



TESIS - TL142501

**PENGARUH LAMA WAKTU TUNGGU PADA
PROSES *PWHT* TERHADAP SIFAT MEKANIK,
STRUKTUR MIKRO DAN TEGANGAN SISA PADA
PENGELASAN BAJA AAR M201 GR.B⁺**

IMMANUEL FREDDY AUGUSTINO
2713201012

DOSEN PEMBIMBING
Prof.Dr.Ir.Sulistijono, DEA

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN METALURGI PENGELASAN
JURUSAN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015



THESIS - TL142501

**ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF HOLDING
TIME ON *PWHT* PROCESS AGAINSTS
MECHANICAL PROPERTIES, MICROSTRUCTURE
AND RESIDUAL STRESS ON WELDING OF STEEL
AAR M201 GR.B⁺**

IMMANUEL FREDDY AUGUSTINO
2713201012

ADVISOR
Prof.Dr.Ir.Sulistijono, DEA

MASTER PROGRAM
AREAS OF EXPERTISE OF WELDING METALLURGY
DEPARTMENT OF MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOVEMBER INSTITUT OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2015

LEMBAR PENGESAHAN TESIS


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

Oleh:
Immanuel Freddy Augustino
NRP. 2713201012

Tanggal Ujian: 1 Juli 2015
Periode Wisuda: Semester Genap 2014/2015

Disetujui oleh:

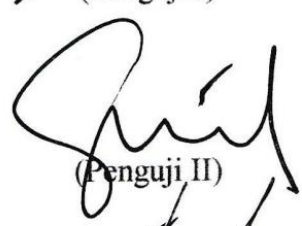
1. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA
NIP. 196203261987011001


(Pembimbing)


2. Dr. Lukman Noerochim, ST., M.Sc.Eng
NIP. 197703132003121001


(Penguji I)

3. Dr. Sungging P, ST., MT
NIP. 196809302000031001


(Penguji II)

4. Mas Irfan P H, ST., M.Sc., Ph.D
NIP. 197610272003121001


(Penguji III)



Direktur Program Pascasarjana


Prof. Dr. Ir. Adi Soepriyanto, M.T.
NIP. 196404051990021001

Analisa Pengaruh Lama Waktu Tunggu pada Proses *PWHT* Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa pada Pengelasan Baja AAR M201 Gr.B⁺

Nama mahasiswa : Immanuel Freddy Augustino
NRP : 2713201012
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

ABSTRAK

PWHT adalah proses perlakuan panas yang biasanya diberikan pada material setelah mengalami proses pengelasan, *PWHT* bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa, menyeragamkan butir dan membuat material lebih tangguh.

Dalam penelitian ini material yang digunakan adalah AAR M201 Gr.B⁺ dengan ketebalan 20mm. Proses las menggunakan SMAW dengan elektroda E8018-B2, polaritas DCEP. *PWHT* diberikan pada temperatur 600°C dengan waktu tunggu selama 1 jam, 2 jam, 3 jam dan 4 jam didalam furnace lalu didinginkan di udara.

Berdasarkan hasil pengujian struktur mikro, semakin lama waktu tunggu, maka struktur butir menjadi lebih seragam, dan butir menjadi lebih besar. Hal ini dikarenakan panas yang masuk merupakan energi bagi struktur butir sehingga membuat butir membesar dan lebih seragam. Berdasarkan hasil pengujian kekerasan pada daerah base metal, *HAZ*, dan weld metal, didapatkan nilai kekerasan menurun akibat *PWHT*, hal ini dikarenakan tegangan sisa menurun akibat proses *PWHT* sehingga nilai kekerasan ikut turun. Didapatkan nilai kekerasan yang masuk dalam range yaitu pada material yang diberi perlakuan panas selama 4 jam. Berdasarkan hasil pengujian impak pada daerah weld metal, FL+1, FL+5, didapatkan daerah weld metal memiliki nilai impak paling rendah, hal ini karena pada daerah weld metal kekerasannya tinggi sehingga ketangguhannya rendah. Semua daerah menunjukkan tren yang sama, dari material tanpa diberi *PWHT* hingga yang diberi *PWHT* dengan waktu tunggu 4 jam. Berdasarkan hasil pengujian *XRD* pada daerah base metal, *HAZ*, dan weld metal, didapatkan hasil yang berbeda-beda, namun dari keseluruhan daerah menunjukkan bahwa tegangan sisa menurun pada material yang diberi *PWHT* 4 jam sehingga mengakibatkan nilai kekerasan menurun dan ketangguhan meningkat. Nilai tegangan sisa mencapai nilai yang hampir sama pada pemberian *PWHT* 2 jam.

Kata kunci: *PWHT*, Temperatur, Waktu tunggu, Struktur mikro, Kekerasan, impak, *XRD*

Analysis of The Influence of Holding time on *PWHT* Process Againsts Mechanical Properties, Microstructure and Residual Stress on Welding of Steel AAR M201 Gr.B⁺

Name : Immanuel Freddy Augustino
Student ID number : 2713201012
Advisor : Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA

ABSTRACT

PWHT is a heat treatment process that usually given to materials after welding. PWHT is supposed to reduce the residual stress, to uniform the grain and to make material much tougher.

On this experiment, material used is AAR M201 Gr.B⁺ with 20mm thick. Welding process using SMAW with electrode E8018-B2, polarity DCEP. PWHT is given in temperature of 600°C, held for 1 hour, 2 hours, 3 hours and 4 hours in the furnace and then cooled in air.

Based on the result of microstructure test, the longer Holding time is given, the more uniform and the bigger the grain becomes. This is because the heat which given into material is energy to the grain to make himself much bigger and more uniform. Based on the result of hardness test in areas of base metal, HAZ, and weld metal, obtained the value of hardness decreased because of PWHT, this may happen because the residual stress decreased after PWHT, so the value of hardness is decreased as well. Obtained the hardness value that is still in range is in the material given PWHT with Holding time for 4 hours. Based on the result of impact test in areas of weld metal, FL+1, FL+5, obtained the impact value in area of weld metal has the lowest value, for the hardness in weld metal is high and the toughness is low. All areas show the same trend from the material without PWHT to material given PWHT for 4 hours. Based on the result of XRD test in areas of base metal, HAZ, and weld metal, obtained different result each, yet the entire areas show that the residual stress decreased on material given PWHT for 4 hours, so it causes the hardness value decreased and the toughness increased. The residual stress achieves almost the same value on material given PWHT for 2 hours.

Keywords: PWHT, Temperature, Holding time, Microstructure, Hardness, Impact, XRD

KATA PENGANTAR

Puji Tuhan, segala puji dan syukur bagi Tuhan Yesus yang selalu memberikan pertolongan pada waktu-Nya dan hikmat kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini yang berjudul: **ANALISA PENGARUH LAMA WAKTU TUNGGU PADA PROSES PWHT TERHADAP SIFAT MEKANIK, STRUKTUR MIKRO DAN TEGANGAN SISA PADA PENGELASAN BAJA AAR M201 GR.B⁺**

Pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah ikut berperan dalam pengerjaan tesis ini, antara lain:

1. Keluarga, khususnya mama tercinta, sebagai seseorang yang selalu mendukung dan mendoakan selama proses pengerjaan tesis.
2. Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan masukan selama pengerjaan tesis.
3. Segenap Dosen dan Karyawan di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) yang telah banyak membantu dalam pengujian tesis. Bapak Miftahul Munir, Bapak Usman Dinata, Bapak Agus, Bapak Ilham, Mas Yasir, dll.
4. PT. Barata Indonesia yang telah membantu dalam pengadaan material AAR M201 Gr. B⁺.
5. Bapak Joko selaku *welder* yang telah membantu penulis dalam proses pengelasan.
6. Karyawan PT. Barata Indonesia yang secara langsung maupun tidak langsung ikut berperan dalam penyelesaian tesis ini.
7. Teman-teman S2 Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2013.
8. Semua pihak yang terkait baik secara langsung maupun tidak langsung.

Penulis menyadari bahwa tesis ini jauh dari sempurna, oleh karena itu penulis sangat mengharapkan segala bentuk kritik dan saran yang membangun

guna penyempurnaan tesis ini. Akhirnya, penulis berharap sekiranya tesis ini dapat bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, 9 Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Spesifikasi Material.....	5
2.2 Perlakuan Panas (<i>Heat Treatment</i>).....	8
2.2.1 Pemanasan awal (<i>Preheating</i>)	8
2.2.2 Suhu antar lapis (<i>Interpass Temperature</i>)	9
2.2.3 Perlakuan panas pasca pengelasan (<i>Post Weld Heat Treatment</i>)	9
2.3 Proses Pengelasan <i>SMAW</i>	11
2.3.1 Distribusi Temperatur	13
2.3.2 Tegangan Termal Selama Pengelasan	14
2.4 Mikrostruktur Material Las	16
2.4.1 Daerah logam las	16
2.4.2 Daerah terpengaruh panas atau <i>heat affected zone (HAZ)</i>	17
2.4.3 Logam induk	18
2.5 Tegangan Sisa	18
2.5.1 Terjadinya Tegangan Sisa.....	19

2.5.2	Penyebab terjadinya tegangan sisa	20
2.5.3	Sifat-sifat tegangan sisa	20
2.5.4	Pengaruh tegangan sisa	21
2.5.5	Pengukuran tegangan sisa	21
2.5.5.1	Metode pelubangan	22
2.5.5.2	Hukum bragg dan syarat difraksi	23
2.4.5.3	Analisa data difraksi dan tegangan sisa dengan metode Scherer	25
2.5.6	Usaha dalam mengurangi tegangan sisa	26
BAB III METODE PENELITIAN		27
3.1	Material	27
3.2	Parameter pengelasan	27
3.3	Prosedur dan Proses Pengelasan	28
3.4	Pengambilan Spesimen Uji	29
3.5	Pengujian Mekanik	29
3.5	Pengamatan Struktur Mikro	32
3.6	Analisa <i>XRD</i>	32
3.7	Analisa dan Pembahasan	33
3.8	Kesimpulan dan Saran	33
BAB IV ANALISA DATA PENELITIAN		37
4.1	Analisa hasil pengujian struktur mikro	37
4.2	Analisa hasil pengujian kekerasan	42
4.3	Analisa hasil pengujian dampak	44
4.4	Analisa hasil pengujian <i>XRD</i>	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		49
5.1	Kesimpulan	49
5.2	Saran	50
DAFTAR PUSTAKA		51
LAMPIRAN		53
BIOGRAFI PENULIS		90

DAFTAR TABEL

Table 2.1 Spesifikasi material AAR M201	5
Table 2.2 Komposisi Kimia AAR M201 Gr.B ⁺	6
Table 2.3 Nilai impact test pada suhu tertentu (ASTM A370, 2002)	7
Tabel 3.1 Data material AAR M201 Gr.B ⁺	27
Tabel 3.2 Komposisi kawat las E8018-B2	28
Tabel 3.3 <i>Welding Prosedure Spesification</i>	28
Tabel 3.4 Penandaan pada spesimen impak	31

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram besi karbon (Fe_3C).....	10
Gambar 2.2 Proses SMAW (TiraWeld, 2013).....	11
Gambar 2.3 Tipe fluks elektroda. (a) Cellulose. (b) Rutile. (c) Acid. (d) Basic...	12
Gambar 2.4 Distribusi temperatur dan tegangan selama proses pengelasan (a) Weld, (b) Perubahan Temperature, (c) Tegangan.	15
Gambar 2.5 Daerah logam lasan dan logam induk.	16
Gambar 2.6 Heat affected zone.	17
Gambar 2.7 Tegangan sisa karena penahan luar pada proses pengelasan.	19
Gambar 2.8 Terjadinya tegangan sisa.	20
Gambar 2.9 Hukum Bragg untuk difraksi sinar-x (Basary, 2006).....	23
Gambar 3.1 Pengambilan spesimen uji.....	29
Gambar 3.2 Bentuk dan ukuran spesimen uji Kekerasan.....	30
Gambar 3.3 Bentuk dan ukuran spesimen uji Impak.	31
Gambar 3.4 Flowchart pengerjaan	34
Gambar 4.1 Struktur mikro pada daerah <i>base metal</i> dengan perbesaran 1000x a) Tanpa <i>PWHT</i> , b) <i>PWHT</i> 1 jam, c) <i>PWHT</i> 2 jam, d) <i>PWHT</i> 3 jam, e) <i>PWHT</i> 4 jam.	37
Gambar 4.2 Struktur mikro pada daerah <i>HAZ</i> dengan perbesaran 1000x a) Tanpa <i>PWHT</i> , b) <i>PWHT</i> 1 jam, c) <i>PWHT</i> 2 jam, d) <i>PWHT</i> 3 jam, e) <i>PWHT</i> 4 jam.	39
Gambar 4.3 Struktur mikro pada daerah <i>weld metal</i> dengan perbesaran 1000x a) Tanpa <i>PWHT</i> , b) <i>PWHT</i> 1 jam, c) <i>PWHT</i> 2 jam, d) <i>PWHT</i> 3 jam, e) <i>PWHT</i> 4 jam.	41
Gambar 4.4 Hasil pengujian kekerasan pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses <i>PWHT</i>	42
Gambar 4.5 Hasil pengujian impak pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses <i>PWHT</i>	44
Gambar 4.6 Hasil pengujian <i>XRD</i> pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses <i>PWHT</i>	46

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pengelasan mempunyai peranan penting didalam proses manufaktur dan produksi. Pengelasan melibatkan proses pencairan, proses metalurgi, dan proses pembekuan logam, maka diperlukan pengetahuan yang mendalam untuk dapat menghasilkan sambungan las yang berkualitas dan memenuhi persyaratan dari segi kekuatan dan ketangguhan. Untuk mengetahui apakah kekuatan dan ketangguhan dari sambungan las memenuhi persyaratan atau tidak maka perlu dilakukan pengujian. Pengujian yang diberikan biasanya melibatkan pengujian sifat mekanik dan struktur mikro. Persyaratan kekuatan dan ketangguhan dari sambungan las biasanya mengacu ke standar yang digunakan. Beberapa standar yang biasa digunakan meliputi ASME, ASTM, API, AWS, dll. Penggunaan standar tergantung dari untuk sambungan apa pengelasan tersebut diaplikasikan.

Bogie adalah konstruksi dasar kereta api yang mana material yang digunakan merupakan material Cor *AAR M201*. Pada saat proses pembekuan logam cor, tidak menutup kemungkinan terjadi cacat. Cacat-cacat yang terjadi tersebut harus dilakukan perbaikan dengan menggunakan proses beveling dengan menggunakan mesin gerinda dan dilakukan pengisian (*build up*) dengan proses pengelasan. Bogie memiliki 3 daerah ^(lampiran A), yaitu daerah 1: dimana dalam proses pengelasannya perlu dilakukan *PWHT*, karena daerah ini merupakan daerah kritis yang mana bila tidak diberi *PWHT* maka akan berakibat fatal. Biasanya daerah-daerah kritis ini terletak pada bagian cekungan/belokan dan pada ujung yang menyimpan banyak tegangan sisa. Daerah 2: dimana dalam proses pengelasannya tidak perlu dilakukan *PWHT* bila pengelasannya lebih dari 2 *layer*, karena bila lebih dari 2 *layer* dianggap telah mengalami *temper beat welding* sehingga *PWHT* tidak harus dilakukan. Daerah 3: dimana

perlakuan panas merupakan pilihan didalam pengelasannya, artinya baik diberi *PWHT* atau tidak, diijinkan. Pada daerah 3 ini dianggap sebagai daerah yang tidak terlalu kritis sehingga perlakuan *PWHT* tidak diwajibkan.

