

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

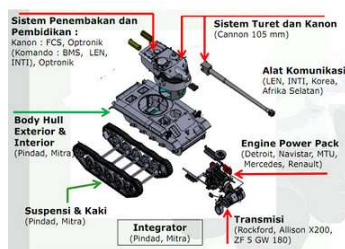
2.1 Kendaraan Tempur Lapis Baja

Efek *deterrent* diberikan dengan adanya kemandirian alutsista seperti produksi alat pertahanan dan keamanan, salah satu contohnya kendaraan tempur (Irwanto dkk., 2022.). Data terbaru menunjukkan bahwa untuk kendaraan lapis baja, terdapat 1444 unit dan 314 tank yang dimiliki Indonesia (Jemail, R., 2023). Kendaraan tempur lapis baja (*Armored Fighting Vehicle/ AFV*) adalah jenis kendaraan yang memiliki struktur yang dilengkapi dengan material baja yang kuat dan tahan terhadap serangan atau bahaya eksternal. Tank terbagi menjadi beberapa bagian sesuai dengan pendekatan berat serta pendekatan seberapa besar kaliber meriamnya. Menurut pendekatan berat, yaitu *Light Tank* (kurang dari 15 ton), *Medium Tank* (15-30 ton), dan *Main Battle Tank* (di atas 30 ton). Pendekatan seberapa besar kaliber meriamnya, yaitu 30 mm, 90 mm, 100 mm, 105 mm, dan 120 mm. (Wulandari, A., 2017). Walaupun, *medium tank* digunakan untuk melakukan penggepuran jarak menengah, *medium tank* dilengkapi dengan sistem perlindungan yang kuat yang mampu menghasilkan daya kejut dan daya kekuatan serangan yang hebat. (Rustandi, A. dkk., 2017)

2.1.1 Struktur *Body Hull Medium Tank*

Body hull dalam *medium tank* memiliki arti badan kendaraan. *Body hull* adalah struktur utama dalam kendaraan tempur yang membentuk kerangka dasar medium tank dan memberikan perlindungan terhadap ancaman. Komponen ini mencakup beberapa komponen, yaitu dinding samping, dinding depan, dinding belakang, dinding atap, lantai, *rampdoor*, *hatch* (pintu yang berfungsi sebagai akes masuk atau keluar), *hatch* (pelapik akses), pintu (pintu depan dan pintu belakang), pelindung kaca (pelindung kaca depan dan pelindung kaca samping). Setiap komponen terbuat dari material baja tahan peluru dengan tebal yang beragam dan klasifikasinya terbagi atas beberapa jenis berdasarkan ketebalan dan

kekuatannya yang berbeda-beda (Izzatunnisaa, F., & Endang Prasetyaningsih, 2022). Selain itu, *body hull* memiliki fungsi untuk mengangkut bagian atas tangka, *turret*, dari satu tempat ke tempat lain.



Gambar 2. 1. Struktur Medium Tank
Sumber : WarThunder, 2019

2.2 Pengelasan

Pengelasan memiliki peranan penting dalam dunia industri sebagai salah satu teknik fabrikasi. Menurut AWS (*American Welding Society*), pengelasan berarti proses penyambungan atau lebih material logam maupun non logam sampai mencapai temperatur las di mana tanpa melibatkan adanya *pressure* (tekanan) dan ada atau tanpa *filler metal* (logam pengisi).

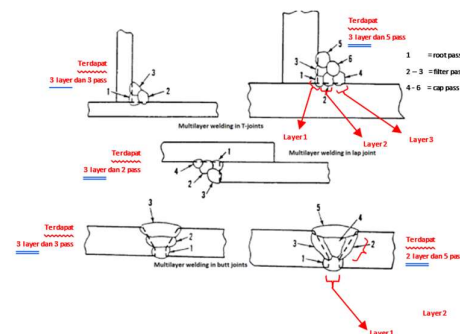
Proses pengelasan melibatkan berbagai teknik dan metode yang digunakan untuk menggabungkan material logam menjadi satu kesatuan yang kokoh. Teknik pengelasan yang dipilih tergantung pada jenis material yang akan dihubungkan, kekuatan yang diperlukan, dan kegunaan akhir produk. Salah satu teknik pengelasan yang umum adalah pengelasan listrik, yang mencakup metode seperti pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), SAW (*Submerged Arc Welding*), dan FCAW (*Flux-Cored Arc Welding*). Setiap metode ini memiliki karakteristik masing masing.

2.2.1 Layer dan Pass dalam Pengelasan

Pada pengelasan, *weld pass* dan *weld layer* memiliki konsep yang berbeda. Namun, kedua konsep ini sering digunakan secara bersamaan. *Weld pass* adalah rangkaian pengelasan di sepanjang sambungan las yang mewakili tiap satu kali proses pengelasan. Isitlah *weld pass* identik dengan

weld bead dan *weld run*. Apabila diperlukan ketebalan atau kedalaman penetrasi yang lebih besar dari yang dicapai dengan satu *pass*, maka diperlukan beberapa *pass* (*multi pass*) yang ditumpuk sehingga membentuk *weld layer* (Welding Tech, 2019). Dengan kata lain, hasil dari *weld pass* ini adalah *weld layer*. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan ketika memutuskan beberapa *pass*, yaitu ketebalan material yang disambung, proses pengelasan yang digunakan, posisi pengelasan, dan kualifikasi *welder*. *Root pass* adalah lintasan *pass* pertama dalam prosedur pengelasan. Dalam banyak kasus, multipass dilakukan untuk membentuk sambungan las yang kuat dan ulet. *Root pass* adalah *pass* yang pertama kali dilas (ditandai dengan nomor 1). *Cap pass* adalah *pass* terakhir dari las-lasan yang membentuk *weld face*, di mana *cap pass* sendiri terletak pada *layer* terakhir. Apabila pada proses pengelasan hanya terdapat, *root pass* dan *cap pass*, maka sambungan las tersebut memiliki 2 *layer* saja. Namun, apabila ada lebih dari 2 *layer*, maka terdapat *filter pass*, yaitu *pass* yang mengisi sambungan las setelah *root pass* sampai sebelum *cap pass*. (Fajrin, A., 2023)

