



TESIS - TL185413

**STUDI PENGARUH SAMBUNGAN LAS *DISSIMILAR-METAL* BAJA KARBON DAN BAJA TAHAN KARAT TERHADAP STRUKTUR MIKRO, KEKERASAN, DAN KETAHANAN KOROSI RETAK TEGANG DALAM LINGKUNGAN AMINE**

**I WAYAN YUDA SEMARADIPTA**  
NRP. 6011221005

**DOSEN PEMBIMBING**  
Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D  
Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL & METALURGI  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI DAN REKAYASA SISTEM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
2024**

*~Halaman ini sengaja dikosongkan~*

## LEMBAR PENGESAHAN TESIS

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar  
**Magister Teknik (M.T.)**  
di  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
oleh :

**I Wayan Yuda Semaradipta**  
**NRP 6011221005**

Tanggal Ujian : 19 Juli 2024  
Periode Wisuda : September 2024

Disetujui oleh:  
**Pembimbing:**

1. Sutarsis, ST, MSc, PhD  
NIP: 197708172005011001

2. Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D  
NIP: 197703132003121001

**Penguji:**

1. Dr. Agung Purniawan, ST, M.Eng  
NIP: 197605282002121003

2. Yusuf Pradesar, S.T., M.T., M.Sc., Ph.D  
NIP: 2022199211015

Kepala Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem



**Sigit Tri Wicaksono, SSi, MSi, PhD**  
NIP: 197801132002121003

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**STUDI PENGARUH SAMBUNGAN LAS DISSIMILAR-METAL BAJA  
KARBON DAN BAJA TAHAN KARAT TERHADAP STRUKTUR  
MIKRO, KEKERASAN, DAN KETAHANAN KOROSI RETAK TEGANG  
DALAM LINGKUNGAN AMINE**

Nama : I Wayan Yuda Semaradipta  
NRP : 6011221005  
Pembimbing I : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D  
Pembimbing II : Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D

**ABSTRAK**

Sambungan las *dissimilar-metal* baja karbon dan baja tahan karat menjadi salah satu pilihan yang menjanjikan dalam proses fabrikasi fasilitas sirkulasi amine untuk penyerapan CO<sub>2</sub>. Hal ini dimaksudkan untuk mengeliminasi proses perlakuan panas yang diwajibkan untuk menghindari korosi retak tegang pada pengelasan baja karbon. Namun hingga saat ini, belum ada penelitian yang spesifik untuk melihat pengaruh sambungan las *dissimilar-metal* baja karbon dan baja tahan karat ini terhadap ketahanan korosi dan korosi retak tegangnya dalam lingkungan amine. Dalam penelitian ini, dibuat dua spesimen pengelasan yaitu las baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 serta lasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan proses *shield metal arc welding* (SMAW) sesuai prosedur pengelasan yang telah terakreditasi. Perlakuan panas pasca pengelasan hanya dilakukan untuk pengelasan antar baja karbon. Kedua spesimen kemudian diinvestigasi struktur mikro dan kekerasannya. Evaluasi ketahanan korosi dilakukan dengan pengujian *potentiodynamic polarization*. Ketahanan korosi retak tegang dilakukan berdasarkan standar ASTM G30-20 dengan spesimen berbentuk *U-bend*. Kedua pengujian korosi tersebut dilakukan dalam lingkungan amine bertipe aMDEA dengan dan tanpa CO<sub>2</sub>, masing – masing pada temperatur 25°C, 80°C, dan 100°C. Setelah 14 hari, spesimen *U-bend* diperiksa dengan uji tidak merusak dan metalografi untuk melihat kemungkinan terjadinya retakan. Selain itu, produk korosi juga dianalisa menggunakan metode XRD. Dari hasil analisa didapatkan bahwa pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja karbon ASTM A285 Gr. C, terjadi kenaikan ukuran butir pada daerah HAZ (*heat affected zone*), pembentukan perlite kasar dalam matriks ferit Widmanstatten. Sedangkan pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304, terjadi sedikit penghalusan ukuran butir dan terbentuknya perlite halus sehingga menaikkan kekerasan HAZ sisi baja karbon. Tingkat laju korosi pada kedua spesimen mengalami kenaikan seiring kenaikan temperatur uji. Kontaminasi CO<sub>2</sub> pada larutan amine aMDEA, akan membentuk lapisan pasif film FeCO<sub>3</sub> yang menurunkan laju korosi. Tidak ditemukan adanya retakan hingga skala mikro setelah pengujian korosi retak tegang. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai rujukan untuk diterapkan dalam dunia industri.

*Kata kunci: korosi retak tegang, amine, las dissimilar-metal, baja karbon, baja tahan karat*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **STUDY OF DISSIMILAR WELD JOINT OF CARBON STEEL AND STAINLESS STEEL ON MICROSTRUCTURE, HARDNESS, AND RESISTANCE OF STRESS CORROSION CRACKING IN AMINE ENVIRONMENT**

Name : I Wayan Yuda Semaradipta  
NRP : 6011221005  
Supervisor I : Sutarsis, S.T., M.Sc., Ph.D  
Supervisor II : Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D

## **ABSTRACT**

*Dissimilar-metal-welded carbon steel and stainless steel are promising options for fabricating amine circulation facilities for CO<sub>2</sub> absorption. This method is intended to eliminate the heat treatment process required to avoid stress corrosion cracking in carbon-steel welding. However, until now, there has been no specific research on the effects of carbon steel and stainless steel dissimilar-metal welded joints on corrosion resistance and stress corrosion in an amine environment. In this study, two welding specimens were prepared: a weld of ASTM A285 Gr. C and ASTM A240-TP304 stainless steel and a weld of ASTM A285 Gr. C and ASTM A285 Gr. C with shield-metal arc welding (SMAW) process according to qualified welding procedures. The post-welding heat treatment was carried out for the welding of carbon steel. The microstructure and hardness of the two specimens were then investigated. Corrosion resistance was evaluated using potentiodynamic polarization tests. Stress corrosion cracking resistance was evaluated based on ASTM G30-20 standards with U-bend-shaped specimens. Both corrosion tests were carried out in an mDEA-type amine environment with and without CO<sub>2</sub>, respectively at temperatures of 25°C, 80°C and 100°C. After 14 days, the U-bend specimens were examined using non-destructive tests and metallography to identify possible cracks. In addition, the corrosion products were analyzed by XRD analysis. From the analysis on the welding of carbon steel ASTM A285 Gr. C and carbon steel ASTM A285 Gr. C, an increase in grain size was observed in the HAZ (heat affected zone), area, and coarse pearlite was formed in the Widmanstatten ferrite matrix. For welding carbon steel ASTM A285 Gr. C and ASTM A240-TP304 stainless steel, there is a slight refinement of the grain size and the formation of fine pearlite, thereby increasing the HAZ hardness of the carbon steel side. The corrosion rate in both specimens increased as the test temperature increased. CO<sub>2</sub> contamination in the mDEA solution formed a passive FeCO<sub>3</sub> film layer, which reduced the corrosion rate. No microcracks were observed in the stress corrosion cracking tests. The result of this study could be used as a reference for application in the industrial practice.*

*Keywords: stress corrosion cracking, amine, dissimilar metal weld, carbon steel, stainless steel*

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis ucapkan kehadapan Ida Sang Hyang Widhi Wasa yang telah memberi penulis kekuatan, kesabaran dan petunjuk sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal tesis yang berjudul “Studi Pengaruh Sambungan Las Dissimilar-Metal Baja Karbon dan Baja Tahan Karat Terhadap Struktural Mikro, Kekerasan, dan Ketahanan Korosi Retak Tegang Dalam Lingkungan Amine” sebagai syarat Magister Teknik di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS - Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan serta dalam tersusunnya tesis ini antara lain:

1. Kedua orang tua, I Wayan Sudipta & Ni Ketut Uriyani, yang telah memberikan doa dan semangat.
2. Nenek tercinta, Alm. Ni Wayan Nasar, yang telah menjadi teladan dan inspirasi untuk terus berjuang.
3. Istri tercinta, Putu Dwipa Krisna Devi, yang selalu memberikan semangat, doa, motivasi, dan pendampingan selama periode kuliah.
4. Adik tersayang, I Made Satya Pradipta beserta keluarga, yang menjadi motivasi untuk terus maju.
5. Bapak Sutarsis, ST. M.Sc. Ph.D serta Bapak Lukman Noerochim, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing atas segala arahan, nasihat, motivasi dan waktu yang diberikan untuk penyelesaian tesis ini.
6. Mas Tio & Mas Akmal, yang telah sangat banyak membantu selama proses penulisan tesis.
7. Seluruh jajarannya staf dan dosen di Jurusan Teknik Material & Metalurgi, ITS – Surabaya.

Penulis sangat menyadari masih ada banyak kekurangan dan kekeliruan dikarenakan keterbatasan kemampuan dalam penulisan ini. Dengan kerendahan hati, segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan untuk kesempurnaan tesis ini. Akhir kata, semoga proposal tesis ini dapat menambah khasanah pustaka dan bermanfaat bagi orang lain.

Surabaya, 19 Juli 2024

Penulis

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN TESIS .....	iii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
BAB I.....	1
1.1.    Pendahuluan .....	1
1.2.    Rumusan Masalah .....	4
1.3.    Batasan Masalah atau Asumsi Masalah .....	5
1.4.    Tujuan Penelitian.....	5
1.5.    Manfaat Penelitian.....	5
1.6.    Hipotesis.....	6
BAB II.....	7
2.1.    Amine dan Penyerapan CO <sub>2</sub> .....	7
2.2.    Korosi Baja Karbon pada Lingkungan Amine .....	10
2.3.    Korosi Retak Tegang Amine pada Baja Karbon .....	12
2.4.    Analisa Ketahanan Korosi Retak Tegang .....	13
2.5.    Pengelasan Baja Karbon dan Baja Tahan Karat.....	16
2.5.1. <i>Shield Metal Arc Welding</i> (SMAW).....	16
2.5.2.    Spesifikasi Prosedur Pengelasan.....	17
2.6.    Tegangan Sisa.....	17
BAB III .....	21
3.1.    Diagram Alir Penelitian.....	21
3.2.    Bahan Penelitian.....	22
3.3.    Pelaksanaan Penelitian .....	24
3.3.1.    Proses Pengelasan .....	24
3.3.2.    Proses Pengujian Radiografi & Pematangan.....	25
3.3.3.    Proses Perlakuan Panas Pasca Pengelasan.....	27
3.3.4.    Proses Bending Berdasarkan ASTM G30-97 .....	28

3.3.5. Proses Perendaman Pada Lingkungan Amine.....	29
3.4. Pengujian Sampel .....	31
3.5. Rancangan Penelitian.....	35
BAB IV .....	37
4.1. Analisis Spesifikasi Material Logam Induk ( <i>Base Metal</i> ).....	37
4.2. Analisis Parameter Pengelasan .....	38
4.3. Analisis Pengaruh Perbedaan Sambungan Las Terhadap Struktur Mikro 39	
4.4. Analisis Pengaruh Struktur Mikro Sambungan Las Terhadap Sifat Mekanik .....	44
4.5. Analisa Pengaruh Temperatur dan Kandungan CO <sub>2</sub> Terhadap Perilaku Korosi Sambungan Las Dalam Lingkungan Amine .....	47
4.6. Analisa Pengaruh Temperatur dan Kandungan CO <sub>2</sub> Terhadap Ketahanan Korosi Retak Tegang Sambungan Las Dalam Lingkungan Amine.....	54
BAB V .....	61
5.1. Kesimpulan .....	61
5.2. Saran .....	62
DAFTAR PUSTAKA.....	63

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sistem Pemurnian Dengan Larutan Amine (Dutcher, 2015) .....	7
Gambar 2. 2 Mekanisme Korosi Baja Karbon Pada Lingkungan CO <sub>2</sub> -H <sub>2</sub> O (Banas, 2007) .....	12
Gambar 2. 3 SMAW: (a) Proses Keseluruhan, (b) Area Lasan (Kou, 2003).....	166
Gambar 2. 4 Tegangan Akibat Panas: (a) Saat Pemanasan, (b) Saat Pendinginan, (c) Tegangan Sisa (Kou, 2003) .....	18
Gambar 2. 5 Perubahan Temperatur dan Tegangan dalam Proses Pengelasan (Kou, 2003) .....	19
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian .....	21
Gambar 3. 2 Perangkat Hitachi PMI Smart Master OES System .....	22
Gambar 3. 3 Proses Pengelasan Menggunakan Metode SMAW .....	25
Gambar 3. 4 (a) Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 .....	25
Gambar 3. 5 (a) Film Radiografi Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Film Radiografi Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304.....	26
Gambar 3. 6 (a) Proses Pemotongan Spesimen, (b) Potongan Spesimen Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (c) Potongan Spesimen Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 .....	27
Gambar 3. 7 (a) Proses PWHT Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Contoh Spesimen Hasil PWHT .....	28
Gambar 3. 8 Detail Ilustrasi & Dimensi Spesimen U-bend.....	29
Gambar 3. 9 Spesimen U-bend (a) Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan PWHT, (b) Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304.....	29
Gambar 3. 10 Skema Instalasi Peralatan Perendaman Amine Untuk Pengujian Korosi Retak Tegang.....	30
Gambar 3. 11 Instalasi Pengujian Korosi Retak Tegang Dengan Perendaman Dalam Larutan Amine (a) Tabung Amine dan Spesimen, (b) Sumber CO <sub>2</sub> dan Pendingin Air .....	300
Gambar 3. 12 (a) Mikroskop Untuk Pengujian Metalografi, (b) Area Pengujian & Spesimen Metalografi .....	31
Gambar 3. 13 (a) Peralatan Pengujian Kekerasan, (b) Spesimen Pengujian Kekerasan.....	32
Gambar 3. 14 Skema Instalasi Untuk Pengujian <i>Potentiodynamic Polarization</i> ..	33
Gambar 3. 15 Instalasi Pengujian <i>Potentiodynamic Polarization</i> .....	33
Gambar 3. 16 Alat Pengujian XRD.....	34
Gambar 4. 1 Struktur Mikro Baja Karbon ASTM A285 Gr. C Perbesaran 20x (a) <i>As Received</i> , (b) HAZ Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (c) HAZ Pada Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 .....	41

Gambar 4. 2 Struktur Mikro Baja Karbon ASTM A285 Gr. C Perbesaran 50x (a) <i>as received</i> , (b) HAZ Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (c) HAZ Pada Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 .....	41
Gambar 4. 3 Perbandingan Mikrostruktur Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304, (a) dan (b) Logam Induk, (c) dan (d) HAZ .....	433
Gambar 4. 4 Ilustrasi Titik Pengambilan Nilai Kekerasan (HV) (a) Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (b) Lasan Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 .....	444
Gambar 4. 5 Grafik Profile Kekerasan Sampel Uji Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT Serta Lasan Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 .....	45
Gambar 4. 6 Kurva Polarisasi (a) Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 Dalam Amine dan CO <sub>2</sub> Dengan Temperatur Berbeda, (b) Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 Dalam Amine Dengan dan Tanpa CO <sub>2</sub> .....	499
Gambar 4. 7 Kurva Perbandingan Laju Korosi Sambungan Las Pada Berbagai Kondisi Lingkungan .....	50
Gambar 4. 8 Kurva XRD Analisa Produk Korosi Sambungan Las (Sisi Baja Karbon A285 Gr. C) Setelah Perendaman Dalam Amine Selama 14 Hari Dengan Variasi Temperatur dan Kontaminasi CO <sub>2</sub> .....	533

## DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Rangkuman Jenis Amine dan Laju Korosi Pada Baja Karbon Rendah .	9
Tabel 3. 1 Data Elektroda Untuk Proses Pengelasan Spesimen.....	23
Tabel 3. 2 Detail Dimensi Spesimen U-bend.....	28
Tabel 3. 2 Pengujian Spesimen Hasil Pengelasan.....	35
Tabel 3. 4 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT) pada Lingkungan Amine Tanpa CO <sub>2</sub> .....	35
Tabel 3. 5 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT) pada Lingkungan Amine Dengan CO <sub>2</sub> .....	35
Tabel 3. 6 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 pada Lingkungan Amine Tanpa CO <sub>2</sub> .....	35
Tabel 3. 7 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 pada Lingkungan Amine Dengan CO <sub>2</sub> .....	35
Tabel 3. 8 Tata Waktu Penelitian.....	36
Tabel 4. 1 Analisis Kandungan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C.....	37
Tabel 4. 2 Analisa Kandungan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304.....	37
Tabel 4. 3 Parameter Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C .....	38
Tabel 4. 4 Parameter Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304.....	38
Tabel 4. 5 Hasil Uji Kekerasan Sambungan Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT .....	46
Tabel 4. 6 Hasil Uji Kekerasan Sambungan Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304.....	47
Tabel 4. 7 Rangkuman Hasil Pengujian <i>Potentiodynamic Polarization</i> .....	48
Tabel 4. 8 Hasil Pengujian <i>Dye Penetrant Examination</i> Sampel U-bend.....	55
Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Metalografi Sampel U-bend Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT .....	56
Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Metalografi Sampel U-bend Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304.....	57

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Pendahuluan**

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) atau *Sustainable Development Goals* (SDGs) merupakan agenda yang diusung dan disetujui oleh seluruh negara Perserikatan Bangsa – Bangsa (PBB) sejak tahun 2015. Tujuan tersebut kemudian dirumuskan dalam suatu 17 (tujuh belas) strategi global untuk mengakhiri kemiskinan dan kekurangan lainnya yang dihadapi dunia (PBB, 2023). Indonesia sebagai bagian dari PBB juga mengadopsi program ini dengan diterbitkannya Peraturan Presiden No. 59 tahun 2017 tentang Pelaksanaan Pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan. Energi bersih dan terjangkau merupakan salah satu dari 17 strategi global TPB. Dalam rangkian mencapai tujuan ini, diperlukan masa transisi dari energi fosil ke energi bersih dan terbarukan. Gas bumi, termasuk didalamnya *Liquid Natural Gas* (LNG) menjadi pilihan utama dalam masa transisi energi ini karena emisi pembakaran yang relatif lebih rendah (Muttaqien, 2022).

Di Indonesia, terdapat 3 (tiga) fasilitas produksi LNG. Keandalan fasilitas produksi LNG ini merupakan salah satu kunci dalam usaha menjaga ketahanan dan transisi energi nasional. Dalam produksi LNG, terdapat proses untuk menghilangkan pengotor CO<sub>2</sub> yang dilakukan melalui proses absorpsi menggunakan larutan amine. Hal ini bertujuan untuk mencegah adanya CO<sub>2</sub> yang terbawa dan membeku pada proses selanjutnya yang memiliki temperatur rendah (NGL, 2015). Absorpsi CO<sub>2</sub> menggunakan sistem sirkulasi amine merupakan salah satu metode yang paling populer serta menguntungkan secara finansial dan proses pada suatu fasilitas produksi LNG dikarenakan keunggulannya seperti efisiensi dan laju penyerapan CO<sub>2</sub> yang tinggi, serta dapat dipakai ulang (Gary & Handwerk, 2001). Sistem absorpsi amine juga digunakan dalam fasilitas penyerap karbon pada pabrik pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar batu bara dalam usaha mengurangi emisi karbon (Mazari,

2020). Namun, disamping keunggulannya, amine juga memberikan potensi kegagalan pada fasilitas pemurnian minyak dan gas, produksi LNG, maupun fasilitas penyerap karbon dalam bentuk korosi dan korosi retak tegang. Kegagalan pada lingkungan amine rentan terjadi pada peralatan yang terbuat dari material baja karbon yang tidak mendapat perlakuan panas atau berada pada area yang mengalami pengerjaan dingin (API-571, 2020). Sebagai contoh, kegagalan dilaporkan pada tahun 1984 di US karena korosi retak tegang pada unit bejana tekan absorber amine setelah 14 tahun beroperasi. Kegagalan ini menyebabkan 17 orang meninggal dunia (Schillmoller, 1986). Kegagalan pada sistem sirkulasi amine juga dilaporkan terjadi pada alat penukar panas yang terbuat dari material stainless steel ASTM 304. Kegagalan yang ditemukan berupa korosi dan retak dibawah area gasket (*gasket seat*) (Panahi H. , 2017). Selain itu, korosi juga dilaporkan terjadi pada karena adanya kebocoran gas asam pada unit regenerasi amine (Raut, 2009).

Korosi amine pada material karbon steel secara garis besar dikelompokkan menjadi (i) korosi asam basah dan (ii) korosi cairan amine (Mazari, 2020). Tingkat korosifitas amine dipengaruhi oleh (i) konsentrasi, (ii) kapasitas loading CO<sub>2</sub>, (iii) tipe amine, (iv) temperatur operasi, (v) degradasi amine, dan (vi) kecepatan aliran. Risiko korosi tertinggi terjadi pada area dengan loading CO<sub>2</sub> dan temperatur yang tinggi. Amine dengan jenis MEA memiliki korosifitas tertinggi, sedangkan MDEA merupakan jenis amine dengan korosifitas terendah (Kittel, 2012). Selain korosi, kegagalan peralatan baja karbon pada sistem amine juga terjadi karena korosi retak tegang. Korosi retak tegang ini terjadi melalui empat mekanisme berbeda yaitu korosi retak tegang sulfida, retak yang dipicu oleh hidrogen, retak berorientasi yang dipicu oleh hidrogen, serta korosi retak tegang alkalin (API-RP945, 2021).

