

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

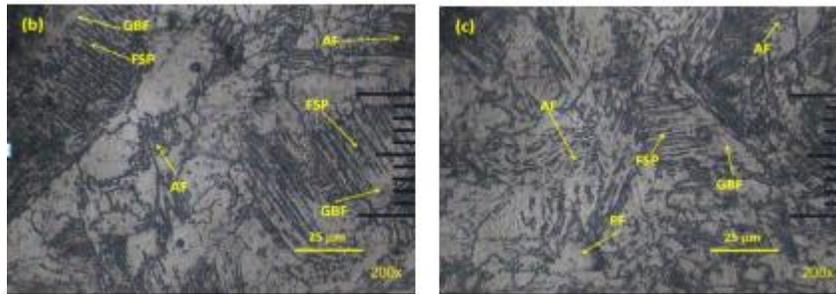
1. *Underwater Wet Welding* (UWW)

Penerapan UWW untuk pemeliharaan struktur bawah laut saat ini berkembang sangat pesat. Hal ini dikarenakan pemeliharaan konstruksi bawah laut dan perkapalan mengalami kenaikan signifikan. Keuntungan dari UWW adalah memudahkan pemeliharaan dan perbaikan konstruksi bawah laut seperti jaringan pipa, kapal, pembangkit listrik tenaga nuklir dan konstruksi pelabuhan (Guo *et al.*, 2015).

Berdasarkan kontak dengan air, metode *underwater welding* dibagi menjadi dua yaitu *dry dan wet underwater welding*. *Underwater wet welding* (UWW) adalah metode yang paling banyak digunakan karena fleksibel dan memiliki biaya yang lebih murah dibandingkan dengan metode pengelasan bawah air lainnya (Hirokaza *et al.*, 1997; Labanowski *et al.*, 2016). Namun, UWW memiliki kelemahan yang disebabkan oleh lingkungan yaitu tekanan hidrostatis dan laju pendinginan (Zhai *et al.*, 2017). Tekanan hidrostatis yang dibarengi dengan laju kecepatan aliran air memiliki dampak besar terhadap memburuknya stabilitas las, transisi droplet dan inisiasi cacat las. Cacat las (*crack*, korosi dan porositas) mempengaruhi hasil las, memperburuk sifat mekanis dan kinerja komponen (Sun *et al.*, 2016; J. Wang, Sun, Pan, *et al.*, 2019). Hasil pengelasan dipengaruhi oleh stabilitas busur dan metode perpindahan logam (transisi droplet). Pelarutan air meningkatkan oksigen dan hidrogen di kolam, menyebabkan porositas dan retak (Chen *et al.*, 2015). *Hydrogen assist cracking* (HAC) adalah masalah umum dalam pengelasan baja. Efek berbahaya dari hidrogen pada baja dikenal sebagai *hydrogen embrittlement*. Retakan di zona yang terkena panas (HAZ) terutama dipengaruhi oleh kandungan hidrogen (Saini *et al.*, 2017).

Laju pendinginan UWW menyebabkan ketidaksempurnaan mikrostruktur karena waktu yang tidak cukup untuk rekristalisasi saat siklus termal berlangsung. Hal ini menyebabkan struktur mikro yang heterogen khususnya di daerah *weld metal* (WM) dan *heat affected zone* (HAZ). Laju pendinginan berbanding terbalik dengan masukan panas. Masukan panas yang berkurang berarti pendinginan semakin cepat.

Masukan panas berpengaruh pada struktur mikro yang muncul pada masing-masing daerah pengelasan. Struktur mikro yang sering muncul di daerah *weld metal* adalah jenis ferrite yaitu GBF (*grain boundary ferrite*), PF (*polygonal ferrite*) FSP (*ferrite second phase*) dan AF (*accicular ferrite*) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.1



Gambar 2. 1 Bentuk struktur mikro GBF(*grain boundary ferrite*), PF (*polygonal ferrite*), FSP (*Ferrite second phase*) dan AF (*accicular ferrite*) (Matien *et al.*, 2019)