Sejauh yang diketahui bahwa proses pengelasan pada material selalu meninggalkan tegangan akibat panas yang masuk, tegangan ini dinamakan tegangan sisa. Tegangan sisa yang terdapat pada material menyebabkan material tersebut menjadi keras dan getas sehingga keberadaan tegangan sisa ini tidak diharapkan. Kerusakan getas yang terjadi pada struktur pengelasan merupakan permasalahan global, terutama pada heat affected zone (*HAZ*) yang merupakan cikal bakal dari permasalahan yang kompleks dimana struktur mikro yang terbentuk dari perbedaan perlakuan panas dan kondisi lingkungan. Hal ini yang mempengaruhi sifat material seperti kekuatan, keuletan, kekerasan, dan ketangguhan. (Mohammad W. Dewan, Jiandong Liang, M.A. Wahab, Ayman M. Okeil, 2013)

Walaupun dalam pengelasan tegangan sisa selalu terjadi, namun tegangan sisa dapat dikurangi yaitu dengan cara melakukan *PWHT* (Post Weld Heat Treatment). *PWHT* telah menjadi suatu usaha yang umum dilakukan untuk mengurangi tegangan sisa dan meningkatkan sifat mekanik dari material paduan dan baja nerkekuatan tinggi dengan menghaluskan butir. Selain menggunakan *PWHT*, tegangan sisa dapat juga dikurangi yaitu dengan cara dipukul berulang-ulang, dicairkan ulang, digerinda, dan dipukul dengan ultrasonik.(Abdullah A, Malaki M, Eskandari A, 2012). Pada penelitian yang dilakukan oleh (Pingsha Dong, Shaopin Sing, Jinmiao Zhang, 2014) yaitu mengenai mekanisme pengurangan tegangan sisa dengan cara *PWHT* dengan menggunakan finite elemen, didapatkan hasil deformasi plastik dari pembebasan tegangan sisa cukup kecil. Tergantung pada perlakuan panasnya, struktur mikro pada baja dapat berbeda-beda. Bisa menjadi ferit-perlit (JaHAZi M, Egbali B, 2000 dan Kordaa AA, Miyashita Y, Mutoh Y, Sadasue T, 2007), martensit temper, atau bahkan bainit (Tau L, Chan SLI, Shin CS, 2013).

Hal tersebut juga tergantung dari persen karbon pada material tersebut. Proses holding time pada PEHT juga bergantung pada ketebalan material. Waktu tunggu yang disyaratkan ialah 25mm/jam. namun hal ini masih dianggap belum mencapai hasil yang maksimum (Augustino I.F, 2013).

Dalam penelitian ini, pengaruh dari lama waktu tunggu terhadap tegangan sisa yang dapat dilihat dari struktur mikro dan sifat mekaniknya akan dilakukan. Temperatur *PWHT* yang digunakan adalah 600°C dengan waktu tunggu 1 jam, 2 jam, 3 jam, dan 4 jam. Penambahan waktu tunggu diambil berdasarkan waktu tunggu yang dapat diaplikasikan untuk pembuatan produk, dikarenakan pemberian *PWHT* juga mempengaruhi biaya produksi sehingga perlu dilakukan optimasi.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dan judul yang diambil maka permasalahan yang menjadi obyek penelitian yaitu:

1. Bagaimana pengaruh *PWHT* pada daerah logam las, *HAZ*, dan logam induk pada pengelasan baja Cor AAR M201 Gr.B⁺ terhadap sifat mekanik dan struktur mikro?
2. Berapa waktu tunggu yang tepat agar mendapatkan hasil yang optimum?
3. Bagaimana pengaruh lama waktu tunggu pada proses *PWHT* terhadap tegangan sisa akibat proses pengelasan?

1.3 Batasan Masalah

Karena banyaknya permasalahan yang dapat dikembangkan pada penelitian ini, maka untuk menghindari agar masalah tidak melebar, permasalahan hanya dibatasi pada bagian berikut :

- Laju pendinginan pada proses *PWHT* dianggap konstan.
- Perubahan arus, potential, dan kecepatan pengelasan pada proses pengelasan dianggap sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan perumusan masalah diatas maka tujuan penelitian ini. antara lain:

1. Menganalisa pengaruh *PWHT* pada daerah logam las, *HAZ*, dan logam induk pada pengelasan baja Cor *AAR M201 Gr.B⁺* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro.
2. Menganalisa waktu tunggu yang tepat untuk mendapatkan hasil yang optimum (ditinjau dari nilai kekerasan dan impak).
3. Menganalisa pengaruh lama waktu tunggu pada proses *PWHT* terhadap tegangan sisa akibat proses pengelasan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Agar hasil dari penelitian ini dapat dijadikan panduan bagi perusahaan foundry dalam proses produksinya, terutama perusahaan pembuat komponen *bogie*.
2. Manfaat lain adalah agar penelitian ini dapat menjadi referensi bagi para peneliti untuk dapat dikembangkan lebih lagi.

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Spesifikasi Material

Material AAR tergolong material baja cor paduan untuk peralatan mobil dan lokomotif. Terdiri atas Grade A, B, B⁺, C, D dan E. setiap grade memiliki nilai kuat tarik dan nilai kekerasan yang berbeda-beda, seperti ditunjukkan pada Tabel 2.1 berikut:

Table 2.1 Spesifikasi material AAR M201

Class	Specification	Min. Yield Strength, ksi [Mpa]	Tensile Strength range ksi [Mpa]	Hardness (HBN)
AAR M201	Grade A	30 [207]	60 [414]	108-160
AAR M201	Grade B	38 [262]	70 [483]	137-228
AAR M201	Grade B ⁺	50 [345]	80 [552]	137-228
AAR M201	Grade C	60 [414]	90 [621]	179-241
AAR M201	Grade D	85 [586]	105 [724]	211-285
AAR M201	Grade E	100 [689]	120 [827]	241-311

Sumber: AAR Standard, 2007

Dari Tabel 2.1 diatas dapat diketahui bahwa material AAR M201 Gr.B⁺ memiliki nilai yield strength 50 ksi (345 Mpa), tensile strength 80 ksi (552 Mpa), dan Kekerasan 137-228 HBN. Dimana hal ini akan berpengaruh dalam pemilihan elektroda.

Dalam pemilihan elektroda mengacu pada nilai *tensile strength* dari pada material yang akan dilas, dikarenakan menurut standard nilai kuat tarik minimal dari sambungan las adalah nilai kuat tarik dari material itu sendiri, sehingga dalam pemilihan elektroda minimal yang digunakan harus memiliki nilai kuat tarik sama dengan logam induk atau lebih tinggi dari logam induknya.

Prosentase unsur-unsur kimia yang terkandung didalam material AAR M201 Gr.B⁺ dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut:

Table 2.2 Komposisi Kimia AAR M201 Gr.B⁺

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al
0.23%	0.59%	1.07%	0.02%	0.01%	0.10%	0.03%	0.04%

Sumber: Test laboratorium

Dari komposisi kimia pada Tabel 2.2 diatas dapat diketahui sifat material, dikarenakan setiap unsur kimia yang terkandung memiliki peranan masing-masing didalam material. Dibawah ini peran dari masing-masing unsur:

- Karbon (C)

Mempunyai sifat keras tetapi getas.

Fungsi karbon pada baja adalah mampu menjalani reaksi-reaksi kimia seperti reaksi substitusi (pergantian), reaksi adisi (penambahan), reaksi eliminasi (pengurangan). Karbon pada baja adalah sebagai lem atau zat perekat dan mempunyai sifat cukup tahan gesek terhadap benda atasip (tanah yang berpasir dan tidak mengandung silicon). Karbon membuat atau membentuk struktur ferit, dimana struktur tersebut mempunyai kekerasan diatas 48HRC, tetapi tidak mempunyai sifat ketajaman.

- Silikon (Si)

Mempunyai sifat elastis atau keuletannya tinggi. Silikon juga menambah kekerasan dan ketajaman pada baja. Tapi penambahan silikon yang berlebihan akan menyebabkan baja tersebut mudah retak. Silikon berupa massa hitam mirip logam yang meleleh pada 1410°C . Unsur ini mempunyai kecenderungan yang kuat untuk berikatan dengan oksigen dan sifat seratnya tahan api.

- Mangan (Mn)

Mempunyai sifat yang tahan terhadap gesekan dan tahan tekanan (beban impak). Unsur ini mudah berubah kekerasannya pada kondisi temperatur yang tidak tetap dan juga digunakan untuk membuat alloy mangan tembaga yang bersifat ferromagnetik.

- Fosfor (P)

Dapat menurunkan keuletan (ductility) pada baja dan meningkatkan kemungkinan retak pada sambungan las. Biasanya kadar fosfor pada baja dibatasi hingga 0.05%.

- Belerang (S)

Keberadaan belerang pada baja tidak begitu diinginkan karena membentuk besi sulfida yang mempunyai titik leleh rendah dan bersifat rapuh. Kandungannya dijaga serendah mungkin yaitu dibawah 0.05%. unsur ini dapat menyebabkan baja menjadi getas, oleh karena itu hanya diperkenankan kadarnya antara 0.025-0.03%.

- Kromium (Cr)

Unsur ini digunakan Sebagai pelindung permukaan baja dan tahan gesekan. Baja yang mengkilap, keras dan rapuh serta tahan terhadap korosi (karat) tetapi mempunyai keuletan yang rendah.

- Molibdenum (Mo)

Mempunyai sifat tahan pekerjaan panas sehingga cocok untuk *hotwork tool steel*, batas pencampuran unsur ini MAX.7% juga berfungsi sebagai penetralisir kekerasan wolfram. Molibdenum merupakan unsur tambahan pembuat keuletan baja yang maximum.

Material AAR M201 memiliki nilai impak masing-masing yang dapat dilihat pada Tabel 2.3 berikut:

Table 2.3 Nilai impact test pada suhu tertentu

Cast Steel	Temperature (°C)	Energy (Joule)
Grades B and B ⁺	-7	20.33
Grade C (NT)	-18	20.33
Grade C (QT)	-40	27.12
Grade D	-40	27.12
Grade E	-40	27.12

Sumber: ASTM A370, 2002

Untuk material dengan Grade B⁺ memiliki energi 20.33 Joule pada temperatur -7°C. Hal ini menyatakan nilai ketangguhan dari material pada

temperatur rendah. Apabila pada pengujian nilai pada Tabel 2.3 diatas terpenuhi, maka pengujian berhasil dan material dinyatakan *acceptable*.

2.2 Perlakuan Panas (*Heat Treatment*)

Pemanasan dan pendinginan yang terjadi akibat pengelasan dapat menyebabkan perubahan sifat bahan yang terkena pengaruh panas. Maka pada pengelasan-pengelasan dikenal adanya daerah terpengaruh panas (*Heat Affected Zone, HAZ*), karena daerah ini perlu mendapat perhatian. Selain perubahan pada struktur mikro, hal-hal yang mungkin terjadi akibat pemanasan ini ialah adanya tegangan sisa dan distorsi. Untuk memperkecil terjadinya perubahan-perubahan tersebut, maka perlu diketahui tentang perlakuan panas pada setiap pengelasan.

2.2.1 Pemanasan awal (*Preheating*)

Pemanasan awal dilakukan dengan tujuan agar pada waktu proses pemanasan pada pengelasan yang sedang berlangsung tidak terjadi suatu perbedaan suhu yang sangat besar antara logam induk dan daerah lasan. Dengan pemanasan awal laju pendinginan dapat ditahan (tidak terlalu cepat), karena pendinginan yang terlalu cepat memungkinkan terbentuknya struktur martensit lebih banyak, dimana struktur martensit ini menyebabkan material tersebut keras dan getas sehingga tidak diinginkan. Dengan pemanasan awal ini tegangan sisa dan distorsi juga akan berkurang. Pada pengelasan baja karbon, pertimbangan untuk melakukan pemanasan awal tidak hanya ditinjau dari kandungan karbon pada baja saja, tetapi juga kandungan unsure-unsur lain yang terdapat pada baja, antara lain Mn, Si, Cr, dan Mo. Perbandingan deposit las dan tebal logam induk juga merupakan pertimbangan dalam menentukan pemanasan awal. Masukan panas (*Heat Input*) yang kecil dari deposit yang kecil pada logam induk yang tebal akan memerlukan tambahan panas, maka perlu adanya pemanasan awal.

2.2.2 Suhu antar lapis (*Interpass Temperature*)

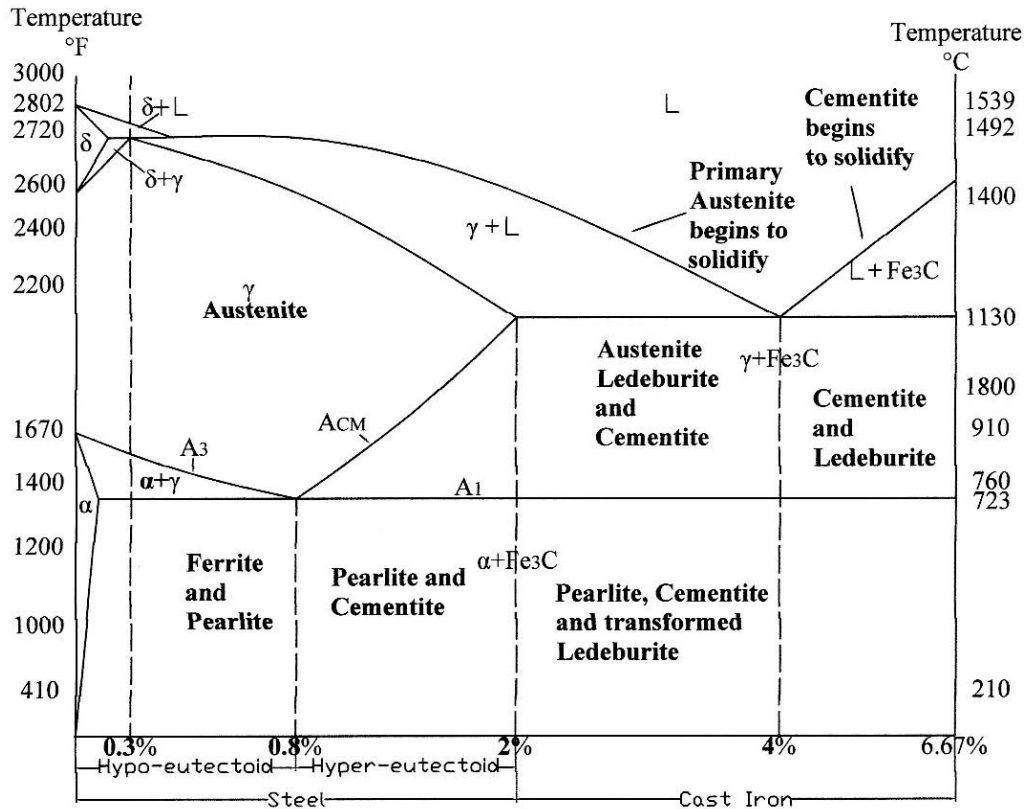
Untuk pengelasan lapis banyak, apabila panas dari pengelasan lapis-lapis sebelumnya masih memungkinkan atau masih berada pada temperatur diatas pemanasan awal, maka tidak perlu dilakukan pemanasan awal lagi. Tetapi apabila suhu logam telah turun sampai dibawah suhu pemanasan awal yang ditentukan, maka perlu dilakukan pemanasan awal lagi. Panas yang masuk pada pengelasan lapis banyak ini perlu diperhatikan, karena apabila panas yang masuk terlalu besar maka akan menyebabkan daerah yang dipengaruhi panas (*HAZ*) lebih lebar.