Saat terjadi kegagalan pada peralatan dalam sistem sirkulasi amine, maka harus dilakukan perbaikan dengan cepat dan tepat sehingga tidak terjadi kehilangan produksi yang signifikan. Proses perbaikan biasanya melibatkan kegiatan penggantian bagian yang mengalami kegagalan dengan pemasangan material baru menggunakan metode

pengelasan *shield metal arch welding* (SMAW). Perbaikan ini melibatkan penyambungan baja karbon diikuti oleh *post weld heat treatment* (PWHT). Untuk mempercepat perbaikan dalam kasus perbaikan pada kegagalan material baja karbon, praktik perbaikan dilakukan dengan penggantian bagian material baja karbon yang mengalami kegagalan menggunakan material baru baja tahan karat. Hal ini dimaksudkan untuk meniadakan proses PWHT yang diperlukan dalam pengelasan antar baja karbon dalam lingkungan amine guna menurunkan risiko terjadinya korosi retak tegang. Pengelasan dengan logam berbeda memiliki beberapa kesulitan karena adanya potensi pembentukan pori, retakan, serta daerah dilusi yang memiliki kontribusi pada kegagalan korosi dalam lingkungan asam (Abioye, 2019). Perubahan struktur austenite menjadi ferit pada pengelasan baja karbon dan baja tahan karat, yang dibarengi migrasi unsur paduan kromium, juga menjadi isu yang dapat menurunkan sifat mekanik dan ketahanan korosi baja tahan karat. Kemunculan fase delta ferit memungkinkan terjadinya penurunan keuletan dan ketangguhan material baja tahan karat (Pahlawan, 2020).

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mempelajari sifat mekanik maupun ketahanan korosi pada sambungan las baja karbon dan baja tahan karat. Dalam studi simulasi pengelasan antara baja karbon A36 dan baja tahan karat SS304-L, dilaporkan bahwa pengelasan kedua material ini menggunakan elektroda EC410NiMo memiliki tegangan sisa yang sangat rendah jika dibandingkan dengan pengelasan baja karbon dengan baja karbon maupun pengelasan baja tahan karat dan baja tahan karat (Alcantar-Modragón, 2021). Sementara itu, Chuaiphan melakukan penelitian pada tahun 2013 untuk membandingkan pengelasan SMAW dan GTAW pada sambungan las baja karbon AISI 1020 dan baja tahan karat AISI 304. Dari hasil penelitiannya, diketahui bahwa pengelasan dengan GTAW memiliki sifat mekanik maupun ketahanan korosi sumuran dalam lingkungan 3,5% NaCl yang lebih baik dibanding pengelasan SMAW (Chuaiphan, 2013). Sambungan las baja karbon dan baja tahan karat menunjukkan kemampuan ketahanan korosi yang lebih baik dalam lingkungan 3,5% wt NaCl pada pengelasan GMAW dengan elektroda E309L dibandingkan logam induk baja karbon

dan baja tahan karat AISI 304 (Abioye, 2019). Pengelasan GTAW pelat baja karbon dan baja tahan karat AISI 304L menggunakan elektroda ER308L dilaporkan memiliki ketahanan bending yang lebih tinggi dibanding logam induknya. Dari hasil pengujian korosi, spesimen pengelasan memiliki laju korosi yang sangat rendah (maksimum 0,0068243 mm per tahun) pada lingkungan 3,5% wt NaCl (Okoro, 2018).

Dari beberapa penelitian sebelumnya, tidak pernah dilakukan penelitian secara ilmiah terhadap hasil pengelasan antara material baja karbon dan baja tahan karat yang akan dipakai dalam proses perbaikan peralatan yang beroperasi dalam lingkungan amine. Hal ini membutuhkan suatu evaluasi sistematis dan komprehensif yang meliputi pengamatan struktur mikro, sifat mekanis, dan ketahanan korosi dalam lingkungan kerja amine dari hasil penyambungan dua logam tersebut sebagai dasar pengaplikasian metode perbaikan ini dalam dunia industri.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana perubahan struktur mikro pada sambungan pengelasan baja karbon dan baja tahan karat.
2. Bagaimana sifat kekerasan sambungan pengelasan baja karbon dan baja tahan karat.
3. Bagaimana perilaku korosi dan ketahanan korosi retak tegang sambungan pengelasan baja karbon dan baja tahan karat dalam kondisi lingkungan amine.
4. Bagaimana perbandingan sktruktur mikro, kekerasan, perilaku korosi, dan ketahanan korosi retak tegang antara hasil pengelasan baja karbon dengan PWHT dan hasil pengelasan baja karbon dan baja tahan karat.

### **1.3. Batasan Masalah atau Asumsi Masalah**

Batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Proses pengelasan dilakukan dengan mengacu pada parameter yang tertuang dalam prosedur pengelasan yang sudah melalui pengujian dan tersertifikasi.
2. Pengujian korosi untuk kedua jenis spesimen dilakukan dalam kondisi yang identik pada lingkungan amine yang dialirkan gas CO<sub>2</sub> sebagai simulasi kondisi aktual saat operasi.

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan sebagai berikut:

1. Membandingkan dan menganalisa struktur mikro pada hasil pengelasan baja karbon dengan PWHT dan hasil pengelasan baja karbon dan baja tahan karat.
2. Membandingkan dan menganalisa kekerasan area lasan (*microhardness*) pada hasil pengelasan baja karbon dengan PWHT dan hasil pengelasan baja karbon dan baja tahan karat.
3. Membandingkan dan menganalisa perilaku korosi dan ketahanan korosi retak tegang pada hasil pengelasan baja karbon dengan PWHT dan hasil pengelasan baja karbon dan baja tahan karat dalam kondisi lingkungan amine yang diberikan variasi temperatur.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan analisis empiris mengenai perbandingan ketahanan korosi retak tegang antara hasil pengelasan material baja karbon dengan variasi pengelasan material baja karbon dan baja tahan karat yang bekerja pada variasi lingkungan amine sehingga dapat dijadikan acuan dalam pengaplikasian di dunia industri minyak dan gas serta unit penangkap karbon dalam usaha mengurangi emisi karbon dunia.

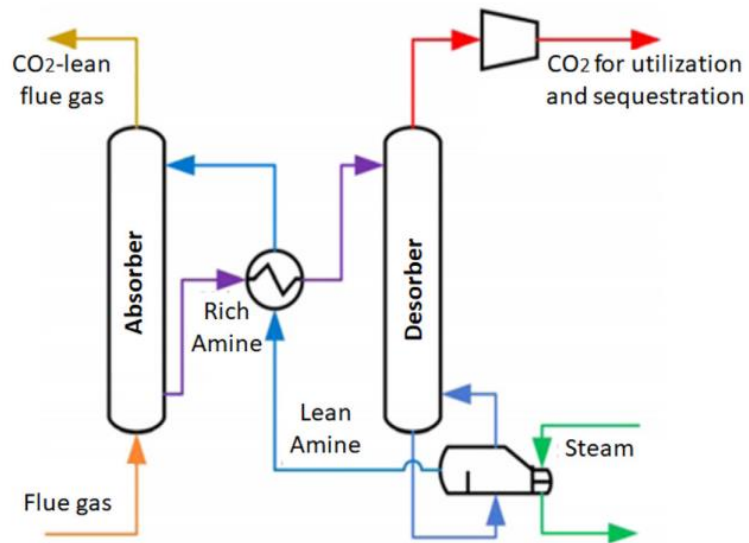
## **1.6. Hipotesis**

1. Sifat kekerasan (*microhardness*) akan berbeda karena adanya perbedaan siklus panas pada kedua spesimen.
2. Temperatur & kontaminasi CO<sub>2</sub> akan memberikan dampak terhadap perilaku korosi dan korosi retak tegang pada kedua spesimen pengelasan

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Amine dan Penyerapan CO<sub>2</sub>

Amine merupakan teknologi larutan yang paling handal dalam usaha penyerapan CO<sub>2</sub> dan telah dipakai selama lebih dari 60 tahun dalam pemurnian gas alam. Tipikal aliran amine pada teknologi penyerapan CO<sub>2</sub> ditunjukkan oleh Gambar 2. 1. Gas awalnya dialirkan kedalam kolom penyerapan (*absorber*) dimana *lean* amine (amine tanpa kandungan CO<sub>2</sub>) digunakan untuk menyerap kandungan CO<sub>2</sub>. Amine yang telah menyerapp CO<sub>2</sub> (*rich amine*) kemudian dialirkan menuju *stripper* (desorber) dimana CO<sub>2</sub> dilepaskan dari *rich amine* kembali menjadi *lean amine* melalui proses pemanasan (Dutcher, 2015).



Gambar 2. 1 Sistem Pemurnian Dengan Larutan Amine (Dutcher, 2015)

Beberapa jenis amine yang biasanya dipakai dalam sistem penyerapan CO<sub>2</sub> adalah sebagai berikut:

a. Monoethanolamine (MEA)

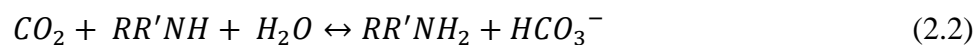
MEA adalah senyawa kimia organik yang merupakan basa lemah dengan formula  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ . MEA digunakan secara luas dalam usaha penyerapan  $\text{CO}_2$  karena sifatnya yang tidak beracun dan ekonomis. Reaksi antara MEA dan  $\text{CO}_2$  dalam larutan dituliskan sebagai berikut:



dimana R mewakili grup alkohol (Bernhardsen, 2017). Peningkatan tekanan parsial akan meningkatkan konsentrasi  $\text{CO}_2$  pada fase-antara cair/gas, sehingga peningkatan laju penyerapan (Tan, 2015). Selain itu, peningkatan temperatur hingga  $50^\circ\text{C}$  juga dilaporkan akan meningkatkan efisiensi penyerapan  $\text{CO}_2$ . Diatas  $50^\circ\text{C}$ , peningkatan efisiensi tidak akan terjadi secara signifikan (Joel, 2014).

b. 2-Amino-2-Methylpropanol (AMP)

AMP merupakan senyawa organik yang mengandung gugus amine dan alkohol dengan formula  $(\text{CH}_3)_2\text{C}(\text{NH}_2)\text{CH}_2\text{OH}$  dan telah banyak dikembangkan sebagai salah satu alternatif yang menjanjikan dalam penyerapan  $\text{CO}_2$  dalam berbagai macam jenis lapangan gas (Bougie, 2012). Secara teorititis, 1 mol  $\text{CO}_2$  seharusnya dapat diserap oleh 1 mol AMP dengan skema berikut:



dimana R dan R' menunjukkan grup alkohol dan -H (Svensson, 2014). AMP dilaporkan memiliki kemampuan penyerapan  $\text{CO}_2$  dua kali lebih besar dibanding MEA. Sayangnya, kemampuan AMP dalam melepas  $\text{CO}_2$  lebih rendah, yang disebabkan reaksinya yang lebih kuat dibanding MEA (Ooi, 2020).

c. Methyldiethanolamine (MDEA)

MDEA atau biasa dikenal N-methyldiethanol amine (tertiary amine) adalah senyawa organik dengan rumus kimia  $\text{CH}_3\text{N}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OH})_2$ . MDEA mendapat perhatian lebih karena tingkat korosifitas dan degradasinya yang rendah



(Mindaryani, 2017). MDEA tidak memiliki atom karbon yang bereaksi dengan CO<sub>2</sub>, melainkan berperan sebagai wadah ion hidrogen yang dihasilkan dari hidrolisis CO<sub>2</sub> dalam air. Reaksi kimianya adalah sebagai berikut (Seagraves, 2009):

- Skema i



- Skema ii



Dari percobaan yang dilakukan, didapatkan data bahwa kemampuan penyerapan CO<sub>2</sub> mencapai 15 – 20% pada konsentrasi MDEA sebesar 20 – 35.3%. Kenaikan konsentrasi MDEA tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap jumlah penyerapan CO<sub>2</sub> yang dihasilkan (Mindaryani, 2017).

d. Activated Methyldiethanolamine (aMDEA)

aMDEA adalah pengembangan dari MDEA yang ditambahkan campuran activator piperazine (PZ) (2 – 40%). Campuran ini dikenal memiliki kinetika reaksi yang cepat dengan sedikit aktivator, biaya energi yang rendah, serta sifat korosifitas yang rendah pada material baja karbon (Ying, 2017).

Tabel 2. 1 Rangkuman Jenis Amine dan Laju Korosi Pada Baja Karbon Rendah

Jenis Amine	Rumus Kimia	Laju Korosi (mm per tahun) (Gunasekaran, 2013)
MEA	NH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	4,1
AMP	(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> C(NH <sub>2</sub> )CH <sub>2</sub> OH	3
MDEA	CH <sub>3</sub> N(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH) <sub>2</sub>	1
aMDEA	CH <sub>3</sub> N(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> OH) <sub>2</sub> + PZ	Data belum ditemukan

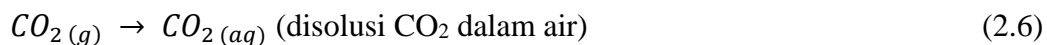
## 2.2. Korosi Baja Karbon pada Lingkungan Amine

Kebanyakan material yang dipakai dalam unit penyerapan CO<sub>2</sub> adalah baja karbon karena memiliki keunggulan dari sisi ekonomi dan kekuatan tariknya. Baja karbon merupakan salah satu jenis baja yang memiliki kandungan berat karbon 0,1% hingga 2.1%. Baja karbon diklasifikasikan berdasarkan kadar karbonnya menjadi baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan baja karbon tinggi. Baja karbon menunjukkan sifat yang unik dimana dengan adanya penambahan kadar karbon akan menyebabkan keuletannya berkurang, namun kekerasan dan kekuatan tariknya meningkat (Dwivedi, 2017).

Korosi melibatkan proses elektrokimia yang simultan antara oksidasi pada permukaan material yang menghasilkan elektron dan reaksi reduksi yang mengkonsumsi elektron. Proses reduksi dan oksidasi (redoks) ini melibatkan tiga element yaitu anoda, katoda, dan elektrolit. Pada pembahasan ini, elektrolit merujuk kepada larutan korosif (CO<sub>2</sub> yang terlarut pada pelarut). Selama berinteraksi dengan elektrolit, elektron akan dilepaskan oleh anoda (tempat terjadinya korosi) dan dialirkan ke katoda. Kecenderungan korosi pada logam tergantung pada tipe logam serta pH elektrolit (Popoola, 2013).

Reaksi kimia diawali dengan disolusi gas CO<sub>2</sub> pada air yang diilustrasikan pada skema (1). CO<sub>2</sub> yang terlarut bereaksi dengan air membentuk asam karbonat, H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (skema (2)). Selanjutnya disosiasi H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> membentuk larutan asam (skema (3)) (Hernandez, 2012).

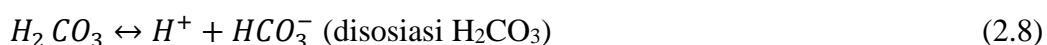
Skema (1)



Skema (2)



Skema (3)



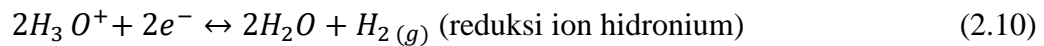
Pada sisi anoda, reaksi oksidasi terjadi melibatkan disolusi besi yang diterangkan oleh skema (4).

Skema (4)



Di sisi lain, reaksi reduksi di katoda melibatkan reduksi ion hidronium, ion bikarbontan, serta air. Reduksi ion hydronium digambarkan oleh skema (5); sementara persamaan reduksi ion bikarbonat dan air ditunjukkan pada skema (6) dan skema (7) (Kahyarian, 2017).

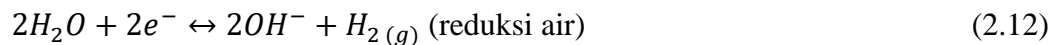
Skema (5)



Skema (6)



Skema (7)

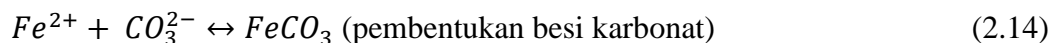


Dari reaksi redoks tersebut, akan terbentuk besi hidrosida dan besi karbonat. Pembentukan besi hidroksida ditunjukkan oleh skema (8) dan pembentukan besi karbonat ditunjukkan oleh skema (9) (Hernandez, 2012).

Skema (8)

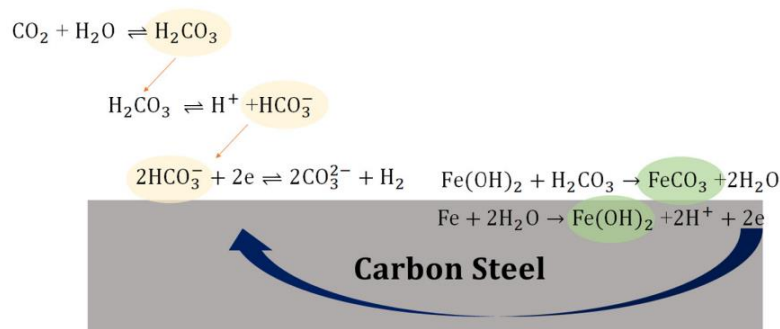


Skema (9)



Produk akhir dari kedua reaksi diatas adalah pembentukan besi (ii) hidroksida dan besi (ii) karbonat. Ion besi (ii) sangat tidak stabil dan dapat dengan mudah teroksidasi

oleh oksigen di udara untuk membentuk ion besi (iii), dan menghasilkan korosi yang berwarna coklat kemerahan. Skema terjadinya korosi ditunjukkan oleh Gambar II.2 (Banas, 2007).



Gambar 2. 2 Mekanisme Korosi Baja Karbon Pada Lingkungan CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (Banas, 2007)

Peristiwa korosi pada baja karbon dalam lingkungan amine juga dipengaruhi oleh temperatur. Melalui kurva tafel dan data elektrokimia, diketahui bahwa laju korosi baja karbon pada lingkungan amine akan meningkat dengan meningkatnya temperatur. Hal ini dikarenakan kinetika pembentukan *heat stable salt* amine dan degradasi amine yang lebih cepat seiring kenaikan temperatur (Javidi, 2017).

### 2.3. Korosi Retak Tegang Amine pada Baja Karbon

Korosi retak tegang amine atau retak amine merupakan fenomena retak yang terjadi pada baja yang berada dalam kombinasi kondisi memiliki tegangan tarik (karena gaya dari luar atau tegangan sisa) dalam lingkungan larutan alkanolamine yang dipakai sebagai media penyerapan H<sub>2</sub>S dan atau CO<sub>2</sub> dari aliran gas atau cairan hidrokarbon. Retak amine merupakan bentuk dari korosi retak tegang alkaline (*Alkaline Stress Corrosion Cracking – ASCC*) (Javidi, 2017).

ASCC diyakini disebabkan oleh adanya mekanisme kerapuhan lapisan film pada material. Pada area yang memiliki tegangan sisa yang tinggi, seperti pada HAZ (*heat affected zone*), slip menyebabkan kerusakan pada lapisan film pasif, sehingga material

terekspose ke lingkungan, terkorosi, dan membentuk retakan. Apabila laju korosi lebih tinggi dibandingkan laju pembentukan film pasif, lapisan film proteksi tidak akan kembali terbentuk, sehingga korosi sumuran atau korosi lokal lainnya akan terbentuk. Namun, bila lapisan film pasif terbentuk lebih cepat daripada laju korosi, maka lapisan film proteksi akan dapat terbentuk kembali. Pengulangan dari proses ini menghasilkan perambatan ASSC. ASSC paling sering ditemukan pada sistem pengolahan gas yang mengandung CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, atau keduanya dengan larutan alkanolamine. ASSC pada fasilitas pengolahan gas dengan amine yang pertama kali dilaporkan oleh NACE ditemukan dengan kondisi retak intergranular dengan pembentukan oksida didalamnya. Karena retak yang ditemukan hanya berada pada daerah yang memiliki tegangan tinggi, HAZ, maka PWHT direkomendasikan untuk menghindari ASSC. Oleh sebab itu, PWHT menjadi hal yang direkomendasikan untuk seluruh sistem perpipaan dan peralatan (kecuali tanki timbun) yang beroperasi pada lingkungan amine di atas temperatur tertentu. Sesuai kebijakan dan tipe amine, penentuan temperatur bervariasi antara 38 hingga 93°C, dimana kebanyakan menggunakan batas 66 °C (Nielsen, 2020).

Peningkatan temperatur merupakan salah satu faktor yang menyebabkan kenaikan tingkat kemungkinan dan keparahan keretakan, meskipun beberapa keretakan juga terjadi dibawah temperatur kamar (API-571, 2020). Dalam penentuan kemungkinan terjadinya keretakan pada lingkungan amine, temperatur menjadi salah satu item penentu sesuai dengan jenis amine yang dipakai. Temperatur diatas 82°C dinilai membuat tingkat kemungkinan yang tinggi untuk terjadinya retakan pada jenis amine MEA, DIPA, atau DEA (API-580, 2016).