2. *Post Weld Heat Treatment (PWHT)*

Proses pengelasan menyebabkan efek panas lokal dan distribusi panas yang tidak merata. Selama proses pengelasan, bagian yang dilas menerima panas pengelasan dan temperatur berubah terus menerus. Akibatnya, bagian yang dilas mengalami ekspansi termal sementara bagian yang tidak terkena panas pengelasan tetap tidak berubah sehingga terbentuk penghalang pemuaian yang mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk, tegangan sisa dan peningkatan kekerasan di HAZ (Patel *et al.*, 2017). Tegangan sisa awalnya terbentuk selama pendinginan, diikuti oleh proses solidifikasi, dimana volume material menyusut yang menyebabkan deformasi. Deformasi pada material ini menyebabkan tegangan yang sifatnya tetap dan disebut tegangan sisa. Tegangan sisa adalah gaya elastis yang dapat mengubah jarak antar atom suatu material tanpa memerlukan gaya dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan material yang mengalami proses pengelasan.

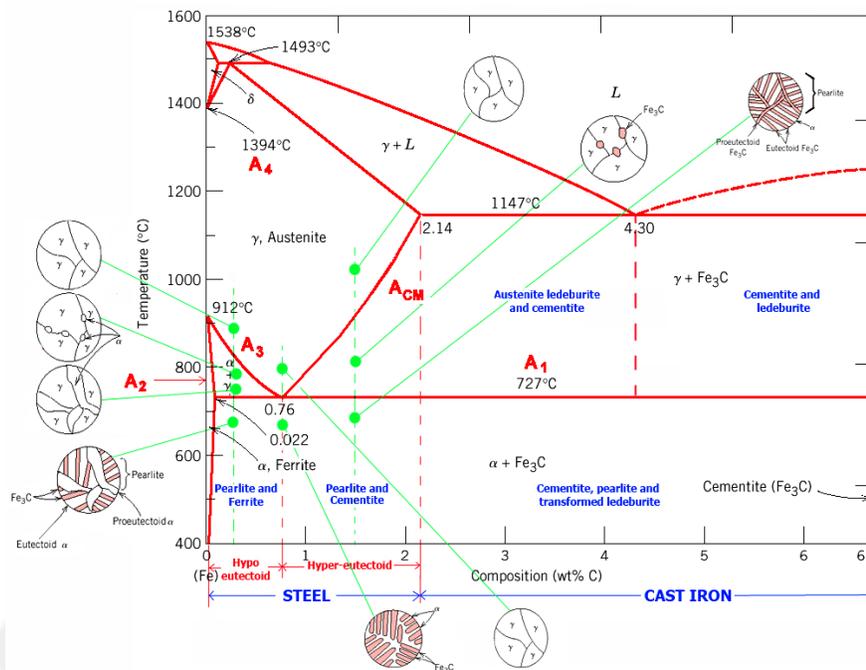
Metode efektif untuk mengatasi masalah yang timbul dari proses pengelasan seperti tegangan sisa yaitu perlakuan panas setelah pengelasan (PWHT) *stress*

relieving. PWHT *stress relieving* adalah kombinasi pemanasan dan pendinginan pada laju tertentu yang dilakukan terhadap logam dalam keadaan padat untuk mendapatkan sifat tertentu. PWHT umumnya berkaitan dengan transformasi dekomposisi austenitik yang akan menentukan sifat fisik dan mekanik baja. Parameter yang membedakan proses PWHT satu dengan yang lainnya adalah temperatur pemanasan dan *holding time* (lamanya waktu penahanan dan laju pendinginan). PWHT untuk *stress relieving* dilakukan dengan cara memanaskan kembali material temperatur kritis bawah (A_1) yaitu pada temperatur 723°C . Gambar 2.2 menjelaskan diagram fasa besi karbon (Fe_3C) dimana pada karbon yang memiliki kandungan karbon < 0.8 memiliki struktur ferit dan perlit pada temperatur kamar, sedangkan pada komposisi karbon $0,8\% > x > 2\%$ memiliki struktur perlit dan martensit.

PWHT dibagi menjadi dua cara yaitu termal dan mekanik (Kumar *et al.*, 2019). Metode termal adalah yang paling banyak digunakan. PWHT dilakukan dengan memanaskan kembali logam las untuk mendapatkan sifat-sifat tertentu yang diperlukan untuk konstruksi, misal kekuatan (*strength*), melunakan (*softness*), mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki butir-butir kristal material (Sisi *et al.*, 2014; Tanaka *et al.*, 2017). Tahapan dalam melakukan PWHT.