2.2.3 Perlakuan panas pasca pengelasan (*Post Weld Heat Treatment*)

Setelah selesai pengelasan, material uji kerja masih harus mendapatkan perlakuan panas yang baik juga. Pemanasan ini sering disebut dengan istilah *PWHT*. *PWHT* adalah panas yang diberikan pada material setelah pengelasan guna memperbaiki sifat mekanik dan struktur mikro pada daerah yang dipengaruhi panas dan daerah logam lasan. *PWHT* sering dilakukan dengan cara memanaskan kembali material pada temperatur dibawah temperatur kritis bawah (A_1) yaitu pada suhu 723°C . dapat dilihat pada Gambar 2.1 diagram fasa besi karbon (Fe_3C) yang mana pada baja karbon yang memiliki kandungan karbon kurang dari 0,8% memiliki struktur ferit dan perlit pada temperature kamar, sedangkan pada kandungan karbon $0,8\% > x > 2\%$ memiliki struktur perlit dan martensit. Perlakuan panas yang diberikan setelah pengelasan biasanya terletak pada temperatur sekitar $150^{\circ} - 600^{\circ}\text{C}$ dengan waktu tunggu yang berbeda-beda sesuai dengan ketebalan material. Laju pendinginan setelah pengelasan harus dijaga. Pada baja karbon, pendinginan harus dijaga, karena bila pendinginan terlalu cepat akan membentuk struktur martensit yang keras, sehingga material menjadi getas dan mudah retak. Sedangkan pada baja tahan karat (stainless steel) pendinginan harus dipercepat pada temperatur sensitisasi $426^{\circ}-871^{\circ}\text{C}$, karena karbon yang tidak larut pada Austenite akan membentuk Chrom karbida pada *HAZ*. Jadi bila suhu sensitisasi ini

dilewati terlalu lama maka pembentukan Cr_{23}C_6 (Chrom karbida) akan lebih banyak. Seperti diketahui Cr_{23}C_6 yang berupa endapan pada batas butir akan menyebabkan timbulnya korosi batas butir (intergranular corrosion).

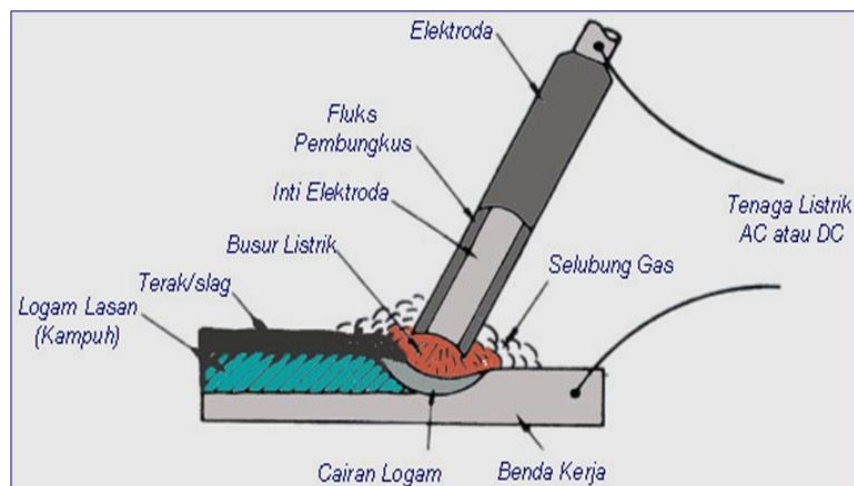
PWHT dapat dilakukan dengan memasukkan material pada furnace lalu menaikkan suhu pada temperature tertentu, dibawah temperatur kritis, dan menahannya dengan memberi waktu tunggu (*Holding time*), atau dengan cara menutup bagian yang dilas setelah proses las selesai dengan kain atau asbes atau sejenisnya untuk menjaga pendinginan agar tidak terlalu cepat. *PWHT* sering dilakukan sebagai usaha untuk membebaskan tegangan sisa, yaitu pada pengelasan pelat-pelat tebal. Namun dampak dari *PWHT* yaitu dapat menurunkan ketangguhan sambungan, peristiwa ini disebut Penggetasan Bebas Tegang. Proses pembebasan tegangan ini sebenarnya adalah proses penemperan baja yang menyebabkan terjadinya perubahan struktur logam dan pengendapan karbida.



Gambar 2.1 Diagram besi karbon (Fe_3C)

2.3 Proses Pengelasan SMAW

SMAW adalah las busur listrik dengan menggunakan elektroda berselaput (*fluks*). Fungsi *fluks* pada pengelasan ini adalah membentuk *slag* diatas hasil lasan yang berfungsi sebagai pelindung hasil lasan dari udara (Oksigen, hidrogen, dsb) selama proses las berlangsung. Proses las SMAW dapat dilihat pada Gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Proses SMAW (TiraWeld, 2013)

➤ Proses Kerja

Pada proses las elektroda terbungkus, busur api listrik yang terjadi antara ujung elektroda dan logam induk (*base metal*) akan menghasilkan panas. Panas inilah yang mencairkan ujung elektroda (kawat las) dan benda kerja secara setempat. Dengan adanya pencairan ini maka kampuh las akan terisi oleh logam cair yang berasal dari elektroda dan logam induk, terbentuklah kawah cair, lalu membeku maka terjadilah logam lasan (*weldmetal*) dan terak (*slag*).

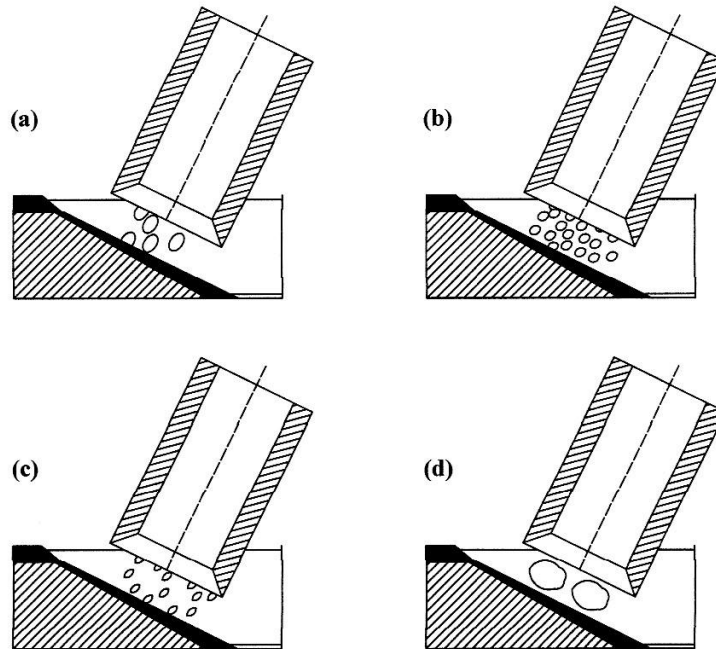
➤ Jenis Elektroda

Elektroda untuk SMAW ada berbagai macam (dipengaruhi oleh jenis *fluks*-nya, antara lain:

- Type Cellulose
- Type Rutile
- Type Acid

- Type Basic

Perbedaan dari ke-empat jenis elektroda diatas adalah pada lelehan elektroda selama proses pengelasan berlangsung, seperti Gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.3 Tipe fluks elektroda. (a) Cellulose. (b) Rutile. (c) Acid. (d) Basic.

Pemilihan jenis elektroda akan mempengaruhi kualitas dan hasil lasan, untuk itu, selain pemilihan jenis *fluks*, pemilihan elektroda harus disesuaikan dengan material yang akan dilas.

➤ Arus Listrik

Arus listrik yang digunakan untuk pengelasan SMAW adalah arus DC (*Direct Current*) dan arus AC (*Alternating Current*).

➤ Keuntungan

- Dapat dipakai dimana saja, diluar, dibengkel & didalam air.
- Satu set dapat mengelas berbagai macam tipe dari material mild steel ke copper alloy dengan rectifier.
- Set-up yang cepat dan sangat mudah untuk diatur.
- Pengelasan dengan segala posisi.

- Elektroda tersedia dengan mudah dalam banyak ukuran dan diameter.
- Perlitan yang digunakan sederhana, murah dan mudah dibawa kemana-mana.
- Tingkat kebisingan rendah.
- Tidak terlalu sensitif terhadap korosi, oli & gemuk.

➤ Kerugian

- Pengelasan terbatas hanya sampai sepanjang elektroda dan harus melakukan penyambungan.
- Setiap akan melakukan pengelasan berikutnya slag harus dibersihkan.
- Tidak dapat digunakan untuk pengelasan bahan baja non - ferrous.
- Mudah terjadi Oksidasi akibat pelindung logam cair hanya busur las dari *fluks*.
- Diameter elektroda tergantung dari tebal pelat dan posisi pengelasan.

2.3.1 Distribusi Temperatur

Sumber panas pada proses pengelasan berasal dari panas elektroda yang ada. Dimana panas ini secara matematis dapat dihitung dengan persamaan empiris:

$$H_{net} = \frac{f_1 E I}{v} \quad (2.1)$$

Dimana:

H_{net} : Energi input bersih (J/mm)

E : Tegangan (Volt)

I : Arus (Ampere)

f_1 : Efisiensi pemindahan panas

V : Kecepatan pengelasan (mm/s)

Tidak semua energi panas yang terbentuk dari perubahan energi listrik diserap 100% oleh logam lasan, akan tetapi hanya sebagian besar saja. Sehingga energi busur las dapat ditulis sebagai berikut:

$$Q = \eta UI \quad (2.2)$$

Dimana :

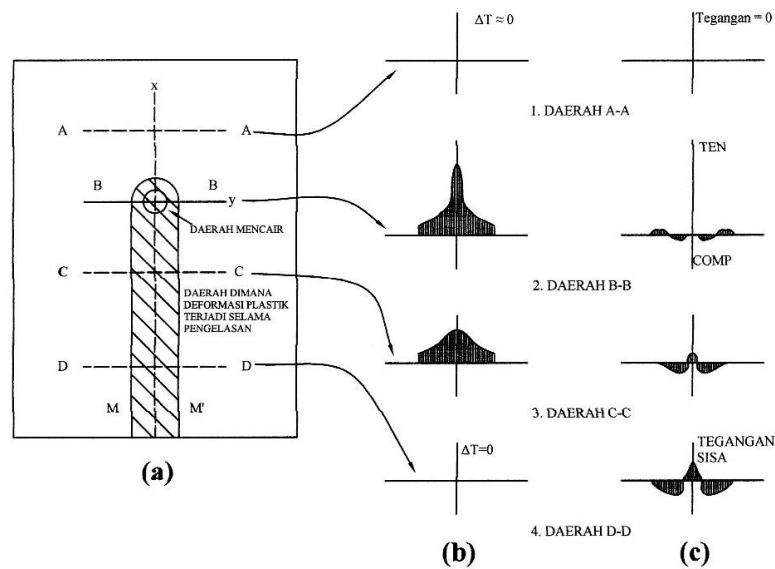
- Q : Net heat input (watt)
- η : Koefisien efisiensi (%)
- U : Tegangan busur (Volt)
- I : Arus listrik (Ampere)

2.3.2 Tegangan Termal Selama Pengelasan

Selama proses pemanasan dalam pengelasan akan mengakibatkan suatu tegangan. Tegangan akibat pemanasan ini dapat didiskripsikan dengan membagi daerah lasan menjadi beberapa buah potongan melintang sebagai berikut:

- A-A : Daerah yang belum tersentuh panas
- B-B : Daerah yang mencair tepat pada busur las
- C-C : Daerah terjadinya deformasi plastis selama proses pengelasan
- D-D : Daerah yang sudah mengalami pendinginan

Bila pengelasan berjalan dari potongan D-D ke potongan B-B maka akan terjadi distribusi panas sepanjang pengelasan. Sesaat pengelasan sampai dititik O maka setiap potongan pada alur pengelasan dapat dianalisa distribusi tegangannya. Besarnya tegangan yang terjadi karena adanya perubahan temperatur selama proses pengelasan ditunjukkan oleh Gambar 2.4 berikut:



Gambar 2.4 Distribusi temperatur dan tegangan selama proses pengelasan (a) Weld, (b) Perubahan Temperature, (c) Tegangan.

Pada daerah A-A, dimana $\Delta T \approx 0$ maka disini tidak terjadi tegangan, sedangkan pada daerah B-B yaitu daerah yang mencair (terjadi suhu maksimum) tepat pada garis lasan akan mengalami tegangan tekan (*compression*) sedangkan disisi kanan dan kiri garis lasan akan mengalami tegangan tarik (*tension*). Pada daerah C-C, dimana suhu sudah mulai turun, pada daerah garis lasan akan mengalami tegangan tarik dan pada sisi kanan dan kirinya akan mengalami tegangan tekan. Demikian pula pada daerah D-D yaitu pada daerah yang sudah terjadi pendinginan ($\Delta T \approx 0$) maka pada garik lasan akan mengalami tegangan tarik dan pada sisi kanan dan kirinya akan mengalami tegangan tekan. Tegangan tarik sifatnya tetap tinggal pada material tersebut dan lebih sering disebut tegangan sisa (AWS Vol 1, 1996).

Sedangkan tegangan sisa karena pengaruh pemanasan dapat dihitung dengan menggunakan hubungan antara tegangan-regangan yang disebabkan oleh panas :

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta t \quad (2.3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.4)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (2.5)$$

$$\sigma = \alpha \Delta t E \quad (2.6)$$

Dimana :

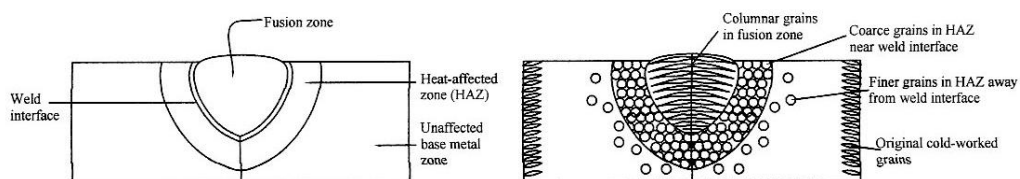
- σ : Tegangan sisa (Pa)
- E : Modulus elastisitas (Pa)
- l_0 : Panjang mula-mula (m)
- Δl : Perubahan panjang (m)
- Δt : Perubahan temperatur (K)
- α : Koefisien muai panjang (K^{-1})

2.4 Mikrostruktur Material Las

Daerah las-lasan terdiri dari tiga bagian yaitu: daerah logam las, daerah pengaruh panas atau *heat affected zone (HAZ)* dan logam induk (daerah yang tidak terpengaruh panas).

2.4.1 Daerah logam las

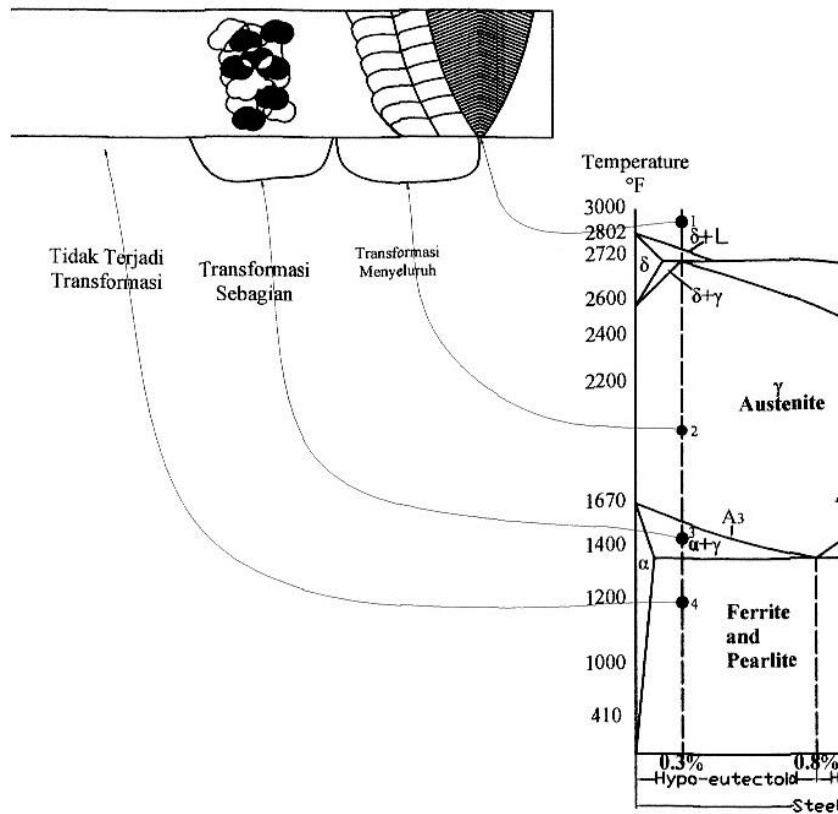
Daerah logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan bahan tambah dari elektroda. Karena logam las dalam proses pengelasan ini mencair kemudian membeku, maka kemungkinan besar terjadi pemisahan komponen yang menyebabkan terjadinya struktur yang tidak homogen, ketidakhomogennya struktur akan menimbulkan struktur ferit kasar dan bainit yang akan menurunkan ketangguhan logam las. Pada daerah ini struktur mikro yang terjadi adalah struktur cor. Struktur mikro di logam las dicirikan dengan adanya struktur berbutir panjang (*columnar grains*). Struktur ini berawal dari logam induk dan tumbuh ke arah tengah daerah logam las (Sonawan, 2004). Struktur mikro di logam las dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 Daerah logam lasan dan logam induk.