#### **2.4. Analisa Ketahanan Korosi Retak Tegang**

Untuk melakukan analisa kerentanan suatu material paduan terhadap korosi retak tegang, terdapat beberapa metode yang dapat digunakan tergantung dari tujuan yang ingin dicapai. Bila tujuannya adalah untuk melihat perilaku material terhadap kondisi kerja tertentu serta untuk memilih material yang akan digunakan, biasanya pengujian dilakukan dalam waktu yang singkat dengan menaikkan parameter kerja kritis seperti

temperatur, tekanan, konsentrasi lingkungan, pengotor, serta tegangan kerja. Secara umum, spesimen untuk analisa korosi retak tegang dapat dibagi dua yaitu tanpa cacat serta dengan cacat kecil (takikan). Selain itu, pengujian dapat dilakukan dengan mode beban meningkat, beban siklik, defleksi tetap, beban tetap, dan regangan (*strain rate*). Dalam praktiknya, pengujian korosi retak tegang dilakukan selama periode waktu tertentu. Kondisi spesimen serta jumlah retakan yang terjadi setelahnya digunakan sebagai kriteria kerentanan suatu material terhadap korosi retak tegang. Selain spesimen dengan pembebanan tetap, beberapa spesimen yang biasa digunakan adalah C-ring, U-ring, *bent beam*, dan *four-point bending*. Persiapan sampel uji dapat mengacu ke dokumen ASTM G49, ASTM G39, ASTM G30, NACE TM 0177 (NACE-TM-0177), dan ISO 7539 bagian 2 – 5 (Tagliari, 2021).

Pengujian korosi tegangan menggunakan polarisasi potensiostatik atau potensiodinamik dapat memberikan informasi imunitas, korosi merata, pasivasi, dan korosi sumuran pada lingkungan kerja tertentu melalui interpretasi beberapa karakteristik potensial seperti potensial korosi, potensial pasivasi primer, potensial kerusakan (*breakdown potensial*), serta potensial proteksi. Parameter – parameter tersebut dapat memberikan gambaran hubungan antara kerentanan terhadap korosi retak tegang dan perilaku elektrokimia material dengan lingkungannya. Dengan begitu, maka pemahaman terhadap mekanisme korosi retak tegang dapat dilakukan dengan lebih baik (Parkins, 2010).

Panahi (2019) melakukan pengujian korosi retak tegang pada material baja tahan karat feritik dalam lingkungan tertiar amine (aMDEA) dengan konsentrasi 30, 40, 50% dan variasi temperatur 25 dan 75°C. Pengujian korosi retak tegang dilakukan pada spesimen U-bend yang mengacu pada ASTM G30-97. Selain itu, untuk mengamati perilaku korosi material, dilakukan juga pengujian polarisasi siklik.  $i_{\text{corr}}$  dan  $i_p$  meningkat dengan kenaikan temperatur. Hal ini juga sejalan dengan penurunan kestabilan lapisan pasif (karena kenaikan laju difusi ion) dan kenaikan kinetika reaksi. Kenaikan konsentrasi amine menghasilkan laju korosi yang lebih tinggi. Retak yang

dihasilkan lebih panjang pada konsentrasi amine dan temperatur yang lebih tinggi (Panahi H. , 2019).

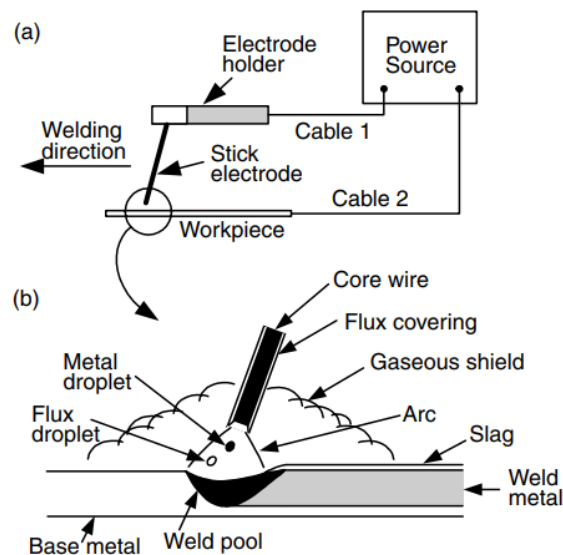
Sebelumnya pada tahun 2018, Panahi juga melakukan penelitian terhadap perilaku korosi dan korosi retak tegang baja tahan karat austenitic 304 dan 316 pada lingkungan aMDEA. Pengujian dilakukan dengan metode U-bend serta polarisasi siklik dengan variasi konsentrasi amine serta temperatur. Berbeda dengan pengujian pada tahun 2019, dalam pengujian ini ditemukan bahwa kenaikan konsentrasi amine hanya sedikit berpengaruh terhadap korosi dan korosi retak tegang material baja tahan karat 304 dan 316. Namun, kenaikan temperatur dapat menaikkan laju korosi. Selain itu, didapatkan juga hasil bahwa baja tahan karat 304 lebih rentan terhadap korosi retak tegang dibanding tipe 316, karena lapisan pasif yang tidak stabil (Panahi H. , 2018).

Korosi dan korosi retak tegang pada material baja karbon API 5L X52 dalam lingkungan amine diamatai oleh Javidi pada tahun 2019. Dalam penelitiannya, metode yang digunakan untuk korosi retak tegang adalah pengujian slow strain rate sesuai NACE TM0198. Sedangkan pengujian polarisasi dilakukan menggunakan variasi larutan DEA dan kontaminasi CO<sub>2</sub> dan/atau H<sub>2</sub>S dengan mengacu ke ASTM G3. Semua variasi larutan diuji dalam variasi temperatur 25, 40, 60, 80°C. Dari pengujian yang dilakukan, didapatkan hasil bahwa lingkungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S terlarut dalam DEA memiliki kerentanan korosi retak tegang yang lebih rendah dibanding lingkungan tanpa DEA. Dalam lingkungan DEA yang terkontaminasi CO<sub>2</sub>, laju korosi dan kerentanan korosi retak tegang akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan temperatur. Hal ini dinyatakan disebabkan oleh kenaikan kinetik pembentukan *heat stable amine salt* serta naiknya laju kerusakan amine pada temperatur yang semakin tinggi (Javidi, 2017).

## 2.5. Pengelasan Baja Karbon dan Baja Tahan Karat

### 2.5.1. Shield Metal Arc Welding (SMAW)

SMAW adalah proses untuk pengambungan logam melalui pelelehan dengan panas yang dihasilkan oleh busur antara batang elektroda yang memiliki pelapis dengan logam yang akan disambung. Elektroda disambungkan ke sumber daya dengan kabel, sementara terdapat kabel lain yang menghubungkan logam yang akan disambung ke sumber daya. Elektroda yang dipakai memiliki pelapis yang didalamnya terdapat inti yang disebut kawat las. Kawat ini menghantarkan arus listrik serta menjadi logam pengisi dalam sambungan las. Panas yang dihasilkan dari busur antara kawat dan logam yang dilas menyebabkan kawat dan pelapis elektroda meleleh secara bersamaan sehingga menghasilkan lelehan logam las. Lelehan logam las ini kemudian terkumpul dalam kampuh las dan membeku menjadi logam lasan. Bagian lelehan logam las yang memiliki masa lebih kecil akan bergerak ke permukaan menjadi kerak lasan. Dalam pengelasan SMAW, kawat lasan dilapisi material tertentu dengan tujuan melindungi logam lasan dari proses oksidasi dengan udara, menjaga kestabilan busur lasan, mengontrol paduan logam lasan, serta meningkatkan laju deposisi (Kou, 2003).



Gambar 2. 3 SMAW: (a) Proses Keseluruhan, (b) Area Lasan (Kou, 2003)

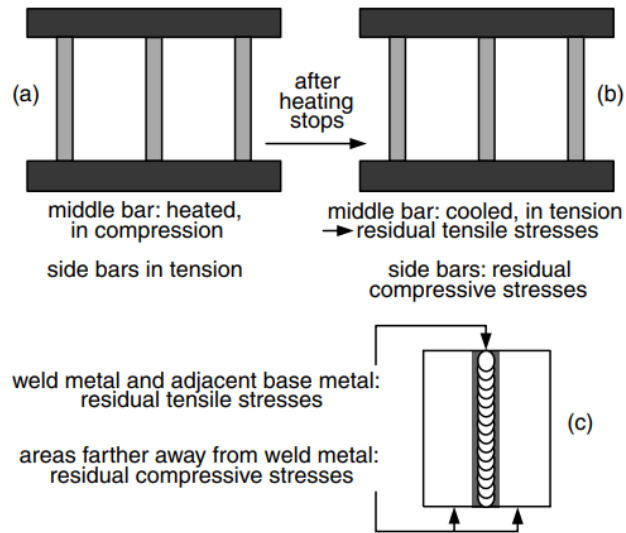


### **2.5.2. Spesifikasi Prosedur Pengelasan**

Dalam rangka menjaga kualitas hasil lasan, maka harus dibuat dan dibakukan suatu prosedur pengelasan dengan rangkaian proses pengujian untuk membuktikan sifat mekaniknya. Prosedur pengelasan dapat dibuat dengan mengacu kepada berbagai standar, salah satunya adalah ASME IX. Dalam standar ini, prosedur pengelasan disebut *Welding Procedure Specification* (WPS). Proses pembuatan suatu WPS dimulai dengan pembuatan spesimen lasan yang dicatat semua parameter penting dalam prosesnya. Selanjutnya, spesimen tersebut diuji secara visual dan mekanik dengan kriteria penerimaan yang sudah ditentukan. WPS bersifat spesifik untuk setiap proses serta material yang akan dilas (ASME, 2010). Perbedaan parameter pengelasan dapat menyebabkan perbedaan hasil pengelasan. Sebagai contoh penggunaan logam pengisi E6013 dan E309L untuk pengelasan baja karbon dan baja tahan karat. Dalam penelitiannya, akan terjadi perbedaan dalam struktur mikro, luasan area yang dipengaruhi panas (HAZ), serta persentase dilusi (Pahlawan, 2020).

### **2.6. Tegangan Sisa**

Tegangan sisa adalah tegangan yang terjadi setelah pembebanan pada suatu material dilepaskan. Tengan sisa ini biasanya disebut tegangan internal. Tengan sisa terjadi pada material yang sebelumnya diberikan temperatur yang tidak seragam seperti dalam proses pengalasan (tegangan termal). Kondisi ini dapat dijelaskan pada gambar dibawah. Logam lasan diumpakan sebagai logam dibagian tengah, sedangkan area yang jauh dari lasan adalah dua logam disampingnya. Kontraksi dan ekspasi pada logam lasan dan area sekitarnya dihambat oleh area lain yang berada jauh dari logam lasan. Akibatnya, setelah pendinginan hingga temperatur ruangan, tegangan tarik sisa terjadi logam lasan dan area sekitarnya, sedangkan tegangan kompresi sisa terjadi pada area yang jauh dari logam lasan.

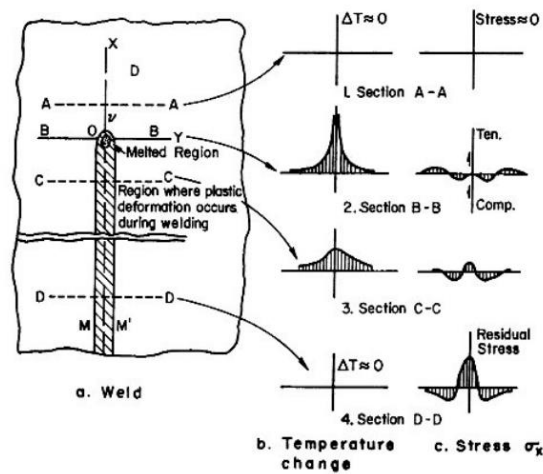


Gambar 2. 4 Tegangan Akibat Panas: (a) Saat Pemanasan, (b) Saat Pendinginan, (c) Tegangan Sisa (Kou, 2003)

Gambar dibawah ini menjelaskan skema perubahan temperatur ( $\Delta T$ ) dan tegangan yang searah dengan pengelasan ( $\sigma_x$ ). Potongan A-A menunjukan area didapan sumber panas yang belum terpengaruh signifikan oleh panas yang dihasilkan; perubahan temperatur belum terjadi ( $\Delta T = 0$ ) dan kurva distribusi temperatur masih rata. Potongan B-B merupakan bagian dimana sumber panas tepat berada, sehingga kurva distribusi temperatur cenderung berbentuk sangat tajam. Pada potongan C-C, dengan posisi dibelakang sumber panas, kurva distribusi temperatur cenderung lebih landai. Kurva distribusi temperature kembali rata pada posisi potongan D-D.

Dengan mengambil asumsi bahwa tegangan terjadi pada arah longitudinal akibat panas,  $\sigma_x$ . Karena potongan A-A tidak dipengaruhi panas, maka  $\sigma_x = 0$ . Pada potongan B-B, tepat pada titik sumber panas,  $\sigma_x$  mendekati nol. Sementara di titik yang lebih jauh akan memiliki tegangan kompresi karena ekspansi yang terjadi pada area ini terhalang oleh area lain yang memiliki temperatur lebih rendah. Pada titik yang lebih jauh, terjadi tegangan tarik sebagai penyeimbang tegangan kompresi yang ada. Disepanjang potongan C-C, area logam lasan dan sekitarnya dalam proses pendinginan dan cenderung berkontraksi menghasilkan tegangan tarik. Sedangkan area yang lebih jauh

mengalami tegangan kompresi. Akhirnya, pada potongan D-D yang berada jauh dibelakang sumber panas dimana logam lasan dan area sekitarnya sudah membeku dan berkontraksi lebih banyak, menghasilkan tegangan tarik yang lebih besar dari sebelumnya. Begitu pula tegangan kompresi untuk area yang lebih jauh. Karena tidak ada lagi panas yang mempengaruhi area ini, maka distribusi tegangan pada potongan ini akan bersifat tetap yang akhirnya membentuk distribusi tegangan sisa (Kou, 2003).

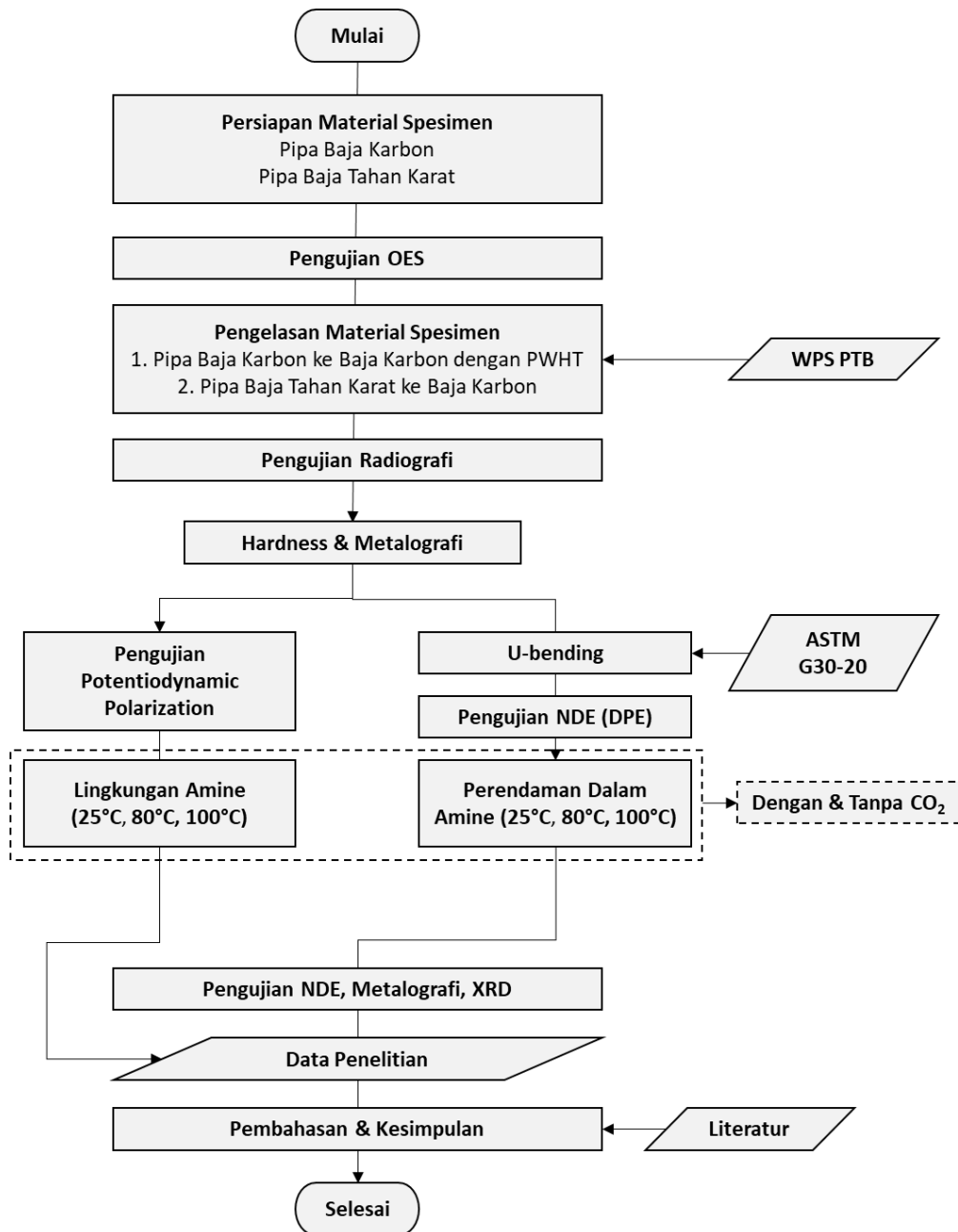


Gambar 2. 5 Perubahan Temperatur dan Tegangan dalam Proses Pengelasan (Kou, 2003)

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

### BAB III METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

## 3.2. Bahan Penelitian

### 3.2.1. Baja Karbon ASTM A285 Gr. C & Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

Material baja karbon yang digunakan adalah pelat dengan spesifikasi ASTM A285 Gr. C yang memiliki ketebalan  $\frac{1}{4}$ ". Verifikasi komposisi kimia material dilakukan melalui *mill certificate* serta pengujian XRF.

Material baja tahan karat yang digunakan adalah pipa dengan spesifikasi ASTM A240-TP304 yang memiliki ketebalan  $\frac{1}{4}$ " mm. Verifikasi komposisi kimia material dilakukan melalui *mill certificate* serta pengujian XRF.

### 3.2.2. Pengujian OES (Optical Emission Spectrometer)

Pengujian OES dilakukan di Laboratorium Metalurgi & NDT PT Pupuk Kalimantan Timur (PKT) menggunakan alat Hitachi PMI Smart Master OES System. Proses pengujian ini dilakukan pada material dasar sebelum dilakukan pengelasan. Pengujian ini dilakukan untuk mencocokkan data komposisi unsur material yang diterima dari fabrikator dengan kondisi aktualnya.



Gambar 3. 2 Perangkat Hitachi PMI Smart Master OES System

### 3.2.3. Elektroda E6010, E7018, & E309

Terdapat dua elektroda yang digunakan dalam penelitian ini yaitu E6010 (root) & E7018 (filler) untuk pengelasan antara baja karbon dengan baja karbon serta E309 untuk pengelasan antara baja karbon dengan baja tahan karat. Detail spesifikasi setiap elektroda dapat dilihat pada Tabel 3. 1.

Tabel 3. 1 Data Elektroda Untuk Proses Pengelasan Spesimen

<b>Item</b>	<b>E6010</b>	<b>E7018</b>	<b>E309</b>
F. No	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Spesifikasi No. (SFA)	<b>SFA-5.1</b>	<b>SFA-5.1</b>	<b>SFA-5.4</b>
Klasifikasi AWS	<b>AWS A5.1</b>	<b>AWS A5.1</b>	<b>AWS A5.4</b>
Diameter	<b>1/8"</b>	<b>1/8"</b>	<b>1/8"</b>

### 3.2.4. Larutan Amine

Larutan amine yang digunakan adalah tertiary *activated methyldiethanolamine* (aMDEA). Larutan amine dikirim dari plant site LNG Bontang. Berdasarkan *data sheet*, informasi terkait aMDEA adalah sebagai berikut:

- a. Wujud : cairan
- b. Warna : tidak berwarna – kuning
- c. Bau : seperti amina
- d. Titik leleh : 5 - 6°C
- e. Titik didih : >100°C
- f. pH : 13 – 14 (100 g/l, 20°C)
- g. Konsentrasi : 40% dalam air

Informasi pada N-Methyldiethanolamine: Koefisien distribusi n-oktanol/air (log Pow): -1.08 (25 °C; pH: 9.9 - 10.4).

Informasi pada Piperazine: Koefisien distribusi n-oktanol/air (log Pow): -1.24 (25 °C; pH: 11).

### 3.2.5. Gas CO<sub>2</sub>

Gas CO<sub>2</sub> yang digunakan dalam penelitian ini adalah gas CO<sub>2</sub> yang memiliki kemurnian 99,99%. Gas ini dihembuskan kedalam larutan amine secara terus menerus dengan kontrol regulator.

### 3.3. Pelaksanaan Penelitian

#### 3.3.1. Proses Pengelasan

Seluruh proses pengelasan dilakukan di bengkel PT Badak NGL oleh juru las yang telah melalui tahap kualifikasi. Prosedur pengelasan dilakukan berdasarkan *welding procedur specification* (WPS) yang sudah diuji dan disertifikasi berdasarkan ASME IX serta peraturan pemerintah. Terdapat dua WPS yang digunakan dalam penelitian ini.

a. WPS P1-A-c-Lh

Prosedur ini digunakan untuk melakukan pengelasan antara baja karbon (P1) dengan baja karbon (P1). Proses pengelasan menggunakan metode SMAW (*shield metal arc welding*) dengan elektroda E6010 dan elektroda hidrogen rendah E7018.

b. WPS P8, P1-A

Prosedur pengelasan ini digunakan untuk melakukan pengelasan antara baja karbon (P1) dengan baja tahan karat (P8). Proses pengelasan menggunakan metode SMAW dengan elektroda E309.