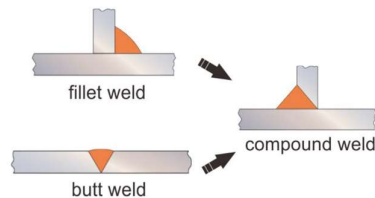
Apabila hanya terdapat 1 *layer* saja, maka pengelasan tersebut *single layer*. Namun, apabila terdapat 2 atau lebih *layer*, maka pengelasan tersebut *multi layer* (pengelasan berlapis). Pada pengelasan *multi layer*, *layer* pertama akan mendapatkan efek *postheat* dari *layer* kedua. Selain itu, *layer* kedua juga akan memberikan efek *preheat* bagi *layer* berikutnya.



Gambar 2. 2. Layer dan Pass dalam Pengelasan
Sumber : Mewelding, 2022

2.2.2 Sambungan Pengelasan (*Joint Design*)

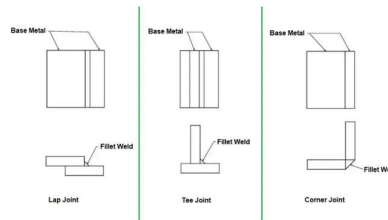
Mengacu pada *The Welding Institute* (TWI) sambungan (*joint*) pengelasan ada 3 jenis, yaitu *fillet weld*, *butt weld*, dan *compound weld* (gabungan *fillet weld* dan *butt weld*).



Gambar 2. 3. Sambungan Pengelasan

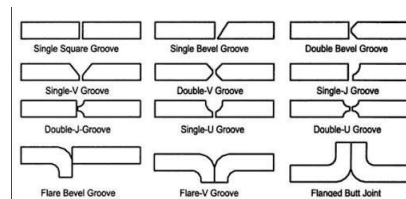
Sumber : ExpertLas, 2020

Fillet weld adalah pengelasan dengan penampang segitiga kasar. Dengan ketebalan yang sama, *fillet weld* memerlukan laju pendinginan yang lebih besar daripada *butt weld*. Dalam membuat *fillet weld*, seorang *welder* biasanya menggunakan elektroda atau kawat pengelas yang meleleh saat terkena panas yang tinggi dan melekatkan material logam pada titik pertemuan sudut atau sambungan tumpul. Dua material disambung dengan cara mengelas sudut yang tegak lurus satu sama lain (artinya ada sudut 90° di antara keduanya). Berarti, *fillet weld* membentuk sudut 45° antar kedua bagian. *Fillet weld* jauh lebih sulit dilas dan diperiksa secara volumetrik. Tidak jarang dalam proses pengelasan *fillet weld*, hasil akhirnya lebih besar dari yang seharusnya. Hal yang perlu dilakukan untuk mengatasi hal ini adalah dengan menentukan ukuran *throat thickness* dengan tepat dan *welder* harus berhati-hati dan berusaha keras untuk mencapai ukuran desain yang ditentukan. Ada tiga jenis *fillet weld* berdasarkan konfigurasi sambungan las, yaitu sambungan pangkuan (*lap joint*), sambungan T (*T joint*), dan sambungan sudut (*corner joint*).



Gambar 2. 4. Fillet Weld Konfigurasi Sambungan Las

Sumber : WhatsPiping, 2023



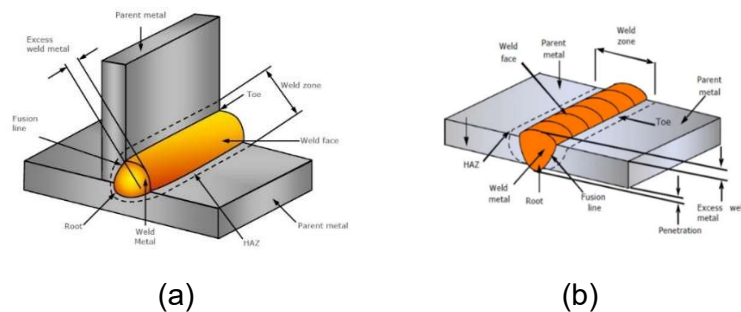
Gambar 2. 5 Butt Weld Konfigurasi Sambungan Las

Sumber : EngineerBabuLal, 2017

Sambungan ini dinamakan "*butt weld*" karena permukaan ujung material yang disambungkan berdampingan atau bersebelahan, tidak ada tumpang tindih atau *overlap*. Apabila *fillet weld* membuat sudut 45° antar kedua bagian, sedangkan *butt weld* membentuk seperti jahitan. Ada tiga jenis *butt weld* berdasarkan konfigurasi sambungan las, yaitu tumpul (*square butt weld*), lancip (*V-butt weld*), dan *bevel butt weld/ double V-butt weld*.