- a. *Heating* yaitu pemanasan sampai dengan temperatur diatas atau dibawah temperatur kritis suatu material. Laju pemanasan dimana material dipanaskan sampai atau dibawah temperatur austenit. Pemanasan yang dilakukan tidak sampai merubah bentuk komponen (tetap dalam keadaan solid, temperatur pemanasan tidak sampai fasa δ (delta), karena fasa δ terbatas, pemanasan tidak sampai pada fasa γ yang bertemperatur tinggi, karena butir akan menjadi kasar.
- b. *Holding* adalah menahan material pada temperatur pemanasan untuk memberikan kesempatan adanya perbaikan struktur mikro. *Holding time* dimana setelah material mencapai temperatur austenite (dibawah atau mendekati temperatur austenite) ditahan pada waktu dan temperatur tertentu untuk mendapatkan struktur fasa yang seragam

- c. *Cooling* yaitu proses pendingin dimana pendingin baja dilakukan secara perlahan dalam dapur pemanas sampai mencapai suhu kamar yang memerlukan waktu beberapa jam



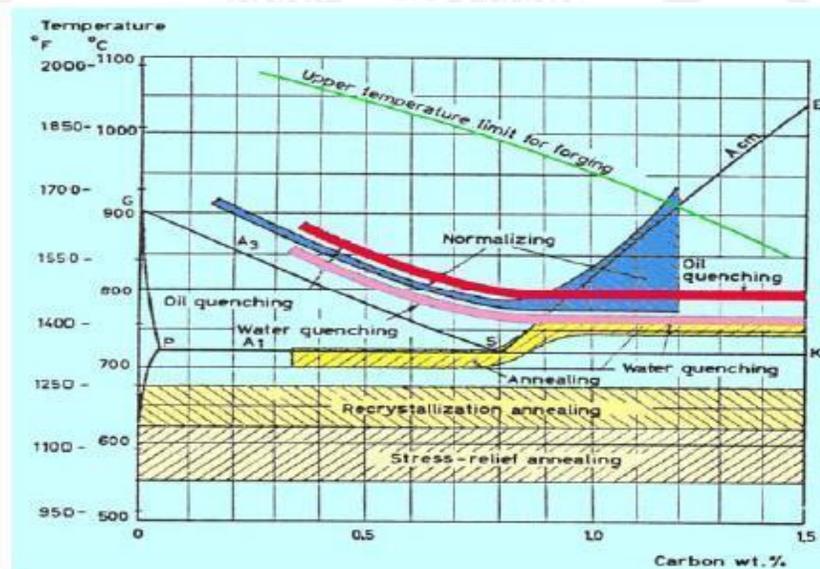
Gambar 2. 2 Diagram Fasa Fe-Fe₃C (Callister ., 2007)

Istilah dalam diagram Fe-Fe₃C dan fasa yang terdapat didalamnya

- A₁ adalah temperatur reaksi eutektoid (perubahan fasa γ menjadi α +Fe₃C (perlit) untuk baja hypoeutectoid)
- A₂ adalah titik Currie (temperatur 769°C), dimana sifat magnetik besi berubah dari feromagnetik menjadi paramagnetik.
- A₃ adalah temperatur transformasi dari fasa γ menjadi α (ferit) yang ditandai naiknya batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya temperatur.
- A_{cm} adalah temperatur transformasi dari fasa γ menjadi Fe₃C (sementit) yang ditandai penurunan batas kelarutan karbon seiring dengan turunnya temperatur.
- A₁₂₃ adalah temperatur transformasi γ menjadi α +Fe₃C (perlit) untuk baja hypereutectoid

Secara umum proses perlakuan panas dapat diklasifikasikan menjadi dua macam, yaitu:

- a. Perlakuan panas kondisi setimbang (*equilibrium*) atau mendekati kondisi setimbang. Kondisi dimana struktur mikro yang dihasilkan mendekati kondisi pada diagram fasenya. Tujuan perlakuan panas kondisi *equilibrium* adalah untuk melunakan dan menghaluskan butir kristal, menghilangkan tegangan dalam serta memperbaiki *machinability*. Jenis-jenis dari perlakuan panas kondisi equilibrium antara lain *full annealing*, *normalizing*, *stress relief annealing*, *spheroidizing* dan *homogenising*. Gambar 2.3 menjelaskan tentang perlakuan panas kondisi setimbang.



