dan titik *yield* pada material. Pengujian tarik dilakukan mengacu pada *American Society for Testing and Material* (ASTM E8) Material dibuat menjadi spesimen uji yang berstandar. Spesimen uji nantinya dipasang pada

mesin tarik dan ditarik ke arah memanjang secara perlahan sampai batang uji terputus. Selama penarikan energi yang diterima tercatat dalam bentuk grafik dan angka yang tersedia pada mesin tarik. Untuk mendapatkan informasi tegangan dari material dapat menggunakan persamaan 3.1 pada penelitian proses pengujian terdapat pada gambar 3.8 .

$$\text{Tegangan : } \sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

Di mana:

F = beban (kg)

A₀ = luas penampang (mm²)

Nilai regangan (pertambahan panjang) dapat di tuliskan dengan persamaan 3.2.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (3.2)$$

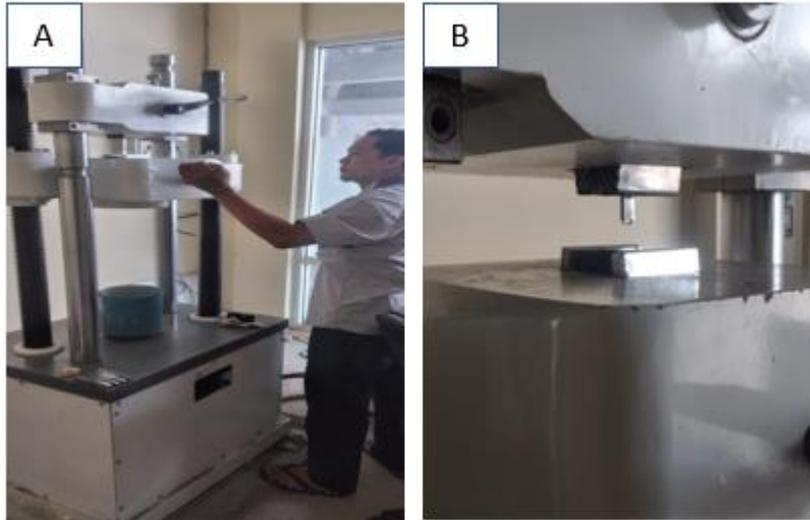
$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

Dimana :

ε = Regangan (%)

L₁ = Panjang Akhir (mm)

L₀ = Panjang Awal (mm)



Gambar 3.8 : Proses Pengujian Tarik (A) Proses pemasangan spesimen pada alat uji tarik (B) spesimen patah akibat beban tarik

2. Pengujian Bending

Pengujian bending merupakan salah satu pengujian untuk mengetahui kualitas dari suatu sambungan hasil pengelasan dengan cara memberikan pembebanan secara vertikal, sehingga benda kerja tertekuk diantara dua penyangga yang disetup tertentu mengikuti dimensi benda kerja. Benda kerja akan mengalami deformasi yang diakibatkan dua gaya yang bekerja berlawanan arah secara bersamaan. Pada tesis ini pengujian bending 3 titik dilakukan untuk mengetahui untuk mengetahui kekuatan permukaan las yang mengalami kekuatan tarik. Parameter pengujian bending dijelaskan pada tabel 3.3 mekanisme pengujian Face Bendign dapat dilihat pada Gambar 3.9.

Tabel 3.3 Parameter Pengujian Bending

Test Direction	Jarak Roll (A) mm		Roll Diamer (B) mm	Lebar Spesimen (C) mm	Last Bending Angel (o)
	Min	Max			
Face Bend	51.3	55.1	38.1	8.81	180

Dalam menentukan jarak roll dan besar roll yang digunakan pada pengujian bending dapat di ketahui menggunakan persamaan berikut :

$$A_{min} = D + (2 \times t) + 3 \quad (3.5)$$

$$A_{max} = D + 3 \times t \quad (3.6)$$

$$B = \frac{100 \times t}{E} - t \quad (3.7)$$

$$C = t + (0.1 \times D) \quad (3.8)$$

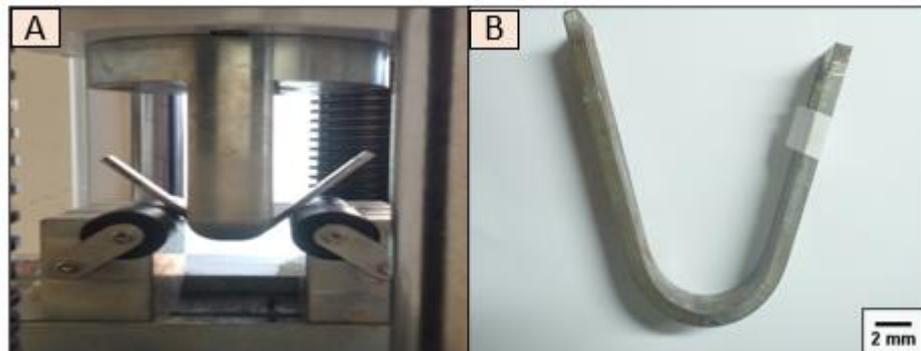
Dimana :

A : Jarak Roll

B : Diameter Roll bending

C : Lebar benda kerja

D : Diameter Pipa (untuk spesimen pipa A106)



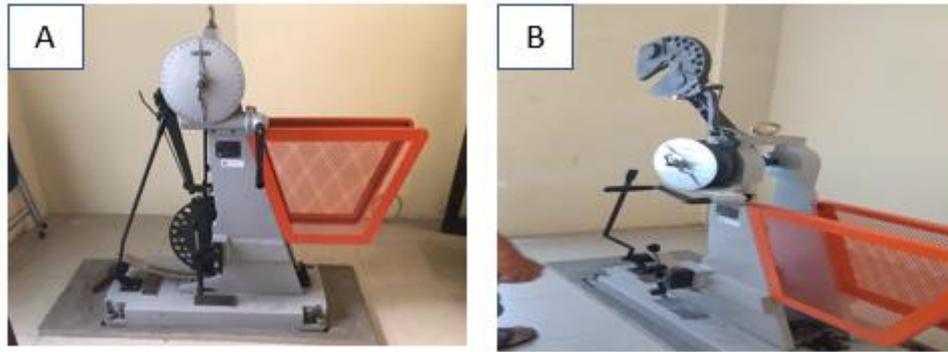
Gambar 3.9: Proses Pengujian Bending (A) Mekanisme face bending (B) Proses pengujian Face banding

3. Pengujian Impak

Pengujian impak merupakan salah satu uji mekanik untuk mendapatkan informasi mengenai karakteristik bahan seperti kemampuan bahan terhadap benturan dan karakteristik keuletan dari sambungan pengelasan akibat perubahan suhu yang diterima, pengujian impak menggunakan metode *Charpy* dengan menggunakan standar ASTM E23 dimana benda uji diletakkan dengan posisi mendatar berlawanan arah dengan takikan. Parameter pengujian impak pada tesis ini tertera pada Tabel 3.4. Nilai dari energi impak dapat diketahui menggunakan Persamaan 3.3. sedangkan proses pengujian dapat dilihat pada gambar 3.10.

Tabel 3.4 : Parameter pengujian Impak

P (mm)	t (mm)	H (mm)	α (°)	Lengan Pendulum (M)	Pendulum (kg)
55	7.50	8.15	140	0.75	21.869



Gambar 3.10 : Proses Pengujian Impack (A) Dimensi Mesin Uji Impak , (B) Proses penentuan sudut alpha

$$HI = E/A \quad (3.3)$$

Dimana :

HI = Nilai Impak (Joule/mm²)

E = Energi yang diserap (Joule)

A = Luasan Penampang dibawah takik (mm²)

4. Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan merupakan pengujian kemampuan suatu material untuk menahan beban identasi atau penetrasi (penekanan), nilai dari kekerasan suatu material dapat dinilai dari besaran beban yang diterima. Metode *vickers* dengan bentuk penekanan piramida, dipilih untuk mengambil nilai kekerasan dengan hasil *Vickers Hardness Number* (VHN), dapat dirumuskan dengan persamaan 3.4.

$$VHN = \frac{2F \left(\frac{\theta}{2}\right)}{L_2} \quad (3.4)$$

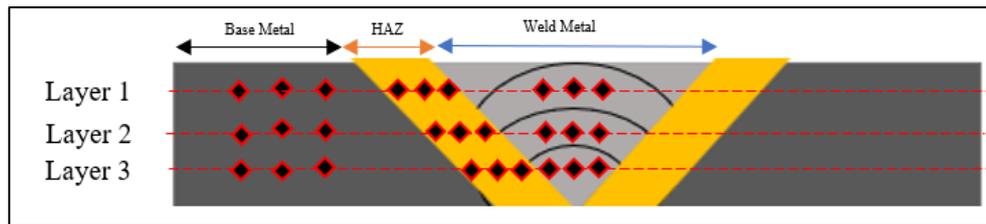
Dimana :

F = Beban (Kg)

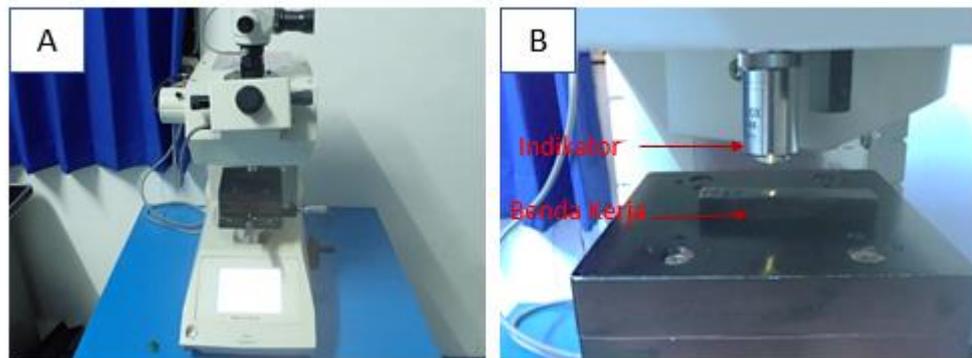
L = Panjang Diagonal Rata-rata (mm)

Θ = Sudut Piramida (136°)

Pengambilan nilai kekerasan dilakukan sebanyak 36 titik dengan dimensi pengujian mengikuti dimensi ASTM E23, pada setiap spesimen dengan masing-masing variasi, dengan mengikuti tempat pengambilan titik mikro hardness yang ditunjukkan pada gambar 3.12.



Gambar 3.11 : Posisi pengambilan nilai kekerasan



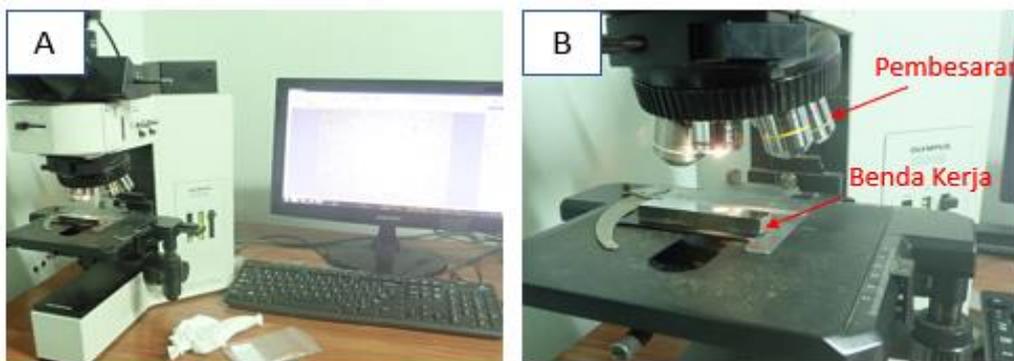
Gambar 3.12 : Proses Pengambilan data Kekerasan (A) Dimensi Mesin Uji Kekerasan *vickers*, (B) Posisi pengambilan nilai kekerasan.