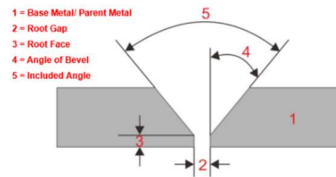
2.2.3 Bagian-Bagian Hasil dalam Pengelasan

Dalam proses pengelasan, terdiri dari beberapa bagian, yaitu



Gambar 2. 6 Bagian-Bagian Pengelasan Fillet dan Butt
(a) *Fillet Weld* ; (b) *Butt Weld*

Sumber : Pengelasan.net, 2019



Gambar 2. 7 Bagian-Bagian Pengelasan

Sumber : ExpertLas, 2020

2.2.3.1 Logam Induk (*Base Metal/ Parent Metal*)

Logam Induk (*Base Metal/ Parent Metal*) adalah daerah material dasar yang nantinya akan membentuk bagian utama dari sambungan las setelah proses pengelasan selesai. Namun, saat proses pengelasan selesai daerah ini tidak mengalami perubahan sifat, perubahan bentuk, dan perubahan mikrostruktur karena tidak terkena panas dan temperatur.

2.2.3.2 Logam Las (*Weld Metal*)

Weld metal adalah daerah utama di mana dua atau lebih dua material di mana terjadi pelelehan dengan *filler metal* kemudian membeku. *Filler metal* diletakkan pada celah antara material yang akan digabungkan.

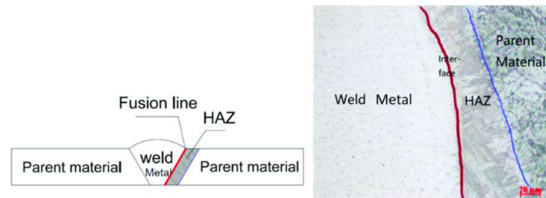
2.2.3.3 HAZ (*Heat-Affected Zone*)

Daerah yang terpengaruh panas dan temperatur yang sangat tinggi selama proses pengelasan. HAZ bersebelahan dengan logam las (*weld metal*) dan logam induk (*base metal*). Akibat dari siklus pelelehan kemudian mendingin dalam waktu yang cepat, logam yang terpengaruh panas dan tidak meleleh di mana mengalami perubahan sifat, perubahan bentuk, dan perubahan mikrostruktur. Perubahan ini dapat memengaruhi kekuatan sambungan las, seperti tingkat kekerasan yang menurun dan kurangnya ketahanan material terhadap korosi.

2.2.3.4 Garis Gabungan (*Fusion Line*)

Apabila kita mengetsa dari penampang las, maka kita dapat melihat garis gabungan (*fusion line*). Garis ini adalah garis gabungan antara

logam induk (*weld metal*) dan HAZ. Dengan kata lain, *fusion line* adalah zona perbatasan antara daerah yang mengalami peleburan dan tidak mengalami peleburan (Nugroho, A., & Setiawan, E., 2018).



Gambar 2. 8 Mikrostruktur dari *Fusion Line*

Sumber : Qian, Y., & Zhao, J., 2019

2.2.3.5 Permukaan Las (*Weld Face*)

Pada konsep *pass* dalam pengelasan, terdapat *pass* terakhir dari as-lasan (*cap pass*) yang membentuk *weld face*. Dengan kata lain, *weld face* adalah daerah permukaan las yang menyatu, mulai dari proses pertama kali pengelasan sampai proses terakhir kali pengelasan.

2.2.3.6 Akar Las (*Root*)

Root adalah daerah yang berada pada bagian pertama kali *welder* melakukan proses las, atau pada *pass* dapat disebut *root pass*.

2.2.3.7 Tinggi Weld Metal (*Weld Reinforcement*)

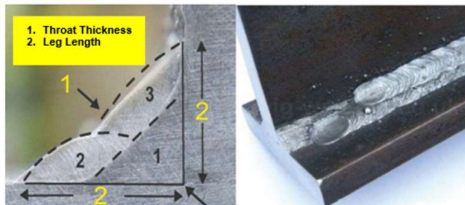
Pada material yang dilas terdapat lelehan hasil pengelasan yang melebihi permukaan base metal, bagian ini disebut dengan *weld reinforcement*. *Weld reinforcement* yang berlebih/ *overflow* dapat menjadi penyebab terjadinya konsentrasi tegangan.

2.2.3.8 Angle of Bevel

2.2.3.9 Throat Thickness dan Leg Length

Pada *fillet weld* pada *T-joint*, ada 2 istilah yang perlu dipahami, yaitu *throat thickness* (nilai desposit las) dan *leg length* (besar ketinggian las). Istilah ini didasari pada pengukuran kampuh las pada *fillet weld*. Pengukuran panjang hasil pengelasan *fillet weld* secara vertikal maupun *horizontal* adalah *leg length*. Kedua arah pengukuran *leg length* diperlukan

untuk melihat kekuatan sambungan las. *Throat thickness* sendiri adalah panjang hasil pengelasan *fillet weld* dari pusat las ke pusat permukaan las, sedangkan untuk *design throat thickness* bernilai leg length (Achmadi, 2023).



Gambar 2. 9 Throat Thickness dan Leg Length Fillet Weld

Sumber : ExpertLas, 2020

2.3 Pengelasan GMAW

Pengelasan GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) merupakan pengelasan dengan penggunaan gas CO₂ sebagai gas pelindung logam yang dilas (*weld metal*) dari pengaruh udara luar (Fakri & Juhan, 2019). Pada penelitian ini digunakan aliran gas inert sebagai gas pelindung (80% Ar dan 20% CO₂ atau campuran 80/20). Tujuannya adalah melindungi sambungan las apabila terjadi oksidasi saat solidifikasi/pembekuan. Ada alasan mengapa Argon digunakan sebagai campuran CO₂, yaitu Argon adalah gas murni yang memiliki kemampuan untuk tidak bereaksi dengan udara luar. Namun, akibat dari Argon murni yang tergolong mahal dan kinerja dari Argon yang tidak terlalu signifikan apabila dicampur dengan gas lainnya, maka dicampurkan dengan CO₂. CO₂ dapat mengurangi percikan logam (*spatter*) pada saat logam dilelehkan selama proses pengelasan. Selain itu, gas ini memiliki portabilitas yang tinggi dan biayanya yang cenderung relatif murah. (Citra Harapan Jaya, 2021). Parameter yang memengaruhi hasil las GMAW, yaitu arus, tegangan, *heat input*, polaritas, kecepatan las, dan kecepatan kawat las.