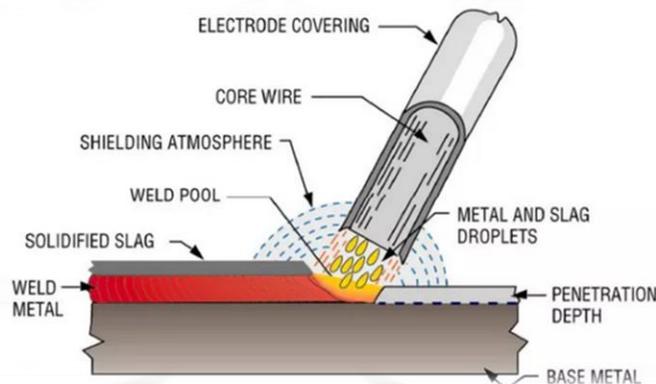
Gambar 2. 3 Perlakuan panas *equilibrium* (Callister, 2007).

- b. Perlakuan panas non equilibrium yaitu perlakuan panas dengan cara memberikan pendinginan cepat pada logam yang sudah dipanaskan sehingga tidak ada kesempatan bagi logam untuk mencapai kondisi yang setimbang karena waktu yang dibutuhkan untuk transformasi atau dekomposisi tidak cukup. Tujuan perlakuan panas kondisi non *equilibrium* adalah untuk mendapatkan sifat kekerasan dan kekuatan logam yang lebih tinggi. Jenis dari perlakuan panas

kondisi non equilibrium antara lain *hardening*, *martempering*, *austempering* dan *surface hardening*.

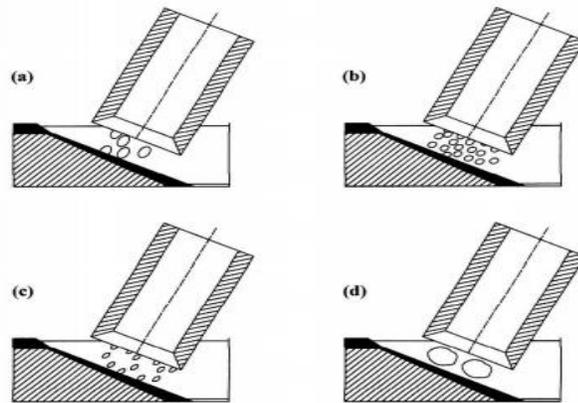
3. SMAW

SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) adalah jenis pengelasan busur listrik dengan elektroda terumpan. Busur listrik yang terjadi antara elektroda dan benda kerja kemudian membentuk paduan dan memadat dalam lasan. Elektroda berlapis (fluks) berfungsi sebagai pelindung untuk melindungi hasil pengelasan dari lingkungan sekitar (oksigen, hidrogen, dll) selama proses pengelasan, cairan yang dilapisi akan didalam permukaan disebut slug. Gambar 2.4 menunjukkan ilustrasi pengelasan SMAW.



Gambar 2. 4 Pengelasan SMAW (Wu *et al.*, 2004)

SMAW menggunakan elektroda khusus, yaitu elektroda yang dilapisi khusus sesuai dengan jenis dan berat kandungan komposisi *hidrogen* dalam elektroda. UWW menggunakan elektroda yang berbeda dari pengelasan biasa, elektroda UWW mengandung lapisan tahan air dan flux khusus untuk mengurangi penyerapan air. Flux elektroda UWW biasanya dari tipe rutil dan bisa dari berjenis *iron-oxide*. Ada beberapa jenis elektroda pada SMAW (dipengaruhi oleh fluks) yaitu tipe *cellulose*, *rutile*, *acid* dan *basic*. Perbedaan antara masing-masing elektroda adalah pelelehan elektroda saat proses pengelasan elektroda berlangsung, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2. 5 Tipe elektroda SMAW a. *cellulose* b. *rutile* c. *acid* d. *basic* (Hirokaza *et al.*, 1997)

4. Baja Karbon

Baja adalah logam paduan dengan besi sebagai unsur dasar dan karbon sebagai unsur penambah utamanya. Kandungan karbon dalam besi berfungsi sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi pada kisi kristal atom besi. Variasi unsur paduan baja berpengaruh terhadap jenis kualitas baja. Penambahan unsur karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya.