Selama proses pengelasan, akan dilakukan pengukuran parameter pengelasan *heat input* (arus, tegangan, dan *travel speed*). Hasil pengelasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar III-4 memiliki kontur yang baik, tanpa adanya takikan yang dapat menyebabkan konsentrasi tegangan.





Gambar 3. 3 Proses Pengelasan Menggunakan Metode SMAW



(a)

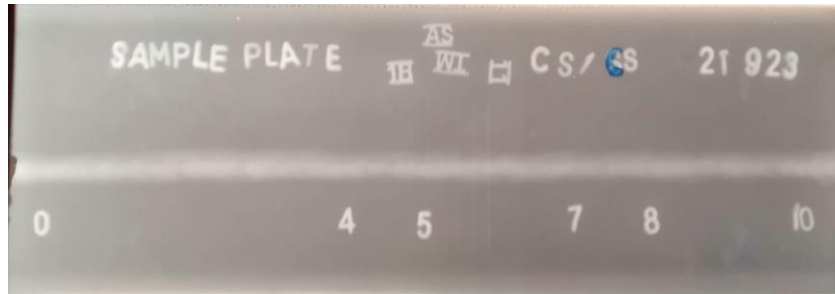
(b)

Gambar 3. 4 (a) Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304

### 3.3.2. Proses Pengujian Radiografi & Pemotongan

Pengujian radiografi dilakukan setelah dilakukan pengelasan untuk memastikan kualitas lasan. Lasan yang mengandung cacat seperti retak, kekurangan logam pengisi, maupun cacat fusi yang dapat membuat bias hasil akhir penelitian yang menitikberatkan pada pengujian ketahanan retak. Pengujian dilakukan dengan menembakan gelombang radiasi dari isotop Iridium 192 (Ir192) dengan kekuatan energi radiasi sebesar 30 ci. Melalui pengamatan visual pada film radiografi, lasan yang

dihasilkan pada kedua pelat memiliki profil yang baik, tanpa ditemukan cacat planar maupun volumetrik.



(a)



(b)

Gambar 3. 5 (a) Film Radiografi Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Film Radiografi Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304

Setelah lolos dari pengujian radiografi, spesimen dipotong untuk mempersiapkan ukuran sampel uji bending. Pemotongan dilakukan menggunakan mesin potong otomatis yang dilengkapi dengan *water coolant* untuk meminimalisir risiko perubahan struktur mikro material akibat panas yang timbul saat pemotongan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 3. 6 (a) Proses Pemotongan Spesimen, (b) Potongan Spesimen Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (c) Potongan Spesimen Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304

### 3.3.3. Proses Perlakuan Panas Pasca Pengelasan

Perlakuan panas pasca pengelasan (*post weld heat treatment* – PWHT), dilakukan hanya untuk sambungan las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C. Mengacu ke API 945, PWHT dilakukan pada temperatur 620°C dengan waktu tahan selama 1 jam. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan perbaikan sifat mekanik pada baja karbon dengan menghilangkan tegangan sisa yang juga akan menurunkan risiko untuk terjadinya korosi retak tegang pada lingkungan amine. Selain itu, PWHT juga direkomendasikan karena dapat menurunkan kekerasan pada bagian HAZ.



(a)



(b)

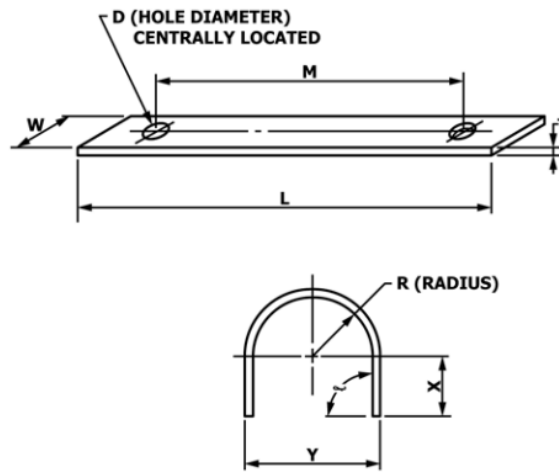
Gambar 3. 7 (a) Proses PWHT Sambungan Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C, (b) Contoh Spesimen Hasil PWHT

### 3.3.4. Proses Bending Berdasarkan ASTM G30-97

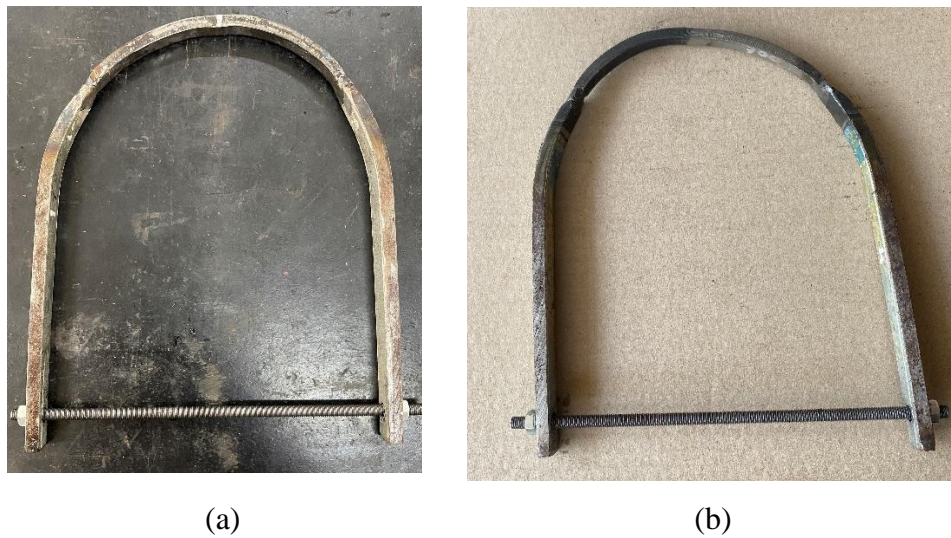
Pengujian ketahanan retak tegang dilakukan pada spesimen yang dibentuk sesuai dengan standar ASTM G30-97. Spesimen U-bend dibuat dengan memotong material yang telah dilas kemudian dibentuk U melalui proses bending (*cold work*). Untuk tujuan membandingkan kondisi antar spesimen, maka dimensi seluruh spesimen dibuat seragam. Detail dimensi setiap spesimen ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 3. 2 Detail Dimensi Spesimen U-bend

L (mm)	M (mm)	W (mm)	T (mm)	D (mm)	X (mm)	Y (mm)	R (mm)	$\alpha$ , rad
100	90	9	6	7	25	38	76	1.57



Gambar 3. 8 Detail Ilustrasi & Dimensi Spesimen U-bend

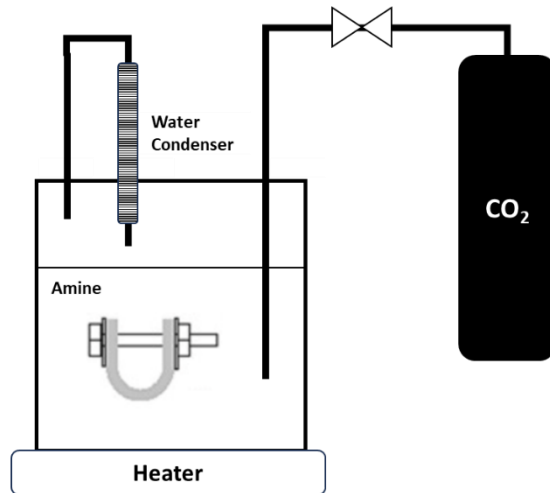


Gambar 3. 9 Spesimen U-bend (a) Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan PWHT, (b) Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304

### 3.3.5. Proses Perendaman Pada Lingkungan Amine

Untuk melihat perilaku material pada kondisi lingkungan kerja, maka harus dilakukan pengujian dengan merendam spesimen U-bend pada lingkungan amine selama 14 hari. Instalasi peralatan khusus dibuat untuk menunjang penelitian ini. Instalasi ini terdiri dari tabung tempat wadah amine yang kedap udara, saluran injeksi

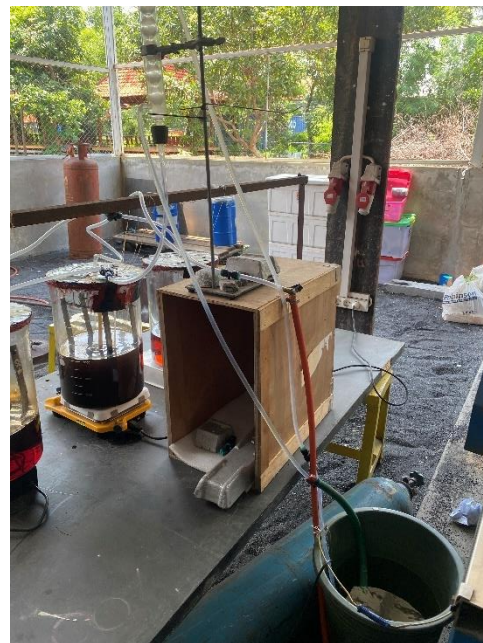
CO<sub>2</sub>, pemanas, serta condenser air. Ilustrasi instalasi peralatan tersebut dapat dilihat pada gambar dibawah.



Gambar 3. 7 Skema Instalasi Peralatan Perendaman Amine Untuk Pengujian Korosi Retak Tegang



(a)



(b)

Gambar 3. 11 Instalasi Pengujian Korosi Retak Tegang Dengan Perendaman Dalam Larutan Amine (a) Tabung Amine dan Spesimen, (b) Sumber CO<sub>2</sub> dan Pendingin Air

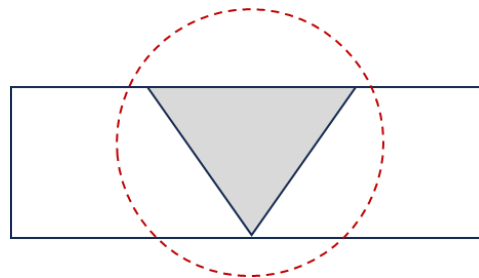
### 3.4. Pengujian Sampel

#### 3.4.1. Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi dilakukan pada material dasar, logam lasan, dan HAZ setelah proses pengelasan (sebelum proses bending) dengan mengambil potongan melintang bagian lasan. Proses metalografi dilakukan di Laboratorium Metalurgi Teknik Material & Metalurgi ITS menggunakan mikroskop Olympus GX51 Microscope. Persiapan spesimen meliputi proses grinding dan etsa menggunakan larutan nital untuk baja karbon dan carpenter untuk baja tahan karat selama masing – masing 5 dan 14 detik.



(a)



(b)

Gambar 3. 82 (a) Mikroskop Untuk Pengujian Metalografi, (b) Area Pengujian & Spesimen Metalografi

#### 3.4.2. Pengujian Kekerasan (*Micro Hardness*)

Pengujian kekerasan dilakukan pada titik yang tersebar pada material logam induk, logam lasan, serta area antara logam induk dan logam lasan, masing – masing sebanyak 3 (tiga) titik. Pengujian kekerasan dilakukan pada material yang telah dilas (sebelum proses bending). Pengujian dilakukan di Laboratorium Metalurgi Teknik Material & Metalurgi, menggunakan beban sebesar 5 kgf dengan waktu indentasi selama 10 detik

menggunakan alat Wolpert UH930 Universal. Sebelum dilakukan indentasi, dilakukan persiapan pada permukaan spesimen agar berada dalam kondisi rata dan bersih dari kontaminan. Skala yang digunakan adalah *Hardness Vicker* (HV).



(a)



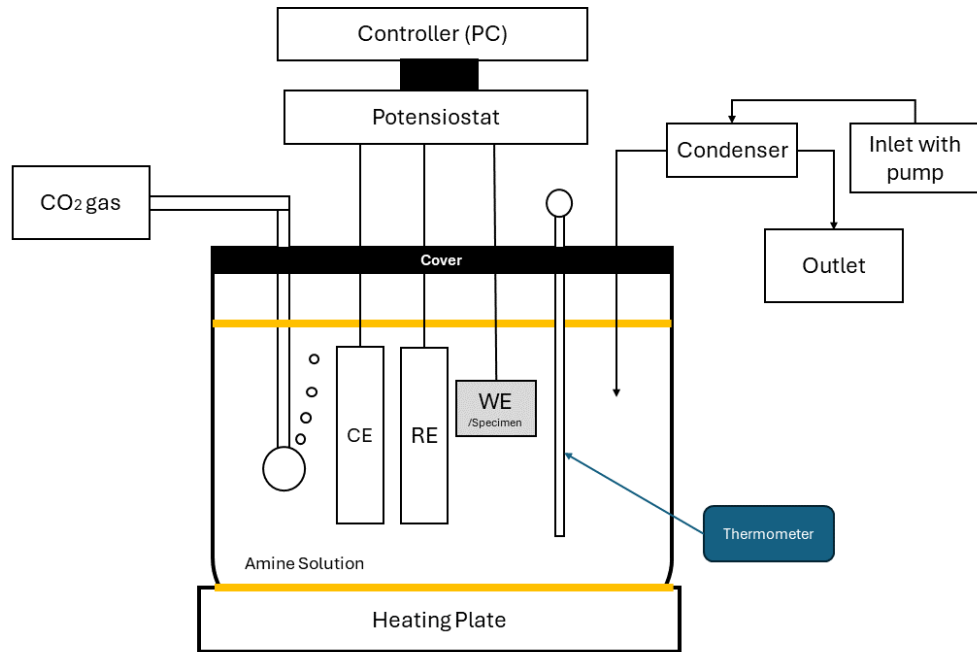
(b)

Gambar 3. 93 (a) Peralatan Pengujian Kekerasan, (b) Spesimen Pengujian Kekerasan

### 3.4.3. Pengujian *Potentiodynamic Polarization*

Pengujian *potentiodynamic polarization* dilakukan pada dua buah material dalam lingkungan amine (dengan variasi temperatur dan kandungan CO<sub>2</sub>). Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan kurva polarisasi [untuk mendapatkan potensial korosi (E<sub>corr</sub>), rapat arus korosi (I<sub>corr</sub>), dan laju korosi (i<sub>corr</sub>)] material hasil pengelasan. Terdapat tiga jenis elektroda yang digunakan dalam pengukuran ini seperti skema pada Gambar 3. 13, yaitu graphite counter electrode, reference electrode menggunakan Saturated Calomel Electrode (SCE), dan elektroda benda uji. Pengujian dilakukan di Laboratorium Korosi Teknik Material dan Metalurgi.





Gambar 3. 14 Skema Instalasi Untuk Pengujian *Potentiodynamic Polarization*



Gambar 3. 15 Instalasi Pengujian *Potentiodynamic Polarization*

#### 3.4.4. Pengujian XRD

Evaluasi struktur kristal dan senyawa secara kualitatif dilakukan melalui pengujian X-Ray Diffraction (XRD) untuk sampel yang setelah melalui proses perendaman dalam lingkungan amine dengan menggunakan alat XRD PAN Analytical. Hal utama yang dianalisa adalah deposit yang terbentuk pada permukaan spesimen setelah adanya proses interaksi dengan lingkungan. Sinar X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar-X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum sinar X memiliki panjang gelombang  $10^{-3}$  - 10 nm, berfrekuensi  $10^{17}$  -  $10^{20}$  Hz dan memiliki energi 103 - 106 eV. Panjang gelombang sinar-X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. XRD digunakan untuk menentukan ukuran kristal, regangan kisi, komposisi kimia dan keadaan lain yang memiliki orde yang sama.



Gambar 3. 16 Alat Pengujian XRD

### 3.5. Rancangan Penelitian

Tabel 3. 3 Pengujian Spesimen Hasil Pengelasan

Spesimen	Pengujian		
	Hardness & Metallography	OES	Rad.
Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT)	x	x	x
Baja Karbon x Baja Tahan Karat	x	x	x

Tabel 3. 4 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT) pada Lingkungan Amine Tanpa CO<sub>2</sub>

Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT)	Pengujian			
	NDT	Metalografi	XRD	Pot. Din. Pol.
25°C	x	x	x	x
80°C	x	x	x	x
100°C	x	x	x	x

Tabel 3. 5 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT) pada Lingkungan Amine Dengan CO<sub>2</sub>

Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C (PWHT)	Pengujian			
	NDT	Metalografi	XRD	Pot. Din. Pol.
25°C	x	x	x	x
80°C	x	x	x	x
100°C	x	x	x	x

Tabel 3. 6 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 pada Lingkungan Amine Tanpa CO<sub>2</sub>

Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304	Pengujian			
	NDT	Metalografi	XRD	Pot. Din. Pol.
25°C	x	x	x	x
80°C	x	x	x	x
100°C	x	x	x	x

Tabel 3. 7 Pengujian Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304 pada Lingkungan Amine Dengan CO<sub>2</sub>

Spesimen U-bend Las ASTM A285 Gr. C dan ASTM A240-TP304	Pengujian			
	NDT	Metalografi	XRD	Pot. Din. Pol.
25°C	x	x	x	x
80°C	x	x	x	x
100°C	x	x	x	x

Tabel 3. 8 Tata Waktu Penelitian

No	Kegiatan	2023					2024						
		Agu	Sep	Okt	Nov	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1	Persiapan alat & bahan	■											
2	Pembuatan spesimen		■										
3	Pembuatan alat pengujian dalam lingkungan amine		■	■									
4	Pengujian		■	■	■	■	■	■	■	■	■		
5	Analisa data dan pembahasan					■	■	■	■	■	■	■	■

## BAB IV DATA & PEMBAHASAN

### 4.1. Analisis Spesifikasi Material Logam Induk (*Base Metal*)

Analisa material logam induk dilakukan untuk memastikan bahwa kandungan unsur paduan utama logam induk yang dipakai untuk pengujian yaitu baja karbon dan baja tahan karat sesuai dengan spesifikasi standar. Analisa dilakukan dengan membandingkan data komposisi kimia yang didapat dengan menggunakan alat OES sebelum dilakukan pengelasan dan data yang dipersyaratkan oleh standar ASTM yang diacu oleh ASME BVPC Section II. Kedua data tersebut disajikan pada Tabel 4. 1. Berdasarkan analisa, dapat disimpulkan bahwa kandungan unsur utama pada kedua jenis logam induk telah memenuhi standar. Pada baja karbon ASTM A285 Gr. C, unsur paduan Mn menjadi paduan utama selain karbon. Sedangkan untuk baja tahan karat ASTM A240-TP304, kandungan Cr dan Ni merupakan paduan penting yang jumlahnya harus dikontrol untuk mendapatkan sifat mekanik yang diinginkan.

Tabel 4. 1 Analisis Kandungan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C

	%wt (max)							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
<b>ASTM A285 Gr. C</b>	0,28	0,98	0,0355	0,035	-	-	-	-
<b>Material Sampel</b>	0,178	0,287	0,0102	0,008	-	0,0083	0,0070	-

Tabel 4. 2 Analisa Kandungan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

	%wt (max)							
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
<b>ASTM A240- TP304</b>	0,08	2	0,045	0,030	0,75	18 – 20	8 – 10,5	0.1
<b>Material Sampel</b>	0,02	1,44	0,042	0,002	-	18,60	8,06	-

## 4.2. Analisis Parameter Pengelasan

Selamat proses pengelasan berlangsung, dilakukan pencatatan parameter yang berkaitan dengan energi panas yang diterima material saat dilakukan proses pengelasan. Energi panas yang diterima material selama proses pengelasan (*heat input*), dihitung melalui persamaan berikut:

$$H = \eta \left( \frac{I \times V \times 0,06}{s} \right) \quad (4.1)$$

H = Heat Input (kJ/mm)

I = Arus (A)

V = Tegangan (V)

S = Laju Pengelasan (mm/menit)

H = Faktor efisiensi SMWA (0,75)

Tabel 4. 3 Parameter Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C

Pass	Elektrod	Arus (A)	Tegangan (V)	Laju Pengelasan (mm/menit)	Heat Input (kJ/mm)
1 ( <i>root</i> )	E6010	64	73.6	148,76	1,42
2 ( <i>filler</i> )	E7018	77	73.6	144,00	1,77
3 ( <i>capping</i> )	E7018	85	73.6	135,34	2,05

Tabel 4. 4 Parameter Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

Pass	Elektrod	Arus (A)	Tegangan (V)	Laju Pengelasan (mm/menit)	Heat Input (kJ/mm)
1 ( <i>root</i> )	E309	58	73.6	156,52	1,22
2 ( <i>filler</i> )	E309	75	73.6	150,00	1,66
3 ( <i>filler</i> )	E309	83	73.6	129,50	2,12
4 ( <i>capping</i> )	E309	78	73.6	128,57	2,01

Berdasarkan data yang diambil dan dihitung, *heat input* kedua pengelasan tidak berbeda secara signifikan. *Heat input* pada pengelasan *root* memiliki nilai yang lebih kecil karena laju pengelasan pada lapisan ini lebih cepat dibanding lapisan di atasnya. Jika dibandingkan dengan penelitian serupa yang disampaikan oleh S. Murugan, dimana didapatkan parameter *heat input* yang tidak jauh berbeda antara pengelasan

baja karbon dan pengelasan baja tahan karat dengan nilai terendah berada pada lapisan *root*. Dalam penelitiannya juga disebutkan bahwa dengan *heat input* yang diberikan akan dihasilkan profil temperatur yang berbeda antara dua pengelasan ini. Temperatur tertinggi yang dicapai pada pengelasan baja tahan karat akan lebih tinggi dibandingkan pengelasan baja karbon, meskipun dengan *heat input* yang lebih rendah pada pengelasan baja tahan karat. Temperatur tertinggi tersebut berada pada titik paling dekat dengan *weld line*. Pada titik yang semakin jauh dari *weld line* (ke arah logam induk), temperatur pada baja karbon cenderung lebih tinggi dibandingkan pada baja tahan karat. Fenomena ini disebabkan oleh konduktifitas termal baja karbon (60 W/m-K) yang 3 kali lebih tinggi dibandingkan baja tahan karat (16 W/m-K) sehingga laju perpindahan energi panas ke arah logam induk pada baja karbon lebih cepat (Murugan, 2001). Dalam penelitian tentang pengelasan baja karbon dan baja tahan karat, laju pendinginan pada baja karbon akan lebih besar dibanding baja tahan karat (Osoba, 2021). Tingginya temperatur puncak yang dicapai dalam pengelasan baja karbon dan baja tahan karat dibanding pengelasan antar baja karbon juga dihasilkan dari analisa elemen hingga. Selain itu, disimulasikan pula bahwa temperatur selama pengelasan yang berfluktuasi pada pengelasan baja karbon dan baja tahan karat (Alcantar-Modragón, 2021). Data terkait perbedaan puncak, rambatan, dan laju perubahan temperature pada area baja karbon dan baja tahan karat pada pengelasan baja karbon dan baja tahan karat diidentifikasi melalui percobaan. Dari data pengukuran, didapatkan bahwa temperatur puncak pada area baja tahan karat lebih tinggi dibanding pada area baja karbon. Namun hal ini hanya terjadi pada titik didekat area las. Semakin jauh dari titik lasan, temperature baja karbon menunjukkan angka lebih tinggi. Laju pemanasan dan pendinginan pada area baja karbon juga lebih tinggi dibanding pada area baja tahan karat (Nhung L. T., 2017).