2.3.1 Filler Metal (Logam Pengisi)

Pada pengelasan GMAW tidak menggunakan fluks, melainkan *filler metal* jenis *solid wire*. *Filler metal* berfungsi agar sambungan las yang

tercipta kuat. Pada *dissimilar weld metal*, *filler metal* dapat menjembatani adanya perbedaan sifat-sifat dasar kedua material, seperti sifat kimia, fisika, dan mekanik. Pada produk *Medium Tank* digunakan beberapa jenis filler metal, yaitu ER70s-6, ER 307, dan ER 110S-G. Namun, *filler metal* yang digunakan pada penelitian ini adalah ER 307 dengan merk ESAB OK AUTROD. Pemilihan *filler metal* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti sifat ketangguhan (*toughness*) dan kekuatan tarik yang mendekati material dasar, serta kemampuan konduktivitas listrik dan konduktivitas termal dari material tersebut (Dwi Fitrianto, A., 2019). Selain itu, *filler metal* ini biasa digunakan untuk sambungan *armor steel* karena difusibilitas hidrogen yang rendah dalam *weld metal* ke HAZ di austenitik (Gürol dkk., 2022).

Tabel 2. 1. Komposisi *Filler Metal* ER307
Sumber : ESAB, 2023

Komposisi (%)									
C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	N
0,08	7	0,9	≤0,015	≤0,025	8	18	≤0,3	≤0,1	≤0,06

Ketahanan terhadap korosi merupakan hal yang sangat penting untuk sambungan las pada *dissimilar weld metal*. Ketahanan tersebut harus sejalan dengan peningkatan kadar Chromium (Cr). ER370 memiliki kadar Chromium yang lebih tinggi daripada ER70s-6 dan ER 110S-G sehingga *filler metal* ini cocok digunakan untuk pengelasan *dissimilar weld metal*. *Filler Metal* ER307 sendiri bersifat austenitik, di mana istilah ini dipakai untuk menggambarkan material dengan struktur *Face-Centered Cubic* (FCC). Selain itu, austenitik seringkali memiliki sifat karakteristik *non-magnetic* (tidak dapat menarik medan magnet). (Mega Jaya, 2023)

Tabel 2. 2 Tipe Paduan *Filler Metal* ER307
Sumber : MegaJaya, 2023

Tipe Paduan	Austenitik (18 % Cr - 8 % Ni - 7 % Mn)
-------------	--



Gambar 2. 10 Filler Metal ESAB OK AUTROD ER307

Sumber : ESAB, 2023

2.4 Parameter Pengelasan

Dalam proses pengelasan, parameter pengelasan adalah suatu hal yang diatur secara hati-hati agar hasil akhir dari pengelasan hanya minim terjadi cacat material. Parameter utama yang perlu diperhatikan meliputi arus, tegangan, kecepatan pengelasan (*travel speed*), dan *heat input*.

2.4.1 Arus (A)

Arus pengelasan adalah jumlah listrik yang mengalir melalui elektroda selama proses pengelasan. Arus merupakan salah satu parameter yang paling berpengaruh dalam menentukan ukuran dan bentuk dari zona leleh (*fusion zone*)

2.4.2 Tegangan (volt)

Tegangan pengelasan adalah perbedaan potensial listrik antara elektroda dan material dasar selama pengelasan. Tegangan memengaruhi bentuk dan ukuran *bead* serta stabilitas busur las.

2.4.3 Kecepatan Pengelasan (*Travel Speed*)

Kecepatan pengelasan adalah salah satu parameter pengelasan yang mengacu pada kecepatan relatif antara sambungan las dan busur listrik pada saat proses pengelasan berlangsung. Peningkatan *travel speed* cenderung menghasilkan *heat input* yang lebih rendah. Alasannya adalah busur listrik akan membutuhkan waktu yang lebih sedikit dalam memanaskan *base metal* dan *filler metal*, sehingga menghasilkan HAZ yang lebih kecil. Namun, *travel speed* yang berlebihan juga tidak baik karena dapat menyebabkan berbagai dampak negatif seperti peningkatan

adanya resiko defek, penetrasi yang tidak memadai, dan buruknya kualitas pengisian.

2.4.4 Heat Input

Heat input dalam pengelasan adalah jumlah energi panas yang diberikan per satuan panjang las selama proses pengelasan. Heat input merupakan salah satu parameter penting dalam pengelasan karena secara langsung mempengaruhi struktur mikro, sifat mekanik, dan kualitas keseluruhan dari sambungan las.

Heat input dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$HI = \frac{V \times I \times 60}{s \times 1000} \text{ kJ/ mm} \quad (2.1)$$

Di mana :

V = Tegangan pengelasan (volt)

I = Arus (A)

s = Kecepatan pengelasan (mm/menit)

Heat input yang tinggi dapat menurunkan kekuatan dan kekerasan sambungan las karena pendinginan yang lebih lambat memungkinkan pertumbuhan butir yang lebih besar dan transformasi fasa yang tidak diinginkan. Untuk itu sebelum pengelasan dilakukan perlu dilakukan penyesuaian tegangan dan arus, mengatur kecepatan pengelasan, dan penggunaan pendingin eksternal jika diperlukan

2.5 Dissimilar Weld Metal

Akibat dari perkembangan teknologi las modern, pengelasan logam yang berbeda (*dissimilar weld metal*) semakin banyak digunakan. Material yang berbeda apabila digabungkan akan menghasilkan sifat-sifat material yang berbeda. Namun, proses ini akan sulit dilakukan dengan pengelasan konvensional. Hal ini disebabkan oleh masing-masing material memiliki sifat yang berbeda. Material yang digunakan dalam penelitian dissimilar weld

metal ini adalah Baja *Armor* MIL-DTL-46100E dan Baja *Non Armor* ISO-15608 1.2.