Berdasarkan komposisi karbon baja diklasifikasikan menjadi 3 (Callister, 2007). Baja karbon rendah : 0,1 – 0,3 % karbon, baja karbon sedang : 0,3 – 0,85 % karbon dan Baja karbon tinggi : 0,85 – 1,3 % karbon. Struktur baja ditentukan oleh kandungan karbon. Struktur baja karbon rendah didominasi oleh ferit dan sedikit perlit. Sedangkan baja karbon sedang bersifat feritik dan perlit tergantung presentase kandungan karbonnya, karena semakin tinggi kandungan karbon maka banyak

perlitnya. Sementara pada baja karbon tinggi, struktur didominasi oleh perlit dan sedikit sementit.

Baja karbon rendah atau baja ringan digunakan untuk konstruksi umum (Afandi *et al.*, 2015) dengan ditambahkan sedikit unsur-unsur paduan. Penambahan unsur paduan dapat meningkatkan kekuatan baja tanpa mengurangi keuletannya. Seperti contohnya plat baja SS400 merupakan baja karbon rendah dengan kadar karbon kurang dari 0,30%. Sifat baja SS400 dijelaskan pada Tabel 2.1. Baja karbon rendah merupakan paduan dari unsur besi dan karbon sebagai unsur utama, fungsi utama dari karbon adalah sebagai unsur penguat (Zhang *et al.*, 2016). Penambahan unsur karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, tetapi disisi lain membuatnya menjadi rapuh serta mengurangi keuletan.

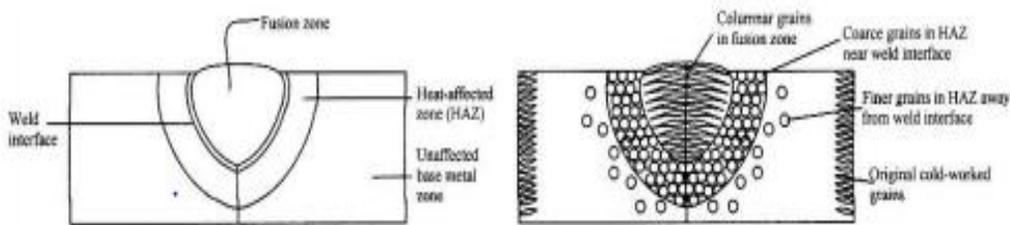
Tabel 2. 1 Sifat mekanik baja SS400

Massa jenis	2.68 g/cc
Modulus young	70,3 Gpa
Kekuatan tarik maksimum	228 Mpa
Kekuatan luluh	193 Mpa
Poisson rasio	0.33
Kekerasan Vickers	68 Hv

5. Metalurgi las

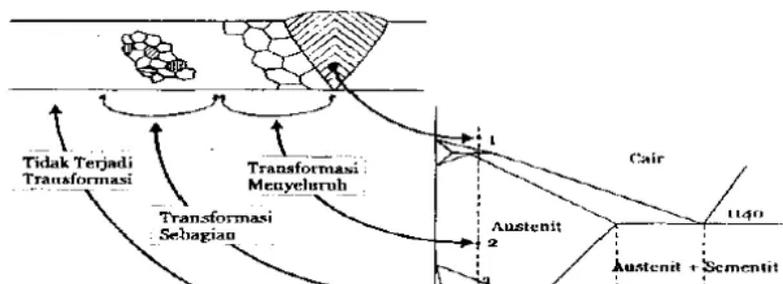
Energi panas saat pengelasan menyebabkan logam di sekitar daerah lasan mengalami siklus termal, sehingga menyebabkan transformasi metalurgi yang kompleks, deformasi dan tegangan-regangan termal. Perubahan metalurgi yang rumit seperti perubahan struktur diakibatkan oleh temperatur, kecepatan dan laju pendinginan selama pengelasan. Siklus termal mengakibatkan daerah yang berbeda, daerah yang terkena siklus termal selama pengelasan diklasifikasikan menjadi 3 yaitu *weld metal* (WM), *heat affected zone* (HAZ) dan *base metal* (BM) (Lee *et al.*, 2014; Cabrillo and Geric., 2018).