2.4.2 Daerah terpengaruh panas atau *heat affected zone (HAZ)*

Daerah pengaruh panas atau *heat affected zone (HAZ)* adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga daerah ini yang paling kritis dari sambungan las. Secara visual daerah yang dekat dengan garis lebur las maka susunan struktur logamnya semakin kasar. Pada Gambar 2.6 menunjukkan bahwa pada daerah *HAZ* terdapat tiga titik yang berbeda, titik 1 dan 2 menunjukkan temperatur pemanasan mencapai daerah berfasa austenit dan ini disebut dengan transformasi menyeluruh yang artinya struktur mikro baja mula-mula ferit+perlit kemudian bertransformasi menjadi austenite 100%. Titik 3 menunjukkan temperatur pemanasan, daerah itu mencapai daerah berfasa ferit dan austenit dan ini yang disebut transformasi sebagian yang artinya struktur mikro baja mula-mula ferit+perlit berubah menjadi ferit dan austenit.



Gambar 2.6 Heat affected zone.

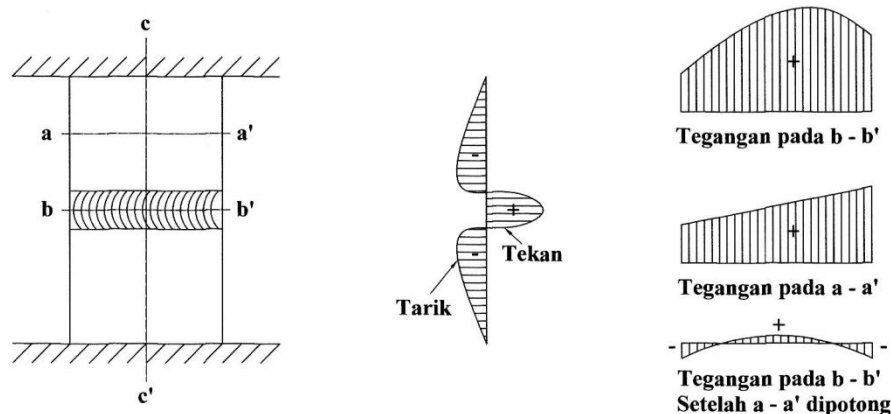
2.4.3 Logam induk

Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat. Pada Gambar 2.6 struktur pada logam induk dapat dilihat pada titik 4 dimana tidak terjadi transformasi fasa dikarenakan panas tidak mencapai daerah transformasi, yaitu daerah austenite. Disamping ketiga pembagian utama tersebut masih ada satu daerah pengaruh panas, yang disebut batas las. Batas las (Fusion Line) adalah daerah yang terletak antara daerah weld metal dan *HAZ*. (Wiryosumarto, 2000).

2.5 Tegangan Sisa

Tegangan sisa adalah gaya elastik yang dapat mengubah jarak antar atom dalam bahan tanpa adanya beban dari luar. Tegangan sisa ditimbulkan karena adanya deformasi plastis yang tidak seragam dalam suatu bahan, antara lain akibat perlakuan panas yang tidak merata atau perbedaan laju pendinginan pada bahan yang mengalami proses pengelasan. Walaupun tegangan sisa secara visual tidak nampak, namun sesungguhnya tegangan sisa tersebut juga bertindak sebagai beban yang tetap yang akan menambah nilai beban kerja yang diberikan dari luar.

Tegangan sisa yang terjadi karena pengelasan dapat dibagi dalam 2 kelompok, yaitu: pertama tegangan sisa oleh adanya halangan dalam yang terjadi karena pemanasan dan pendinginan setempat pada material logam yang mengalami proses pengelasan. Dan kedua tegangan sisa oleh adanya halangan luar yang terjadi karena perubahan bentuk dan penyusutan dari material logam las seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 berikut:



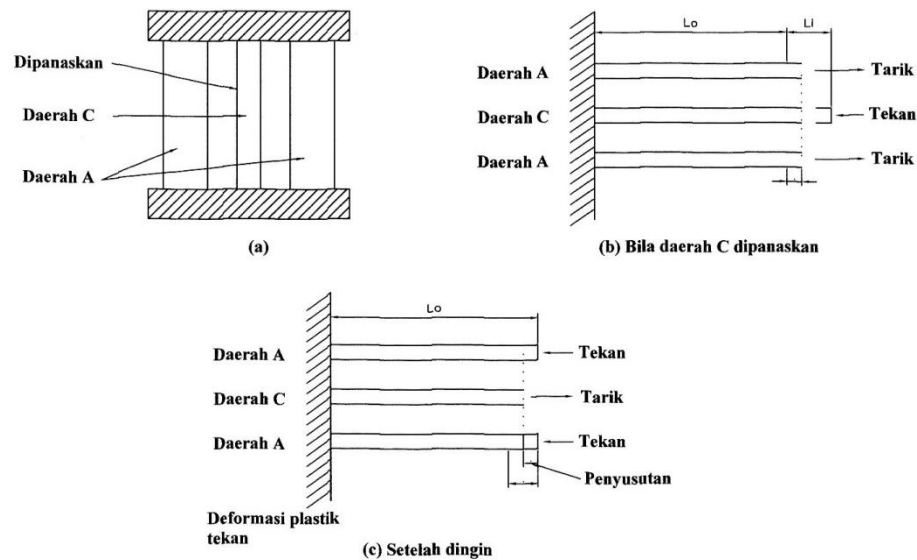
Gambar 2.7 Tegangan sisa karena penahan luar pada proses pengelasan.

2.5.1 Terjadinya Tegangan Sisa

Tegangan sisa selalu muncul apabila sebuah material dikenai perubahan temperatur *non-uniform*, tegangan-tegangan ini disebut tegangan panas. Untuk membahas masalah pengelasan, tegangan sisa yang akan ditinjau adalah tegangan sisa yang ditimbulkan dari distribusi regangan *non-elastic* yang tidak merata pada material.

Terjadinya tegangan sisa ditunjukkan pada Gambar 2.8, dimana daerah C mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C terjadi tegangan tekan dan pada daerah A terjadi tegangan tarik. Tetapi bila luas pada daerah A jauh lebih besar dari daerah C, maka daerah C akan terjadi perubahan bentuk tetap (distorsi), sedangkan pada daerah A terjadi perubahan bentuk elastis. Ketika proses pengelasan selesai, terjadi proses pendinginan dimana daerah C menyusut cukup besar karena disamping pendinginan juga karena tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, oleh sebab itu daerah C akan terjadi tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A. Sehingga perubahan elastis benada yang tidak bebas tersebut menyebabkan tegangan sisa pada material. Hal seperti ini banyak terjadi pada proses pengelasan. namun tidak hanya pada pengerjaan panas saja tegangan sisa dapat terbentuk. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya bahwa tegangan sisa dapat juga terbentuk karena pengerjaan dingin, diantaranya pengerolan, penekanan, dan

lainsebagainya. Pada proses pengerolan tegangan sisa terbentuk akibat perubahan bentuk benda pada saat pengerolan yang menyebabkan struktur material berubah dari yang bulat menjadi lonjong. Hal inilah yang menyebabkan tegangan sisa terjadi pada pengerjaan dingin.



Gambar 2.8 Terjadinya tegangan sisa.

2.5.2 Penyebab terjadinya tegangan sisa

- Tegangan sisa sebagai akibat dari tegangan termal seperti pada pengelasan dan perlakuan panas.
- Tegangan sisa yang disebabkan karena transformasi fasa (seperti baja karbon).
- Tegangan sisa karena deformasi plastis yang tidak merata yang disebabkan gaya-gaya mekanis seperti pada pengerjaan dingin selama pengerolan, penempaan, pembentukan logam atau pekerjaan lain yang dilakukan dengan mesin.

2.5.3 Sifat-sifat tegangan sisa

- Tegangan sisa sangat tinggi biasanya terjadi didaerah las dan daerah HAZ.
- Tegangan sisa maksimum biasanya sampai tegangan luluh (*yield stress*).

- Pada bahan yang mengalami transformasi fasa misalkan baja karbon rendah, tegangan sisa mungkin bervariasi pada permukaan dan bagian dalam dari logam induk

2.5.4 Pengaruh tegangan sisa

- Tegangan sisa yang disebabkan oleh proses pengelasan dapat mempengaruhi sifat-sifat mekanis struktur las seperti patah getas, kelelahan, dan retak karena kombinasi tegangan dan korosi.
- Pengaruh tegangan sisa menurun jika tegangan yang bekerja pada bahan meningkat.
- Pengaruh tegangan sisa pada struktur las bisa diabaikan jika tegangan yang bekerja pada struktur tersebut melebihi tegangan luluhnya.
- Pengaruh tegangan sisa menurun setelah pembebanan berulang.

2.5.5 Pengukuran tegangan sisa

Untuk menghitung tegangan sisa dapat dilakukan dengan menggunakan teknik pengukuran destruktif dan non-destruktif.

Beberapa metode pengukuran tegangan sisa dengan menggunakan metode destruktif, yaitu:

1. Metode pengeboran (Hole-drilling technique)

Strain gauge disusun dengan posisi sudut 0° , 45° dan 90° , kemudian dibuat lubang ditengahnya. Adanya regangan saat pengeboran akan terukur oleh *strain gauge*. Regangan ini berasal dari pembebasan tegangan sisa.

2. Metode Ring (Core technique)

3. Metode bending (Deflection)

4. Metode pemotongan (*Sectioning Technique*)

Tegangan sisa diukur dengan menggunakan *strain gauge* yang bekerja berdasarkan perubahan tahanan listrik.

Teknik non-destruktif merupakan pengukuran yang dilakukan tanpa merusak sampel. Teknik ini memberikan hasil yang lebih akurat

dari pada metode destruktif. Teknik yang paling umum digunakan untuk pengukuran non-destruktif, yaitu:

1. Xray/ Neutron/ Synchrotron diffraction

Prinsip kerja pengukuran sinar-X berdasarkan sifat tegangan sisa yang dapat mempengaruhi struktur Kristal. Jika sinar-x mengenai bahan maka sebagian dari sinar tersebut mengalami difraksi dan membentuk pola-pola lingkaran yang bisa dilihat pada film.

2. Ultrasonic technique (UT)

3. Magnetic methods

Teknik difraksi didasarkan pada penggunaan kisi jarak sebagai *strain gauge*. UT menggunakan variasi rambat gelombang ultrasonic dalam bahan-bahan dibawah aksi tegangan mekanik. Sedangkan metode magnetic bergantung pada interaksi antara magnetisasi dan regangan elastik dalam bahan ferro-magnetik.

2.5.5.1 Metode pelubangan

Prinsip kerja dari metode ini adalah mengukur tegangan yang terjadi akibat pembuatan lubang yang dilakukan pada spesimen. Pengukuran regangan dilakukan dengan bantuan *strain gauge* yang dipasang dekat lubang yang dibuat.

Prinsipnya membuang sebagian dari material agar terjadi relaksasi dengan tegangan sisa. Pada metode pelubangan ini, proses pembuangan material adalah dengan melakukan proses gurdi sehingga terbentuk lubang pada spesimen tersebut. Regangan yang terjadi dapat terdeteksi dengan menggunakan 3 *strain gauge*, maka akan didapatkan harga regangan yang terukur. Besarnya tegangan dapat ditentukan dengan kondisi biaxial stress Hooke's law, dimana: ($\sigma_x \neq 0$, $\sigma_{xy} \neq 0$ dan $\tau_{xy} = 0$) oleh persamaan :

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (2.7)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (2.8)$$

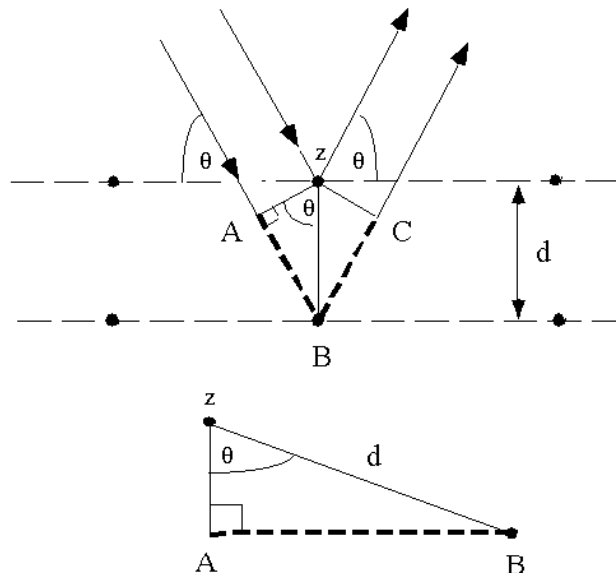
2.5.5.2 Hukum bragg dan syarat difraksi

Pada sebuah material yang dikenakan sinar-x, atom-atom dapat mendifraksikan berkas tersebut, dalam hal ini ada 2 hal yang akan terjadi:

1. Hamburan sinar-x oleh setiap atom
2. Interferensi gelombang-gelombang terhambur

Gejala interferensi dan difraksi merupakan hal umum dibidang cahaya. Percobaan fisika dasar standar untuk menentukan jarak antar kisi dilakukan dengan mengukur sudut berkas difraksi dari cahaya yang diketahui panjang gelombangnya. Persyaratan yang harus dipenuhi:

1. kisi-kisi bersiat periodik
2. panjang gelombang cahaya mempunyai orde yang sama dengan jarak kisi-kisi yang akan ditentukan



Gambar 2.9 Hukum Bragg untuk difraksi sinar-x (Basary, 2006)

Pada Gambar 2.9 hukum Bragg menunjukkan bahwa difraksi ekuivalen dengan pemantulan simetris oleh berbagai bidang Kristal asalkan persyaratan tertentu dipenuhi. Berkas sinar-x dengan panjang gelombang (λ) yang jatuh dengan sudut θ pada set bidang Kristal dengan jarak d . Berkas yang dipantulkan dengan

sudut θ bersifat riil, berkas dari bidang berikutnya saling memperkuat. Agar ini dipenuhi, jarak tambah yang harus ditempuh oleh berkas yang dipantulkan oleh tiap bidang berikutnya (atau selisih jarak) harus sama dengan bilangan bulat dikalikan panjang gelombang $n\lambda$. Sebagai contoh berkas kedua yang diperlihatkan pada Gambar 2.8 harus menempuh jarak yang lebih besar dari pada jarak yang ditempuh oleh berkas pertama, selisih jarak tersebut adalah $AB=BC$. Persyaratan pemantulan akan saling memperkuat menjadi

$$n\lambda = \overline{AB} + \overline{BC} = 2\overline{AB} = d \sin\theta + d \sin\theta = 2d\sin\theta \quad (2.9)$$

$$\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta_{hkl}; \overline{AB} = d \sin\theta \quad (2.10)$$

Persamaan ini adalah hukum Bragg dan nilai sudut kritis θ yang memenuhi hukum ini disebut hukum Bragg. Arah berkas yang dipantulkan semata-mata ditentukan oleh geometri kisi yang bergantung pada orientasi dan jarak bidang Kristal. Kristal memiliki simetri kubik dengan ukuran struktur sel a , maka sudut difraksi berkas dari bidang Kristal (hkl) dapat dihitung dengan mudah dari hubungan jarak interplanar

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{(h^2+k^2+l^2)}} \quad (2.11)$$

Telah menjadi kebiasaan untuk memasukkan orde refleksi n bersama dengan indeks Miller, dan apabila ini diterapkan maka hukum Bragg menjadi:

$$\lambda = 2a \sin\theta \sqrt{(n^2h^2 + n^2k^2 + n^2l^2)} \quad (2.12)$$

$$\lambda = 2a \sin\theta \sqrt{n} \quad (2.13)$$

Dimana:

d : jarak kisi interplanar

(h,k,l) : bidang Kristal

a : ukuran struktur sel

n : orde refleksi/pantulan/bilangan garis

2.4.5.3 Analisa data difraksi dan tegangan sisa dengan metode Scherer

Setelah semua data difraksi didapat maka akan dilakukan pencocokan model kurva terukur dengan kurva permodelan, untuk itu digunakan *software* seperti (*Profile search match Phillips x'pert*) dengan format SD, DAT dan *software Rietica* dengan format DAT, CPI.