3.8.2 Pengujian Mikro Struktur

Pengamatan mikro dilakukan untuk mengetahui perubahan struktur mikro yang terjadi akibat proses perlakuan panas serta laju pendinginan yang dialami oleh spesimen pasca pengelasan. Pengujian ini digunakan untuk mendapatkan bentuk struktur mikro dari spesimen pengelasan. Pengamatan akan dilakukan pada daerah *base metal* dan daerah HAZ dan *weld metal*. Dimensi pengujian struktur mikro mengikuti ASTM E23. Adapun langkah yang dilakukan dalam pengujian ini :

1. Grinding: spesimen dihaluskan menggunakan mesin grinding dengan kertas gosok SiC *Waterproof* grid 220 - 2000.

2. Polishing: spesimen uji dipoles dengan metal polishing dan kain bludru hingga permukaan material yang dipoles mengkilap tanpa goresan.
3. Spesimen di etsa menggunakan larutan dengan komposisi Alkohol 100 % 100 ml + HNO₃ 3 ml
4. Spesimen diamati struktur mikro dan fasa yang terjadi menggunakan mikroskop optis dengan perbesaran 100X, 500X, dan 1000X pada area yang sudah ditentukan .
5. Pengambilan gambar struktur mikro dilakukan menggunakan microscope olympus BX60M.



Gambar 3.13 : Proses Pengambilan Struktur Mikro (A) Setup microscope olympus dan (B) Posisi benda kerja dan pembesaran.

3.9 Analisa data hasil pengujian

Informasi yang didapatkan melalui pengujian mekanik dan mikrostruktur, yang berupa data kekuatan mekanik serta pengujian fisis kemudian dilakukan analisa yang bertujuan untuk mendapatkan informasi yang valid menggunakan desain eksperimen dengan melihat faktor yang berpengaruh dari hasil pengelasan dalam air, dengan pemodelan statistik yang dilakukan dengan bantuan software minitab 19, dari informasi yang didapat berbentuk grafik, nilai P_{value} dan nilai F_{hitung} yang digunakan sebagai acuan dalam mengambil keputusan tingkat pengaruh suatu faktor dalam pengelasan dan serta level terhadap hasil uji setiap variasi sesuai dengan desain eksperimen. Pada tabel 3.5 menjelaskan faktor dan level yang digunakan pada tesis yang nantinya dijalankan pada software minitab 19.

Tabel 3.5 Tabel Desain Eksperimen dengan

MATERIAL	Elektroda	Arus	Depth (m)	kode
Plat A36	E6013	90	3	A1
			10	A2
		120	3	B1
			10	B2
	E7018	90	3	C1
			10	C2
		120	3	D1
			10	D2
PIPA A106	E6013	90	3	E1
			10	E2
		120	3	F1
			10	F2
	E7018	90	3	G1
			10	G2
		120	3	H1
			10	H2

Data yang tersaji berupa perbandingan pengaruh antara faktor dan respon yang berupa distribusi, kekuatan tarik, kekuatan impak, dan kekerasan sedangkan struktur makro sebagai validasi dari respon, pengujian SEM dapat ditambahkan untuk mengetahui bentuk butiran hasil patahan uji tarik dan impak pada hasil patahan uji mekanik untuk mengetahui struktur yang terbentuk.

3.10 Pembahasan

Informasi dari analisa data selanjutnya grafik diberikan informasi mengenai pengaruh dari variabel terhadap respon yang dihasilkan , dan dijelaskan mengenai fenomena yang terjadi berdasarkan referensi dari dasar teori maupun penelitian terdahulu yang mendukung hasil dari penelitian serta menambah informasi dan validasi kesesuaian hasil.

3.11 Kesimpulan dan saran

Setelah melakukan analisis, maka dapat ditarik kesimpulan dari hasil pengujian yang telah dilakukan serta saran untuk penelitian berikutnya.

(Halaman sengaja dikosongkan)

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

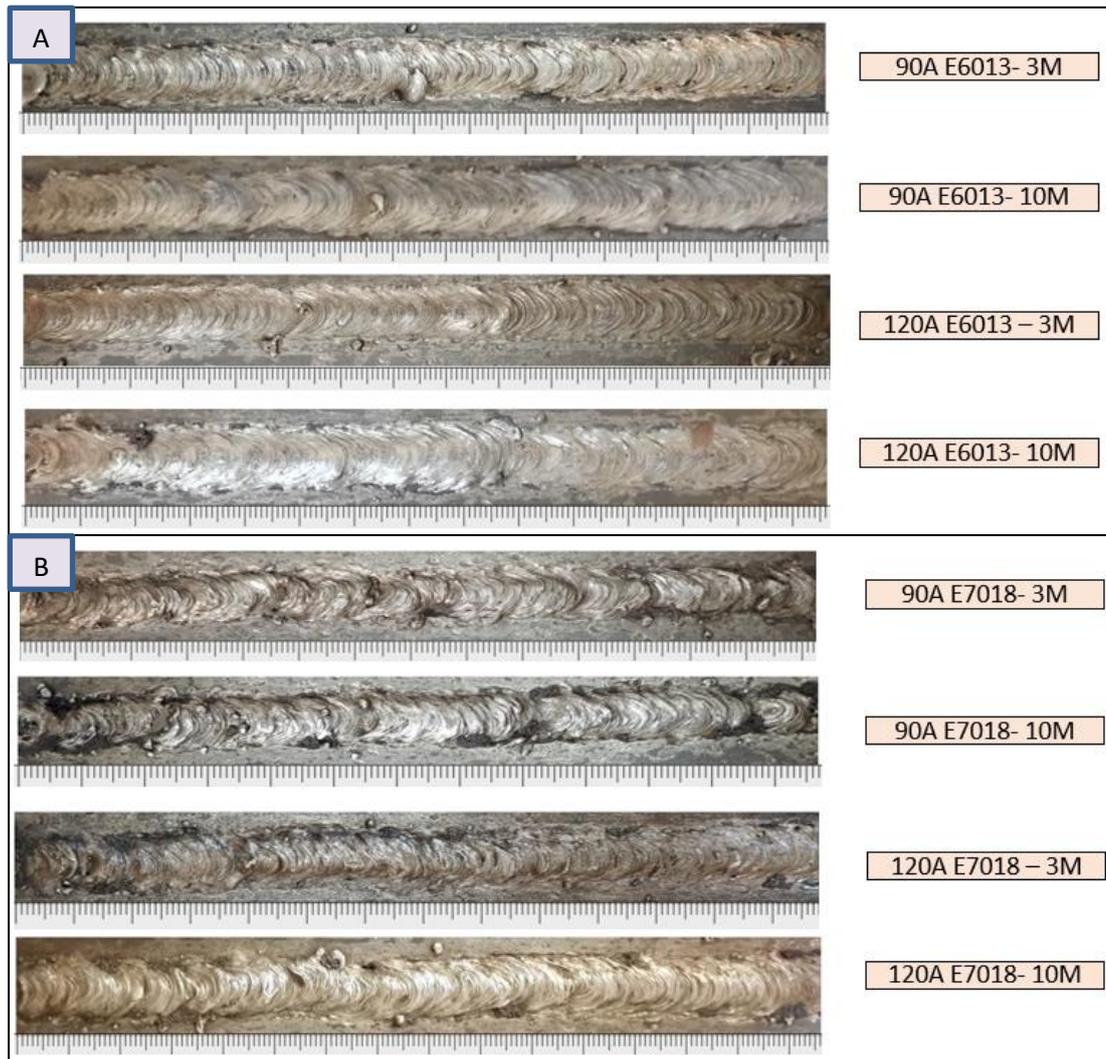
Dalam bab ini menjelaskan hasil dari penelitian beserta hepotesisnya yang akan dibahas pada bagian akhir, hasil dan pembahasan akan di bahas pada masing masing sub-bab hasil penelitian.

4.1 Analisa Visual Geometri *Weld metal*

4.1.1 Visual Surface *Weld metal*

Pengamatan visual pada geometri hasil sambungan las yang dilakukan dengan parameter pengelasan, dengan elektroda dan benda kerja yang telah ditentukan dengan hasil berikut :

A. Plat A106 :



B. Pipa A106 :



Gambar 4.1: Hasil pengelasan (A) Plat A36 dengan elektroda (a) E6013 kedalaman 3 M dan 10 M (b) E7018 kedalaman 3 M dan 10 M, (B) Pipa A106 (c) E6013 kedalaman 3 M dan 10 M (d) E7018 kedalaman 3 M dan 10 M.

Dari hasil pengamatan bentuk dan surface dari logam las menunjukkan bahwa sambungan Plat A36 dan Pipa A106 dengan menggunakan elektroda E6013 ditunjukkan gambar 4.1 (A) dan E7018 ditunjukkan gambar 4.1 (B) memiliki kesamaan bentuk dan lebar dikarenakan menggunakan parameter eksperimen yang sama. Pengamatan hasil pengelasan dengan elektroda E6013 terlihat alur yang lebih stabil dan lebih rapi dibandingkan elektroda E7018 dengan lebar hasil pengelasan yang kontinu baik pada plat A36 dan pipa A106 ditunjukkan pada gambar 4.1 (a dan c), sedangkan untuk elektroda E7018 ditunjukkan pada gambar 4.1 (b dan d) alur

pengelasan diskontinu dan lebar hasil lasan yang bervariasi, dari kedua elektroda yang digunakan dengan adanya perbedaan kedalaman proses pengelasan dari 3 meter ke dalam 10 meter hal ini menyebabkan terjadi cacat pengelasan seperti porositi, spatter dan undercut serta *imperfect shape* atau ketidak sempurnaan geometri sambungan las yang diakibatkan kurang stabil nyala dari busur las pada lingkungan air, dari hasil pengamatan visual di temukan beberapa cacat dari hasil pengelasan yang telah dirangkum pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 : Hasil analisa defect hasil pengelasan

Material	Arus	elektroda	depth	All defect material
Plat A36	90 A	E6013	3 Meter	Spartter
	120 A		10 Meter	
Plat A36	90 A	E7018	3 Meter	Undercut
	120 A		10 Meter	
Pipa A106	90 A	E6013	3 Meter	Inrreguler Surface
	120 A		10 Meter	
Pipa A106	90 A	E7018	3 Meter	Imperfect Shape
	120 A		10 Meter	

Dari tabel 4.1 munculnya cacat pada hasil pengelasan kemungkinan terjadi akibat arc shrinking dan laju pendinginan serta hilangnya energi panas selama proses pengelasan dengan bertambahnya kedalaman Hal ini di dukung dengan pernyataan peneliti sebelumnya yang menyatakan pengelasan dalam air akan memiliki cacat yang tinggi pada hasil pengelasannya.