Komposisi WM terdiri dari logam induk dan bahan tambah elektroda. Karena logam cair dalam proses pengelasan mencair dan membeku, kemungkinan besar komponen akan terpisah sehingga membuat struktur las tidak rata. Heterogenitas struktur menyebabkan ferit kasar dan bainit yang akan mengurangi kekuatan struktur ferit. Struktur yang terbentuk merupakan struktur cor, yang ditandai dengan adanya struktur berbutir panjang (*columnar grain*). Struktur dibentuk dari logam induk dan tumbuh ke arah tengah daerah logam las. Struktur mikro daerah las logam dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Base metal dan daerah las (Callister, 2007)

HAZ adalah daerah kritis dari lasan. Terletak bersebelahan dengan logam las, mengalami siklus termal yang cepat. Secara visual, area di dekat titik leleh las akan menyebabkan struktur logam menjadi lebih kasar. Gambar 2.7 menunjukkan bahwa daerah HAZ memiliki tiga titik yang berbeda, titik 1 dan 2 menunjukkan bahwa temperatur pemanasan mencapai daerah fasa austenitik dan disebut transformasi lengkap, yang berarti struktur mikro baja pertama adalah ferit+perlit kemudian bertransformasi menjadi 100% austenitik. Titik 3 menunjukkan temperatur pemanasan, daerah itu mencapai fasa ferit dan austenit dan ini disebut transformasi parsial, yang berarti bahwa struktur mikro baja awalnya berubah menjadi ferit, perlit dan austenitik.



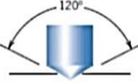
Gambar 2.7. *Base metal* dan daerah las (Callister, 2007)

Logam induk adalah bagian yang tidak terpengaruh oleh temperatur pengelasan, sehingga tidak mempengaruhi struktur dan sifat dari material. Gambar 2.8 struktur pada logam induk dapat dilihat pada titik 4 dimana tidak terjadi transisi fasa karena panas tidak mencapai daerah transformasi yaitu daerah austenitik.

6. Pengujian

a. Pengujian kekerasan *vickers*

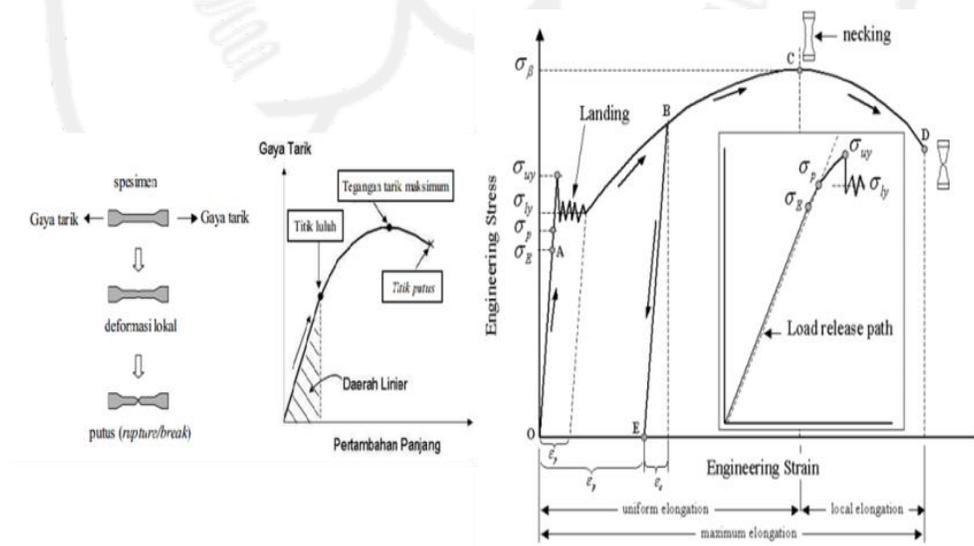
Kekerasan menunjukkan ketahanan material terhadap deformasi plastis atau permanen, misalnya pada pipa baja. Uji kekerasan dilakukan untuk mengetahui kemungkinan terjadinya retak akibat terbentuknya martensit di HAZ. Kekerasan digunakan sebagai indeks kepekaan terhadap beberapa jenis retak korosi (Lamet *et al.*, 1993). Uji kekerasan diperlukan untuk mengamati distribusi kekerasan di daerah lasan. Teknik pengujian kekerasan yang umum digunakan adalah *vickers*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.9.