1. Data difraksi langsung dianalisa untuk menentukan posisi puncak digunakan *Search and Match program* untuk menentukan fasa-fasa apa saja yang terkandung pada material hasil proses pengelasan.
2. Menggunakan *profile fitting* untuk mengetahui posisi puncak dan *FWHM*. Didapatkan data grafik puncak difraksi dan posisi puncak serta *FWHM*.
3. Data *FWHM* dari puncak tertinggi diubah dari derajat($^{\circ}$) kedalam radian, lalu digunakan untuk mencari nilai B dengan mengurangkan dengan material standart Si. Rumus sebagai berikut:

$$B^2 = B_s^2 - B_{st}^2 \quad (2.14)$$

Dimana:

B : selisih nilai *FWHM* (Radian)

B_s : nilai *FWHM* puncak tertinggi sampel (Radian)

B_{st} : nilai *FWHM* puncak tertinggi standard (Radian)

4. Setelah nilai B didapatkan, maka mencari nilai regangan (ϵ) dengan rumus sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{B}{4(\tan \theta)} \quad (2.15)$$

Dimana:

ϵ : regangan

B : selisih nilai *FWHM* (Radian)

θ : Posisi puncak tertinggi sampel ($^{\circ}$)

5. Setelah didapat nilai regangan, maka dicari nilai tegangan sisa dengan rumus berikut:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.16)$$

Dimana:

σ : tegangan (MPa)

E : modulus young (MPa)

ε : regangan (mm/mm)

2.5.6 Usaha dalam mengurangi tegangan sisa

1. Pengurangan tegangan sisa sebelum dan selama pengelasan

a. Ketelitian ukuran

Ukuran bagian yang akan dilas diteliti sehingga tidak memerlukan pengerjaan lagi pada proses fabrikasi.

b. Alur (groove)

Jika sambungan tumpul (butt joint), lebar alur dibuat sesempit mungkin untuk mencegah terjadinya masukan panas yang tinggi. Dengan demikian lebar daerah yang terkena panas tidak meluas sehingga mengurangi tegangan sisa.

c. Las lapis banyak

Jika plat yang dilas cukup tebal, maka pengelasan dilakukan berulang-ulang

d. Urutan pengelasan

Tegangan sisa bisa dikurangi dengan memperhatikan urutan pengelasan yang tepat

2. Pengurangan tegangan sisa setelah pengelasan

Pengurangan tegangan sisa dapat juga dilakukan dengan proses *PWHT* (perlakuan panas setelah pengelasan). Biasanya proses ini dilakukan dengan cara memanaskan kembali hingga dibawah temperatur kritis, agar tidak terjadi perubahan fasa pada material tersebut tetapi hanya bertujuan untuk relaksasi.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Material

Material yang akan digunakan adalah jenis material Casting Plate yaitu AAR M201 Gr.B⁺ dengan ketebalan 20mm. material ini memiliki keunggulan, yaitu kekuatannya tinggi dan tahan terhadap temperatur rendah. Data-data mengenai material ini dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini:

Tabel 3.1 Data material AAR M201 Gr.B⁺

Material	Komposisi Material									CE	Yield kg/mm ²	Tensile kg/mm ²	Elongation %
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al					
AAR M201 Gr.B ⁺	0.23%	0.59%	1.07%	0.02%	0.01%	0.10%	0.03%	0.04%	0.54%	40.27	58.44	0.284	

Sumber: Test Laboratorium

3.2 Parameter pengelasan

Proses pengelasan dilakukan dengan proses las *SMAW (Shield Metal Arc Welding)* dimana proses pengelasan ini merupakan proses pengelasan manual dengan menggunakan kawat las yang harus diganti setiap kali setelah pengelasan. Proses pengelasan dilakukan di PT.Barata Indonesia dengan kawat las E8018-B2 dengan diameter 4mm yang mana memiliki kuat tarik minimum 80 ksi (552 Mpa) dan merupakan kawat las *low hydrogen* sehingga untuk menggunakannya harus dioven terlebih dahulu pada temperatur 350° selama kurang lebih 1,5 - 2 jam agar uap air hilang dan tidak mengakibatkan cacat pada logam lasan. Komposisi kawat las E8018-B2 dapat dilihat pada Tabel 3.2. Arus yang digunakan berkisar antara 140-180 Ampere dan potensial 19-26 Volt. Kecepatan pengelasan 90-250 mm/menit. Ampere yang digunakan mengacu kepada diameter kawat las, karena semakin besar diameter kawat las, maka arus yang digunakan lebih besar. Untuk arus, voltase dan kecepatan telah diatur didalam prosedur pengelasan yang telah dibuat sebelumnya dalam penelitian Immanuel Freddy Augustino, 2013 sebelumnya.

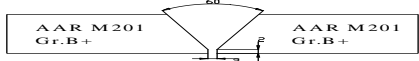
Tabel 3.2 Komposisi kawat las E8018-B2

C	Cr	P	Mn	Mo	Si
0.069	1.32	0.024	0.58	0.65	0.31

3.3 Prosedur dan Proses Pengelasan

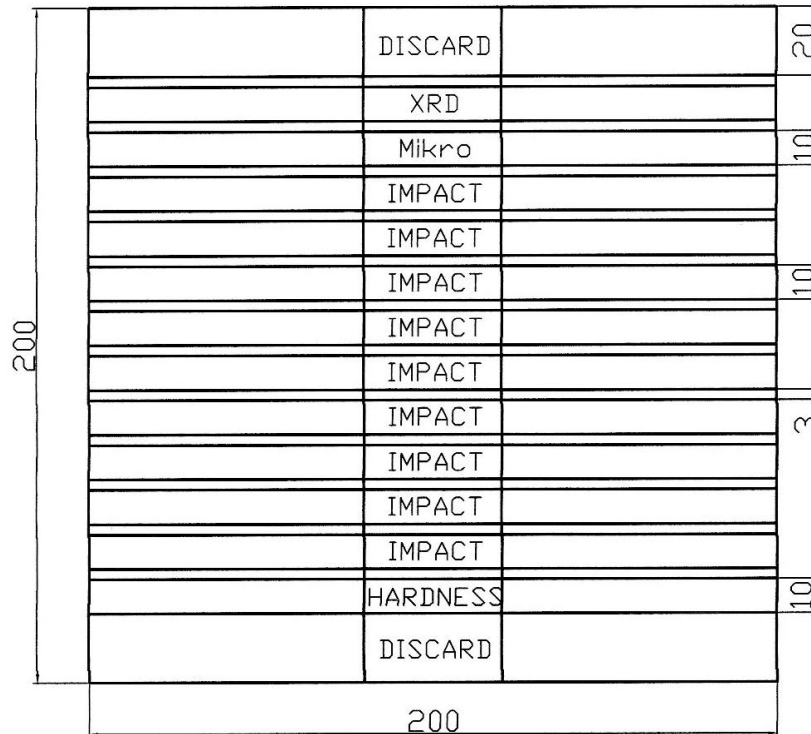
Sebelum dilakukan proses pengelasan harus dilakukan persiapan terlebih dahulu, salah satu yang harus disiapkan adalah prosedur pengelasan atau biasa disebut *Welding Procedure Specification (WPS)*. *WPS* digunakan oleh juru las (*welder*) sebagai panduan pengelasan, didalamnya terdapat parameter las, posisi las, kawat las, dan sebagainya. *WPS* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3. Setelah proses pengelasan selesai dilakukan, lalu dilakukan proses *PWHT* dengan temperatur 600°C dengan waktu tunggu 1 jam, 2 jam, 3 jam, dan 4 jam.

Tabel 3.3 *Welding Procedure Specification*

WELDING PROCEDURE SPECIFICATION (WPS)						
Company name <u>PT.Barata Indonesia</u>		Welding procedure specification no. <u>XA.1.1H-203</u>		Rev. <u>0</u>	By <u>PT.Barata Indonesia</u>	
Supporting procedure qualification test record(s) no. <u>YA.1.1H-203</u>		Date <u>June 28th, 2013</u>				
Welding process(es) <u>SMAW</u>		Type <u>Manual</u>				
Mode of transfer for GMAW <u>N/A</u>						
JOINTS Type of welded joint(s) <u>V-Groove</u> Backing <input type="checkbox"/> Yes <input checked="" type="checkbox"/> No Backing material type <u>N/A</u> Groove welded from: One side <u> </u> Both sides <u>Yes</u>			COATINGS Type <u>N/A</u> Thickness <u>N/A</u> Sketch of Joint Details 			
BASE METAL Material specification type and grade: Sheet steel <u>AAR M201 Gr.B+ to AAR M201 Gr.B+</u> Support steel <u>N/A</u> Thickness range: Sheet steel <u>5 ~ Unlimited</u> Support steel <u>N/A</u> Thickness <u>N/A</u> Base metal preparation <u>Bevel 30° & Cleaned</u>						
FILLER METAL Specification <u>A5.1/A5.1M</u> Classification <u>E8018-B2</u>			PREHEAT Preheat temperature min. <u>N/A</u>			
POSITIONS Position of groove <u>1G</u> Position of fillet <u>N/A</u> Progression <u>N/A</u>			PWHT Heating. <u>Temperature 600°C</u> Holding. <u>at temperature 600°C for an hour</u> Cooling. <u>still in air</u>			
GAS Shielding gas <u>N/A</u> Flow rate <u>N/A</u> Percent mixture <u>N/A</u>			Flow rate <u>N/A</u>			
FLUX <u>N/A</u>						
TECHNIQUE						
Pass No.	Electrode Size	Welding Current		Travel Speed	Heat input J/mm	Wire Feed Speed
		Amperes	Volts			
1 ~ full	Ø 4 mm	140 - 180	19 - 26	90 - 250	1000 - 2500	-
This procedure may vary due to fabrication sequence, fit-up, pass size, etc., within the limitation of variables given in AWS D15.1, 2012 <i>Railroad Welding Specification for Cars and Locomotives</i> . Authorized by _____ Date _____						

3.4 Pengambilan Spesimen Uji

Sebelum dilakukan pengujian, material terlebih dahulu dipotong menjadi spesimen-spesimen uji. Pemotongan material dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3.1 Pengambilan spesimen uji

3.5 Pengujian Mekanik

Tahap pelaksanaan pengujian mekanik dilakukan untuk dapat mengetahui sifat mekanik dari sampel. Beberapa pengujian mekanik yang dilakukan antara lain:

❖ Pengujian kekerasan

Sebelum dilakukan pengujian kekerasan, spesimen uji kekerasan dihaluskan permukaannya dengan menggunakan Mesin Polish dengan kertas gosok hingga grid 600 dan terakhir diperhalus dengan kain bludru dengan diolesi aluminium karbida (Al_2O_3) sebagai penghilap permukaan spesimen hingga permukaan spesimen tampak seperti kaca, lalu dietsa dengan menggunakan larutan nital 2% yaitu dengan menggunakan larutan

HNO₃ 2ml + Alkohol 96% 98ml. setelah itu spesimen dikeringkan dengan menggunakan *dryer*.

Dilakukan penandaan pada spesimen uji, yaitu bagian atas, tengah, dan bawah, setiap daerah (logam induk, *HAZ*, dan logam pengisi) diambil 6 titik pada setiap bagian. Mesin uji kekerasan yang digunakan diatur beban identornya, yaitu 30kgf dengan identor yang digunakan adalah pyramid intan dengan waktu penekanan 15 detik. Lalu tampak pada mikroskop bekas identor, dihitung d_1 dan d_2 nya dan dirata-rata lalu dimasukkan ke dalam perhitungan HVN seperti terlihat pada persamaan dibawah ini:

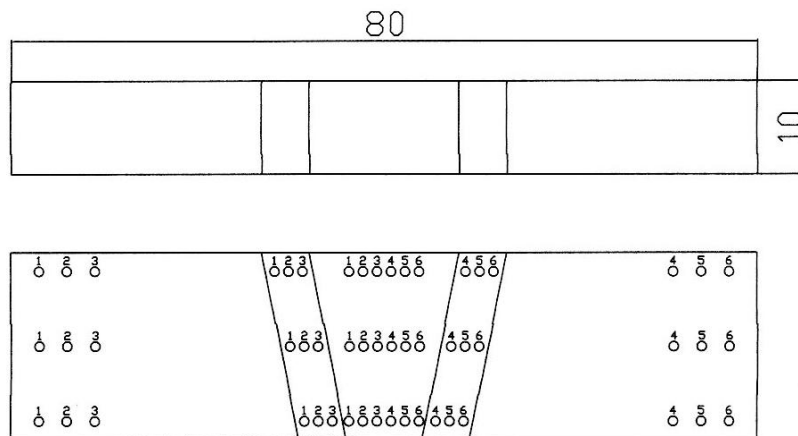
$$d_{rata-rata} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (2.17)$$

$$HVN = \frac{1.854 \times P}{d^2} \quad (2.18)$$

Dimana:

- d_1 : jarak dari ujung ke ujung arah horizontal (mm)
- d_2 : jarak dari ujung ke ujung arah vertical (mm)
- P : Beban (kgf)

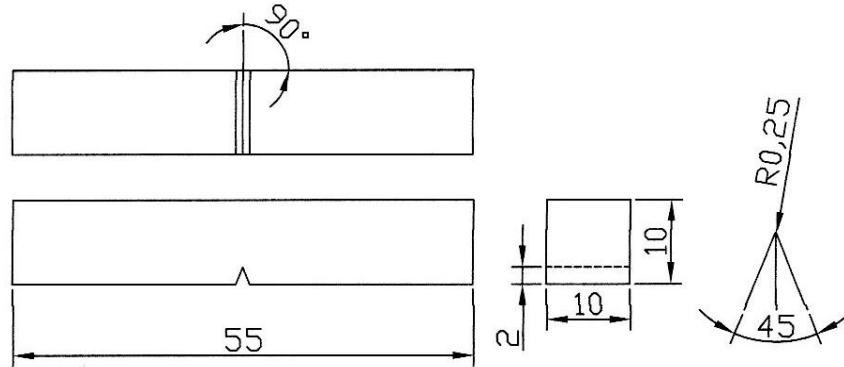
Bentuk dan ukuran spesimen uji kekerasan dapat dilihat pada Gambar 3.2 dimana diambil nilai atas, tengah, dan bawah pada masing-masing daerah dan tiap daerah pada satu garis diambil 6 titik, sehingga satu spesimen diambil 54 titik agar memberikan hasil yang akurat.