2.5.1 MIL-DTL-46100E

Besarnya permintaan militer akan pelat baja, maka solusinya adalah memperluas ketersediaan baja berdasarkan spesifikasi militer Amerika Serikat untuk *Tempered High-Hard Armor* (HHA), yaitu MIL-DTL-46100E. MIL-DTL adalah singkatan dari "*military detail spec*". Material lapis baja ini biasanya digunakan untuk konstruksi kendaraan tempur, perlindungan terhadap ranjau darat, dan yang berkaitan dengan perlindungan kendaraan dari ledakan. MIL-DTL-46100E merupakan material tahan peluru (*armor*) yang bersifat baja *armor plate*, *wrought armor*/ baja tempa (diproses secara mekanis atau termal), dan memiliki kekerasan tinggi. Sifat kekerasan yang tinggi dari perlakuan panas MIL-DTL-46100E memberikan ketahanan yang baik terhadap penetrasi (MIL-DTL-46100E, 2008).

2.5.2 ISO-15608 1.2.

ISO-15608 1.2 memberikan pedoman sistem dalam pengelompokan baja *non armor*. Pengelompokan ini dapat dikaitkan dengan beberapa hal, seperti *heat treatment*, pembentukannya, dan menurut pengujian *non-destructive*. Apabila melihat referensi pada *Technical Report* ISO/TR 15607 "*Welding — Guidelines For A Metallic Materials Grouping System*", baja *non armor* dikelompokkan untuk setiap tipenya. Dimana *group* 1, 2, 3 dan 11 mengacu pada komposisi kimia yang ditentukan pada standar material (nilai tertentu) dan *group* 4-11 berdasarkan kandungan unsur yang digunakan dalam desain paduan. Pada penelitian ini digunakan ISO-15608 1.2. Baja tersebut memiliki *group* 1 dan *subgroup* 2 (ISO-TR-15608, 2017).

2.5.3 Alasan Pemilihan Material untuk Digabungkan

Pemilihan *dissimilar weld metal* tersebut merujuk pada struktur *body hull* Medium Tank. Dari struktur *body hull* ada beberapa daerah kritis dan non-kritis. Pada daerah kritis dituntut untuk memiliki material proteksi balistik, sedangkan pada daerah non-kritis diperlukan material untuk

masing-masing struktur *body hull* itu sendiri. Kondisi ini mengakibatkan terjadinya *dissimilar weld metal* dengan dua material yang berbeda. Material *armor* untuk daerah yang terekspos dengan lingkungan luar, di mana terdapat ancaman dari musuh. Material *non armor* terdapat pada bagian dalam.

2.6 Struktur Mikro Baja Karbon

Struktur mikro memengaruhi sifat mekanik material. Baja karbon terdiri dari ferit dan perlit sebagai fasa utamanya. Pada dasarnya, jumlah dan distribusi fasa tersebut dipengaruhi oleh adanya proses pendinginan dan perlakuan panas. Struktur mikro pada baja dapat diamati dengan analisis permukaan sampel menggunakan mikroskop optik (OM) dan SEM.

2.6.1 Delta Iron (δ)

Struktur kristal yang dimiliki adalah BCC. Fasa ini stabil pada temperatur yang sangat tinggi, yaitu 1394 °C hingga 1538 °C.

2.6.2 Austenit (γ)

Fasa austenit memiliki struktur FCC. Material yang didominasi oleh fasa ini akan bersifat cenderung lunak (*ductile*). Austenit stabil pada temperatur 912°C hingga 1394 °C.

2.6.3 Ferit (α)

Ferit merupakan fasa yang memiliki struktur BCC. Temperatur dari fasa ini berada di bawah 910°C. Karakteristik dari ferit sendiri, yaitu mudah dibentuk. Hal ini mengakibatkan ferit menjadi seringkali digunakan pada konstruksi. Apabila dibandingkan dengan sementit, ferit lebih lunak (*ductile*).

2.6.4 Perlit ($\alpha + F_3C$)

Perlit adalah struktur mikro kombinasi dari fasa ferit (α) dan sementit (F_3C) yang terdiri dari lapisan-lapisan (lamelar) ferit dan sementit. Fasa ini terbentuk karena pendinginan lambat austenit pada temperatur di bawah 727°C. Ferit bersifat lebih keras dan kuat daripada ferit karena adanya sementit. Pada kasus pendinginan cepat, karbon yang tidak berdifusi akan

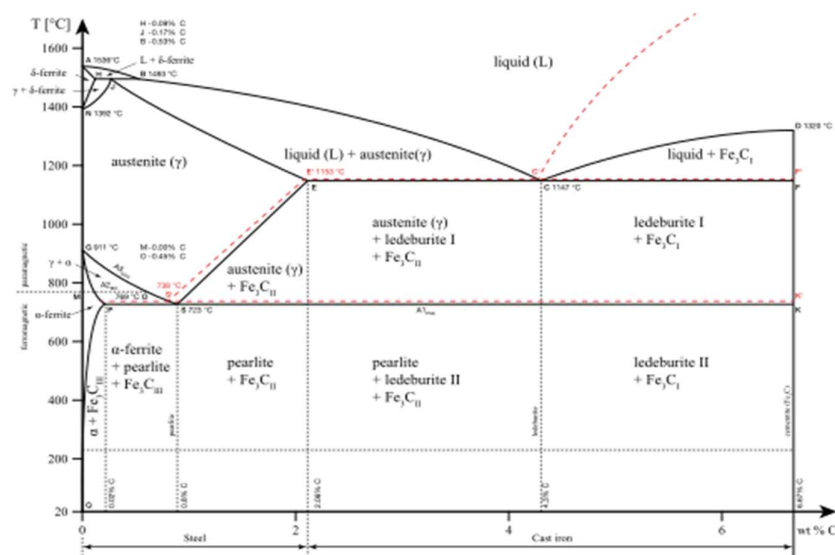
memicu terbentuknya fasa martensit. Fasa martensit adalah fasa terkeras dalam baja, di mana kekerasannya mencapai 700-900 HV.