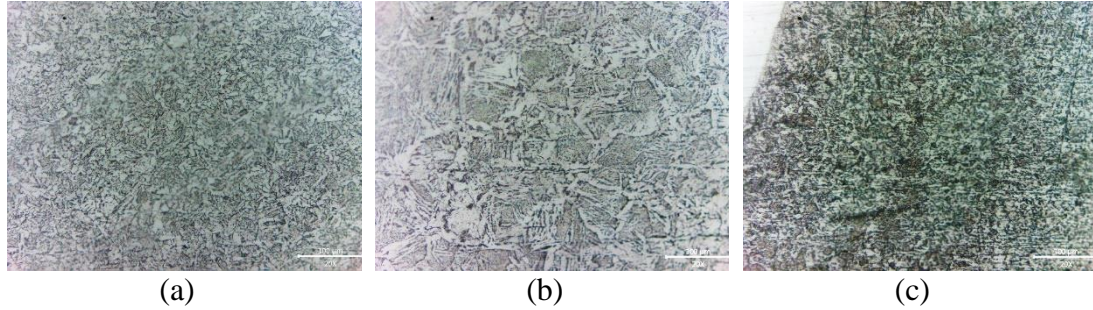
#### **4.3. Analisis Pengaruh Perbedaan Sambungan Las Terhadap Struktur Mikro**

Dalam penelitian ini, pengujian metalografi dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi pada struktur mikro baja karbon ASTM A285 Gr. C setelah mengalami

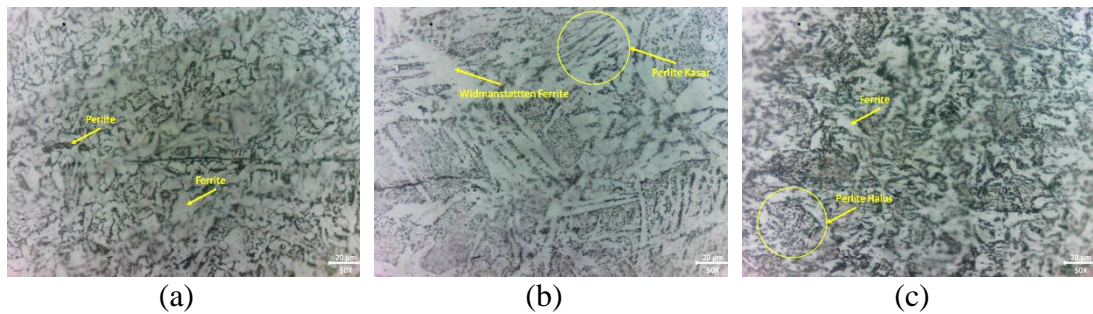
siklus panas selama proses pengelasan dan PWHT serta struktur mikro baja tahan karat ASTM A240-TP304. Analisa dilakukan dengan membandingkan struktur mikro antara logam induk dan HAZ untuk masing – masing spesimen.

Gambar 4. 2a menunjukkan struktur mikro baja karbon ASTM A285 Gr. C *as received*. Berdasarkan analisa komposisi material, baja ini merupakan baja karbon rendah dengan paduan 0,28%wt karbon. Dari hasil metalografi, baja ini memiliki struktur mikro berupa ferrite serta perlite yang merupakan hasil dari proses pengecoran. Kemudian pada gambar 4. 2b, ditunjukkan struktur mikro HAZ baja karbon ASTM A285 Gr. C setelah dilakukan proses pengelasan dan PWHT. Dari gambar tersebut, dapat teramati terbentuknya fase Widmanstatten ferrit dan koloni perlit kasar. Perlit kasar merupakan fase yang terjadi pada temperature sedikit dibawah temperature eutektoid yang memberikan waktu dan energi untuk atom karbon berdifusi lebih jauh. Hal ini menghasilkan struktur lamelar yang tebal (Callister, 2014). Terbentuknya pola Widmanstatten pada fase ferit rentan terjadi pada baja dengan kadar karbon <0,3%, terlebih bila memiliki struktur austenite yang kasar. Pola Widmanstatten terbentuk pada kombinasi antara ukuran butir, laju pendinginan, dan kadar karbon yang tepat. Pada baja dengan kadar karbon yang sama, semakin besar ukuran butir, laju pendinginan untuk terjadinya pola Widmanstatten akan lebih rendah (Todorov, 2004). Struktur mikro seperti ini konsisten dengan pengamatan yang dilaporkan oleh Dodo dalam papernya tentang pengelasan antar baja karbon. Transformasi yang terjadi pada daerah HAZ melibatkan transformasi fase *solid state* (pertumbuhan butir, transformasi fase, dan tempering). Ukuran butir disebelah area fusi juga lebih besar dibanding logam induk. Hal ini terjadi karena adanya transformasi dari ferrite menjadi austenite, lalu austenite menjadi ferrite ( $\alpha$ ) selama siklus pengelasan (Dodo, 2016). Kondisi terbentuknya fase Widmanstatten ferit dan perlite, diikuti pertumbuhan butir juga dilaporkan pada pengelasan baja karbon yang dilakukan oleh Boumerzoug (Boumerzoug, 2010).





Gambar 4. 1 Struktur Mikro Baja Karbon ASTM A285 Gr. C Perbesaran 20x (a) *As Received*, (b) HAZ Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (c) HAZ Pada Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304



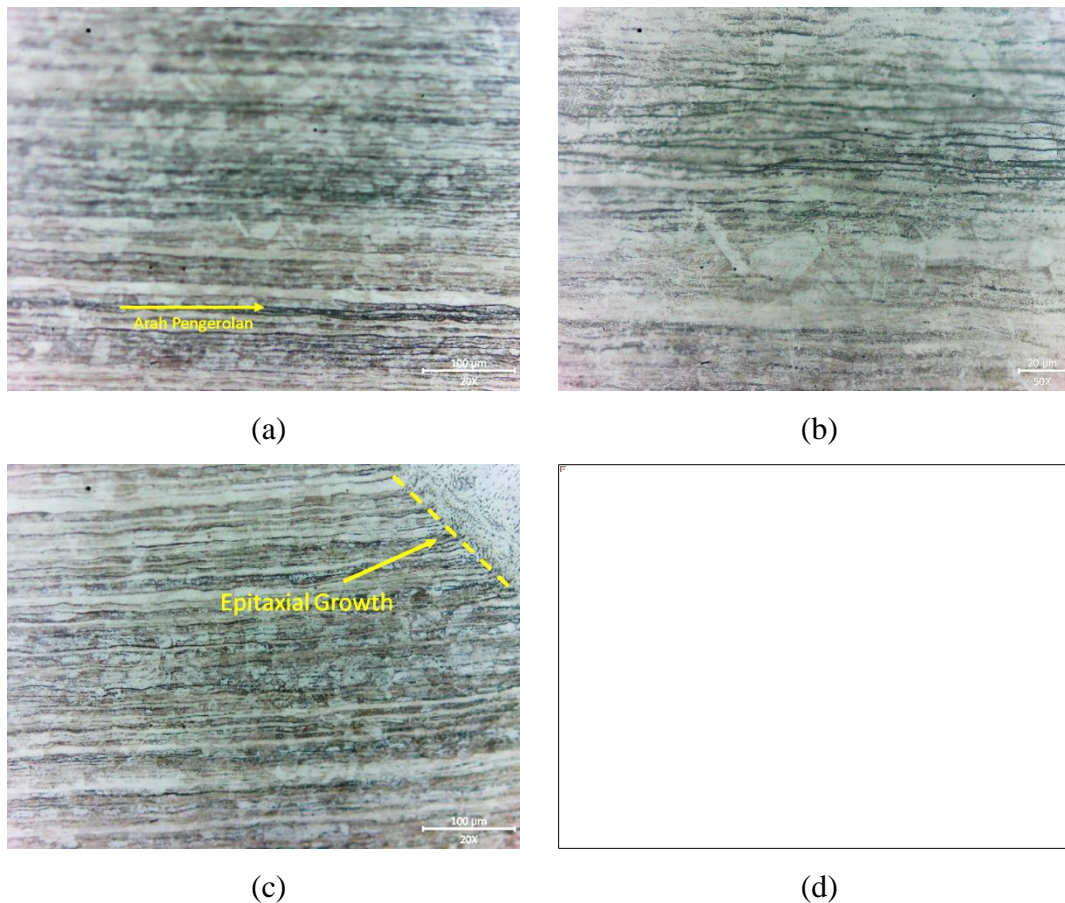
Gambar 4. 2 Struktur Mikro Baja Karbon ASTM A285 Gr. C Perbesaran 50x (a) *as received*, (b) HAZ Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (c) HAZ Pada Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

Mikrostruktur dari hasil pengelasan antara baja karbon dan baja tahan karat diperlihatkan oleh Gambar 4. 2c. Dari hasil pengamatan, fasa yang terbentuk adalah matriks ferrite pada perlite yang halus. Perlite yang halus ini terbentuk karena laju pendinginan yang cukup cepat sehingga menyebabkan penurunan kesempatan difusi karbon. Akibatnya, lapisan lamelar menjadi tipis dan membentuk perlite yang halus (Callister, 2014). Pada pengeelasan *multipass* baja karbon dan baja tahan karat, butir yang dihasilkan lebih halus dibandingkan pengelasan *singlepass*. Hal ini terjadi karena panas yang dihasilkan menunjang proses rekristalisasi fase austenite secara penuh, kemudian terdekomposisi menjadi perlite dan ferit selama proses pendinginan (Nhung L. T., 2018). Dari pembahasan fase diatas, dapat disimpulkan bahwa kondisi pendinginan pada pengelasan, baik pengelasan baja karbon rendah maupun pengelasan

baja karbon rendah dan baja tahan karat dengan kadar karbon rendah, meskipun tidak terjadi secara isothermal, tidak merubah fase material baja karbon menjadi fase yang lebih keras seperti bainite atau martensit. Selain itu, untuk baja karbon rendah, akan dibutuhkan pendinginan yang sangat cepat untuk terjadinya perubahan menuju fase karbida jika mengacu pada diagram pendinginan kontinyu.

Apabila dibandingkan ukuran butir logam induk baja karbon ASTM A285 Gr. C pada perbesaran yang sama (20x), dapat terlihat adanya pertumbuhan butir dari halus menjadi lebih kasar pada daerah HAZ pengelasan antara baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja karbon ASTM A285 Gr. C yang diikuti oleh PWHT (Gambar 4. 1b). Adanya kenaikan ukuran butir ini dimungkinkan karena adanya energi siklus panas yang diterima saat pengelasan serta PWHT yang memberikan waktu cukup bagi butir untuk tumbuh. Pertumbuhan butir seperti ini tidak terjadi pada daerah HAZ pengelasan antara baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 (Gambar 4. 1c). Jika dibandingkan dengan struktur mikro logam induk dan HAZ pada pengelasan antar baja karbon, maka ukuran butir yang dihasilkan cenderung lebih halus. Fenomena ini dapat terjadi karena temperatur pemanasan yang lebih tinggi untuk terjadinya proses rekristalisasi dan laju perpindahan panas pada pengelasan antara baja karbon dan baja tahan karat yang cenderung lebih besar ke arah baja karbon sehingga terjadi pendinginan yang lebih cepat, sebagaimana dijelaskan pada Sub Bab 4.2. Pendinginan yang lebih cepat ini tidak memberikan waktu yang cukup untuk butir dapat tumbuh membesar. Kondisi ini juga terjadi dalam penelitian yang dilakukan oleh Winarto, dimana dalam pengelasan antara baja karbon dan baja tahan karat, terjadi penurunan ukuran butir pada daerah HAZ, dibanding logam induknya. Ukuran butir akan semakin kecil seiring penurunan energi panas pengelasan yang menyebabkan laju pendinginan yang lebih cepat (Winarto, 2020). Penurunan ukuran butir pada HAZ juga disebutkan oleh Nhung pada penelitiannya tentang pengelasan baja karbon dan baja tahan karat. Perubahan ini juga kemungkinan dapat disertai dengan pembentukan fasa seperti martensit, bainit, dan perlit halus, tergantung temperatur puncak dan laju pendinginan yang dialami material (Nhung L. T., 2020).

Selanjutnya, mikrostruktur pada logam induk ASTM A240-TP304 diamati dan dibandingkan dengan mikrostrukturnya di daerah HAZ setelah dilakukan proses pengelasan. Gambar 4. 3 (a) dan (b) menunjukkan fase matriks austenite hasil proses pengerolan. Jika dibandingkan dengan mikrostruktur pada HAZ-nya setelah pengelasan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 3 (c) dan (d), tidak ditemukan terjadinya perubahan fase maupun bentuk butir pada material ASTM A240-TP304. Kondisi serupa juga dilaporkan oleh Nhung yang melakukan pengelasan antara baja karbon dan baja tahan karat austenitic dengan metode SMAW menggunakan kawat las E309L-16. Hanya saja, pada penelitiannya dilaporkan terjadi beberapa titik presipitasi karbida pada batas butir (Nhung L. T., 2020).

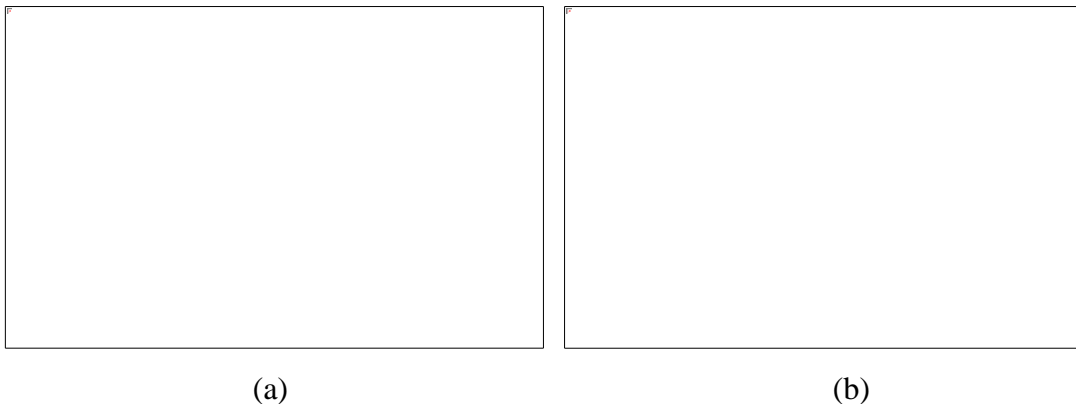


Gambar 4. 3 Perbandingan Mikrostruktur Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304, (a) dan (b) Logam Induk, (c) dan (d) HAZ

Tidak terjadinya perubahan ukuran butir pada daerah HAZ juga dilaporkan pada pengelasan baja karbon dan baja tahan karat dengan kadar karbon rendah. Selain itu, dikarenakan adanya panas selama pengelasan, terjadi pergerakan Cr (tidak diikuti oleh C dan Ni) dari pada daerah HAZ menuju ke arah baja karbon (Alcantar-Modragón, 2021). Bentuk struktur mikro austenite pada baja tahan karat tipe austenitik 304 yang sama juga dilaporkan pada penelitian yang dilakukan oleh Oktadinata. Dalam studinya, pada daerah HAZ yang berdekatan dengan fusion line, ditemukan perubahan arah butir yang disebut epitaxial growth (Oktadinata, 2019).

#### 4.4. Analisis Pengaruh Struktur Mikro Sambungan Las Terhadap Sifat Mekanik

Pengujian ini dilakukan untuk melihat adanya kemungkinan perubahan kekerasan akibat siklus pemanasan lokal yang terjadi selama proses pengelasan, terutama pada daerah antara logam induk dan logam lasan (*heat affected zone* – HAZ). Ilustrasi pengambilan data kekerasan ditunjukkan oleh Gambar 4. 4. Data yang dihasilkan kemudian disajikan dalam grafik yang diplot pada Gambar 4. 5.



Gambar 4. 4 Ilustrasi Titik Pengambilan Nilai Kekerasan (HV) (a) Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT, (b) Lasan Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

HAZ baja karbon ASTM A285 Gr. C pada pengelasan antara ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C yang telah di PWHT (area B dan Area C) terlihat tidak mengalami kenaikan signifikan dibanding dengan logam induknya. Sedangkan area A

yang merupakan HAZ pada baja karbon ASTM A285 Gr. C hasil pengelasan ASTM A285 Gr. C dengan ASTM A240-TP304 terlihat mengalami kenaikan jika dibandingkan area B.



Gambar 4. 5 Grafik Profile Kekerasan Sampel Uji Lasan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C dengan Perlakuan PWHT Serta Lasan Baja Karbon Lasan ASTM A285 Gr. C dengan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

Tabel 4. 5 menunjukkan detail hasil uji kekerasan untuk sambungan las baja karbon ASTM A285 Gr. C dan ASTM A285 Gr. C yang telah mendapat perlakuan PWHT. Dari data yang dihasilkan, terlihat bahwa daerah logam lasan yang merupakan hasil deposit elektroda E7018 memiliki tingkat kekerasan tertinggi. Sedangkan untuk area HAZ yang merupakan bagian dari logam induk mengalami kenaikan kekerasan yang tidak terlalu signifikan jika dibandingkan area logam induk yang tidak terkena efek panas pengelasan. Pembentukan pola Widmanstatten pada fase ferit juga tidak memberikan Dampak terhadap kekerasan setelah dilakukan PWHT. Tidak terjadinya kenaikan kekerasan yang signifikan juga dilaporkan pada penelitian sebelumnya. Pada pengelasan baja karbon dengan kekerasan awal 38 HRB, naik menjadi 42 HRB setelah pengelasan, dan turun kembali ke 40 HRB setelah dilakukan perlakuan panas (Dodo, 2016). Turunnya kekerasan pada HAZ akibat perlakuan panas juga dilaporkan pada

pengelasan baja ASTM A36. Perlakuan panas dilakukan pada temperatur 610°C selama 20 menit berhasil menurunkan kekerasan HAZ dari 210 menjadi 170 HBW (Zirwatul, 2017).

Tabel 4. 5 Hasil Uji Kekerasan Sambungan Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT

	<b>Logam Induk A36 (HV)</b>	<b>HAZ (HV)</b>	<b>Logam Lasan (HV)</b>	<b>HAZ (HV)</b>	<b>Logam Induk A36 (HV)</b>
	123,90	126,00	176,30	129,40	122,90
	124,00	130,90	173,60	127,80	127,10
	123,00	128,30	181,40	128,10	124,20
Rata - Rata	123,63	128,40	177,10	128,43	124,73

Hasil pengujian kekerasan dari sampel sambungan las baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 disajikan dengan detil pada Tabel 4. 6. Titik kekerasan tertinggi didapatkan pada logam lasan hasil deposit elektroda E309. Seperti yang disampaikan sebelumnya, terdapat kenaikan kekerasan terjadi pada area HAZ baja karbon ASTM A285 Gr. C. Hal ini didapat dari terbentuknya fase perlite halus. Perlite halus memiliki kekuatan dan kekerasan yang lebih tinggi, tetapi keuletan yang lebih rendah dibandingkan dengan perlite kasar (Callister, 2014). Ukuran butir yang semakin halus pada HAZ sambungan las baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 juga berdampak pada naiknya kekerasan pada area ini. Kekerasan pada suatu baja karbon rendah akan turun dengan naiknya ukuran rata – rata butirnya (Soleimani, Effect of grain size on the corrosion resistance of low carbon steel, 2020). Sedikit angka kenaikan pada logam induk baja tahan karat ASTM A240-TP304 juga terjadi, tanpa diikuti oleh perubahan ukuran butir maupun fase pada mikrostrukturnya. Profile kekerasan serupa untuk pengelasan baja karbon dan baja tahan karat juga dilaporkan oleh Alcantar pada studinya dimana terdapat kenaikan kekerasan pada HAZ baja karbon dan kekerasan yang stabil pada HAZ baja tahan karatnya. Kenaikan kekerasan pada HAZ baja karbon dikaitkan dengan fenomena penghalusan butir perlite dan ferrite (Alcantar-Modragón, 2021).