Gambar 3.2 Bentuk dan ukuran spesimen uji Kekerasan

❖ Pengujian Impak

Pengambilan spesimen Impak diambil 3 buah pada FL+1, 3 buah pada FL+5, dan 3 buah pada *weld metal* pada masing-masing sambungan. Bentuk dan ukuran spesimen uji Impak dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3 Bentuk dan ukuran spesimen uji Impak.

Dalam persiapannya, spesimen ditandai sesuai dengan variabel yang diberikan, yaitu tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam, dan *PWHT* 4 jam. Penandaan pada spesimen dapat dilihat pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.4 Penandaan pada spesimen impak

		Temperatur 600°C						Tanpa <i>PWHT</i>	
		1 Jam	2 Jam	3 Jam	4 Jam				
A1	WM	B1	WM	C1	WM	D1	WM	E1	WM
A2	WM	B2	WM	C2	WM	D2	WM	E2	WM
A3	WM	B3	WM	C3	WM	D3	WM	E3	WM
A4	FL+1	B4	FL+1	C4	FL+1	D4	FL+1	E4	FL+1
A5	FL+1	B5	FL+1	C5	FL+1	D5	FL+1	E5	FL+1
A6	FL+1	B6	FL+1	C6	FL+1	D6	FL+1	E6	FL+1
A7	FL+5	B7	FL+5	C7	FL+5	D7	FL+5	E7	FL+5
A8	FL+5	B8	FL+5	C8	FL+5	D8	FL+5	E8	FL+5
A9	FL+5	B9	FL+5	C9	FL+5	D9	FL+5	E9	FL+5

spesimen dibentuk seperti tampak pada Gambar 3.3 dengan menggunakan mesin *wire cut*. Setelah terbentuk, spesimen diukur dimensinya yang terdiri dari panjang, lebar, tebal spesimen, dan tebal takikan lalu dicatat. Spesimen dikondisikan pada temperatur kerja yaitu -

7°C dengan cara dimasukkan kedalam *cooling chamber*^(lampiran G4) yang telah diisi dengan alkohol dan *dry ice*. Spesimen dimasukkan dan ditunggu selama 10 menit agar kondisi temperatur kerja merata pada seluruh spesimen. Setelah 10 menit, spesimen siap untuk dilakukan pengujian.

3.5 Pengamatan Struktur Mikro

Spesimen yang akan diamati struktur mikronya dilakukan penghalusan dengan menggunakan *surface grinding*, lalu digosok dengan kertas gosok dengan grid 320, 400, 600, 1000, 1200, dan 1500 yang telah digunting sesuai dengan bentuk piringan *hand grinding* pada mesin polis. Yang perlu diperhatikan dalam proses *grinding* yaitu setiap pergantian kertas gosok maka arah orientasi penggosokan harus tegak lurus dengan arah orientasi penggosokan sebelumnya. Setelah selesai digosok dengan kertas gosok, lalu dilanjutkan dengan kain bludru yang telah digunting sesuai dengan bentuk piringan *hand grinding* dengan ditambahkan aluminium karbida (Al₂O₃) sebagai penghilap spesimen. Setelah seluruh spesimen mengkilap hingga tampak seperti kaca, kemudian dilakukan etsa dengan menggunakan larutan natal 2% HNO₃ 2ml + Alkohol 96% 98ml, spesimen diolesi dengan larutan tersebut dan disiram dengan air dan disemprot alkohol lalu dikeringkan dengan *dryer*.

Pengamatan pada mikroskop dilakukan dengan perbesaran 1000X, diambil pada masing-masing daerah (*base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*).

3.6 Analisa XRD

X-Ray Diffractometer adalah alat yang dapat memberikan data-data difraksi dan kuantitas intensitas difraksi pada sudut-sudut difraksi (2θ) dari suatu material. Pengujian ini bertujuan untuk mendapatkan nilai tegangan sisa yang didapatkan dari pergeseran atom yang akan muncul pada grafik yang dilambangkan dengan nilai *FWHM*. Pada puncak tertinggi nilai *FWHM* kemudian diubah dari derajat(^o) menjadi radian, lalu dimasukkan kedalam Persamaan 2.14, setelah didapat nilai B kemudian dicari nilai regangan(ϵ) dengan menggunakan Persamaan 2.15. setelah didapat nilai

regangan kemudian didapatkan nilai tegangan sisa(σ) dengan Persamaan 2.16.

3.7 Analisa dan Pembahasan

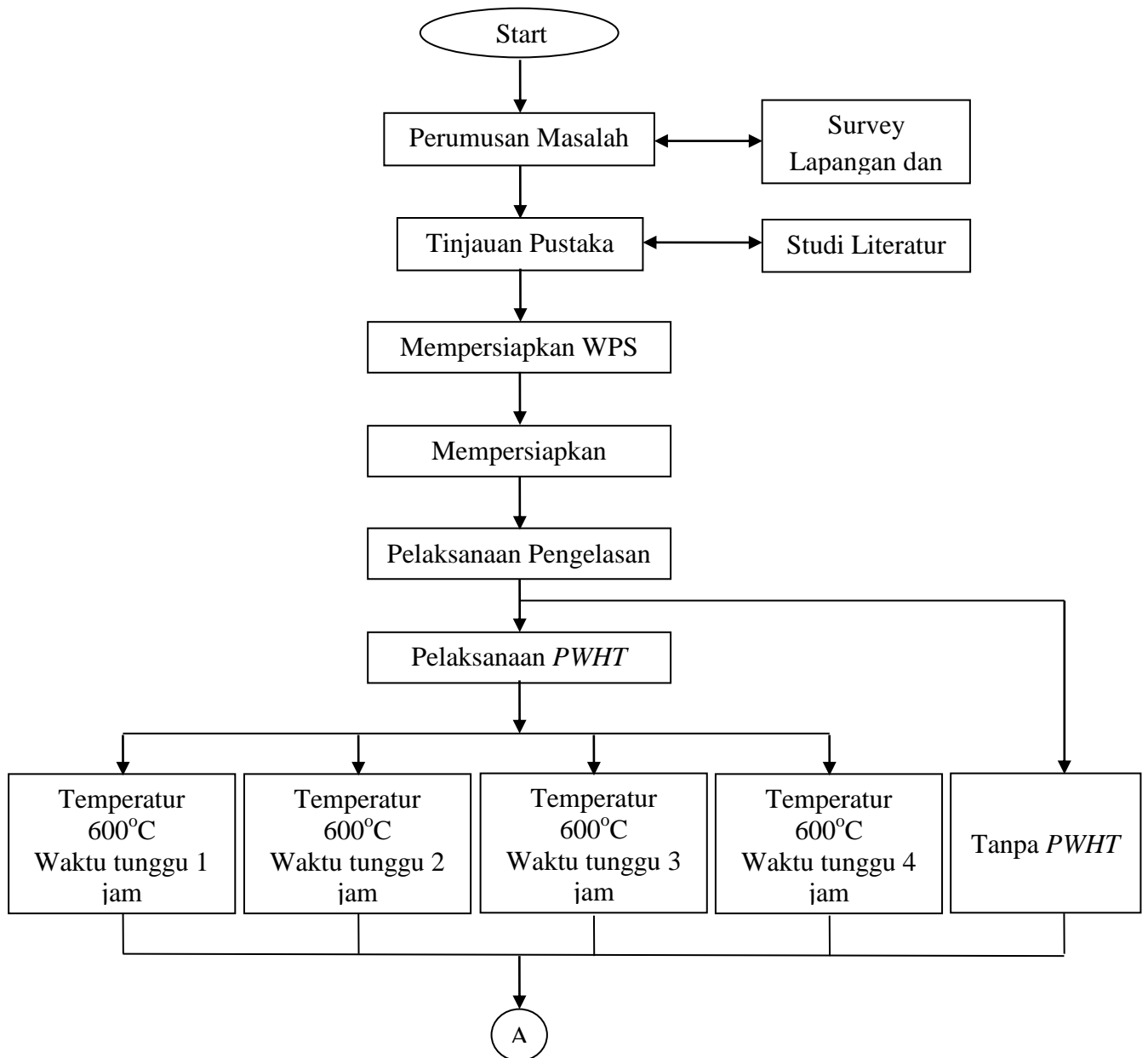
Analisa dan pembahasan dilakukan pada hasil dari pengujian spesimen uji. Dari hasil uji struktur mikro akan didapatkan hasil pengaruh *Holding time* terhadap struktur mikro pada tiap daerah (base metal, *HAZ*, dan weld metal). Dari pengujian kekerasan dan impak diharapkan didapatkan hasil analisa *Holding time* yang optimum, dari hasil *XRD* diharapkan dapat diketahui bagaimana pengaruh *Holding time* terhadap tegangan sisa.

3.8 Kesimpulan dan Saran

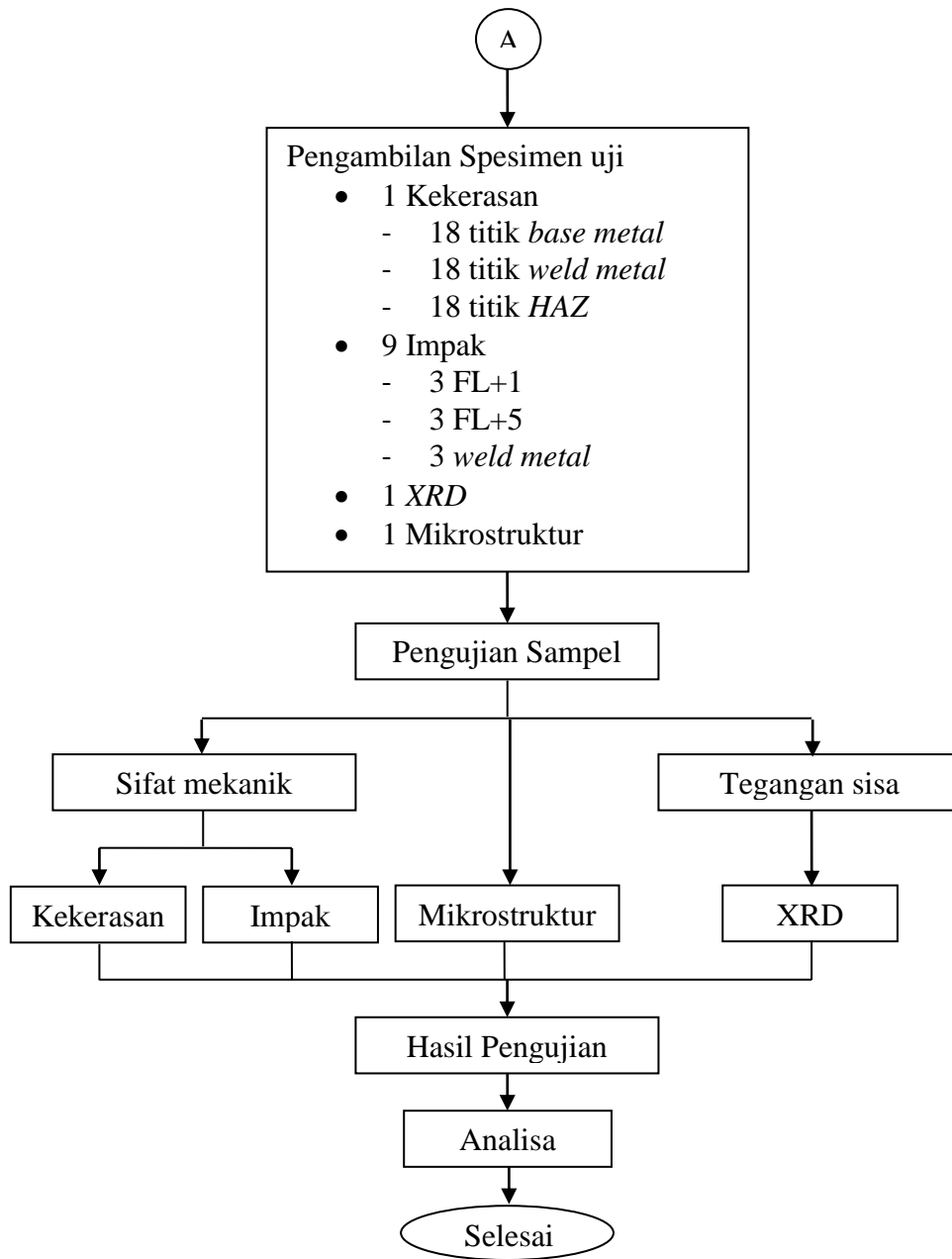
Dari hasil analisa, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil pengujian struktur mikro
- Hasil pengujian kekerasan
- Hasil pengujian impak
- Hasil pengujian *XRD*

Urutan-urutan pengerjaan Tesis seperti yang diuraikan sebelumnya dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut:



Gambar 3.4 Flowchart pengerjaan



Gambar 3.4 Flowchart pengerjaan (Lanjutan)

BAB 4

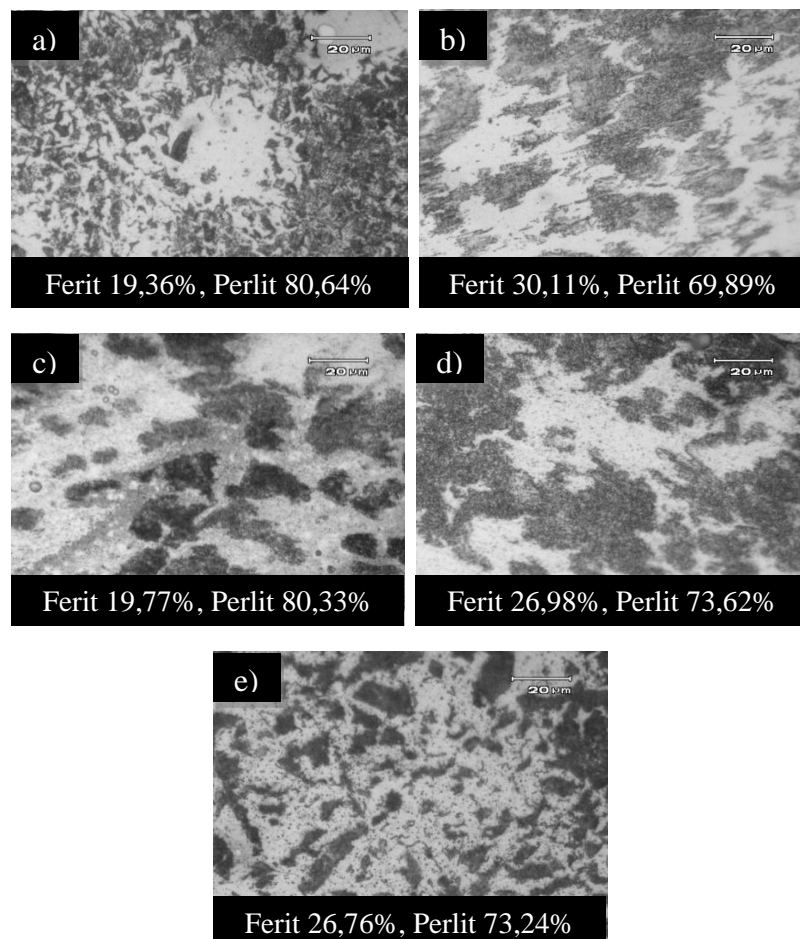
ANALISA DATA PENELITIAN

Setelah dilakukan pengujian maka didapatkan data-data yang akan dianalisa lebih lanjut. Data yang diperoleh yaitu data struktur mikro, data uji kekerasan, data uji dampak, dan data uji *XRD*.

4.1 Analisa hasil pengujian struktur mikro

Data perbandingan hasil struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*), *HAZ*, dan logam pengisi (*weld metal*) untuk variabel tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam.