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2P/t^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> ⎧ Diamond cone; ⎧ 1/16, 1/8, 1/4 in. diameter steel spheres 			<ul style="list-style-type: none"> 60 kg } Rockwell 100 kg } 150 kg } 15 kg } Superficial Rockwell 30 kg } 45 kg } 	

Gambar 2. 8 Teknik pengujian kekerasan

b. Pengujian Tarik

Uji Tarik adalah pengujian yang dimaksudkan untuk mengetahui sifat mekanik logam. Metode yang digunakan untuk menguji kekuatan suatu bahan/material dengan cara memberikan beban dengan arah berlawanan arah pada salah satu ujung material yang sedang diuji tarik. Penarikan akan mengakibatkan terjadinya perubahan bentuk (deformasi). Proses deformasi pada bahan uji adalah proses dimana pergerakan butiran kristal logam yang akan mengakibatkan melemahnya gaya elektromagnetik setiap atom logam sampai terlepas dengan menarik gaya maksimum. Tujuan Uji tarik adalah untuk mengetahui ketahanan las. Sebuah beban ditransfer ke suatu benda dengan memberikan gaya tarik dalam arah yang berlawanan ke salah satu ujung benda. Proses pengujian tarik, beban diberikan secara kontinu dan pelan–pelan bertambah besar sampai material terputus sehingga didapat kurva profil pengujian seperti diilustrasikan oleh Gambar 2.8. Kurva tegangan regangan menunjukkan gaya tarikan dengan perubahan panjang.

Gambar 2. 9 Kurva tegangan regangan (Wiryosumarto *et al.*, 2000)

Hubungan antara beban atau gaya yang diberikan berbanding lurus dengan perubahan panjang material (daerah linier). Kurva pertambahan panjang vs beban mengikuti aturan *Hooke* yaitu rasio tegangan (*stress*) dan regangan (*strain*) konstan. Tegangan adalah beban dibagi luas penampang bahan (persamaan 2.1) dan regangan adalah pertambahan panjang dibagi dengan panjang awal

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana :

σ = tegangan (Pa)

F = gaya tarikan(N)

A_0 = luas penampang (m^2)

$$\varepsilon = \left(\frac{l_t - l_0}{l_0}\right) \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana :

ε = Regangan

l_t = Panjang sesudah patah

l_0 = Panjang mula – mula

Hubungan antara *stress* dan *strain* dirumuskan

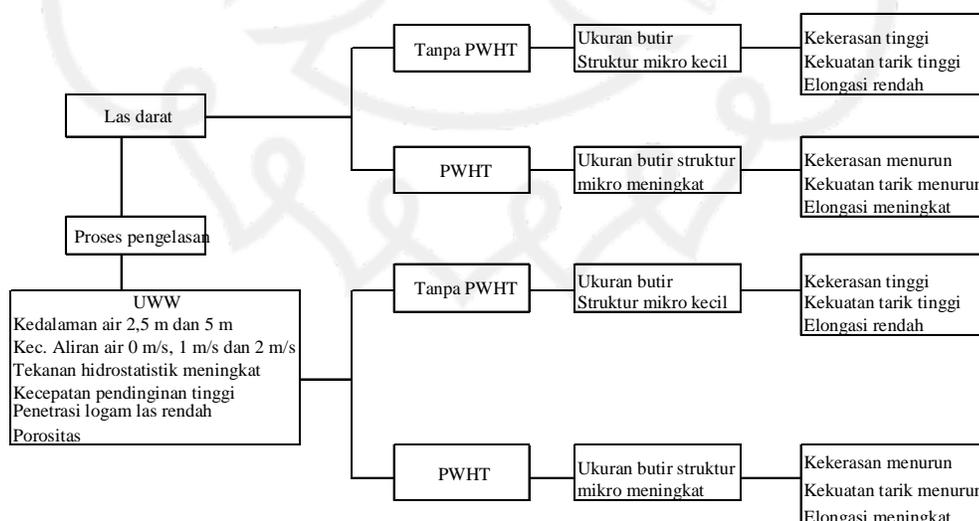
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \dots\dots\dots (2.3)$$