Tabel 4. 6 Hasil Uji Kekerasan Sambungan Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304

	Logam Induk A36 (HV)	HAZ (HV)	Logam Lasan (HV)	HAZ (HV)	Logam Induk SS304 (HV)
	121,90	147,60	211,00	198,70	191,40
	124,90	148,70	224,60	202,50	190,50
	128,00	153,10	213,30	207,70	192,30
Rata - Rata	124,93	149,80	216,30	202,97	191,40

#### 4.5. Analisa Pengaruh Temperatur dan Kandungan CO<sub>2</sub> Terhadap Perilaku Korosi Sambungan Las Dalam Lingkungan Amine

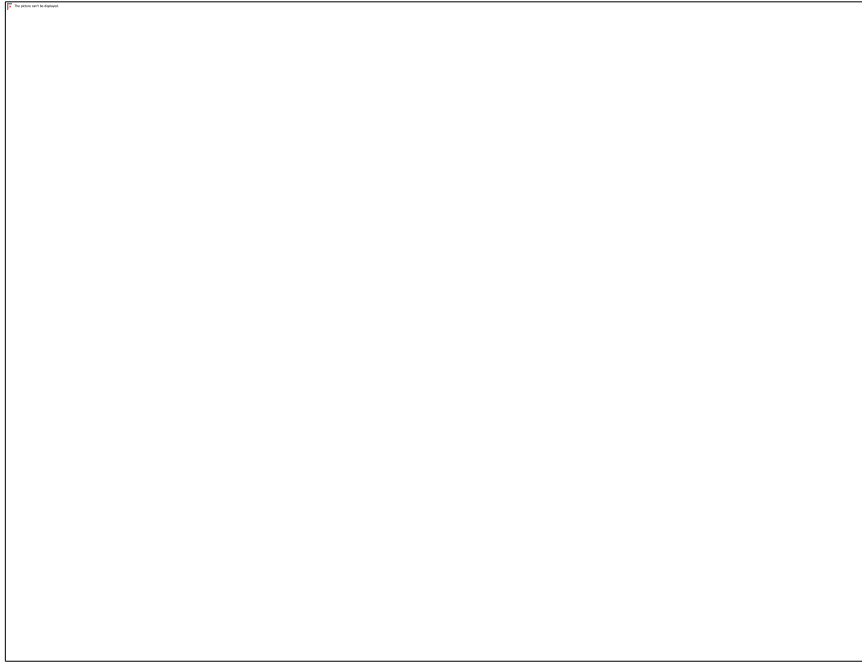
Hasil pengujian *potentiodynamic polarization* dirangkum dalam Tabel 4. 7. Hasil ini merupakan analisa yang dilakukan terhadap kurva polarisasi pada Gambar 4. 6 (melalui Data Fitting – Fit Auto Tafle – CS Studio5). Secara umum, nilai laju korosi yang dihasilkan pada kedua jenis sambungan didalam larutan aMDEA, baik yang dialirin CO<sub>2</sub> maupun tidak, lebih kecil daripada yang pernah dilaporkan dalam studi sebelumnya dengan laju korosi sebesar 8,27 mm/tahun untuk baja karbon A36 pada larutan 50% amine, 0,13 mol CO<sub>2</sub>, temperatur 50°C (Ooi, 2020). Sementara pada pengujian dengan aMDEA, laju korosi tertinggi dihasilkan pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 dengan laju sebesar 3,11 mm per tahun pada larutan 40% amine tanpa kontaminasi CO<sub>2</sub> dengan temperatur 100°C.

Tabel 4. 7 Rangkuman Hasil Pengujian *Potentiodynamic Polarization*

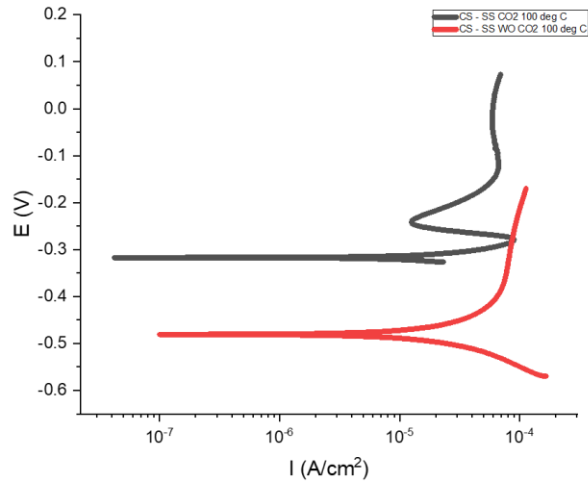
Lingkungan Amine	Temperatur (°C)	Icorr (A cm <sup>-2</sup> )	Ecorr (V)	Laju Korosi (mm/thn)
<b>Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT</b>				
Tanpa CO <sub>2</sub>	25	1,7673E-05	-0,433	0,20800
	80	4,4492E-05	-0,468	0,51700
	100	4,4830E-05	-0,394	1,30470
Dengan CO <sub>2</sub>	25	2,6054E-06	-0,360	0,03020
	80	1,0990E-05	-0,351	0,12700
	100	1,0374E-05	-0,327	0,12060
<b>Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304</b>				
Tanpa CO <sub>2</sub>	25	3,2431E-05	-0,539	0,37700
	80	6,3912E-05	-0,536	0,74200
	100	10,7000E-05	-0,480	3,11940
Dengan CO <sub>2</sub>	25	7,0860E-07	-0,396	0,00823
	80	3,3710E-06	-0,370	0,03918
	100	7,6620E-06	-0,317	0,08900

Selanjutnya, jika dilihat dari perubahan temperatur (Gambar 4. 7), didapatkan data bahwa laju korosi akan semakin meningkat seiring dengan kenaikan temperatur hingga temperatur 100°C. Kondisi ini terjadi pada semua tipe spesimen dalam kondisi larutan aMDEA yang sama. Trend seperti ini juga dilaporkan dalam beberapa studi. Pada baja karbon dalam larutan MEA, laju korosi pada temperatur 80°C lebih besar dibanding pada temperatur 60°C (Erfani, 2015). Sementara itu, dalam lingkungan DEA dengan kombinasi kandungan CO<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>S, kenaikan laju korosi juga terjadi pada baja karbon dengan adanya kenaikan temperatur dari 25°C hingga 80°C (Javidi, 2017). Peningkatan laju korosi juga terjadi saat temperatur dinaikan dari 25°C ke 60°C pada baja tahan karat di lingkungan MDEA. Kenaikan temperatur ini menyebabkan terjadinya degradasi amine (temperatur diatas 100°C) dan kenaikan kinetika reaksi korosi. Pada temperatur tinggi, kation pada permukaan lapisan pasif bergerak lebih cepat kedalam lapisan pasif melalui elektrolit, yang melemahkan lapisan pasif, meningkatkan densitas arus, dan mempercepat laju korosi. (Panahi H. , 2019).





(a)



(b)

Gambar 4. 6 Kurva Polarisasi (a) Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Tarat ASTM A240-TP304 Dalam Amine dan CO<sub>2</sub> Dengan Temperatur Berbeda, (b) Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304 Dalam Amine Dengan dan Tanpa CO<sub>2</sub>



Gambar 4. 7 Kurva Perbandingan Laju Korosi Sambungan Las Pada Berbagai Kondisi Lingkungan

Secara lebih lengkap, mekanisme terjadinya korosi pada amine (MDEA) dijelaskan dengan reaksi berikut:

Pembentukan karbonat



Hidrolisis karbonat



Disolusi besi



Disosiasi



Disosiasi ion bikarbonat



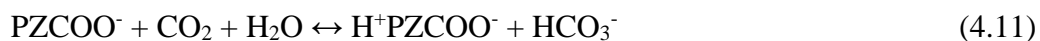
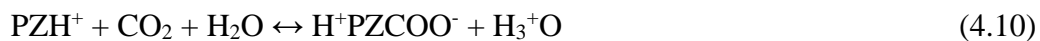
Oksidasi besi

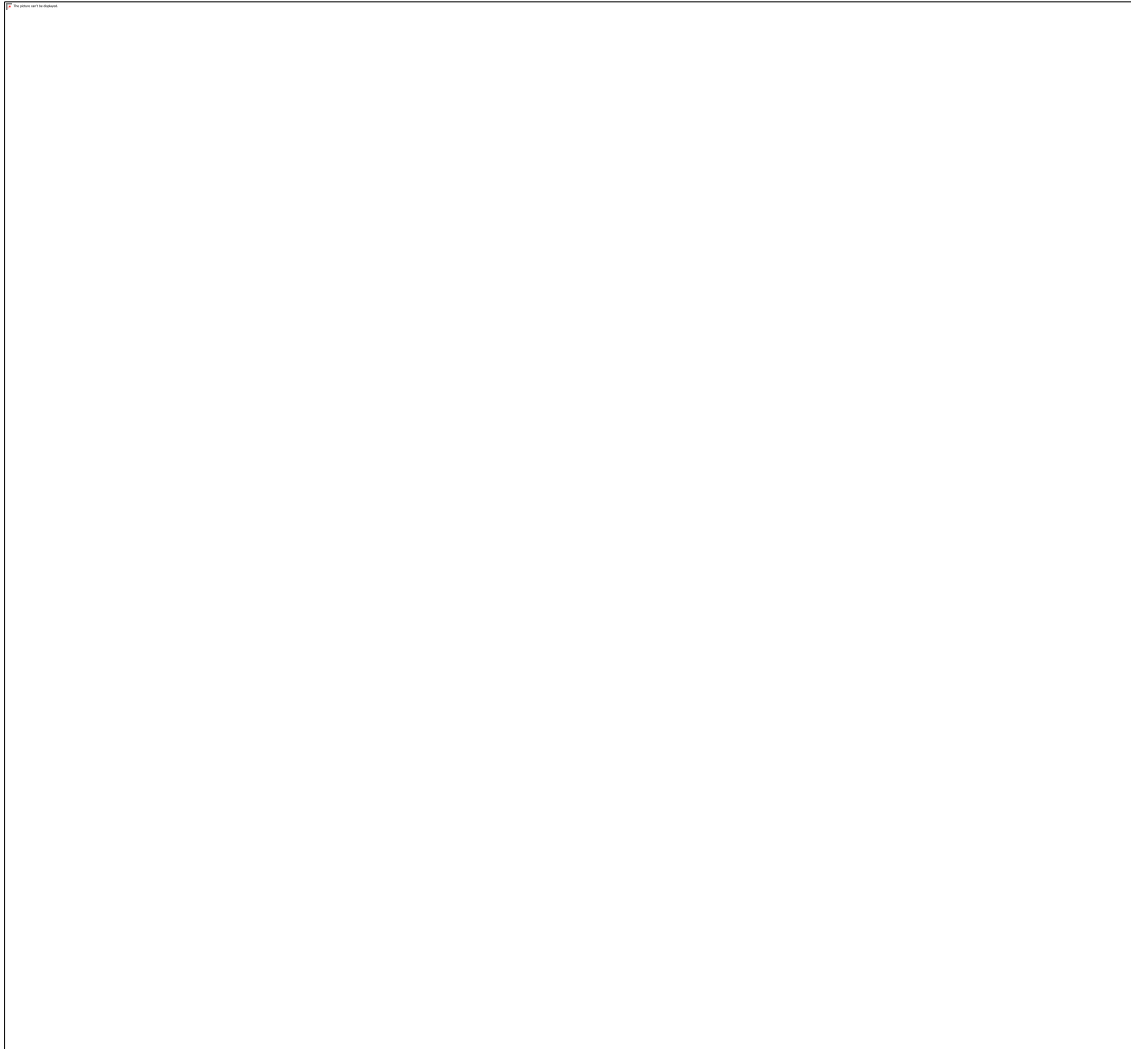


Bikarbonat  $\text{HCO}_3^-$  adalah faktor utama yang menyebabkan korosi pada lingkungan  $\text{CO}_2$ . Jumlah  $\text{HCO}_3^-$  yang terbentuk akan setara dengan pelepasan ion besi, yang menentukan laju korosi secara keseluruhan. Konstanta keseimbangan pada persamaan (2), (4), dan (5) akan meningkat dengan naiknya temperatur sehingga akan terbentuk  $\text{H}^+$  dan  $\text{HCO}_3^-$  yang lebih banyak. Untuk menjaga keseimbangan reaksi, maka disolusi logam akan bertambah, kemudian jumlah elektron juga ikut naik untuk terjadinya reaksi oksidasi. Hasilnya adalah kenaikan laju korosi (Yang, 2020).

Kontaminasi  $\text{CO}_2$  pada larutan amine juga memengaruhi laju reaksi yang terjadi pada kedua spesimen. Secara umum, laju korosi menurun pada jenis spesimen dan temperatur yang sama untuk larutan amine dengan kontaminasi  $\text{CO}_2$ . Hal ini merupakan kontribusi dari terbentuknya lapisan film pasif  $\text{FeCO}_3$  yang merupakan produk korosi dalam lingkungan  $\text{CO}_2$ , seperti yang dirumuskan oleh persamaan (3). Terbentuknya lapisan pasif  $\text{FeCO}_3$  terkonfirmasi melalui pengujian XRD pada produk korosi spesimen baja karbon yang berhasil dikumpulkan. Melalui analisa puncak grafik XRD dengan mencocokkan ke *database* JCPDS, dapat terlihat intensitas puncak Fe yang semakin menurun pada produk korosi larutan amine dengan kontaminasi  $\text{CO}_2$ . Kemudian, pola puncak untuk lapisan pasif film  $\text{FeCO}_3$  dapat dengan jelas terlihat pada grafik produk korosi baja karbon dalam larutan amine yang terkontaminasi  $\text{CO}_2$  pada temperatur  $100^\circ\text{C}$ . Hal ini juga didukung dengan terlihatnya daerah pasivasi pada kurva polarisasi spesimen las baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 pada larutan amine yang terkontaminasi  $\text{CO}_2$  pada temperatur  $100^\circ\text{C}$  (Gambar 4. 6a). Pola pasivasi ini tidak terbentuk pada kondisi spesimen dan temperature yang sama pada larutan amine tanpa kontaminasi  $\text{CO}_2$  (Gambar 4. 6b). Pola puncak  $\text{FeCO}_3$  pada kurva XRD juga mulai terlihat dengan intensitas yang lebih kecil pada larutan amine yang sama pada temperature  $25^\circ\text{C}$  dan  $80^\circ\text{C}$ . Pada kurva XRD Gambar 4. 8, terdapat pola puncak  $\text{SiO}_2$ . Hal ini merupakan elemen pengotor yang terikut saat sampel U-bend dipersiapkan dengan proses grinding dan penghalusan permukaan lasan dengan *abrasive paper*.

Lapisan pasif film  $\text{FeCO}_3$  (siderite) bertindak sebagai pembatas antara logam dan lingkungan korosif, memberikan perlindungan terhadap korosi lebih lanjut. Pada beberapa kasus, pasif film ini dapat menurunkan laju korosi dan meningkatkan ketahanan korosi pada baja karbon. Selain itu, terbentuknya siderite juga dapat memberikan pasivasi pada permukaan baja karbon. Pembentukan siderite ini dapat terjadi pada larutan dengan alkalinitas atau konsentrasi karbonat yang tinggi. Pembentukan lapisan film ini juga dipengaruhi hal lain seperti temperatur, pH, serta kandungan agen korosif lainnya (El-Fattah, 2024). Pembentukan lapisan pasif  $\text{FeCO}_3$  juga dikonfirmasi terbentuk pada baja karbon A106 melalui analisa kurva puncak XRD. Pembentukannya tergantung dari jumlah  $\text{CO}_2$  dalam larutan amine (Zheng, 2016). Pada penelitian lainnya, dijelaskan juga bahwa kandung piperazine (PZ) pada amine membantu terbentuknya lapisan pasif  $\text{FeCO}_3$  ini. Lapisan  $\text{FeCO}_3$  tidak ditemukan dalam amine yang tidak mengandung PZ. Pada kurva XRD, puncak  $\text{FeCO}_3$  teridentifikasi bersama puncak Fe pada sampel yang terkorosi (Liu, 2018). Reaksi pembentukan ion karbonat akibat adanya aktivator PZ dijelaskan dalam reaksi berikut (Zheng, 2014):





Gambar 4. 8 Kurva XRD Analisa Produk Korosi Sambungan Las (Sisi Baja Karbon A285 Gr. C) Setelah Perendaman Dalam Amine Selama 14 Hari Dengan Variasi Temperatur dan Kontaminasi CO<sub>2</sub>

Hal lain yang bisa dicermati dari hasil pengujian potentiodynamic polarization adalah tingkat laju korosi yang berbeda antara daerah pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan daerah pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan baja tahan karat ASTM A240-TP304. Pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan baja tahan karat ASTM A240-TP304, laju korosi yang terjadi pada larutan amine tanpa kontaminasi CO<sub>2</sub> lebih besar dibanding pada pengelasan antar baja karbon A285 Gr. C dalam lingkungan dan temperatur yang sama.

Hal ini disebabkan karena perbedaan ukuran batas butir yang dihasilkan dari kedua proses pengelasan tersebut seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 4.3. Pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan baja tahan karat ASTM A240-TP304, ukuran butir pada daerah HAZ baja karbon ASTM A285 Gr. C lebih kecil, sehingga memiliki batas butir yang juga lebih banyak. Penghalusan batas butir menyebabkan kenaikan densitas arus korosi ( $i_{corr}$ ). Hal ini terkait dengan energi dan aktivitas kimia yang lebih besar pada batas butir, yang kemudian meningkatkan reaktivitas permukaan melalui peningkatan aktivitas dan difusi elektron (Soleimani, 2020). Namun hal ini tidak terjadi pada spesimen yang berada dalam kondisi amine dengan aliran CO<sub>2</sub>. Dalam kondisi ini, laju korosi pada HAZ baja karbon untuk pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan baja tahan karat ASTM A240-TP304 yang memiliki ukuran butir lebih kecil, memiliki laju korosi yang lebih rendah jika dibanding HAZ pada pengelasan antar baja karbon ASTM A285 Gr. C. Hal ini diyakini disebabkan karena tingkat pembentukan lapisan pasif film FeCO<sub>3</sub> melalui mekanisme korosi yang lebih banyak terjadi pada butir dengan ukuran kecil. Lapisan FeCO<sub>3</sub> ini kemudian memberikan kontrol terhadap terjadinya korosi lebih lanjut.

#### **4.6. Analisa Pengaruh Temperatur dan Kandungan CO<sub>2</sub> Terhadap Ketahanan Korosi Retak Tegang Sambungan Las Dalam Lingkungan Amine**

Dari hasil pengamatan dengan metode dye penetran examination (DPE), tidak ditemukan adanya retakan pada semua spesimen. Untuk memastikan dengan lebih detail area permukaan material, dilakukan juga metalografi untuk melihat kemungkinan retakan yang terjadi dalam skala mikro (microcrack). Pengamatan dengan metalografi untuk melihat terjadinya microcracks pada baja karbon dalam lingkungan amine juga pernah dilakukan oleh Javidi dalam papernya (Javidi, 2017). Dari hasil pengamatan, tidak ditemukan adanya indikasi retakan yang terjadi pada area logam induk, logam lasan, dan HAZ.