2.6.5 Martensit

Martensit terbentuk sebagai transformasi fasa dari hasil pemanasan berulang dan terjadi pendinginan cepat (*quenching*) dari austenit. Proses yang terjadi menghasilkan struktur BCT (*Body-Centered Tetragonal*) yang bersifat keras dan rapuh. Fasa ini merupakan fasa ferit dan sementit yang bercampur dalam bentuk jarum-jarum lamelar. Kekuatan dan kekerasan martensit yang tinggi disebabkan oleh deformasi geser yang terjadi selama transformasi fasa tersebut. Namun, sifat rapuh dan keras tersebut juga bergantung pada komposisi karbon.

2.6.6 Sementit (Fe_3C)

Sementit bersifat sangat keras dan rapuh. Kekerasannya berada dalam rentang 800 HV. Sementit terbentuk selama adanya pendinginan baja austenit. Apabila baja tersebut mengalami pendinginan di bawah titik eutektik (727°C .) dan karbon dalam austenit tidak lagi larut dalam besi, maka akan terbentuk fasa sementit.

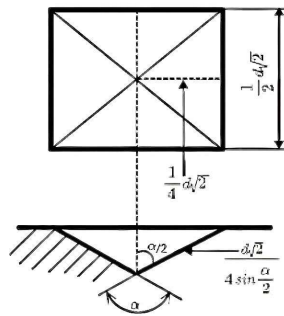


Gambar 2. 11 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Sumber : wikipedia, 2019

2.7 Pengujian *Micro Vickers Hardness*

Pengujian kekerasan diperlukan dalam menilai ketahanan material terhadap deformasi atau perubahan bentuk akibat adanya tekanan maupun gesekan. Pengukuran kekerasan berupa *destructive test* (pengujian merusak) dan metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *Micro Vickers Hardness*. Instrumen pengujian *Micro Vickers Hardness* adalah alat yang digunakan untuk menentukan tingkat kekerasan suatu material pada skala mikro. Prinsip kerjanya didasarkan pada konsep penggunaan indentor berbentuk piramida intan yang memiliki sudut spesifik (136°) dengan alas segi empat. Pertama, material diletakkan secara perlahan pada indentor, yang menyebabkan indentor akan memberikan beban yang telah ditetapkan pada material. Selanjutnya, besarnya indentor yang terbentuk pada permukaan bahan diukur dengan bantuan mikroskop. Dari ukuran indentasi tersebut, nilai kekerasan *micro vickers* (HV) dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini



Gambar 2. 12 Perhitungan nilai HV

Sumber : Zulfandy, D., 2019

$$A = 4x \frac{1}{2} d \sqrt{2} x \frac{1}{2} \left(\frac{d\sqrt{2}}{4\sin\frac{\alpha}{2}} \right)$$

$$A = \frac{d^2}{2\sin\frac{136^\circ}{2}}$$

$$HV = \frac{P}{\frac{d^2}{2\sin\frac{136^\circ}{2}}}$$

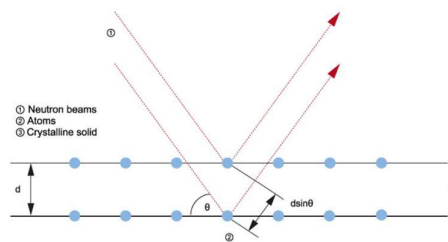
$$HV = \frac{(1,854)P}{d^2} \quad (2.2)$$

di mana P = beban yang digunakan (kg)
 θ = sudut puncak identor = 136°
 D = rata-rata diagonal jejak

2.8 Pengujian XRD

Difraksi dapat terjadi apabila ada pembelokan atau perubahan arah gelombang ketika gelombang bertemu dengan suatu hambatan dalam lintasannya. Hal tersebut sesuai dengan sifat gelombang, yaitu akan menyebar ketika ada celah atau rintangan dalam lintasannya dengan sudut tertentu. Pembelokan pada difraksi mengacu pada fenomena interferensi.

Prinsip pengukuran difraksi didasarkan pada Hukum Bragg. Radiasi elektromagnetik atau partikel sub-atom dengan panjang gelombang yang sebanding dengan jarak antara atom-atom mengenai spesimen kristal dan mengalami hamburan secara spekuler oleh atom-atom dalam sistem. Hal ini juga berlaku untuk neutron atau hamburan neutron. Hasilnya adalah terjadinya interferensi konstruktif sesuai dengan prinsip Hukum Bragg. Dengan kata lain, sinar ini dipantulkan oleh kristal dalam pola khusus yang mencerminkan jarak antar atom dalam kristal dan sudut datangnya radiasi, menghasilkan pola difraksi yang khas.