1. Perbandingan hasil struktur mikro pada daerah logam induk (*base metal*) dapat dilihat pada Gambar 4.1 berikut:

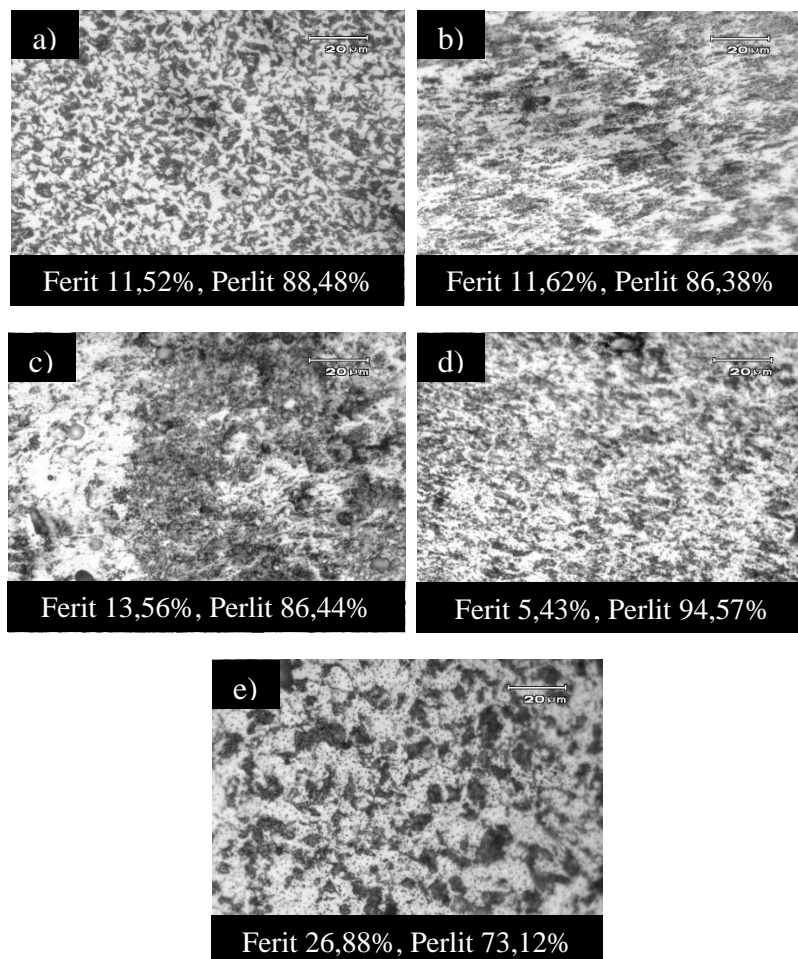


Gambar 4.1 Struktur mikro pada daerah *base metal* dengan perbesaran 1000x a) Tanpa *PWHT*, b) *PWHT* 1 jam, c) *PWHT* 2 jam, d) *PWHT* 3 jam, e) *PWHT* 4 jam.

Pada Gambar 4.1 terlihat struktur mikro pada daerah logam induk spesimen tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam, dan *PWHT* 4 jam memberikan hasil yang tidak jauh berbeda, dikarenakan *PWHT* tidak begitu berpengaruh pada struktur mikro logam induk, karena setelah dilakukan pengecoran material mengalami proses normalizing pada logam induk dan setelah dilakukan pengelasan, logam induk yang jauh dari daerah lasan tidak banyak mengalami perubahan karena panas yang diterima tidak sampai merubah struktur dari material tersebut yaitu dibawah temperatur austenit, sehingga struktur pada material didaerah logam induk cenderung sama atau tidak mengalami perubahan yaitu terdiri dari ferit dan perlit, hanya saja waktu tunggu yang lebih lama menyebabkan panas lebih merata hingga kedalam material dan dapat mengurangi tegangan sisa yang terdapat pada material. Struktur yang sama pada daerah base metal memberikan nilai kekerasan yang tidak jauh berbeda, dapat dilihat pada grafik nilai kekerasan, yaitu Gambar 4.4. Jika dilihat dari material tanpa *PWHT*, fasa ferit (putih) dan perlit (hitam) tampak berdiri sendiri atau tidak merata sehingga tampak fasa ferit berada dipusat dengan dikelilingi oleh fasa perlit. Jumlah persentase fasa antara ferit dan perlit adalah 19,36% dan 80,64%. Material yang diberi *PWHT* selama 1 jam tampak mulai mengalami perubahan, yaitu fasa ferit dan perlit mulai merata namun belum merata seluruhnya karena masih ada bagian yang mengumpul. Jumlah persentase ferit dan perlitnya adalah 30,11% dan 69,89%. Material yang diberi *PWHT* 2 jam tampak lebih merata dibandingkan dengan yang diberi *PWHT* 1 jam namun belum merata seluruhnya. Jumlah persentase ferit dan perlitnya adalah 19,77% dan 80,33%. Material yang diberi *PWHT* 3 jam juga demikian, namun tampak lebih merata dibandingkan dengan *PWHT* 1 jam dan *PWHT* 2 jam. tampak mulai merata pada semua bagian dikarenakan waktu tunggu yang lebih lama menyebabkan panas yang masuk pada material baik yang dipermukaan maupun yang di inti dalam sama, sehingga sama-sama menerima panas dengan temperature yang sama. Jumlah persentase ferit dan perlitnya adalah 26,98% dan 73,02%. Material yang diberi *PWHT* 4

jam tampak ferit dan perlit lebih merata dibandingkan dengan yang diberi *PWHT* 3 jam, karena temperature panas *PWHT* merata pada semua bagian material sehingga struktur mengalami perubahan yaitu pemerataan pada semua bagian. Jumlah persentase ferit dan perlitnya adalah 26,76% dan 73,24%. Material yang diberi *PWHT* memiliki lebih banyak ferit dan lebih sedikit perlit dibandingkan dengan yang tanpa *PWHT* (Saputra W.A, 2012).

2. Perbandingan hasil struktur mikro pada *HAZ* dapat dilihat pada Gambar 4. 2 berikut:

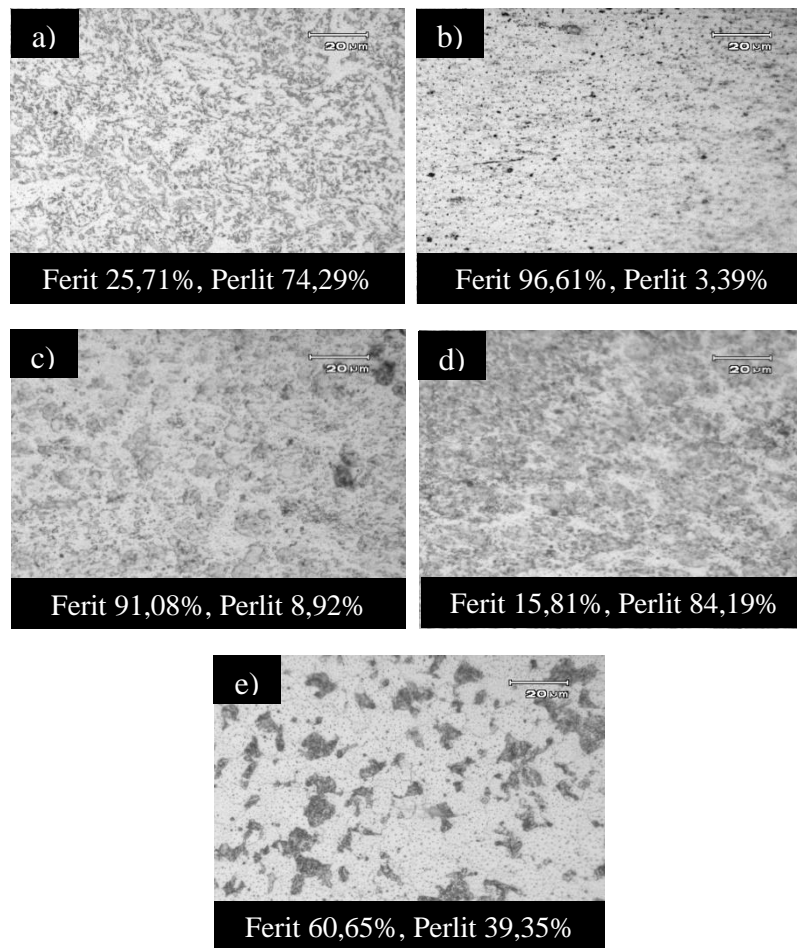


Gambar 4.2 Struktur mikro pada daerah *HAZ* dengan perbesaran 1000x a) Tanpa *PWHT*, b) *PWHT* 1 jam, c) *PWHT* 2 jam, d) *PWHT* 3 jam, e) *PWHT* 4 jam.

Pada Gambar 4.2 terlihat struktur mikro pada daerah *HAZ* spesimen tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam, dan *PWHT* 4 jam terjadi sedikit perubahan pada tiap variabel. Pada material

tanpa *PWHT* terlihat butiran kecil menyeluruh pada daerah tersebut dan memiliki nilai tegangan sisa yang tinggi, lihat Gambar 4.6, yang menyebabkan nilai kekerasan tinggi, Gambar 4.4, lalu setelah diberi *PWHT* struktur menjadi lebih seragam dan sedikit membesar sehingga nilai kekerasannya menurun. Jumlah persentase ferit dan perlit pada material tanpa *PWHT* adalah 11,52% dan 88,48%. Terlihat dari *PWHT* 1 jam struktur menjadi sedikit lonjong dan lebih besar dibandingkan dengan yang tanpa *PWHT*, karena panas yang masuk memberikan energi sehingga terjadi perubahan pada struktur butir pada material. Jumlah persentase ferit dan perlitnya 11,62% dan 86,38%. Pada pemberian *PWHT* 2 jam struktur mikro tidak jauh berbeda dengan *PWHT* 1 jam, namun fasa ferit dan perlitnya masih belum merata dan hampir sama dengan *PWHT* 1 jam. Jumlah ferit dan perlitnya adalah 13,56% dan 86,44%. Material yang diberi *PWHT* 3 jam tampak struktur lebih seragam antara ferit dan perlitnya menyebar pada semua area dibandingkan dengan *PWHT* 1 jam dan *PWHT* 2 jam yang walaupun sudah menerima panas namun masih ada fasa yang mengumpul masing-masing. Jumlah persentase ferit dan perlitnya adalah 5,43% dan 94,57%. Material yang diberi *PWHT* 4 jam struktur terlihat lebih seragam, antara fasa ferit dan perlitnya lebih merata dan struktur lebih besar dibandingkan dengan yang lain, hal ini membuktikan bahwa semakin lama waktu tunggu yang diberikan pada saat *PWHT*, maka semakin seragam struktur butir yang terbentuk dan struktur menjadi membesar karena pengaruh energi panas yang diberikan sehingga berpengaruh terhadap nilai kekerasan yang tampak lebih rendah dari yang lainnya. Jumlah persentase ferit dan perlit pada material yang diberi *PWHT* 4 jam adalah 26,88% dan 73,12%. Material yang diberi *PWHT* memiliki lebih banyak ferit dan lebih sedikit perlit dibandingkan dengan yang tanpa *PWHT* (Saputra W.A, 2012).

3. Perbandingan hasil struktur mikro pada daerah *weld metal* dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut:



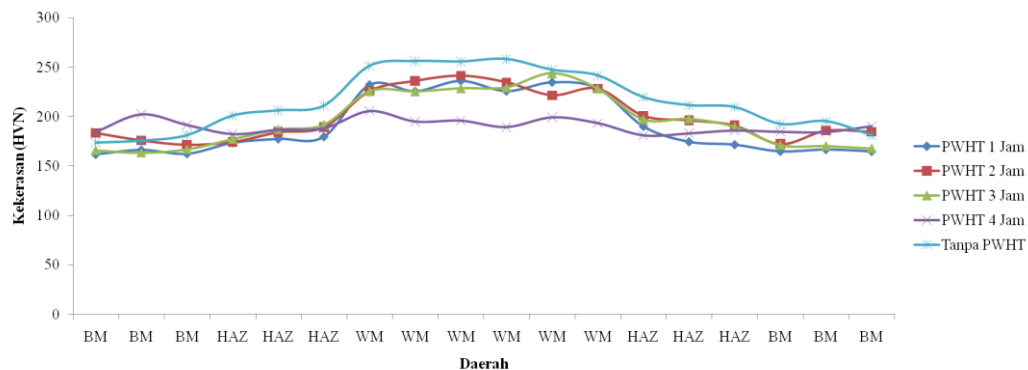
Gambar 4.3 Struktur mikro pada daerah *weld metal* dengan perbesaran 1000x a) Tanpa *PWHT*, b) *PWHT* 1 jam, c) *PWHT* 2 jam, d) *PWHT* 3 jam, e) *PWHT* 4 jam.

Pada Gambar 4.3 terlihat struktur mikro pada daerah *weld metal* variabel tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam, dan *PWHT* 4 jam tidak jauh berbeda karena elektroda yang digunakan memiliki komposisi kimia yang sama dan pengelasan dilakukan dengan parameter las yang sama, hanya berbeda pada perlakuan panas setelah pengelasan yang berpengaruh terhadap keseragaman butir dan tegangan sisa setelah proses pengelasan. Material tanpa *PWHT* hingga material dengan *PWHT* 3 jam tampak tidak jauh berbeda, butiran kecil-kecil merata pada semua daerah, hanya saja tampak yang diberi *PWHT* lebih besar. Dibandingkan dengan material yang diberi *PWHT* 4 jam tampak memberikan hasil yang lebih banyak ferrit dari pada perlit, butir menjadi membesar akibat lama waktu tunggu yang diberikan, sehingga semakin

lama waktu tunggu, semakin besar dan seragam struktur butirnya. Jumlah persentase ferit dan perlit adalah material tanpa *PWHT* 25,71% dan 74,29%, material dengan *PWHT* 1 jam 96,61% dan 3,39%, material dengan *PWHT* 2 jam 91,08% dan 8,92%, material dengan *PWHT* 3 jam 15,81% dan 84,19%, material dengan *PWHT* 4 jam 60,65% dan 39,35%. Material yang diberi *PWHT* memiliki lebih banyak ferit dan lebih sedikit perlit dibandingkan dengan yang tanpa *PWHT* (Saputra W.A, 2012).

4.2 Analisa hasil pengujian kekerasan

Data perbandingan hasil nilai kekerasan pada daerah logam induk (*base metal*), *HAZ*, dan logam pengisi (*weld metal*) untuk variabel tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut:



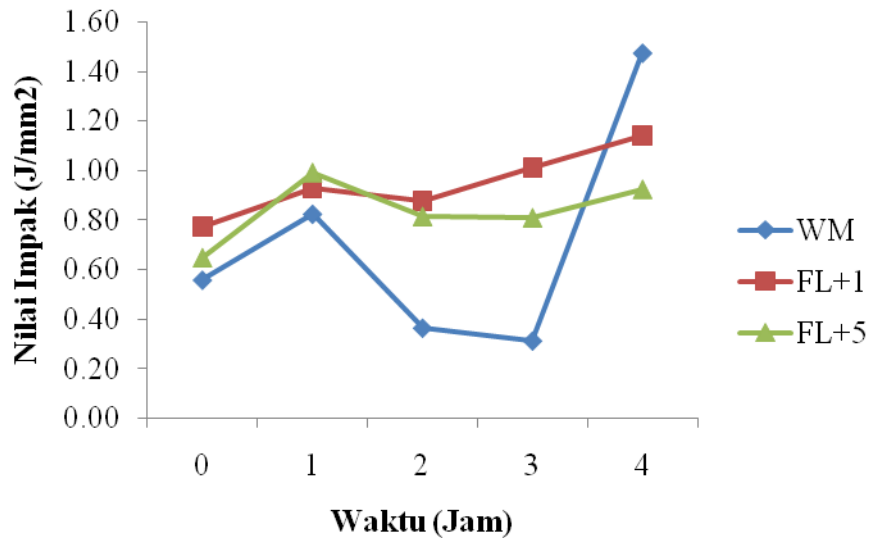
Gambar 4.4 Hasil pengujian kekerasan pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses *PWHT*.