Tabel 4. 8 Hasil Pengujian *Dye Penetrant Examination* Sampel U-bend

No	Lingkungan (Temperatur)	Sebelum	Setelah
<b>Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT</b>			
1	Tanpa CO <sub>2</sub> (25°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	Tanpa CO <sub>2</sub> (80°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	Tanpa CO <sub>2</sub> (100°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	Dengan CO <sub>2</sub> (25°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	Dengan CO <sub>2</sub> (80°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6	Dengan CO <sub>2</sub> (100°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
<b>Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Tahan Karat ASTM A240-TP304</b>			
1	Tanpa CO <sub>2</sub> (25°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
2	Tanpa CO <sub>2</sub> (80°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
3	Tanpa CO <sub>2</sub> (100°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
4	Dengan CO <sub>2</sub> (25°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
5	Dengan CO <sub>2</sub> (80°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>
6	Dengan CO <sub>2</sub> (100°C)	<input type="text"/>	<input type="text"/>

Tabel 4. 9 Hasil Pengujian Metalografi Sampel U-bend Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dengan PWHT

No	Lingkungan (Temperatur)	Baja Karbon	Lasan	Stainless Steel
1	Tanpa CO <sub>2</sub> (25°C)			-
2	Tanpa CO <sub>2</sub> (80°C)			-
3	Tanpa CO <sub>2</sub> (100°C)			-
4	Dengan CO <sub>2</sub> (25°C)			-
5	Dengan CO <sub>2</sub> (80°C)			-
6	Dengan CO <sub>2</sub> (100°C)			-



Tabel 4. 10 Hasil Pengujian Metalografi Sampel U-bend Las Baja Karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304

No	Lingkungan (Temperatur)	Baja Karbon	Lasan	Stainless Steel
1	Tanpa CO <sub>2</sub> (25°C)			
2	Tanpa CO <sub>2</sub> (80°C)			
3	Tanpa CO <sub>2</sub> (100°C)			
4	Dengan CO <sub>2</sub> (25°C)			
5	Dengan CO <sub>2</sub> (80°C)			
6	Dengan CO <sub>2</sub> (100°C)			

Dari kedua pengamatan yang dilakukan ini, dapat disimpulkan bahwa kedua spesimen tidak memiliki kerentanan terhadap korosi retak tegang pada lingkungan aMDEA, baik yang dialiri CO<sub>2</sub> maupun tidak, pada rentang temperatur 25 – 100°C selama 14 hari. Beberapa hal yang menunjang fenomena ini adalah sebagai berikut:

a. Material

Untuk ASTM A285 Gr. C dan Baja Karbon ASTM A285 Gr. C, telah dilakukan PWHT pada temperatur dan durasi yang dianjurkan dalam dengan temperatur minimum 620°C selama minimum 1 jam untuk setiap ketebalan 25 mm. Selain itu, kekerasan yang dicapai dalam pengelasan ini tidak mencapai batas maksimum yang diizinkan oleh NACE SP0472 yaitu sebesar 200 HBW (200 HV) (NACE, 2020). Sementara pada material baja karbon hasil pengelasan dengan material baja tahan karat, meskipun terjadi kenaikan kekerasan, namun nilai kekerasan untuk seluruh daerah baja karbonnya masih berada dibawah nilai kekerasan yang dipersyaratkan dalam NACE SP0472, meskipun tidak dilakukan PWHT. Sedikit penghalusan butir yang terjadi pada daerah HAZ tidak memberikan dampak yang besar untuk menaikkan kekerasan dan level tegangan sisa sehingga menyebabkan terjadinya retakan.

Berbeda dengan baja karbon, material baja tahan karat austenitik merupakan material yang tahan terhadap terjadinya korosi retak tegang terlepas dari kekerasan maupun tegangan sisa pada material ini. Hal ini sesuai dengan rekomendasi dari API 571 dan API RP945 dimana material baja tahan karat austenitik direkomendasikan untuk menghindari retakan pada fluida kerja amine.

b. Jenis Larutan Amine

Jenis larutan amine yang dipakai adalah activated MDEA (aMDEA). Berdasarkan API 571, larutan amine tipe MDEA merupakan jenis amine yang paling tidak agresif untuk kerentanan korosi retak tegang

(API-571, 2020). Urutan amine dari yang paling korosif ke yang tidak korosif adalah MEA > AMP > DEA > PZ > MDEA (Ooi, 2020). Pada larutan amine bersih (tanpa ada kontaminasi CO<sub>2</sub>) spesimen terbebas dari retakan pada semua kondisi pengetesan. Hal ini sesuai dengan kondisi yang disampaikan dalam API RP 954 (API-RP945, 2021). Sementara pada larutan amine yang terkontaminasi CO<sub>2</sub>, adanya aktivator *piperazine* yang membantu pembentukan lapisan film yang stabil, membuat agresifitas larutan akan semakin menurun dan inisiasi untuk terbentuknya titik awal retakan akan semakin sulit.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

1. Pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan perlakuan panas, terjadi kenaikan ukuran butir pada daerah HAZ, pembentukan perlite kasar dalam matriks ferit Widmanstatten. Sedangkan pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304, terjadi sedikit penghalusan ukuran butir dan terbentuknya perlite halus. Tidak terjadi pembentukan fase karbida pada kedua pengelasan.
2. Kenaikan kekerasan terjadi pada HAZ baja karbon pada pengelasan baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 yang disebabkan terbentuknya fase perlit halus dan penghalusan ukuran butir.
3. Tingkat laju korosi pada lingkungan amine aMDEA pada kedua spesimen mengalami kenaikan seiring kenaikan temperature uji. Laju korosi pada hasil pengelasan ASTM A285 Gr. C dan baja tahan karat ASTM A240-TP304 lebih tinggi daripada baja karbon ASTM A285 Gr. C dan baja karbon ASTM A285 Gr. C dengan perlakuan panas karena kontribusi ukuran butir HAZ yang lebih kecil. Sementara, dengan adanya kontaminasi CO<sub>2</sub> pada larutan amine aMDEA, akan terbentuk lapisan pasif film FeCO<sub>3</sub> yang menurunkan laju korosi pada semua spesimen.
4. Melalui penelitian ini, didapatkan data baru bahwa tidak ditemukan adanya retakan hingga skala mikro pada kedua pengelasan pada semua lingkungan dan temperatur uji dalam durasi 14 hari. Hal ini merupakan kontribusi dari sifat mekanikal material dan tingkat korosifitas larutan amine aMDEA yang rendah.

## 5.2. Saran

Untuk menambah kebermanfaatan penelitian dalam aplikasi industri minyak dan gas bumi serta pengembangan teknologi *cabron capture*, maka beberapa saran berikut perlu dipertimbangkan:

1. Perlu dilakukan pengujian korosi dan korosi retak tegang untuk pengelasan baja karbon dan baja tahan karat dalam kondisi konsentrasi larutan amine dan kandungan CO<sub>2</sub> yang bervariasi.
2. Pengujian korosi retak tegang dilakukan dengan metode lain untuk membandingkan dengan hasil penelitian ini seperti dengan metode *slow strain-rate test*, *dynamic load test*, dan lainnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abioye, T. (2019). Effects of Welding Speed on the Microstructure and Corrosion Effects of Welding Speed on the Microstructure and Corrosion Effects of Welding Speed on the Microstructure and Corrosion. *Materials Today: Proceedings*, 871-877.
- Alcantar-Modragón, N. (2021). Study of cracking susceptibility in similar and dissimilar welds between carbon steel and austenitic stainless steel through finger test and FE numerical model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- Al-Juaied, M. (2006). Absorption of CO<sub>2</sub> in Aqueous Diglycolamine. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2473-2482.
- API-571. (2020). *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*. Washington: American Petroleum Institute.
- API-580. (2016). *Risk-based Inspection Methodology*. Washington: API.
- API-RP945. (2021). *Avoiding Environmental Cracking in Amine Unit*. Washington.
- ASME. (2010). *ASME IX - Qualification Standard for Welding and Brazing Procedures, Welders, Brazers, and Welding and Brazing Operators*. New York: ASME.
- Banas, J. (2007). Effect of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S on the composition and stability of passive film on iron alloys in geothermal water. *Electrochimica Acta*, 5704-5714.
- Bernhardsen, I. M. (2017). A review of potential amine solvents for CO<sub>2</sub> absorption process: Absorption capacity, cyclic capacity and pK<sub>a</sub>. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27-48.
- Bougie, F. (2012). Sterically Hindered Amine-Based Absorbents for the Removal of CO<sub>2</sub> from Gas Streams. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 635-669.
- Boumerzoug, Z. (2010). Effect of Welding on Microstructure and Mechanical Properties of an Industrial Low Carbon Steel. *Scientific Research*, 502-506.
- Callister, W. D. (2014). *Material Science & Engineering*. USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Chuaiphan, W. (2013). Dissimilar Welding between AISI 304 Stainless Steel and AISI 1020 Carbon Steel Plate. *Applied Mechanics and Materials*, 283-290.

- Dodo, M. R. (2016). EFFECT OF POST-WELD HEAT TREATMENT ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF ARC WELDED MEDIUM CARBON STEEL. *Nigerian Journal of Technology (NIJOTECH) Vol. 35, No. 2, 337 - 343.*
- Dutcher, B. (2015). Amine-Based CO<sub>2</sub> Capture Technology Development from the Beginning of 2013—A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research 2011.*
- Dwivedi, D. (2017). Carbon steel corrosion: a review of key surface properties and characterization methods. *Royal Society of Chemistry, 4580-4610.*
- El-Fattah, H. A. (2024). Corrosion Investigation of Carbon Steel in Different Amine-Based CO<sub>2</sub> Removal System. *International Journal of Electrochemical Science 19.*
- Erfani, A. (2015). Investigation of carbon steel and stainless steel corrosion in a MEA based CO<sub>2</sub> removal plant. *Petroleum and Coal 57, 48-55.*
- Gary, J., & Handwerk, G. (2001). *Petroleum Refining Technology and Economics.* New York: Marcel Dekker.
- Gunasekaran, P. (2013). Corrosivity of Single and Blended Amines in CO<sub>2</sub> Capture. *Energy Procedia, 2094-2099.*
- Hernandez, J. (2012). Formation of iron-carbonate scale-layer and corrosion mechanism of API X70 pipeline steel in carbon dioxide-saturated 3% sodium chloride. *Afinidad.*
- Javidi, M. (2017). Amine corrosion and amine cracking of API 5L X52 carbon steel in the presence of hydrogen sulphide and carbon dioxide. *The International Journal of Corrosion Processes and Corrosion Control.*
- Joel, A. S. (2014). Process analysis of intensified absorber for post-combustion CO<sub>2</sub> capture through modelling and simulation. *International Journal of Greenhouse Gas Control, 91-100.*
- Kahyarian, A. (2017). 7 - CO<sub>2</sub> corrosion of mild steel. *Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies, 149-190.*
- Kittel, J. (2012). Corrosion in alkanolamine used for acid gas removal: From natural gas processing to CO<sub>2</sub> capture. *Materials and Corrosion 63, 223-230.*
- Kou, S. (2003). *Welding Metalurgy.* US: A John Wiley & Sons, Inc.



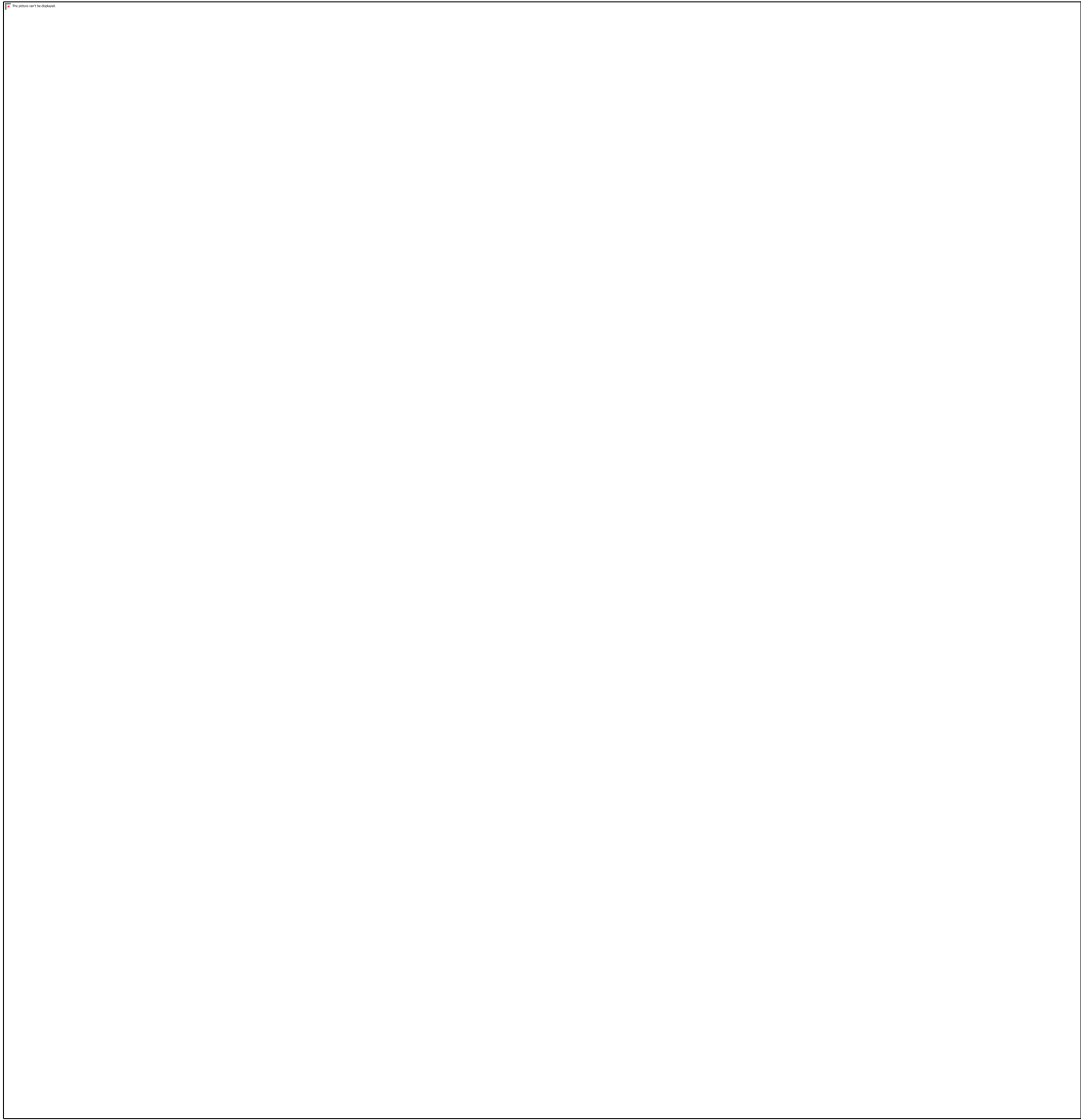
- Krauss, G. (2005). *Steels: Processing, Structure, and Performance*. USA: ASM International.
- Liu, C.-T. (2018). Corrosion of Carbon Steel by Aqueous Piperazine Protected by FeCO<sub>3</sub>. *14th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies*.
- Mazari, S. A. (2020). Review of modelling and simulation strategies for evaluating corrosive behavior of aqueous amine systems for CO<sub>2</sub> capture . *International Journal of Greenhouse Gas Control*.
- Mindaryani, A. (2017). Continuous absorption of CO<sub>2</sub> in packed column using MDEA solution for biomethane preparation. *Second International Conference on Chemical Engineering (ICCE) UNPAR*.
- Mudhasakul, S. (2013). A simulation model of a CO<sub>2</sub> absorption process with methyldiethanolamine solvent and piperazine as an activator. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 134-141.
- Murugan, S. (2001). Temperature Distribution and Residual Stresses due to Multipass Welding in 304 Stainless Steel and Low Carbon Steel Weld Pads. *Intenational Journal of Pressure Vessel and Piping* 78, 307-317.
- Muttaqien, R. F. (2022, Mei 9). *MGTC Spesial G20: Gas Bumi Untuk Indonesia*. Retrieved from Kementertian Energi dan Sumber Daya Mineral: <https://migas.esdm.go.id/post/read/mgtc-spesial-g20-gas-bumi-untuk-indonesia>
- NACE. (2020). *NACE SP0472 Methods and Controls to Prevent In-Service Environmental Cracking of Carbon Steel Weldments in Corrosive Petroleum Refining Environments*. Houston: Nace International.
- NGL, B. (2015). *Badak LNG Engineering Professional Development (EPDP) System Course*. Bontang: PT Badak NGL.
- Nhung, L. T. (2017). The relationship between continuous cooling rate and microstructure in the heat affected zone (HAZ) of the dissimilar weld between carbon steel and austenitic stainless steel. *Acta Metallurgica Slovaca*.
- Nhung, L. T. (2018). MICROSTRUCTURE CHANGE FOR MULTI-PASS WELDING BETWEEN AUSTENITIC STAINLESS STEEL AND CARBON STEEL. *Journal of Mechanical Engineering Research & Developments*, 97-102.

- Nhung, L. T. (2020). Microstructures in HAZ after Heat Treatment of Carbon Steel and Austenitic Stainless Steel Welds. *Materials Science Forum ISSN: 1662-9752, Vol. 985*, 137-146.
- Nielsen, R. B. (2020). Controlling Corrosion in Amine Treating Plants. *Amine Gas Treatment*.
- Okoro, A. M. (2018). Comparative Investigation of The Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of Dissimilar Metal Weld Fusion Zone, Heat Affected Zone, and Base Metal. *A NNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*.
- Oktadinata, H. (2019). Microstructure and Hardness Profile of Dissimilar Lap Joint of Type 304 Stainless Steel to SS400 Carbon Steel. *Metal Indonesia*.
- Ooi, Z. L. (2020). Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 1357-1367.
- Ooi, Z. L. (2020). Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 1357 - 1367.
- Ooi, Z. L. (2020). Amine-based solvent for CO<sub>2</sub> absorption and its impact on carbon steel corrosion: A perspective review. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 1357 - 1367.
- Osoba, L. O. (2021). Influence of Heat Inputs on Weld Profiles and Mechanical Properties of Carbon and Stainless Steel. *NIGERIAN JOURNAL OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT, VOL. 18*, 135 - 143.
- Pahlawan, I. A. (2020). Effect of welding electrode variation on dissimilar metal weld of 316l stainless steel and steel ST41 . *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*.
- Panahi, H. (2017). Failure Analysis of Type 304 Stainless Steel Amine Exchanger Sheets. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 87-98.
- Panahi, H. (2018). Corrosion and stress corrosion cracking initiation of grade 304 and 316 stainless steels in activated Methyl Diethanol Amine (aMDEA) solution. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*.
- Panahi, H. (2019). An Investigation on Corrosion and Stress Corrosion Cracking initiation of a Ferritic Stainless Steel in a Tertiary Amine Solution. *Journal of Chemical and Petroleum Engineering*, 203-210.

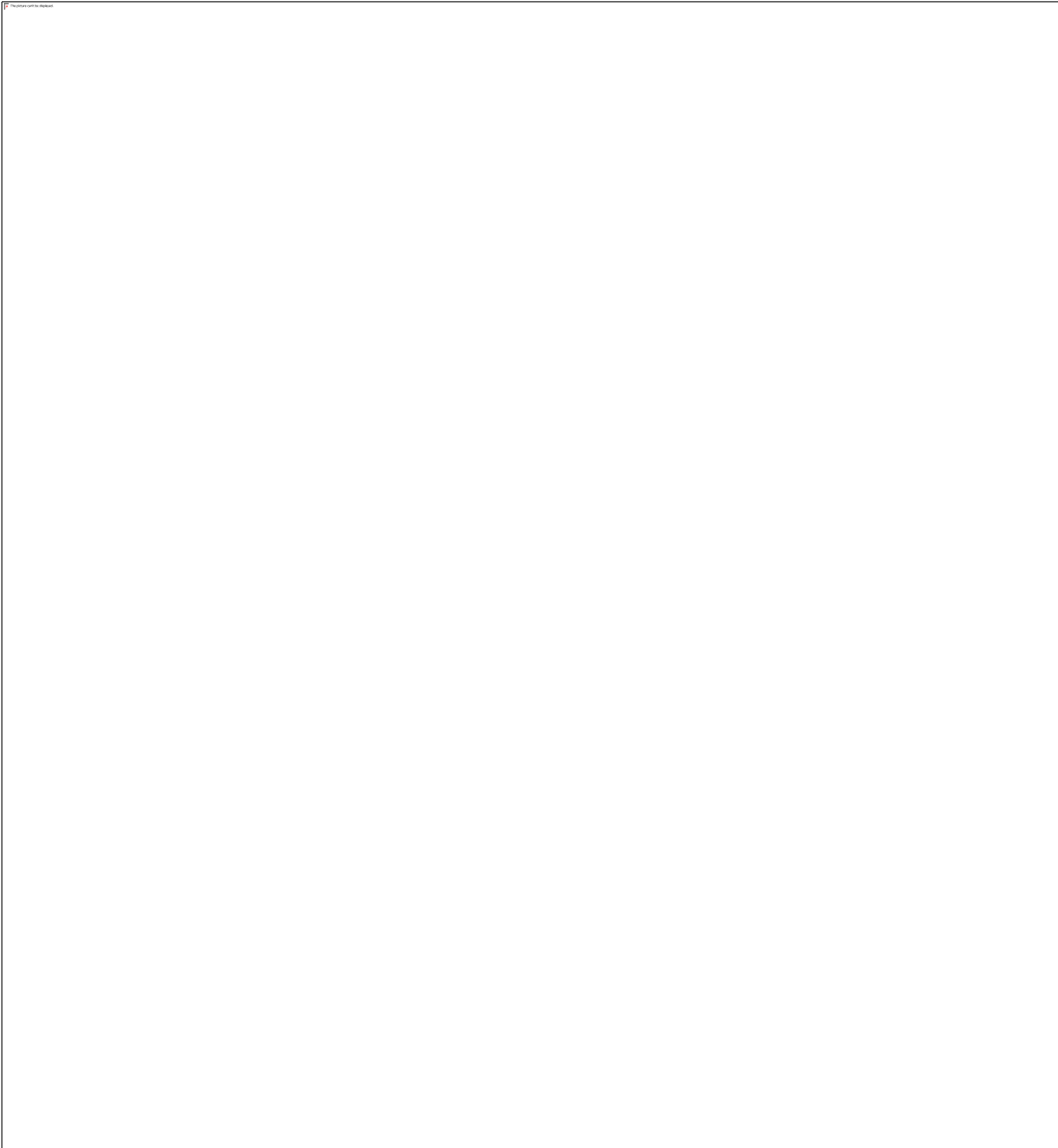
- Parkins, R. N. (2010). Environmentally Assisted Cracking Test Methods. *Shreir's Corrosion*, 1527-1546.
- PBB. (2023, April 14). *The 17 Goals*. Retrieved from United Nations: <https://sdgs.un.org/goals>
- Popoola, L. T. (2013). Corrosion Problems During Oil and Gas Production and Its Mitigation. *International Journal of Industrial Chemistry*, 1-15.
- Raut, N. (2009). Failure Of Amine Regenerating Column Of Amine Treatment Unit. *NACE CORROSION 2009*.
- Schillmoller, C. (1986). Amine stress cracking: Causes and cures. *Hydrocarbon Process*.
- Seagraves, J. (2009). *Treating high CO2 gases with MDEA*. New York.
- Soleimani, M. (2020). Effect of grain size on the corrosion resistance of low carbon steel. *Material Research Express*.
- Soleimani, M. (2020). Effect of grain size on the corrosion resistance of low carbon steel. *Material Research Express*.
- Svensson, H. (2014). Precipitation of AMP Carbamate in CO2 Absorption Process. *Energy Procedia*, 750-757.
- Tagliari, M. d. (2021). Stress corrosion cracking of carbon steels on CO2/H2O Systems. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*.
- Tan, L. (2015). Impact of high pressure on high concentration carbon dioxide capture from natural gas by monoethanolamine/N-methyl-2-pyrrolidone solvent in absorption packed column. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 25-30.
- Todorov, R. P. (2004). Widmanstätten Structure of Carbon Steels. *Metal Science & Heat Treatment Vol. 46*.
- Winarto. (2020). Effects of Heat Input on Microstructures, Hardness, and Residual Stress of GMA Weld Dissimilar butt joints between Stainless Steel SUS 316 and Marine Steel AH 36. *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY* 38(2), 182 - 185.
- Yang, J. (2020). Corrosion Behavior of Carbon Steel in Carbonated MDEA-MEA Aqueous Solutions. *IOP Conference Series: Earth and*.
- Ying, J. (2017). The Activator Mechanism of Piperazine in Aqueous Methyl-diethanolamine Solutions. *Energy Procedia*, 2078-2087.