4.2 Analisa Sifat Mekanik

Dalam melakukan pengujian mekanik hasil pengelasan terdapat beberapa kriteria yang harus dipenuhi menurut standar yang telah di sepakati dalam ASME maupun AWS, untuk proses pengelasan dalam air merujuk pada standar AWS D3.6 (tahun 2017). Sedangkan untuk standar minimum hasil pengujian mekanik mengikuti ASME Section IX 2019 standar kekuatan tarik minimum dapat dilihat pada tabel 4.2 dan untuk minimal kekuatan impak dan nilai kekerasan maksimal merujuk pada AWD D3.6 2017 yang dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.2 : QW/QB ASME IX 2019

Tabel QW / QB -422						
Grouping of Base metal for Qualification						
Speck. No	Desingnation, Type, or Grade	UNS No	Minimum Specified Tensile (Mpa)	P. No	Group No.	Product
A/SA - 36	-	-	400	1	1	Plate, bar & Shapes
A/SA - 106	B	K03006	415	1	1	Smls, Pipe

(Sumber : ASME Section IX 2019 Hal : 97)

Tabel 4.3 : 10.3 kriteria penerimaan Uji mekanik

Kriteria Penerimaan Uji mekanis Pengelasan dalam air			
Minimum Tarik logam dasar	Logam las		Maksimum
	Uji Impak Charpy V- Notch		Vickers
	Energy Rata Rata	Energy Minimum	HV10
> 485 MPa atau < 485 MPa	20 J	14 J	375 HV 10
	27 J	19 J	375 HV 10

(Sumber : AWS D3.6 2017 Hal : 83)

4.2.1 Analisa Pengujian Tarik

Setiap standar menyatakan hasil pengujian tarik dapat di katakan memenuhi kreteria apabila spesimen putus diluar daerah di luar logam las (*weld metal*), atau putus pada garis fusion, selain itu pengujian tarik dapat dikatakan memenuhi syarat jika kekuatan tarik sama dengan kekuatan tarik minimum dari logam dasar yang telah tercantum pada ASME atau pun AWS analisa yang di lakukan berfokus pada kekuatan tarik hasil pengelasan dengan elektroda tipe E6013 dan E7018 dengan kedalaman proses pengelasan yaitu kedalaman 3 meter dan 10 meter.

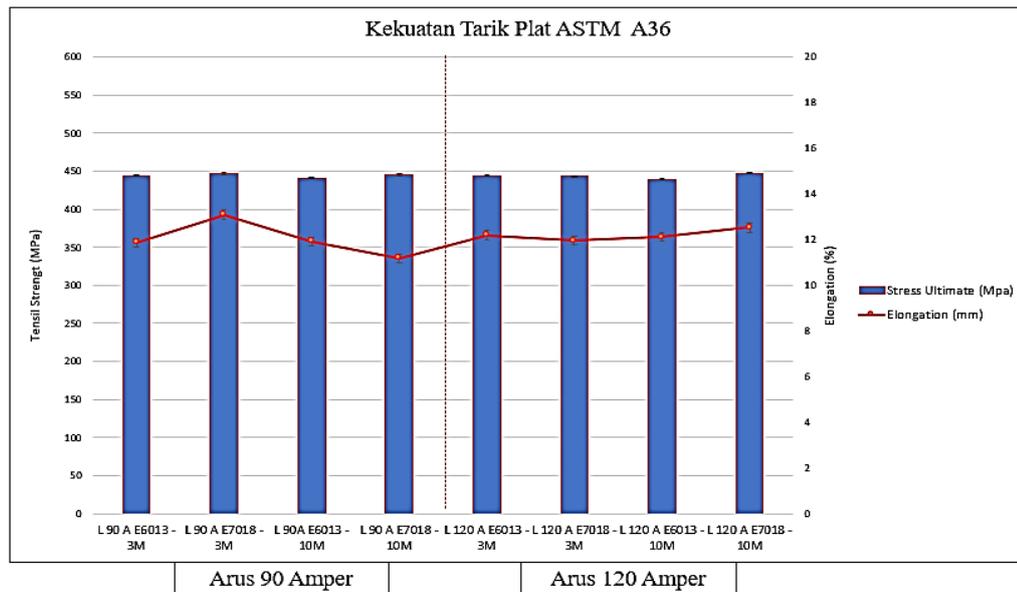
4.2.1.1 Pengujian Tarik Pada Plat A36

Hasil pengujian tarik menggunakan elektroda E6013 dan E7018 pada material plat A36 tertera pata tabel 4.4 :

Tabel 4.4 : Hasil rata rata pengujian tarik plat Plat ASTM A36 :

PLAT A36 - ELEKTRODA E6013					
Parameter	Stress Ultimate (MPa)	Yield Stress (MPa)	Modulus Young (MPa)	Elongation (mm)	Patahan
L 90 A E6013_3M	444	292.7	21.3	11.875	Base metal
L 90 A E6013_10M	441	265.6	21.1	11.915	Base metal
L 120 A E6013_3M	444	285.8	20.8	12.2	Base metal
L 120 A E6013_10M	416	287.6	26.0	9.12	Base metal
PLAT A36 - ELEKTRODA E7018					
Parameter	Stress Ultimate (MPa)	Yield Stress (MPa)	Modulus Young (MPa)	Elongation (mm)	Patahan
L 90 A E7018_3M	447	250.5	19.4	13.09	Base metal
L 90 A E7018_10M	404	287.3	22.2	11.18	Base metal
L 120 A E7018_3M	443	284.4	21.1	11.95	Base metal
L 120 A E7018_10M	447	283.6	20.4	12.52	Base metal

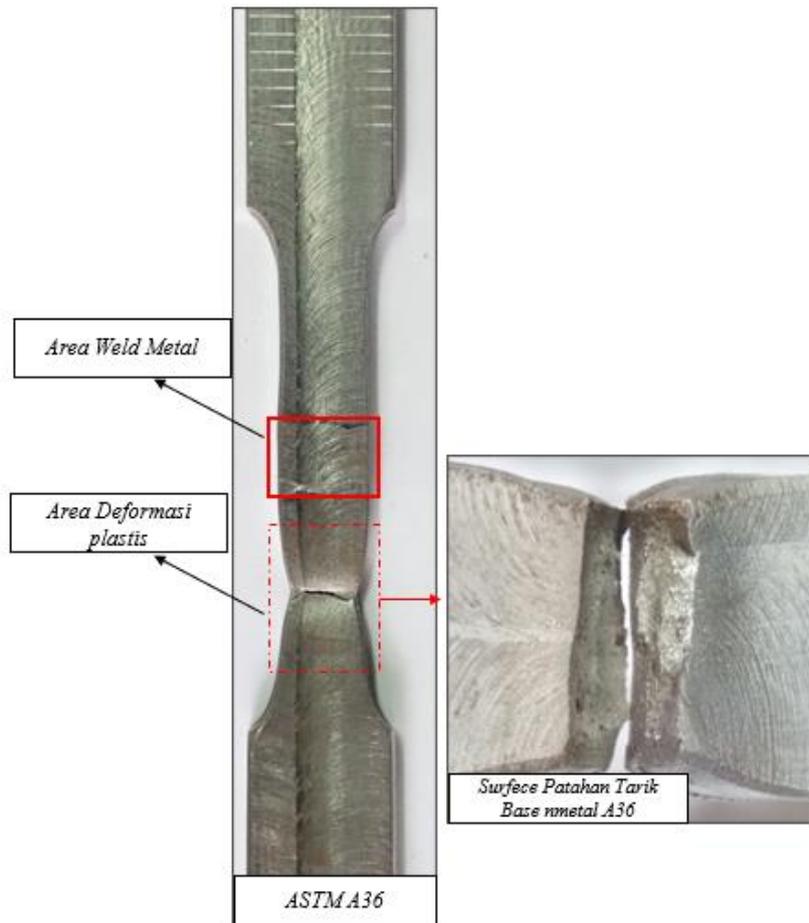
Dari tabel 4.4 dapat dibuat grafik hasil pengujian tarik menggunakan nilai Stress ultimate dan Elongation hasil sambungan menggunakan elektroda E6013 dan E7018 seperti berikut :



Gambar 4.2: Grafik kekuatan tarik dan elongation Plat A36 menggunakan elektroda E7018 dengan amper 90 A dan 120 A pada kedalaman 3 meter dan 10 meter.

Dari gambar 4.6 didapatkan bahwa kekuatan tarik dari masing masing hasil pengujian menggunakan elektroda E6013 dan E7018, di dapatkan kekuatan tarik dari mampu memenuhi standar minimum yang telah diizinkan oleh ASME Section IX yaitu sebesar 400 MPa dan hasil pengujian tarik mampu memenuhi standar tersebut dengan nilai rata- rata menggunakan elektroda E6013 \pm 442 MPa

dan menggunakan elektroda E7018 ± 446 baik dengan kedalaman pengelasan 3 meter dan 10 meter, Sehingga dapat dikatakan proses pengelasan dinyatakan berhasil mengingat tujuan dari proses pengelasan adalah membuat sambungan seperti logam dasar. Dalam pengujian spesimen mengalami patahan pada daerah logam dasar, patahan yang dialami setiap spesimen uji tarik dengan parameter yang telah dibuat data diilustrasikan pada gambar 4.7:



Gambar 4.3: Ilustrasi Pola patahan akibat beban tarik yang dialami Plat ASTM A36 dari sampel (120 Amper elektroda E6013 kedalaman 10 meter)

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa awal mula mulai patahan terdapat necking pada area logam dasar dimana ketika spesimen uji mendapatkan tegangan tarik spesimen akan mengalami pertambahan panjang (deformasi plastis) sebelum terjadinya patahan (putus akibat beban tarik) pada daerah yang mengalami necking.

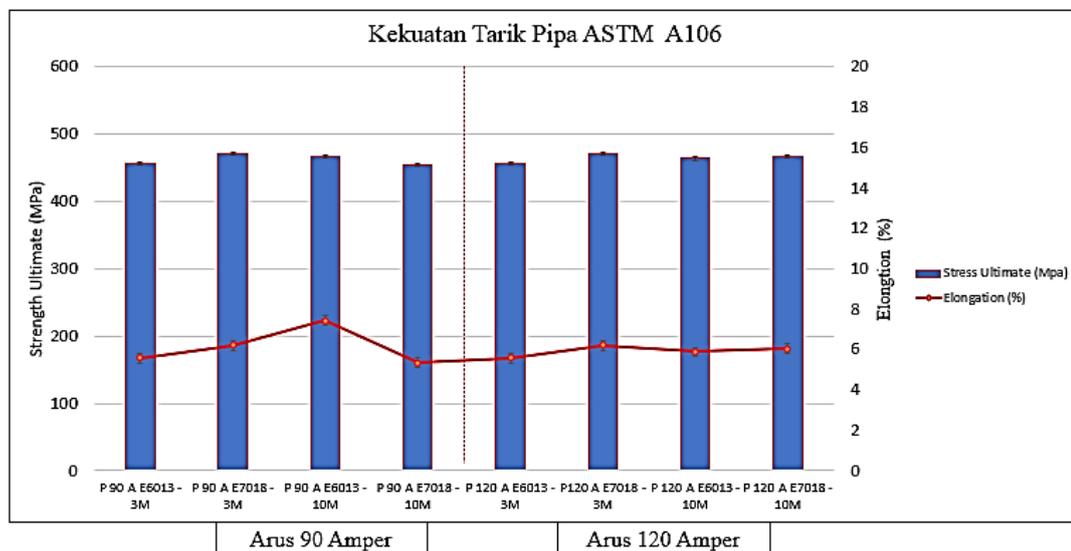
4.2.1.2 Pengujian Tarik Pada Pipa A106

Pengujian yang sama juga dilakukan pada material ASTM A106 dimana hasil pengujian tarik spesimen dapat dilihat pada tabel 4.4 dengan menggunakan parameter yang sama pada plat A36 :