Gambar 2. 13 Hukum Bragg

Sumber : NMEI3, 2012

Peristiwa tersebut memenuhi Hukum Bragg, yang dituliskan pada persamaan

$$n\lambda = 2 \cdot d_{hkl} \sin\theta \quad (2.3)$$

di mana hkl = indeks miler
 notasi untuk menentukan orientasi kristal untuk tiap bidang yang merefleksikan sinar datang pada sudut yang berbeda
 n = bilangan bulat, ditentukan oleh urutan yang diberikan
 λ = panjang gelombang monokromatis
 θ = setengah dari sudut hamburan yang tidak terpengaruh panas
 d = jarak yang tidak meregang karena tidak terpengaruh panas

Metode *Rietveld Refinement* adalah teknik analisis kuantitatif yang sangat detail untuk mempelajari struktur kristal material, yang melibatkan penggunaan *software* seperti Highscore Plus. Teknik ini membandingkan data difraksi sinar-X dengan perhitungan jarak antar atom, sudut ikatan, dan faktor skala. Dalam pengujian pengelasan, metode Rietveld membantu memahami perubahan struktur kristal selama proses pengelasan dan memprediksi stabilitas fase yang terbentuk (Mukminin, 2019). Teknik ini pertama kali diusulkan oleh Hugo Rietveld pada tahun 1960-an dan telah menjadi metode yang paling umum digunakan untuk penyempurnaan profil difraksi sinar-X (XRD).

2.9 Pengujian Metalografi dengan OM

OM (*Optical Microscope*) digunakan untuk memeriksa sampel dengan menghasilkan gambar yang diperbesar. Perbesaran mikroskop ini, yaitu 4x – 1000x. Proses pengujian ini dimulai dengan persiapan sampel, di mana potongan las diambil dari area yang diinginkan dan kemudian dilakukan pemolesan hingga permukaannya halus dan bebas dari goresan. Selanjutnya, sampel tersebut biasanya dietsa menggunakan larutan kimia tertentu untuk menyoroti fitur-fitur mikrostruktural seperti butir, batas butir, dan fasa yang ada. Dengan menggunakan mikroskop optik, peneliti dapat mengamati dan mengambil data dalam bentuk gambar untuk berbagai

aspek struktur mikro, termasuk ukuran dan bentuk butir, distribusi fasa, serta adanya cacat seperti retakan atau porositas.



Gambar 2. 14 Alat OM
Sumber : dokumen pribadi

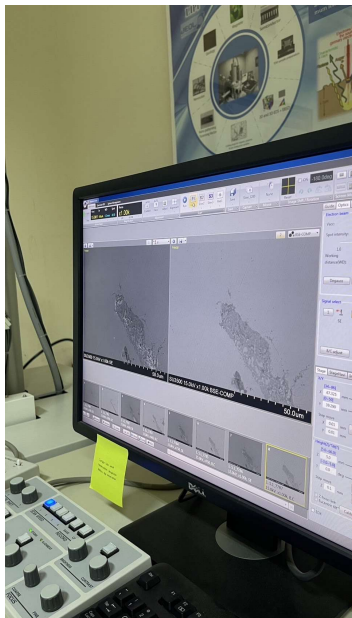
2.10 Pengujian *Scanning Electron Microscopy (SEM)*

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik analisis yang digunakan untuk memeriksa topografi dan komposisi material pada skala mikrometer hingga nanometer. SEM menggunakan elektron (*electron beam*) untuk menghasilkan gambar yang sangat detail dari spesimen. SEM memiliki kemampuan pembesaran hingga 300.000x, bahkan mencapai 1.000.000x pada model modern. SEM memberikan resolusi tinggi yang jauh lebih baik dibandingkan dengan mikroskop optik.

Dalam operasinya, SEM memanfaatkan elektron yang dipancarkan dari sumber elektron yang kemudian dipercepat oleh medan listrik dan difokuskan oleh lensa elektromagnetik menuju permukaan spesimen. Elektron yang berinteraksi dengan permukaan spesimen menghasilkan sinyal yang ditangkap oleh detektor, kemudian diolah menjadi gambar.

Selain gambar topografi, SEM juga mampu memberikan analisis komposisi kimiawi menggunakan fitur Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS). EDS bekerja dengan mendeteksi sinar-X yang dipancarkan oleh spesimen saat elektron berenergi tinggi menabrak atom

dalam spesimen tersebut. Informasi ini kemudian digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan konsentrasi unsur-unsur yang ada di permukaan spesimen tersebut.



Gambar 2. 15 Pembacaan Hasil SEM

Sumber : dokumen pribadi

2.11 Penelitian Terdahulu

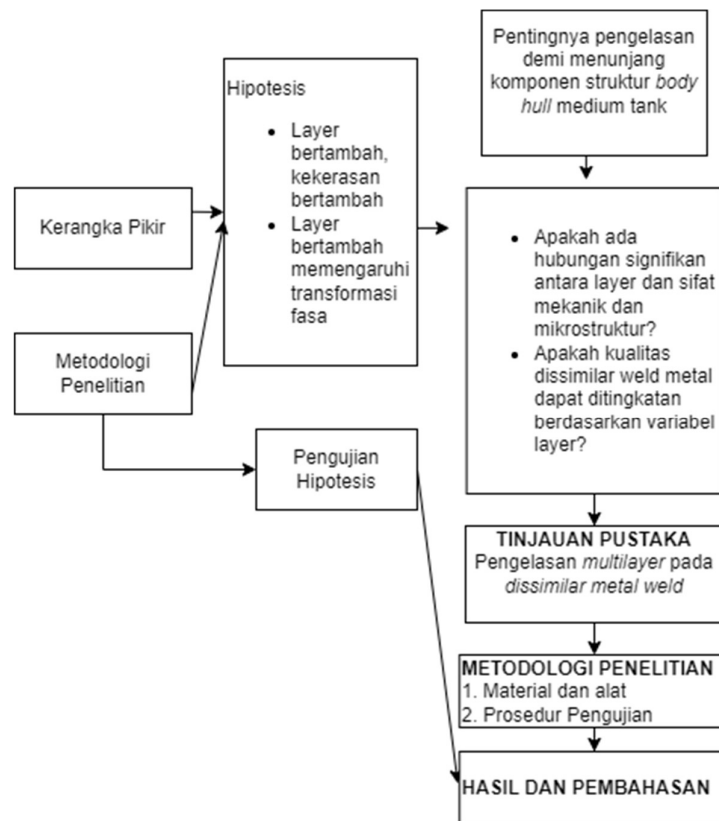
Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No	Judul Penelitian	Penulis	Persamaan Penelitian	Perbedaan Penelitian		
				Pembeda	Penelitian Terdahulu	Penelitian Ini
1.	PENGARUH HEAT INPUT PADA PENGELASAN DISSIMILAR METAL SS304H DAN	(Abdillah. A. F., 2017)	1. Pengelasan pada dissimilar weld metal 2. Metode pengujian dengan micro	1. Material yang disambung	Austenitic (SS304H) dan tube low alloy steel (T22)	high-hardness wrought steel armor plate (MIL-DTL-46100E)