- Zheng, L. (2014). Corrosion Benefits of Piperazine As an Alternative CO<sub>2</sub> Capture Solvent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 11740 - 11746.
- Zheng, L. (2016). CO<sub>2</sub> loading-dependent corrosion of carbon steel and formation of corrosion products in anoxic 30 wt.% monoethanolamine-based solutions. *Corrosion Science*, 44 - 54.
- Zirwatul, P. (2017). EFFECTS OF POST WELD HEAT TREATMENT ON HARDNESS VALUE OF A36 CARBON STEEL WELDED JOINTS BY SHIELDED METAL ARC WELDING. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*.

**LAMPIRAN 1 – PROSEDUR PENGELASAN P1-A-C-Lh**



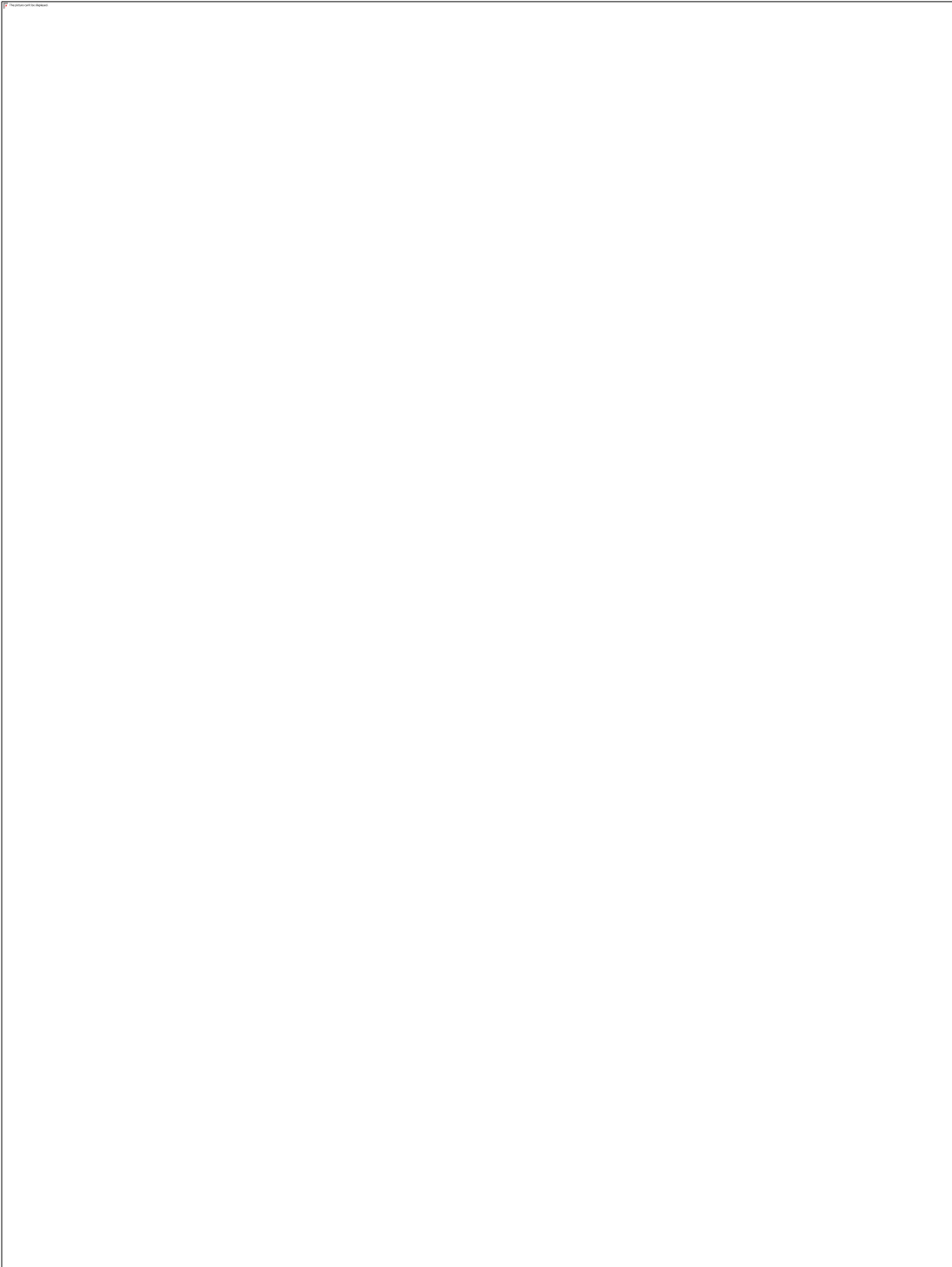
**LAMPIRAN 2 – PROSEDUR PENGELASAN P8, P1-A**



**LAMPIRAN 3 – HASIL PENGUJIAN OES ASTM A285 Gr. C**



**LAMPIRAN 4 – HASIL PENGUJIAN OES ASTM A240 – TP304**



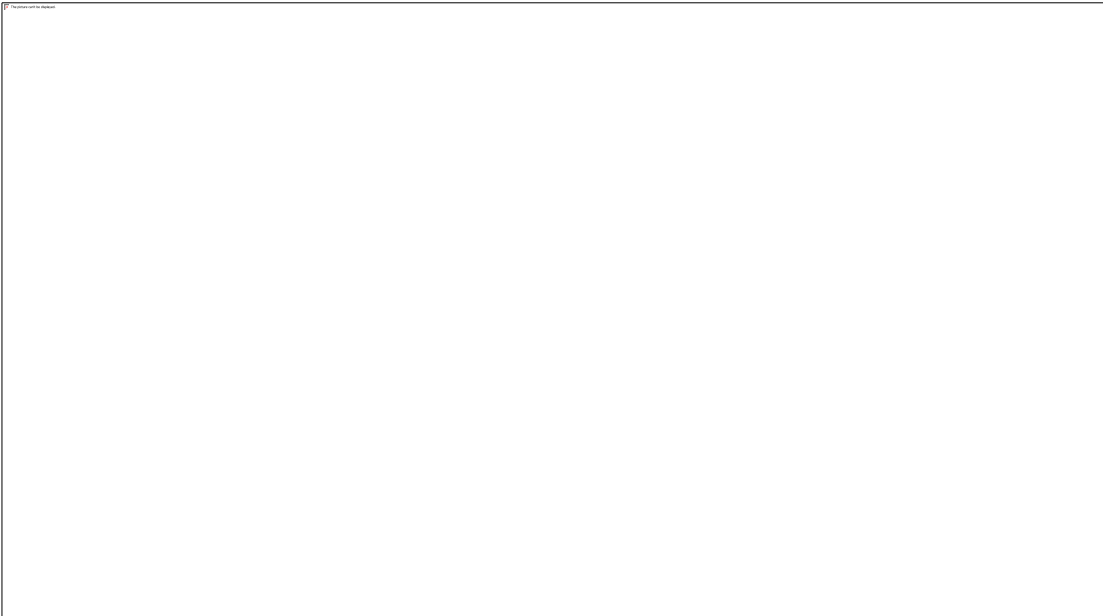


## LAMPIRAN 5 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE (25°C)

### Measurement Conditions: **(Bookmark 1)**

Dataset Name	CS 25
File name	E:\DATA PENGUJIAN-XRD\Pengujian 2024\Februari\Tio-P. Tarsis\CS-CS 25\CS-CS 25.rd
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	3/7/2024 9:53:00 AM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	89.9744
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffraction Type	XPert MPD
Diffraction Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Main Graphics, Analyze View: **(Bookmark 2)**

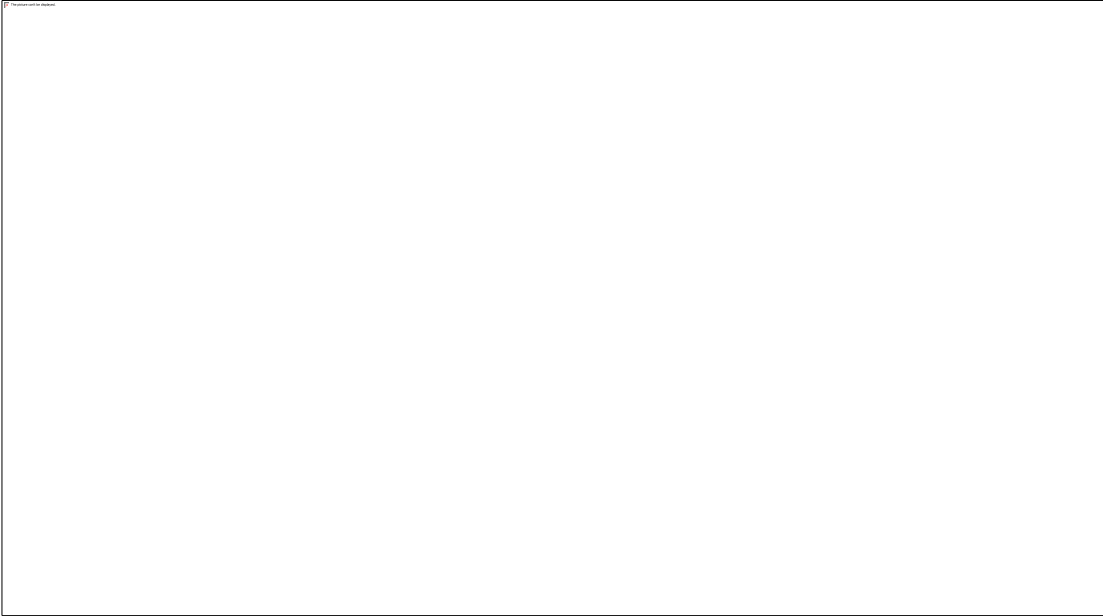


## LAMPIRAN 6 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE (80°C)

Measurement Conditions: (*Bookmark 1*)

Dataset Name	CS 80'C
File name	E:\DATA PENGUJIAN-XRD\Pengujian 2024\Februari\Tio-P. Tarsis\CS-CS 80'C\CS-CS 80'C.rd
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	3/7/2024 8:13:00 AM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	89.9744
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffraction Type	XPert MPD
Diffraction Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Main Graphics, Analyze View: *(Bookmark 2)*

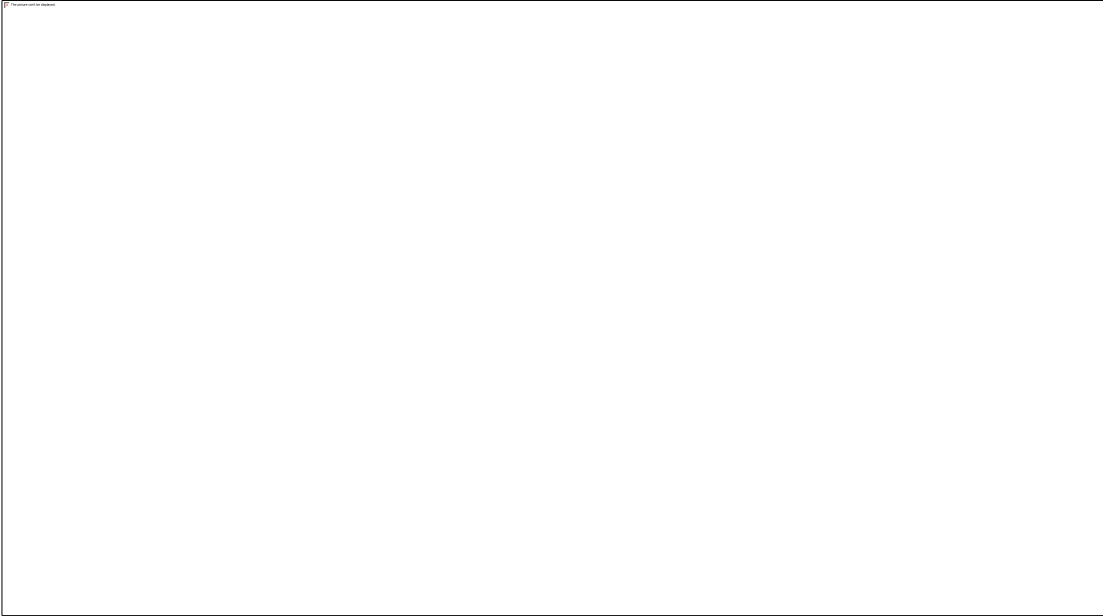


## LAMPIRAN 7 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE (100°C)

Measurement Conditions: (*Bookmark 1*)

Dataset Name	CS 100
File name	E:\DATA PENGUJIAN-XRD\Pengujian 2024\Februari\Tio-P. Tarsis\CS-CS 100\CS-CS 100.rd
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	3/7/2024 8:35:00 AM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	89.9744
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffraction Type	XPert MPD
Diffraction Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Main Graphics, Analyze View: *(Bookmark 2)*



## LAMPIRAN 8 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE DENGAN KONTAMINASI CO<sub>2</sub> (25°C)

Measurement Conditions: (Bookmark 1)

Dataset Name	CS-CS 25'C
File name	G:\Yuda\CS-CS 25'C\CS-CS 25'C.udf
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Spinner,
Owner=User-1, Creation date=1/15/2016 11:44:36 AM	Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Minimum step size 2Theta:0.001; Minimum step size Omega:0.001
Measurement Date / Time	18/07/2024 09:01:00
Raw Data Origin	PHILIPS-ASCII (.UDF)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5,0084
End Position [°2Th.]	89,9744
Step Size [°2Th.]	0,0170
Scan Step Time [s]	10,1600
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0,0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1,0000
Specimen Length [mm]	10,00
Receiving Slit Size [mm]	0,1000
Measurement Temperature [°C]	25,00
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1,54060
K-Alpha2 [Å]	1,54443
K-Beta [Å]	1,39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0,50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractionmeter Type	XPERT
Diffractionmeter Number	1
Goniometer Radius [mm]	240,00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91,00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Main Graphics, Analyze View: (Bookmark 2)





## LAMPIRAN 9 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE DENGAN KONTAMINASI CO<sub>2</sub> (80°C)

Measurement Conditions: (*Bookmark 1*)

Dataset Name	U-Bend 80C Carbon Steel
File name	E:\DATA PENGUJIAN-XRD\Pengujian 2024\Maret\Tyo-XRD-P.Tarsis\U-Bend 80C Carbon Steel\U-Bend 80C Carbon Steel.rd
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	3/28/2024 2:43:00 PM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	89.9744
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractionmeter Type	XPert MPD
Diffractionmeter Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Main Graphics, Analyze View: (*Bookmark 2*)

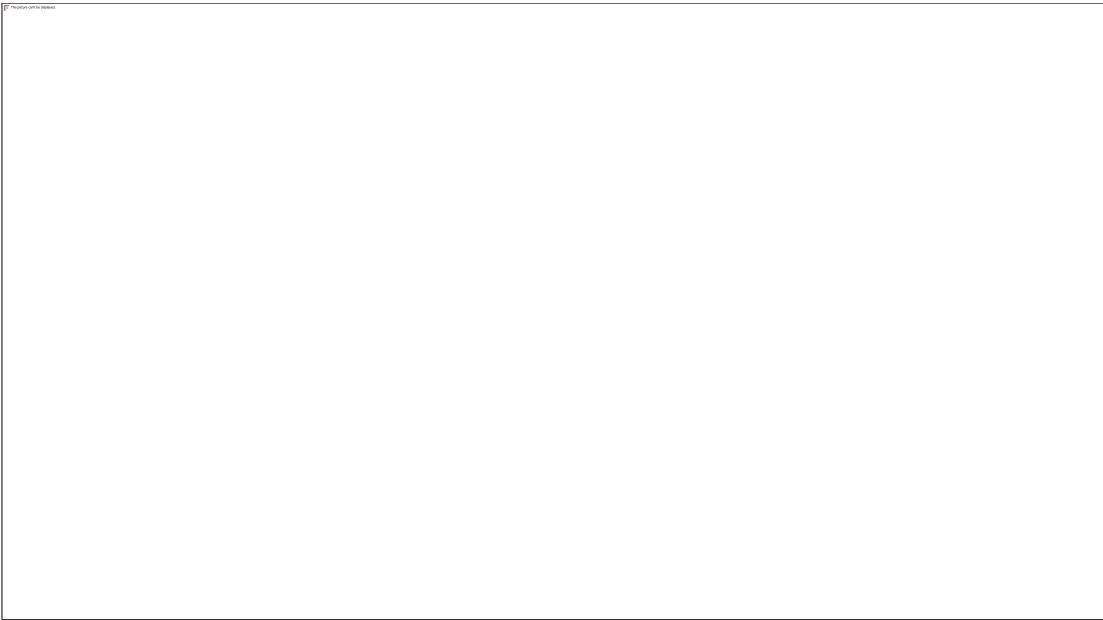


**LAMPIRAN 10 – LAPORAN PEMERIKSAAN XRD PRODUK KOROSI BAJA KARBON PADA LINGKUNGAN AMINE DENGAN KONTAMINASI CO<sub>2</sub> (100°C)**

Measurement Conditions: (*Bookmark 1*)

Dataset Name	U-Bend 100C Carbon Steel
File name	E:\DATA PENGUJIAN-XRD\Pengujian 2024\Maret\Tyo-XRD-P.Tarsis\U-Bend 100C Carbon Steel\U-Bend 100C Carbon Steel.rd
Comment	Configuration=Reflection-Transmission Sp Goniometer=PW3050/60 (Theta/Theta); Mini
Measurement Date / Time	3/28/2024 2:12:00 PM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	5.0084
End Position [°2Th.]	89.9744
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	1.0000
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractionmeter Type	XPert MPD
Diffractionmeter Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	Yes

Main Graphics, Analyze View: (*Bookmark 2*)



## BIODATA PENULIS

Nama lengkap : I Wayan Yuda Semaradipta  
Ponsel : 085737601113  
Email : semaradipta@gmail.com  
Alamat rumah : Jalan Raya Sading No. 105,  
Desa Sading, Kec. Mengwi,  
Badung, Bali  
Bidang keahlian : Material & Metalurgi



### Riwayat Pendidikan Tinggi dan Tahun Belajar:

1. S-2: Teknik Material & Metalurgi, ITS – Surabaya (2022—2024)
2. S-2: *School of Business & Management*, ITB – Bandung (2020 – 2022)
3. Program Profesi Insinyur: Fakultas Teknik, UGM - Yogyakarta (2021)
4. S-2: Teknik Material & Metalurgi, ITS – Surabaya (2010—2014)

### Judul Penelitian dan Tahun Terbit (10 tahun terakhir):

1. “Pengaruh Penambahan Aluminium (Al) Terhadap Sifat Hidrogenasi/Dehidrogenasi Paduan  $Mg_{2-x}Al_xNi$  Hasil Sintesa *Reactive Ball Milling*”, Tugas Akhir Strata 1 Teknik Material & Metalurgi, ITS (2014)
2. “*Decision Making Analysis in Selecting Strategy to Improve Steam Trap Integrity at PT Badak NGL*”, Tesis Strata 2 *School of Business & Management*, ITB (2022)
3. “Studi Pengaruh Sambungan Las *Dissimilar-Metal* Baja Karbon dan Baja Tahan Karat Terhadap Strukutr Mikro, Kekerasan, dan Ketahanan Korosi Retak Tegang Dalam Lingkungan Amine”, Tesis Strata 2 Teknik Material dan Metalurgi, ITS (2024)