Tabel 4.5 : Hasil rata rata pengujian Pipa ASTM A106 menggunakan :

Pipa A106 - ELEKTRODA E6013					
Parameter	Stress Ultimate (MPa)	Yield Stress (MPa)	Modulus Young (MPa)	Elongation (mm)	Patahan
P 90 A E6013_3M	507	385.9	57.1	5.055	Weld Metal
P 90 A E6013_10M	473	403.5	63.1	4.28	Weld Metal
P 120 A E6013_3M	542	446.4	53.7	5.76	Weld Metal
P 120 A E6013_10M	443	385.8	73.2	3.45	Weld Metal
Pipa A106 - ELEKTRODA E7018					
Parameter	Stress Ultimate (MPa)	Yield Stress (MPa)	Modulus Young (MPa)	Elongation (mm)	Patahan
P 90 A E7018_3M	497	250.5	19.4	4.405	Weld Metal
P 90 A E7018_10M	407	287.3	22.2	2.815	Weld Metal
P 120 A E7018_3M	576	284.4	21.1	7.33	Weld Metal
P 120 A E7018_10M	467	283.6	20.4	4.135	Weld Metal

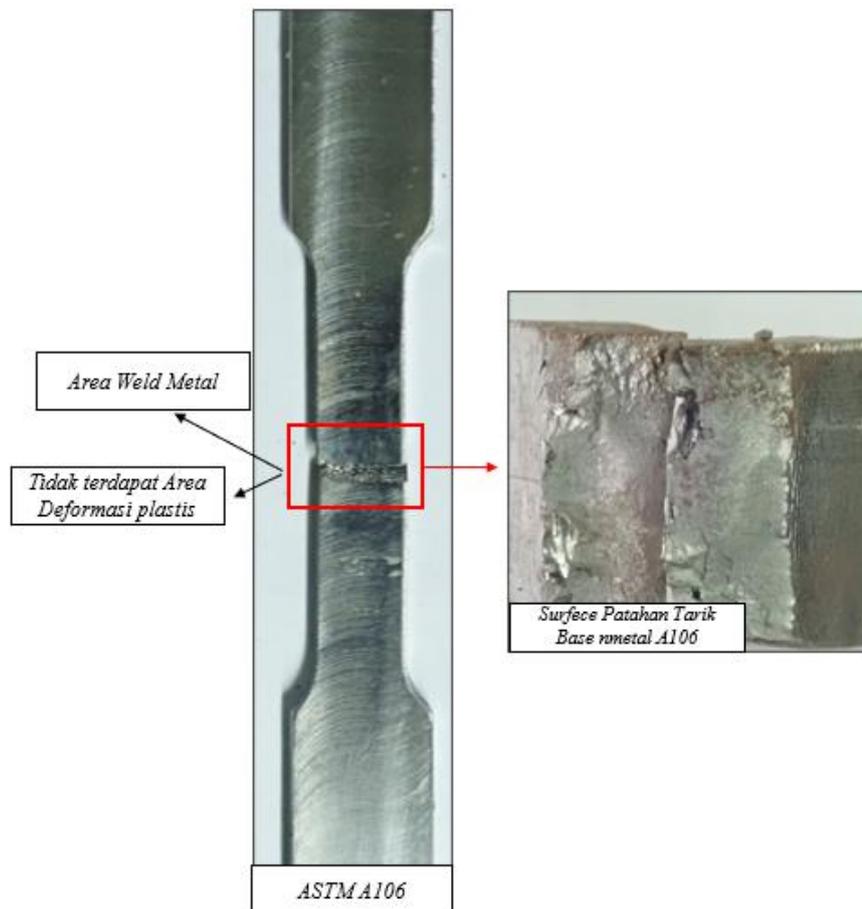
Dari Tabel 4.5 dibuat grafik hasil pengujian tarik, dari nilai Stress ultimate dan Yield Stress hasil sambungan menggunakan elektroda E6013 dan E7018 seperti berikut:



Gambar 4.4: Grafik kekuatan tarik dan regangan Pipa ASTM A106 menggunakan elektroda E6013 dan E7018 dengan amper 90 A dan 120 A pada kedalaman 3 meter dan 10 meter.

Dari gambar 4.8 dapat diketahui bahwa kekuatan tarik yang mampu di terima oleh sambungan dari pipa A106 adalah ± 491 MPa menggunakan elektroda E6013 dan \pm

487 MPa menggunakan elektroda E7018 nilai tersebut lebih besar dibandingkan dengan nilai minimum dari kekuatan tarik logam dasar, sehingga dapat di simpulkan bahwasanya pengelasan yang dilakukan berhasil. Proses patahan akibat uji tarik dari Spesimen A106 terjadi pada daerah logam las fraktur patahan dapat dilihat pada gambar 4.9 yang di ilustrasikan pada salah satu spesimen :

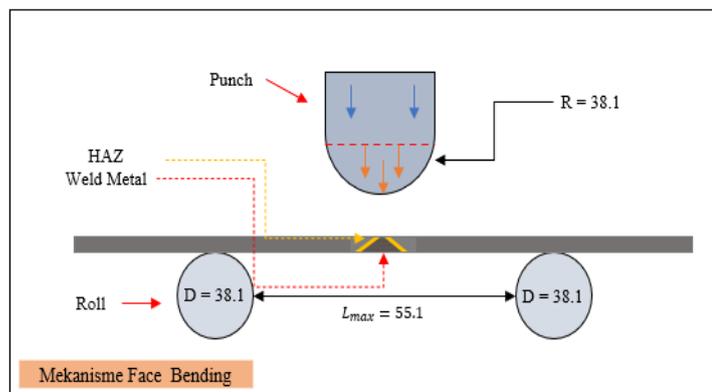


Gambar 4.5: : Ilustrasi Pola patahan akibat beban tarik yang dialami Pipa ASTM A106 dari sempel (120 Amper elektroda E6013 kedalaman 10 meter)

Berbeda dengan plat ASTM A36 patahan pada pipa ASTM A106 pada Gambar 4.9 menunjukkan patahan yang terjadi pada daerah logam las tidak mengalami necking sebelum patah, hal ini disebabkan oleh hilangnya sifat ulet dari material akibat proses pengelasan. Hal ini didukung dengan pernyataan penelitian sebelumnya yang menyatakan pengelasan dalam air akan merubah sifat dasar dari logam las (ulet).

4.3 Analisa Pengujian Bending

Pengujian bending yang dilakukan dilakukan pada bagian permukaan logam las atau juga biasa disebut sebagai metode face bending, metode face bending memberikan gaya tekan yang berada merambat dari pangkal material hingga permukaan material. Mekanisme pengujian face bending dapat dilihat pada Gambar 4.10. kreteria penerimaan pengujian bending Keretakan pada logam las atau HAZ maksimal 3 mm diukur dari segala arah pada permukaan cembung yang telah ditekuk mengikuti AWS D1.1 dengan metode face bending.



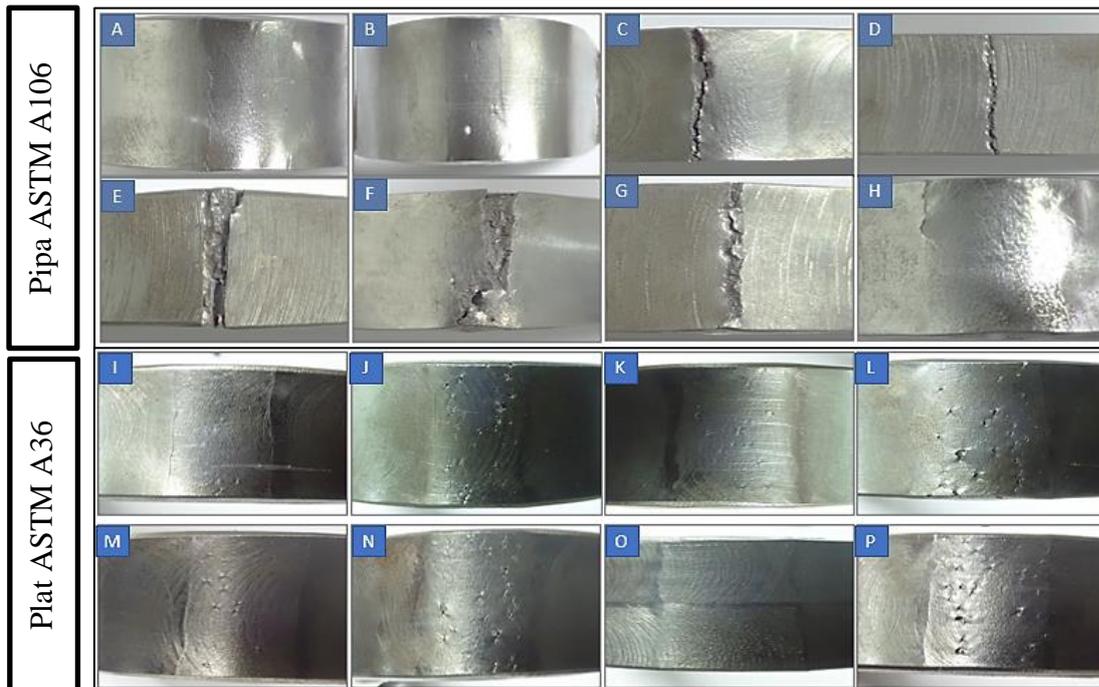
Gambar 4.6 : Mekanisme Pengujian Face Bending

Hasil pengujian face bending dapat di lihat pada tabel 4.6 dimana akan dilakukan pengecekan secara visual retakan yang timbul dari permukaan tekukan.:

Tabel 4.6 : Hasil rata rata pengujian Pipa ASTM A106 menggunakan :

Kode Pipa ASTM A106	PARAMETER	Sudut (o)	Pembeban (Kgf)	Kreteria
A	90 A E6013 3 M	180	500	Accept
B	90 A E7018 3 M	180	500	Accept
C	90 A E6013 10 M	-	500	Rejeck
D	90 A E7018 10 M	-	500	Rejeck
E	120 A E6013 3 M	-	500	Rejeck
F	120 A E7018 3 M	-	500	Rejeck
G	120 A E6013 10 M	-	500	Rejeck
H	120 A E7018 10 M	-	500	Rejeck
Kode Plat ASTM A36	PARAMETER	Sudut (o)	beban (Mpa)	Kriteria
I	90 A E6013 3 M	180	500	Acept
J	90 A E7018 3 M	180	500	Acept

K	90 A E6013 10 M	180	500	Acecept
L	90 A E7018 10 M	-	500	Rejeck
M	120 A E6013 3 M	180	500	Acecept
N	120 A E7018 3 M	-	500	Rejeck
O	120 A E6013 10 M	180	500	Acecept
P	120 A E7018 10 M	-	500	Rijeck



Gambar 4.7 : Hasil pengujian face bending pada matrial Plat ASTM A36 dan Pipa ASTM A106 dengan kreteria penolakan lebar retak lebih dari 3 mm dapa permukaan lengkung Spesimen.