	T22 DENGAN PROSES GTAW TERHADAP DISTRIBUSI KEKERASAN DAN KANDUNGAN DELTA FERRITE		<i>vickers hardness</i> , OM			dan <i>low carbon steel</i> (ISO-15608 1.2)
				2. Variabel bebas	<i>Heat input</i>	<i>Layer</i> pengelasan
				3. Metode pengujian lainnya	Perhitungan <i>ferrite number</i> dengan <i>feritscope</i>	Uji XRD dan uji SEM
<p>Hasil Penelitian :</p> <p>a. Nilai kekerasan tertinggi terdapat pada pengelasan <i>layer 3</i> dan <i>layer 1</i>(<i>root</i>). Hal tersebut disebabkan pengelasan <i>multilayer</i> menyebabkan <i>post heat</i> pada <i>layer 2</i> dan <i>preheat</i> sekaligus, sedangkan pada <i>layer 3</i> dan <i>layer 1</i> (<i>root</i>) hanya mengalami satu <i>treatment</i>.</p> <p>b. Berdasarkan pengujian FN diperoleh nilai data yang sesuai dengan batas δ-ferit pada <i>weld metal</i>, sehingga kemungkinan terjadi <i>hot crack</i> kecil.</p>						
2.	CHARACTERIZATION ON THE GRADIENT MICROSTRUCTURE NEAR THE FUSION INTERFACE OF DISSIMILAR METAL BETWEEN HIGH Cr HEAT-RESISTANT STEEL AND Ni-BASED ALLOY 617	(Wang dkk., 2019)	1. Pengelasan pada <i>dissimilar weld metal</i> 2. Pengelasan berlapis (<i>multilayer</i>) 3. Metode pengujian SEM, OM	1. Material yang disambung	Cr (<i>heat-resistant steel</i>) dan aduan berbasis Ni 617	<i>high-hardness wrought steel armor plate</i> (MIL-DTL-46100E) dan <i>low carbon steel</i> (ISO-15608 1.2)
				2. Variabel terikat	Gradien mikrostruktur	Sifat mekanik dan mikrostruktur
				3. Metode pengujian lainnya	EBSD, EPMA, TEM, dan	XRD dan <i>micro vickers</i>

					STEM	hardness
3.	MICROSTRUCTURE AND HARDNESS PROFILE OF DISSIMILAR LAP JOINT OF TYPE 304 STAINLESS STEEL TO SS400 CARBON STEEL	Oktadinata, H., & Putra, A. G. (2019).	1. Pengelasan pada <i>dissimilar weld metal</i> 2. Metode pengujian OM dan <i>micro vickers hardness</i>	1. Material yang disambung	304(stainless steel) dan SS400(low carbon steel)	
				2. Variabel bebas	1. <i>Filler metal</i> (E316L, E309L, dan E308L) 2. Komposisi Gas (100%CO ₂ dan 90%Ar + 10%CO ₂)	Layer pengelasan
				3. Metode pengelasan	FCAW	GMAW
<p>Hasil Penelitian :</p> <p>a. Kekerasan HAZ akan lebih tinggi daripada <i>base metal</i>. Pembentukan martensit yang dominan pada daerah HAZ SS400 berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang cenderung tinggi. Pada HAZ 304 dapat dilihat dari adanya butiran halus akibat temperatur tinggi selama proses pengelasan</p> <p>b. HAZ 304 dan <i>weld metal</i> memiliki struktur mikro austenit, di mana sub-struktur pada <i>weld metal</i> bersifat kolumnar dan seluler.</p> <p>c. Pemilihan <i>filler metal</i> berpengaruh pada sambungan las. <i>Filler metal</i> E308L memberikan nilai kekerasan yang tinggi pada <i>weld metal</i> daripada E309L dan E316L. Nilai kekerasan pada <i>weld metal</i> dengan munculnya fasa δ-ferit</p>						

2.12 Kerangka Pikir



Gambar 2. 16 Kerangka Pikir

Sumber : diolah peneliti

2.13 Hipotesis

Penambahan jumlah *layer* selaras dengan meningkatnya nilai kekerasan. Hal ini terjadi karena untuk melakukan pengelasan lebih dari satu tahap, maka diperlukan *travel speed* yang lebih tinggi. *Travel speed* yang tinggi akan membuat turunnya total *heat input* yang diterima. Dengan turunnya total *heat input* akan memengaruhi struktur mikro material yang terbentuk yang juga dapat dilihat berdasarkan struktur kristal pada pengujian XRD. Dengan demikian, kualitas *dissimilar weld metal* dapat ditingkatkan dengan penambahan jumlah *layer*.