Kekuatan luluh (*yield strength*) didefinisikan sebagai tegangan di mana deformasi permanen yang telah ditentukan terjadi. Bagian grafis dari tahap awal uji tegangan digunakan untuk mengevaluasi kekuatan luluh. Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) adalah batas tegangan maksimum suatu material yang masih dapat diterima sebelum material tersebut mengalami kegagalan. Ketangguhan adalah ukuran kemampuan suatu bahan untuk menyerap energi hingga patah.

Geometri benda uji dan cara pemberian beban penting dalam penentuan ketangguhan. Ketangguhan dinilai dengan menggunakan uji impak. Ketangguhan ini ada hubungannya dengan luas daerah dibawah kurva tegangan – regangan (Callister, 2007). Kondisi pembebanan saat uji impak dinamis (laju regangan tinggi) diberikan takikan (konsentrasi tegangan hadir).

B. Kerangka Berpikir

Penelitian mengenai UWW selama ini berfokus pada jenis logam pengisi, penambahan logam pengisi, jenis material, metode penyambungan logam beda jenis, kecepatan pengelasan, dan arus pengelasan. Penelitian sebelumnya tentang UWW belum memberikan solusi tentang perbaikan hasil las. Beberapa peneliti sebelumnya hanya fokus pada struktur mikro dan sifat mekanik UWW yang dilakukan pada kondisi aliran diam (Han et al., 2020; Muhayat et al., 2020; Xu et al., 2020) sedangkan untuk kondisi air mengalir hanya berfokus pada stabilitas busur las (Chen et al., 2018, 2019, 2020). Penerapan UWW dalam kondisi nyata dilakukan pada kondisi air mengalir pada kedalaman dan kecepatan tertentu. Kondisi ini dapat memperburuk sifat las dan mempengaruhi kemampuan struktur untuk menahan beban dinamis atau ketahanan lelah (Muhayat et al., 2020).



Gambar 2. 10 Kerangka berpikir penelitian

Berdasarkan permasalahan yang dijabarkan pada diagram kerangka berfikir maka dapat diuraikan pada penelitian ini dilakukan pengelasan UWW dengan variasi kedalaman air (0 m, 2,5 m dan 5 m) dan kecepatan aliran air (1 m/s dan 2 m/s) setelah pengelasan UWW dilakukan PWHT di darat yang dilakukan dalam tungku pemanas pada temperatur 580°C dan ditahan selama 75 menit kemudian didinginkan perlahan pada temperatur ruang.

C. Hipotesis

Hipotesis merupakan jawaban tentang suatu hal yang bersifat sementara terhadap permasalahan penelitian yang belum dibuktikan kebenarannya secara empiris. Hipotesis dalam penelitian ini menyatakan bahwa perlakuan panas (PWHT) *stress relieving* dapat memperbaiki sifat hasil lasan. PWHT *stress relieving* dengan temperatur dibawah A_1 (550-700°C) memberikan energi masukan panas yang dapat membantu ekspansi butir sehingga ukuran butir meningkat. Material berukuran butir besar akan mudah terdeformasi (material dalam keadaan plastis) artinya akan mudah *terecovery*, saat kondisi ini terjadi apabila terdapat tegangan dalam akan mudah dilepaskan.

Masukan panas pada proses PWHT dimanfaatkan oleh atom- atom untuk *recovery*, atom-atom yang mengalami disorientasi oleh difusi saat proses sebelumnya membentuk kembali struktur atom yang berorientasi dan terarah. Atom-atom ini menjadi agen pemandu yang meningkatkan struktur mikro menjadi lebih baik sehingga meningkatkan kekuatan mekanik las atau mencapai sifat yang diinginkan.