Dari gambar 4.11 diketahui bahwa hasil pengelasan pada pipa ASTM A106 dan plat ASTM A36 mengalami perubahan bentuk akibat beban bending pada permukaan logam las, pengujian face bending bertujuan untuk melihat elastisitas dari sambungan logam las, dimana pada gambar 4.11 (C,D,E,F, dan G) untuk material pipa ASTM A106 , mengalami penolakan jika mengikuti AWS D1.1 dengan metode face bending. Patahan akibat beban bending yang diterima pipa ASTM A106 diakibatkan hasil sambungan yang diinisiasi retak dari cacat undercut dan porositi pada daerah lasan, yang merambat hingga menimbulkan patahan seluruh permukaan logam las maupun HAZ, selain itu patahan pada pipa ASTM A106 karna adanya ketidak sempurnaan proses pengelasan dan sifat mampu las pada material. Hal ini harus diperhatikan karna akan berhubungan dengan

pembentukan metalurgi pada daerah HAZ yang cenderung rapuh. Sedangkan untuk material plat ASTM A36 (L, N dan P) untuk material plat ASTM A36, hanya mengalami inisiasi retak pada daerah logam las yang diakibatkan cacat porositas yang merambat ke cacat lainnya yang membentuk lebar lebih dari 3 mm pada permukaan logam.

4.4 Analisa Pengujian Impak

Analisa pengujian impak dilakukan untuk mengetahui ketanguhan hasil sambungan dari hasil pengelasan dalam air, untuk setiap parameter pengelasan yang dilakukan telah ditentukan. Analisa yang dilakukan pada pengujian ini meliputi analisa tahanan dan energi yang mampu diterima oleh logam las akibat pembebanan secara tiba – tiba. Kriteria besaran pembebanan impak yang dapat diizinkan mengacu pada ASME Section IX dan AWS D3.6 yaitu sebesar 20 Joule untuk rata rata dan 27 Joule untuk perspesimen untuk sambungan dalam air hasil pengujianimpak dapat di lihat pada tabel berikut :

4.4.1 Pengujian Impak pada Plat A36

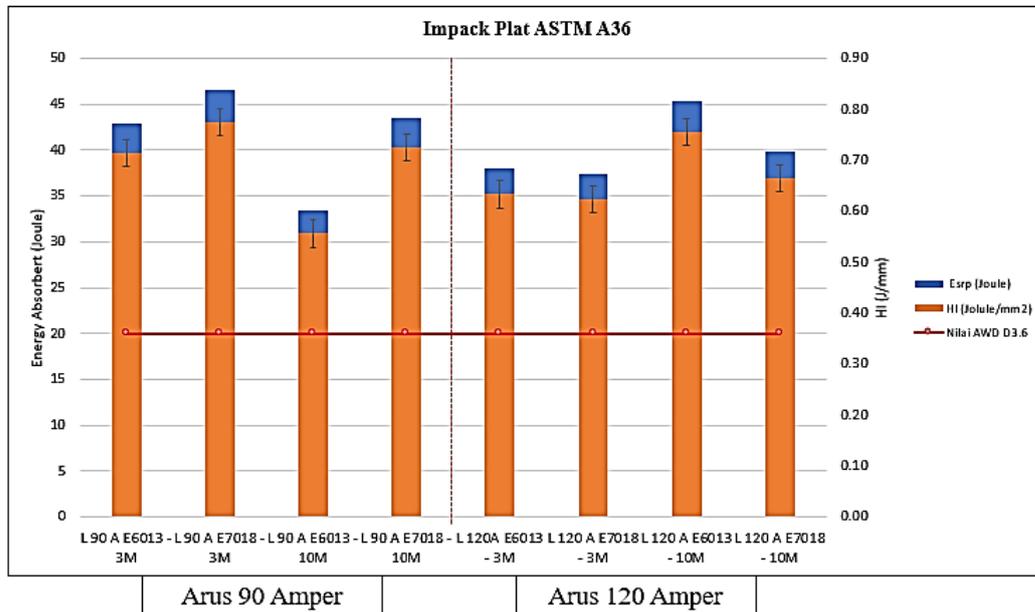
Hasil pengujian Impak untuk material plat A36 hasil pengujian impak menggunakan variasi pengelasan dapat di lihat pada tabel 4.7 sebagai berikut :

Tabel 4.7 : Rata rata Energi impak yang diterima oleh material plat ASTM A36 :

HASIL IMPAK PLAT ASTM A36			
SPESEMEN	Esrp (Joule)	HI (Jolule/mm2	Patahan
L 90E6013_3M	42.88	0.71	Weld metal
L 90E6013_10M	33.37	0.56	Weld metal
L 120E6013_3M	37.99	0.63	Weld metal
L 120E6013_10M	45.28	0.75	Weld metal
HASIL IMPAK PLAT ASTM A36			
SPESEMEN	Esrp (Joule)	HI (Jolule/mm2	Tipe Patahan
L 90E708_3M	46.49	0.77	Weld metal
L 90E7018_10M	43.45	0.72	Weld metal
L 120E7018_3M	37.40	0.62	Weld metal
L 120E7018_10M	39.88	0.66	Weld metal

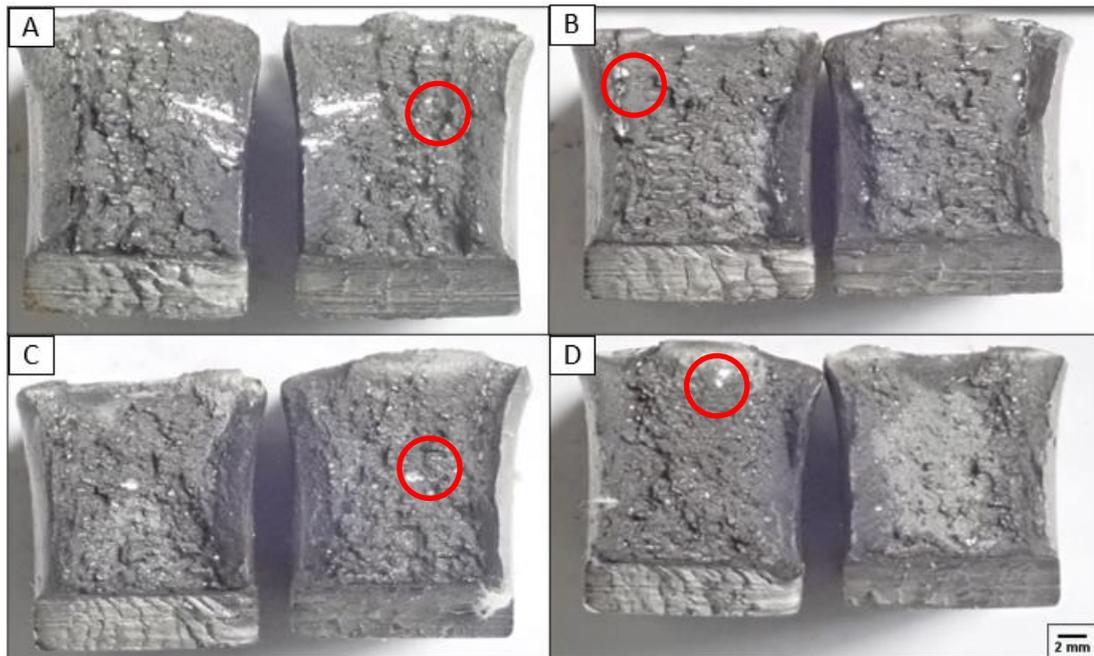
Berdasarkan Tabel 4.7 perbandingan kekuatan impak hasil pengalsan material plat A36 menggunakan elektroda E6013 terdapat pada Gambar 4.12 Grafik

perbandingan energi yang mampu di serap dengan parameter pengelasan amper 90 A dan 120 A dan kedalaman 3 meter dan 10 meter.



Gambar 4.8 : Grafik visual data perbandingan kekuatan impak plat ASTM A36 menggunakan elektroda E6013 dan E7018 dengan amper 90 A dan 120 A pada kedalaman 3 meter dan 10 meter dengan standar AWS D3.6.

Energi impak yang mampu diserap oleh spesimen tidak seragam akibat variabel pengelasan dan lingkungan, fokus pengujian impak terletak pada hasil sambungan atau logam las, rerata sambungan mampu menahan beban impak dengan nilai minimal yang diizinkan oleh AWS D3.6 2017, hasil pengujian impak menggunakan elektroda E6013 didapatkan energi yang mampu diserap sebesar ± 37.91 Joule, sedangkan untuk elektroda E7018 sebesar ± 41.81 Joule, Patahan yang dihasil membentuk patahan dengan serat dan terdapat void kecil akibat terjebaknya udara didalam logam las, selain itu terdapat perbedaan warna antara sisi luar dan dalam yang ini diidentifikasi akibat dari perbedaan pendinginan yang terjadi pada proses pengelasan, hasil patahan pengujian impak diilustrasikan pada gambar 4.12 berikut :



Gambar 4.9 : Ilustrasi patahan impact yang di alami plat ASTM A36, (A) 90 A elektroda E6013 kedalaman 3 meter, (B). 120 A elektroda E6013 kedalaman 10 meter : (A) 90 A elektroda E7018 kedalaman 3 meter, (B). 120 A elektroda E7018 kedalaman 10 meter.

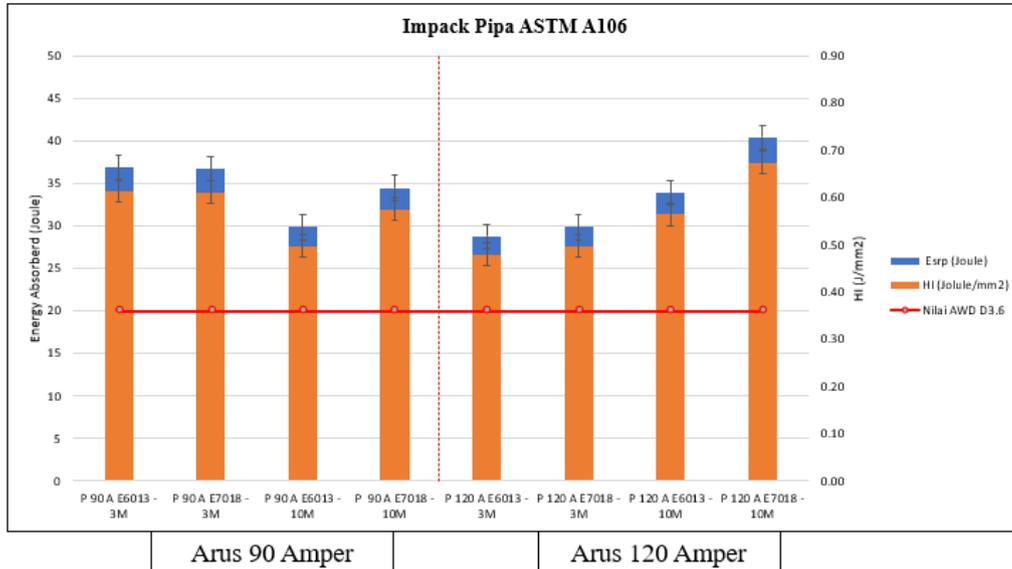
4.4.2 Pengujian Impact pada Pipa A106

Pengujian impact juga dilakukan pada material pipa ASTM A106 dengan parameter pengelasan yang sama, dengan menggunakan 2 tipe elektroda yaotu E6013 dan E7018, dari hasil pengamatan dapat di lihat pada Tabel 4.8:

Tabel 4.8 : Data Energi impact yang mamu diterima oleh material Pipa A106

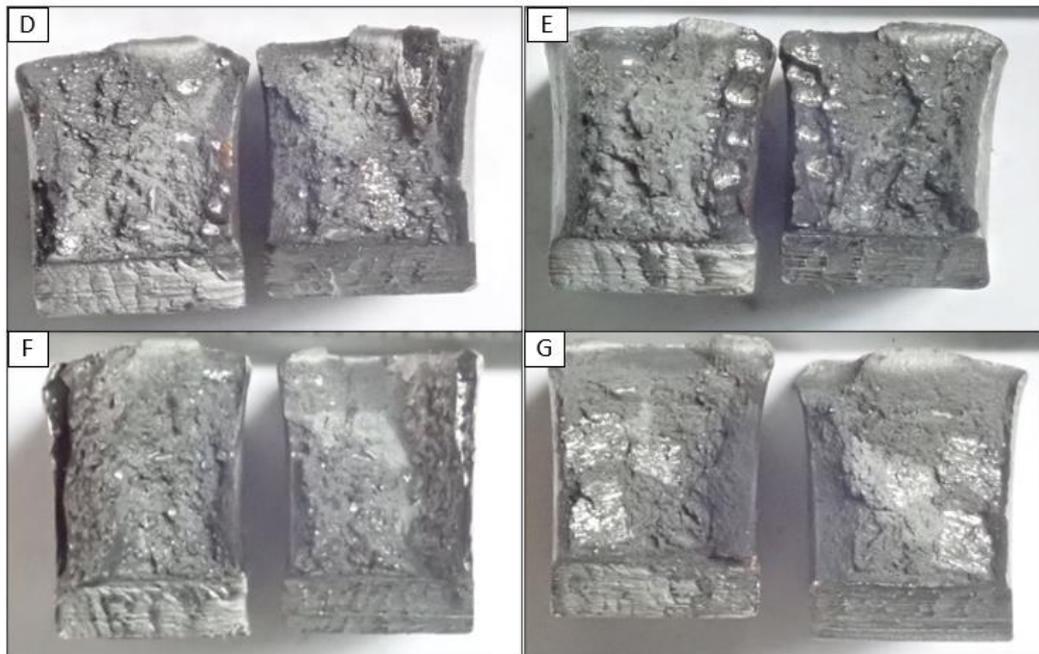
HASIL IMPAK PIPA ASTM A106			
SPESIMEN	E _{sp} (Joule)	HI (Jolule/mm ²)	Patahan
P 90E6013_3M	36.81	0.61	Weld metal
P90E6013_10M	29.84	0.50	Weld metal
P120E6013_3M	28.77	0.48	Weld metal
P120E6013_10M	33.87	0.56	Weld metal
HASIL IMPAK PIPA ASTM A106			
SPESIMEN	E _{sp} (Joule)	HI (Jolule/mm ²)	Patahan
P 90E708_3M	36.69	0.61	Weld metal
P 90E7018_10M	34.46	0.57	Weld metal
P 120E7018_3M	29.82	0.50	Weld metal
P 120E7018_10M	40.39	0.67	Weld metal

Dari tabel 4.7 dibuat grafik visual data perbandingan antara hasil impact dengan nilai minimal yang di izinkan oleh AWS.



Gambar 4.10 : Grafik visual data perbandingan kekuatan impact pipa ASTM A106 menggunakan elektroda E6013 dan E7018 dengan amper 90 A dan 120 A pada kedalaman 3 meter dan 10 meter dengan standar AWS D3.6.

Merujuk dari AWS D3.6, dengan kekuatan impact yang diizinkan minimal sebesar 20 Joule untuk rata rata dan 27 Joule perspesimen, didapatkan bahwa hasil sambungan pengelasan menggunakan elektroda E6013 dan E7018, mampu memenuhi standar minimal yang diizinkan. Dengan fraktur patahan hampir mirip dengan yang di alami oleh Plat ASTM A36, namun pada prosesnya material dengan tipe ini memiliki kedala tersendiri dari proses pengelasannya. Sehingga banyak terdapat cacat leak of fusion. Seperti patahan yang diilustrasikan pada gambar 4.15 :

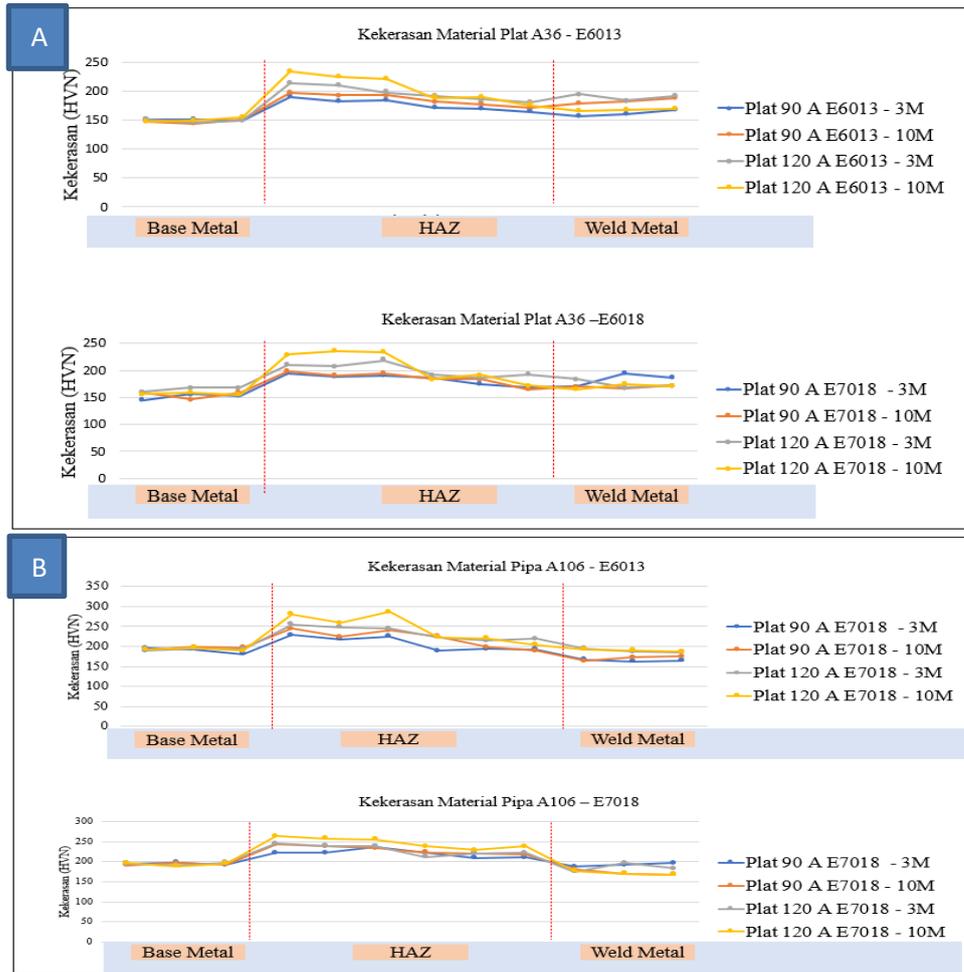


Gambar 4.11 : Ilustrasi patahan impak yang di alami pipa ASTM A106, (A) 90 A elektroda E6013 kedalaman 3 meter, (B). 120 A elektroda E6013 kedalaman 10 meter : (A) 90 A elektroda E7018 kedalaman 3 meter, (B). 120 A elektroda E7018 kedalaman 10 meter.

4.3 Analisa Pengujian Kekerasan

Pengujian kekekrasan dilakukan untuk mengetahui pengaruh pengelasan terhadap perubahan nilai kekerasan dan menentukan apakah material mengalami perubahan struktur akibat proses pengelasan. Pengambilan nilai kekerasan dilakukan sebanyak 40 kali dengan pengambilan data kekerasan sebesar 1 indentan.

Grafik hasil pengujian kekerasan akan ditampilkan pada gambar 4.12, dimana gambar menjelaskan alur sebaran kekerasan pada setiap titik dengan variabel pengelasan yang diberikan, hasil pengujian kekerasan disajikan pada tabel. Tabel 4.9 didapatkan nilai kekerasan terdapat perubahan nilai kekerasan terjadi area yang terpapar panas (HAZ) perubahan tersebut terjadi akibat adanya perubahan ukuran butir dan dominasi Artikular Ferit (AF) dan Grain bondary Ferrite (GBF) pada area tersebut yang menyebabkan tingkat kekerasan yang tinggi, penggunaan metode pengelasan yang di lakukan mampu mengurangi nilai kekerasan dari HAZ sesuai dengan yang di izinkan oleh AWS D3.6 375 HV 10.



Gambar 4.12 : Grafik Hasil pengujian nilai kekerasan pada baja karbon dengan parameter pengelasan, (A) *Trend line* kekerasan pada material A36 dan (B) *Trend line* kekerasan pada material A106.

Tabel 4.9 : Data Nilai Kekerasan pada material dengan parameter pengelasan.

Data hardness (vickers) Plate A36 - E6013												
Parameter Pengelasan	Base metal (Hv)					Haz (Hv)				Weld Metal (Hv)		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	Titik 7	Titik 8	Titik 9	Titik 10	Titik 11	Titik 12
Plat 90 A E6013 - 3M	151	151	149	191	183	185	171	169	165	157	161	168
Plat 90 A E6013 - 10M	148	144	152	197	193	193	182	178	172	179	183	188
Plat 120 A E6013 - 3M	152	146	149	215	210	198	192	186	181	195	184	192
Plat 120 A E6013 - 10M	148	150	155	235	225	222	189	190	176	166	168	169

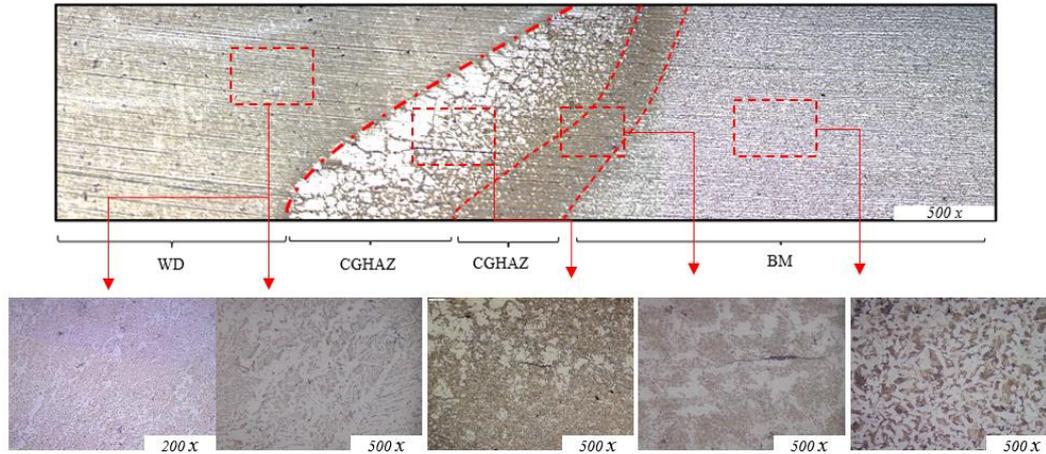
Data hardness (vickers) Plate A36 - E7018												
Parameter Pengelasan	Base metal (Hv)					Haz (Hv)				Weld Metal (Hv)		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	Titik 7	Titik 8	Titik 9	Titik 10	Titik 11	Titik 12
Plat 90 A E7018 - 3M	145	156	152	195	189	191	187	174	169	170	195	186
Plat 90 A E7018 - 10M	159	146	159	198	191	195	185	184	165	170	167	172
Plat 120 A E7018 - 3M	161	168	168	210	208	219	192	187	193	184	168	173
Plat 120 A E7018 - 10M	156	159	154	229	236	233	184	192	173	164	175	171

Data hardness (vickers) Pipa A106 - E6013												
Parameter Pengelasan	Base metal (Hv)					Haz (Hv)				Weld Metal (Hv)		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	Titik 7	Titik 8	Titik 9	Titik 10	Titik 11	Titik 12
	Plat 90 A E7018 - 3M	196	192	181	228	218	225	189	194	192	167	162
Plat 90 A E7018 - 10M	191	198	197	245	224	240	225	198	189	164	173	175
Plat 120 A E7018 - 3M	189	194	192	255	248	245	223	214	219	195	187	186
Plat 120 A E7018 - 10M	192	197	189	281	259	286	223	220	204	193	190	187

Data hardness (vickers) Pipa A106 - E7018												
Parameter Pengelasan	Base metal (Hv)					Haz (Hv)				Weld Metal (Hv)		
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	Titik 6	Titik 7	Titik 8	Titik 9	Titik 10	Titik 11	Titik 12
	Plat 90 A E7018 - 3M	196	198	193	223	222	237	222	210	211	188	193
Plat 90 A E7018 - 10M	191	197	194	243	238	235	224	221	218	181	171	168
Plat 120 A E7018 - 3M	195	191	198	245	240	239	212	221	223	175	197	183
Plat 120 A E7018 - 10M	197	189	196	264	258	256	238	229	238	177	171	168

4.5 Pengujian Mikrostruktur

Hasil pengamatan struktur mikro di tunjukkan pada Gambar 4.16 gambar di ambil dengan pembesaran 500 x, 1000 x dan 5000 x, pada area yang sama, perbedaan yang di amati untuk spesimen Baja A106 menggunakan elektroda E6013 dan A36 menggunakan elektroda E7018, dengan komposisi kimia yang berbeda, pengelasan didalam air dilakukan pada lingkungan yang tidak ideal karna akan meningkatkan laju pendinginan yang disebabkan oleh air, pengelasan dalam air juga memiliki area HAZ dimana pada pengelasan dalam air terbentuk struktur yang kompleks pada area HAZ, gambar 4.17 dari sambungan las yang dipengaruhi oleh laju pendinginan. dari kedua material plat ASTM A36 dan pipa ASTM A106 tersebut menunjukkan struktur yang sama, merujuk dari penelitian terdahulu struktur khas dari pengelasan dalam air terutama pada daerah HAZ memiliki butiran yang kasar dan diidentifikasi sebagai martensit dan terdapat juga strukr bainit yang terbentuk akibat pendingina yang cepat, ditunjukkan pada Gambar 4.17, pembentukan hasil logam las dari kedua spesimen terbentuk oleh dentrit dan dominasi Artikular Ferit (AF) dan Grain bondary Ferrite (GBF). Struktur dasar dari dari material A106 dan A60 ferit dan perlit lingkungan air juga membuat laju pendingina pada area pengelasan area sekitar FGHAZ dan CGHAZ akan mengalami perubahan ukuran butir menjadi lebih halus dan kecil dari bentuk awalnya yang menyebabkan terjadinya perubahan kekerasan pada material.



Gambar 4.13 : Hasil mikro struktur perubahan butir akibat pengelasan..

4.6 Pengujian Anova

Setelah melakukan beberapa pengujian mekanik terhadap hasil pengelasan dalam air, dengan beberapa variabel pengelasan, di dapatkan beberapa hasil seperti hasil kekuatan tarik, kekuatan impak dan kekerasan pada material. Selanjutnya dilakukan pengujian faktor (variabel) terhadap respon yaitu kekuatan mekanik yang di dapatkan dari hasil pengujian mekanik, untuk mengetahui faktor apa saja yang paling berpengaruh signifikan terhadap respon pengujian dari faktor tersebut adalah pengujian *analysis of variance* (ANOVA). Anova merupakan pengujian hepotesa awal (H_0) dan hipotesa alternatif (H_1), dengan kriteria penolakan yang dapat di hitung secara manual maupun menggunakan bantuan software minitab. Hipotesa untuk penelitian sebagai berikut :

- a. Hipotesis pengujian Tarik dan Impak :

$$H_0 = \tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = \tau_4 = 0 \quad (\text{Tidak Berpengaruh})$$

$$H_1 = \tau_1 \neq 0 \quad (\text{Berpengaruh})$$

- b. Hipotesis pengujian kekerasan :

$$H_0 = \text{Semua Nilai kekerasan sama} \quad (\text{Tidak Ada Pengaruh Variabel})$$

$$H_1 = \text{Ada Perbedaan dari nilai kekerasan} \quad (\text{Ada Pengaruh Variabel})$$

Hipotesa alternatif menjelaskan bahwa faktor yang tidak berpengaruh dari hasil pengujian mekanik. Adapun kriteria penolakan dimana H_0 ditolak dalam penelitian ini menggunakan nilai P-value $< \alpha_s$, dimana nilai $\alpha_s = 0.05$ yang berarti parameter mempunyai pengaruh terhadap hasil atau respon. Gambar 4.19

menunjukkan salah satu hasil uji anova pada respon pengujian tarik dengan menggunakan minitab 20, pada pengujian minitab nilai P-value yang di gunakan sebagai acuan sebagai acuan faktor paling berpengaruh.

Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	3695.01	527.86	775.55	0.000
Linear	3	1222.83	407.61	598.87	0.000
Amper	1	70.14	70.14	103.05	0.000
Elektroda	1	8.56	8.56	12.57	0.008
Depth	1	1144.13	1144.13	1681.00	0.000
2-Way Interactions	3	1227.86	409.29	601.34	0.000
Amper*Elektroda	1	1120.58	1120.58	1646.39	0.000
Amper*Depth	1	97.52	97.52	143.27	0.000
Elektroda*Depth	1	9.77	9.77	14.35	0.005
3-Way Interactions	1	1244.33	1244.33	1828.21	0.000
Amper*Elektroda*Depth	1	1244.33	1244.33	1828.21	0.000
Error	8	5.44	0.68		
Total	15	3700.45			

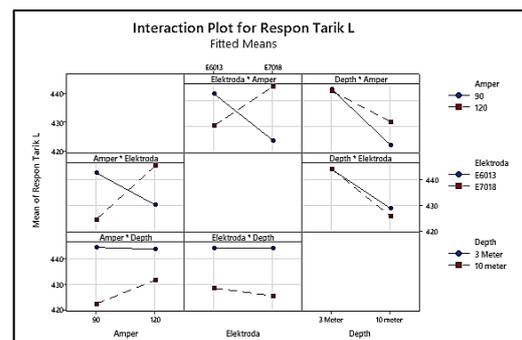
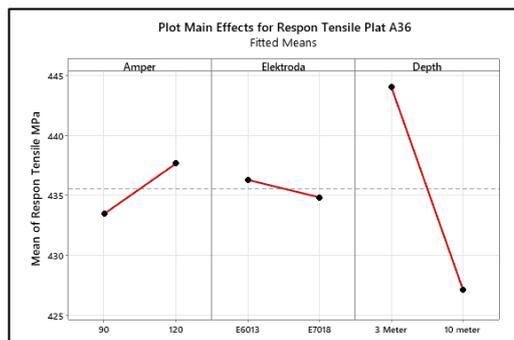
Gambar 4.20 : Hasil Uji Anova dengan Minitab 20.

Rangkuman hasil uji Anova terhadap hasil pengujian mekanik ditunjukkan pada pada sub-bab masing masing dari material antara faktor yang berpengaruh terhadap respon pada material antara pipa A106 dan plat A36.

4.3.1 Analisa Anova pada Material Plat A36

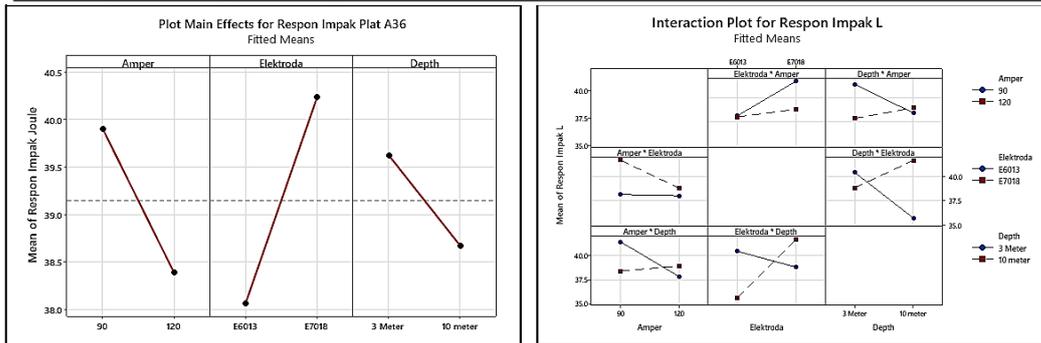
a. Hasil Uji Anova Pada Kekuatan Tarik

No	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	Arus	Kekuatan Tarik	0.000	0.05	Gagal Tolak H_0
2	Elektroda		0.008	0.05	Gagal Tolak H_0
3	Depth		0.000	0.05	Gagal Tolak H_0



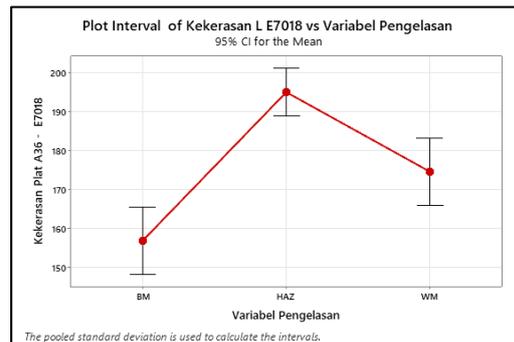
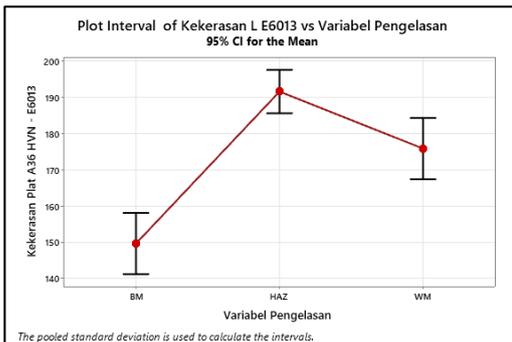
b. Hasil Uji Anova Pada Kekuatan Impak

No	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	Arus	Kekuatan Impak	0.383	0.05	Tolak H_0
2	Elektroda		0.221	0.05	Tolak H_0
3	Depth		0.578	0.05	Tolak H_0



c. Hasil Uji Anova Pada Kekerasan

No	Tipe Elektroda	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	E6013	Variabel Pengelasan	Kekerasan	0.000	0.05	Gagal Tolak H_0
2	E7018	Variabel Pengelasan	Kekerasan	0.000	0.05	Gagal Tolak H_0

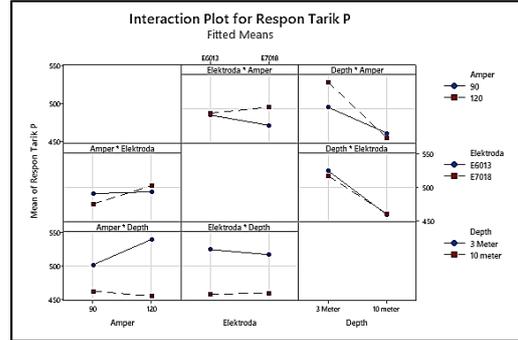


Dari hasil anova yang dilakukan pada material ASTM A36 didapatkan tidak ada pengaruh yang signifikan terhadap pengujian tarik dari arus, elektroda dan kedalaman proses pengelasan terhadap hasil pengujian tarik, untuk hasil pengujian impak dipengaruhi variabel pengelasan secara signifikan terhadap energi impak yang mampu diterima oleh permukaan spesimen.

4.3.2 Analisa Anova pada Material Pipa A106

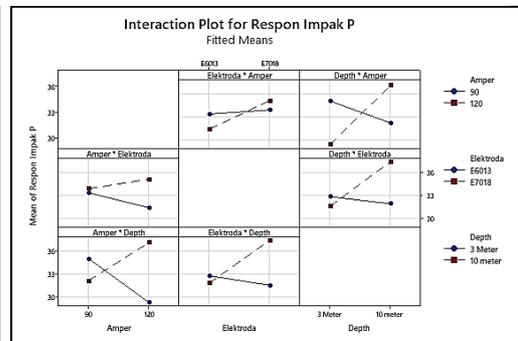
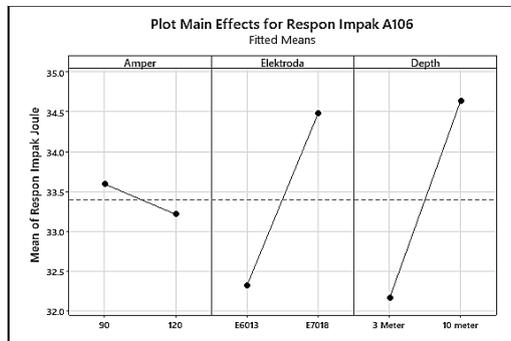
a. Hasil Uji Anova Pada Kekuatan Tarik

No	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	Arus	Kekuatan Impak	0.670	0.05	Gagal menolak H_0
2	Elektroda		0.035	0.05	Gagal menolak H_0
3	Depth		0.020	0.05	Gagal menolak H_0



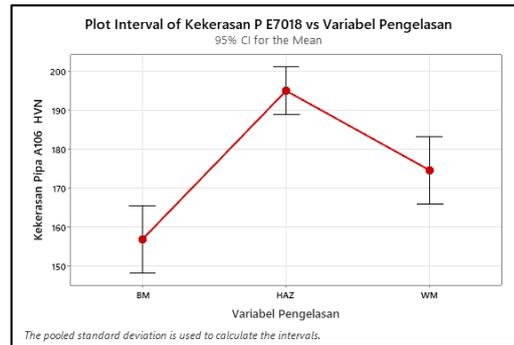
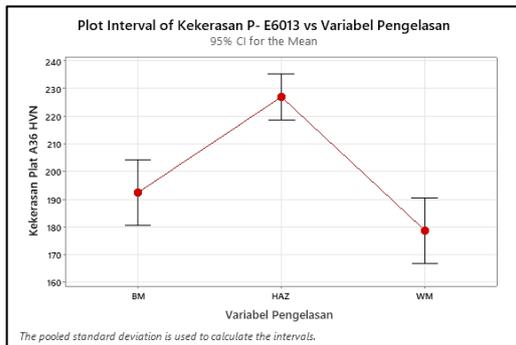
b. Hasil Uji Anova Pada Kekuatan Impak

No	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	Arus	Kekuatan Impak	0.383	0.05	Gagal Tolak H_0
2	Elektroda		0.221	0.05	Gagal Tolak H_0
3	Depth		0.578	0.05	Gagal Tolak H_0



c. Hasil Uji Anova Pada Kekerasan

No	Type Elektroda	Faktor	Respon	P-value	α	Keputusan
1	E6013	Variabel Pengelasan	Kekerasan	0.000	0.05	Tolak H_0
2	E7018	Variabel Pengelasan	Kekerasan	0.000	0.05	Tolak H_0



Dari hasil pengujian anova yang dilakukan pada pipa ASTM A106 didapatkan variabel yang mempengaruhi pengujian tarik dari spesimen pipa A106 adalah variasi arus dan elektroda, untuk pengujian impak dipengaruhi oleh semua variasi antarlain elektroda arus dan kedalaman proses pengelasan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Dari hasil analisa visual yang dilakukan terhadap hasil pengelasan menggunakan parameter pengelasan pada material Plat ASTM A36 dan Pipa ASTM A106 masih terdapat cacat yang muncul yang didominasi dengan beberapa cacat seperti porositas, undurcut dan spatter pada surface hasil pengelasan.
2. Berdasarkan pengujian mekanik yang dilakukan dengan parameter arus dan elektroda serta kedalaman proses pengelasan 3 meter dan 10 meter didapatkan pengaruh yang berbeda beda pada seperti pengujian tarik dengan hasil kekuatan tarik 444 untuk plat ASTM A36 dan ± 489 untuk pipa A106 namun memiliki elongation yang kecil, dan untuk pengujian impak semua spesimen mampu menahan beban impak sebesar >27 Joule dimana plat ASTM A36 mampu menahan energi impak sebesar 40 Joule dan pipa ASTM A106 33 Joule, untuk perubahan nilai kekerasan H spesimen meningkat pada area HAZ dengan besar <380 HVN dengan nilai HAZ plat ASTM A36 nilai kekerasan tertinggi sebesar 249 HV dan pipa ASTM A106 sebesar 244. dari hasil pengujian mekanik di dapatkan bahwa semua spesimen memenuhi standar yang di izinkan AWS D3.6 2017.
3. Secara garis besar pengaruh variabel arus dan kedalaman pengelasan akan menghilangkan sifat ulet dari logam dasar dan meningkatkan kekuatan mekanik dari sambungan serta akan merubah nilai kekerasan dan stuktur mikro terutama pada daerah HAZ , hal ini di dukung dengan pengujian statistik dimana faktor kedalaman proses pengelasan dan Arus menjadi faktor utama terjadinya fenomena tersebut pernyataan ini didasari oleh pengujian anova dengan keyakinan 95%.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah serangkainya pengujian dan hasil yang didapatkan adalah sebagai berikut :

1. Perlu dilakukannya lagi penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh karbon equivalen terhadap hasil pengelasan dalam air. .
2. Berdasarkan hasil penelitian perlu dilakukan penambahan variasi arus untuk proses pengelasan pada material pipa dikarenakan hasil pengelasan pada pipa memiliki hasil yang kurang baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. AWS A2.4 Committee on Definitions and Symbols, "Standard Welding Terms and Definitions," p. 147, 2001
2. AWS D3.6M Committee on Definitions and Symbols, "Standard Welding Terms and Definitions underwater, 2017
3. Anindito, J., Paundra, F., & Muhayat, N. (2012). Pengaruh aliran dan kedalaman air terhadap hasil pengelasan dan kekerasan sambungan las dalam air baja SS400. *Teknik Mesin Indonesia*, 15(2), 1-13.
4. Barnabas, S. G., Rajakarunakaran, S., Pandian, G. S., Buhari, A. M. I., & Muralidharan, V. (2021). Review on enhancement techniques necessary for the improvement of underwater welding. *Materials Today: Proceedings*, 45, 1191-1195.
5. Brown, R. T., & Masubuchi, K. (1975). Fundamental research on underwater welding. *Welding Journal*, 54(6), 178s-188s.
6. Chen, H., Guo, N., Xu, K., Xu, C., Zhou, L., & Wang, G. (2020). In-situ observations of melt degassing and hydrogen removal enhanced by ultrasonics in underwater wet welding. *Materials & Design*, 188, 108482.
7. De Mello Liberato, F., Modenesi, P. J., & Bracarense, A. Q. (2018). Aspectos Operacionais da Soldagem Subaquática Molhada com Eletrodos Revestidos Inoxidável Austenítico. *Soldag Inspeção*, 23, 277-291.
8. Harsono, H., Respati, S. M. B., & Purwanto, H. (2019). Analisis Pengelasan Smaw Tegangan Dc Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, Foto Makro Dan Mikro Pada Stainless Steel 304. *Jurnal Ilmiah MOMENTUM*, 15(1).
9. Klett, J., Hecht-Linowitzki, V., Grünzel, O., Schmidt, E., Maier, H. J., & Hassel, T. (2020). Effect of the water depth on the hydrogen content in SMAW wet welded joints. *SN Applied Sciences*, 2(7), 1-14.
10. Luna, L. E. R., Bracarense, A. Q., Pessoa, E. C. P., Costa, P. S., Guerrero, G. A., & Reyes, A. E. S. (2021). Effect of the welding angle on the porosity of underwater wet welds performed in overhead position at different simulated depths. *Journal of Materials Processing Technology*, 294, 117114.

11. Omajene, J. E., Martikainen, J., Kah, P., & Pirinen, M. (2014). Fundamental difficulties associated with underwater wet welding. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 4(6), 26-31.
12. Putri, E. D. W. S., Surojo, E., & Budiana, E. P. (2020). Current Research and Recommended Development on Fatigue Behavior of Underwater Welded Steel. *Procedia Structural Integrity*, 27, 54-61.
13. Surojo, E., Gumilang, A. H., Triyono, T., Prabowo, A. R., Budiana, E. P., & Muhayat, N. (2021). Effect of water flow on underwater wet welded A36 Steel. *Metals*, 11(5), 682.
14. Tomków, J., Fydrych, D., & Rogalski, G. (2020). Dissimilar underwater wet welding of HSLA steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(3), 717-725.
15. Tomków, J., Rogalski, G., Fydrych, D., & Łabanowski, J. (2019). Advantages of the application of the temper bead welding technique during wet welding. *Materials*, 12(6), 915.
16. Tomków, J. (2021). Weldability of Underwater Wet-Welded HSLA Steel: Effects of Electrode Hydrophobic Coatings. *Materials*, 14(6), 1364.
17. Yohanes, P., & Muhayat, N. (2018). Effect of water depth on the microstructure and mechanical properties of SS400 steel in underwater welding. In *Key Engineering Materials* (Vol. 772, pp. 128-132). Trans Tech Publications Ltd.
18. Zhang, M., Han, Y., Jia, C., Dong, S., Maksimov, S., & Wu, C. (2021). Process Stability, Microstructure and Mechanical Properties of Underwater Submerged-Arc Welded Steel. *Metals*, 11(8), 1249.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Kota Mataram, pada tanggal 10 Desember 1994, anak 2 dari Bapak Arifin dan Ibu Anik. Penulis menyelesaikan pendidikan sekolah dasar di SDN 37 Mataram pada tahun 2007, kemudian melanjutkan pendidikan di Mts Al – Aziziah Lombok Barat dan lulus pada tahun 2010, kemudian pada tahun 2013 penulis menyelesaikan pendidikan sekolah menengah atas di SMKN 3 Mataram. Penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang S-1 di Jurusan Teknik Teknik Mesin di Universitas Negeri Mataram dan lulus pada tahun 2019. Kemudian penulis memutuskan untuk melanjutkan pendidikan pada jenjang Strata dua (S2) di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Pada jenjang magister ini penulis bergabung di Laboratorium Metalurgi.

Dengan diterbitkannya buku Tesis ini, penulis berharap dapat memberikan sumbangsih ilmu pengetahuan melalui media penelitian yang telah dilakukan. Info lebih lanjut terkait penelitian ini dapat menghubungi penulis melalui email: rizaliahmadin1@gmail.com.