Dari Gambar 4.4 diatas dapat dilihat bahwa hasil nilai kekerasan seluruh variabel memberikan hasil yang berbeda-beda. Untuk material tanpa *PWHT* tampak nilai kekerasannya paling tinggi pada daerah Base metal, *HAZ*, dan *weld metal*, hal ini diakibatkan karena material menyimpan tegangan sisa yang besar akibat proses pengelasan dan struktur mikronya juga kecil serta memiliki fasa perlit lebih banyak sehingga nilai kekerasannya tinggi. Sedangkan material yang diberi *PWHT* tampak nilai kekerasannya turun, hal ini karena *PWHT* memang diberikan untuk mengurangi tegangan sisa pada material dan struktur mikro juga lebih besar, sehingga nilai

kekerasannya juga turun. Dapat dilihat dari material yang diberi *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, dan *PWHT* 3 jam nilai kekerasannya hampir sama terutama pada daerah weld metal dan tampak lebih rendah dari material tanpa *PWHT*. sedangkan material yang diberi *PWHT* dengan waktu tunggu selama 4 jam memiliki nilai kekerasan yang hampir sama didaerah *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*, hal ini karena semakin lama waktu tunggu yang diberikan, maka semakin seragam dan semakin membesar struktur mikronya, dan tegangan sisa semakin berkurang. Dapat dilihat pada Gambar 4.2 dan 4.3 struktur material pada daerah *HAZ* dan weld metal tampak yang diberi *PWHT* jumlah persentase feritnya semakin banyak sehingga material lebih ulet dan nilai kekerasannya turun karena struktur ferit memiliki sifat ulet. Untuk nilai kekerasan pada daerah *base metal* cenderung tidak jauh berbeda atau hampir sama karena bagian *base metal* tidak menerima panas yang besar seperti pada daerah *HAZ* dan *weld metal* yang menerima panas hingga temperatur austenite sehingga struktur mikronya berubah dan nilai kekerasannya pun juga ikut berubah bahkan semakin keras karena adanya tegangan sisa akibat proses pengelasan. Pada daerah *HAZ* dan weld metal nilai kekerasan tampak menurun pada grafik dan mencapai nilai kekerasan paling rendah pada *PWHT* 4 jam, sehingga membuktikan bahwa tegangan sisa berkurang dan menyebabkan nilai kekerasannya menurun. Tegangan sisa memberikan pengaruh pada sifat mekanik material, salah satunya yaitu kekerasan. Penurunan tegangan sisa ini karena pada saat material dipanaskan pada temperatur 600°C dan diberi waktu tunggu, material mengalami relaksasi pada semua bagian yang terkena *PWHT* sehingga pembebasan tegangan sisapun terjadi. Material yang diberi waktu tunggu lebih lama tampak pada struktur mikro struktur lebih kecil dan lebih merata dan tegangan sisa yang dibebaskan juga lebih banyak. Material yang diberi *PWHT* dengan temperatur yang lebih tinggi memberikan hasil penurunan pada nilai kekerasannya dibandingkan dengan tanpa *PWHT* (Setiawan I, 2012).

4.3 Analisa hasil pengujian impak

Data perbandingan hasil nilai impak pada daerah *weld metal*, FL+1, FL+5 untuk variabel tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam dapat dilihat pada Gambar 4.5 berikut:



Gambar 4.5 Hasil pengujian impak pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses *PWHT*.

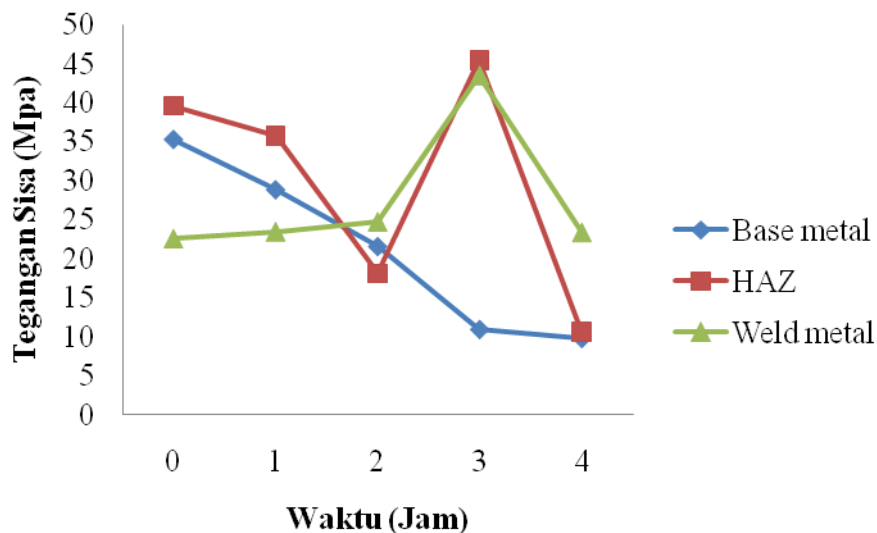
Dari Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa hasil nilai impak seluruh variabel memberikan hasil yang berbeda. Pada daerah *weld metal* yang memiliki nilai kekerasan paling tinggi memiliki nilai ketangguhan yang rendah, dapat dilihat dari grafik yang menunjukkan nilai impak pada daerah *weld metal* terletak paling bawah, sedangkan daerah yang memiliki nilai kekerasan paling rendah memiliki ketangguhan paling tinggi. Pada material tanpa *PWHT* ketangguhan tertinggi terletak pada daerah *HAZ* dan *base metal* dengan perbedaan nilai impak yang kecil, hal ini dikarenakan nilai kekerasannya tidak jauh berbeda, sehingga ketangguhannya pun tidak jauh berbeda. Sedangkan pada spesimen yang diberi perlakuan *PWHT* dengan waktu tunggu 1 jam, ketangguhan relatif hampir sama pada semua daerah, berbeda dengan yang diberi waktu tunggu selama 2 jam, 3 jam, dan 4 jam, yang mana ketangguhan pada daerah *weld metal* cukup jauh berbeda. Pada daerah base metal, yaitu dengan tanda segitiga, nilai impak pada material dengan *PWHT* 1 jam tampak lebih tinggi dibandingkan

dengan material tanpa *PWHT*, dikarenakan nilai kekerasan turun sehingga menyebabkan ketangguhannya meningkat. Berbeda dengan material dengan *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam yang tampak turun dibandingkan dengan material dengan *PWHT* 1 jam, hal ini dikarenakan terdapat unsur kromium yang menyebabkan ketangguhannya menurun. Pada daerah *HAZ*, yaitu yang diberi tanda segiempat, tampak nilai impak atau ketangguhannya meningkat pada material yang diberi *PWHT* dibandingkan dengan yang tanpa *PWHT*, hal ini karena material mengalami penurunan pada nilai kekerasannya akibat proses *PWHT*. namun dapat dilihat pada material yang diberi *PWHT* 2 jam tampak sedikit menurun jika dibandingkan dengan material yang diberi *PWHT* 1 jam, namun hasil penurunannya juga tidak terlalu jauh berbeda, karena pada material dengan *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam tampak meningkat, sehingga dengan penambahan waktu tunggu pada material menyebabkan ketangguhan pada *HAZ* meningkat. Sedangkan pada daerah weld metal, yaitu yang diberi tanda belah ketupat, Nampak berbeda. Material yang diberi *PWHT* 1 jam memiliki ketangguhan yang lebih tinggi dibandingkan dengan material yang tidak diberi *PWHT*, karena nilai kekerasannya menurun. Namun tidak demikian pada material yang diberi *PWHT* selama 2 jam dan *PWHT* selama 3 jam yang tampak menurun, hal ini mungkin dikarenakan adanya unsur kromium yang tinggi pada elektroda yang digunakan yaitu 1.25% sehingga menyebabkan ketangguhannya menurun, karena unsur kromium pada temperatur berkisar 400-800°C membentuk kromium karbida (Cr_2O_3) yaitu reaksi antara kromium dengan sisa karbon dari austenite yang tidak ikut berikatan, sehingga berikatan dengan kromium dan membentuk kromium karbida. Pada material yang diberi *PWHT* 4 jam tampak ketangguhannya meningkat dikarenakan pada pemberian *PWHT* 4 jam didapatkan nilai kekerasan yang paling rendah dibandingkan dengan material tanpa *PWHT* dan dengan *PWHT* 1 jam, 2 jam, dan 3 jam. Dengan ini dapat diketahui bahwa semakin lama waktu tunggu yang diberikan pada proses *PWHT*, semakin berpengaruh pada daerah *weld metal* dan *HAZ* yang diketahui memiliki tegangan sisa yang

besar karena proses pengelasan, sehingga waktu tunggu berpengaruh pada pengurangan tegangan sisa yang ada pada material. Pada spesimen yang diberi *PWHT* dengan waktu tunggu 4 jam ketangguhan pada daerah *weld metal* paling tinggi dibanding dengan yang lain, hal ini karena tegangan sisa berkurang sehingga nilai kekerasan turun dan ketangguhan meningkat, dapat dilihat juga pada nilai kekerasan yang hampir sama dengan daerah *base metal* dan *HAZ*, hal ini membuktikan bahwa tegangan sisa banyak berkurang karena proses *PWHT* yang diberikan dengan waktu tunggu yang lebih lama.

4.4 Analisa hasil pengujian *XRD*

Data perbandingan hasil nilai dampak pada daerah *weld metal*, FL+1, FL+5 untuk variabel tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam dan *PWHT* 4 jam dapat dilihat pada Gambar 4.6 berikut:



Gambar 4.6 Hasil pengujian *XRD* pada beberapa variasi waktu tunggu pada proses *PWHT*.

Dari Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa hasil nilai *XRD* variable tanpa *PWHT*, *PWHT* 1 jam, *PWHT* 2 jam, *PWHT* 3 jam, dan *PWHT* 4 jam bervariasi. Pada daerah *base metal*, pemberian *PWHT* dan penambahan waktu tunggu memberikan dampak penurunan tegangan sisa. Dapat dilihat grafik dengan pola lingkaran menurun dari material yang tidak diberi

PWHT hingga material yang diberi *PWHT* dengan waktu tunggu 4 jam. hal ini karena pengaruh dari temperatur dan lama waktu tunggu pada proses *PWHT* mengakibatkan relaksasi pada material sehingga tegangan sisa berkurang dan struktur butir menjadi membesar. Pengurangan tegangan sisa ini dapat dilihat pada hasil nilai kekerasan, dimana nilai kekerasan menurun. Sedangkan pada daerah *HAZ*, dapat dilihat dari grafik dengan pola persegi tampak menurun dari material tanpa *PWHT* hingga diberi *PWHT* dengan waktu tunggu 2 jam, namun meningkat pada material dengan *PWHT* selama 3 jam, hal ini mungkin diakibatkan karena proses las yang diberikan merupakan proses las manual, sehingga pemberian panas yang masuk sedikit berbeda, namun kembali menurun pada *PWHT* dengan waktu tunggu 4 jam. Pada daerah *weld metal* tampak pemberian *PWHT* mengakibatkan tegangan sisa meningkat namun kenaikannya tidak terlalu besar. Pada *PWHT* dengan waktu tunggu 3 jam tampak nilai tegangan sisa yang ada pada daerah *HAZ* dan *weld metal* hampir sama, hal ini mungkin dikarenakan pada daerah *HAZ* dan *weld metal* menerima masukan panas yang sama sehingga tegangan sisa yang diperoleh juga sama. Namun kembali menurun pada material dengan *PWHT* 4 jam. Trend yang tidak sama pada daerah *HAZ* dan *weld metal* ini disebabkan karena memang masukan panas yang diterima oleh material berbeda. Pada material tanpa *PWHT* masukan panas saat proses pengelasan sebesar 24555,97 J/mm dihitung dari nilai arus, tegangan, kecepatan, dan efisiensi proses pengelasannya. Pada material dengan *PWHT* 1 jam sebesar 21435,9 J/mm, *PWHT* 2 jam sebesar 22964,5 J/mm, *PWHT* 3 jam sebesar 23744,91 J/mm, *PWHT* 4 jam sebesar 24659,67 J/mm. Pada material dengan *PWHT* 2 jam tampak nilai tegangan sisa pada daerah *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal* hampir sama, hal ini dapat diartikan bahwa pemberian *PWHT* akan mendapatkan nilai *XRD* yang hampir sama pada waktu tunggu 2 jam, sehingga dengan waktu tunggu 2 jam saja, maka nilai tegangan sisa sudah mendekati nilai sama pada daerah *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal*. Namun menurut (K. Abburi Venkata, 2014) menyatakan bahwa pengaruh

waktu tunggu akan signifikan sampai dengan 2 jam saja, lebih dari itu pengaruh waktu tunggu pada proses *PWHT* tidak signifikan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, pemberian *PWHT* dengan waktu tunggu yang berbeda-beda, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Struktur mikro pada daerah *base metal*, *HAZ*, dan *weld metal* memberikan hasil yang merata pada pemberian *PWHT* dengan waktu tunggu selama 4 jam. Sehingga semakin lama waktu tunggu yang diberikan, semakin seragam butir yang terbentuk.
2. Nilai kekerasan lebih seragam di daerah *base metal*, *HAZ* dan *weld metal* pada pemberian *PWHT* dengan waktu tunggu selama 4 jam, dan nilai kekerasan juga lebih rendah dari pada yang tidak diberi *PWHT* maupun yang diberi *PWHT* selama 1 jam, 2 jam, dan 3 jam.
3. Ketangguhan yang paling tinggi dimiliki oleh material yang diberi *PWHT* selama 4 jam, berbanding terbalik dengan nilai kekerasan yang rendah, ketangguhan pun meningkat.
4. Tegangan yang paling tinggi terdapat pada daerah *HAZ*, oleh karena itu daerah ini sering disebut daerah kritis. Seiring dengan diberinya *PWHT* nilai tegangan sisa yang ada di daerah *HAZ* mulai menurun. Penurunan tegangan sisa terbesar terdapat pada material dengan *PWHT* selama 4 jam, sehingga waktu tunggu berpengaruh terhadap nilai tegangan sisa pada material.
5. Dari semua pengujian yang dilakukan, nilai kekerasan yang disyaratkan sebesar 137-228 HBN, dimana dari pengujian kekerasan yang masuk kedalam range adalah variabel *PWHT* 4 jam yaitu 173,642-210,072 HBN. Nilai dampak yang diijinkan pada temperatur kamar -7°C sebesar 20,33 J, dimana dari pengujian semua variabel menghasilkan nilai dampak diatas 20,33 J.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan agar diperoleh hasil yang lebih akurat dan dapat dijadikan penelitian lebih lanjut adalah:

1. Pengelasan lebih baik menggunakan proses pengelasan otomatis, karena potensial dan kecepatan konstan dan dapat diukur dengan pasti sehingga panas yang masuk pada material yang dilas sama dan nilai tegangan sisa setelah proses las juga sama.
2. Pemberian *PWHT* sebaiknya dilakukan setelah material dibentuk menjadi spesimen uji, sehingga hasil yang didapat lebih akurat.

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A. <i>Bogie Identification</i>	53
Lampiran B. Hasil Pengujian Kekerasan	55
Lampiran C. Hasil Pengujian Impak	65
Lampiran D. Hasil Pengujian XRD.....	68
Lampiran E. Spesimen Uji	83
Lampiran F. Peralatan	84
Lampiran G. Hardness Conversion Table	87

DAFTAR PUSTAKA

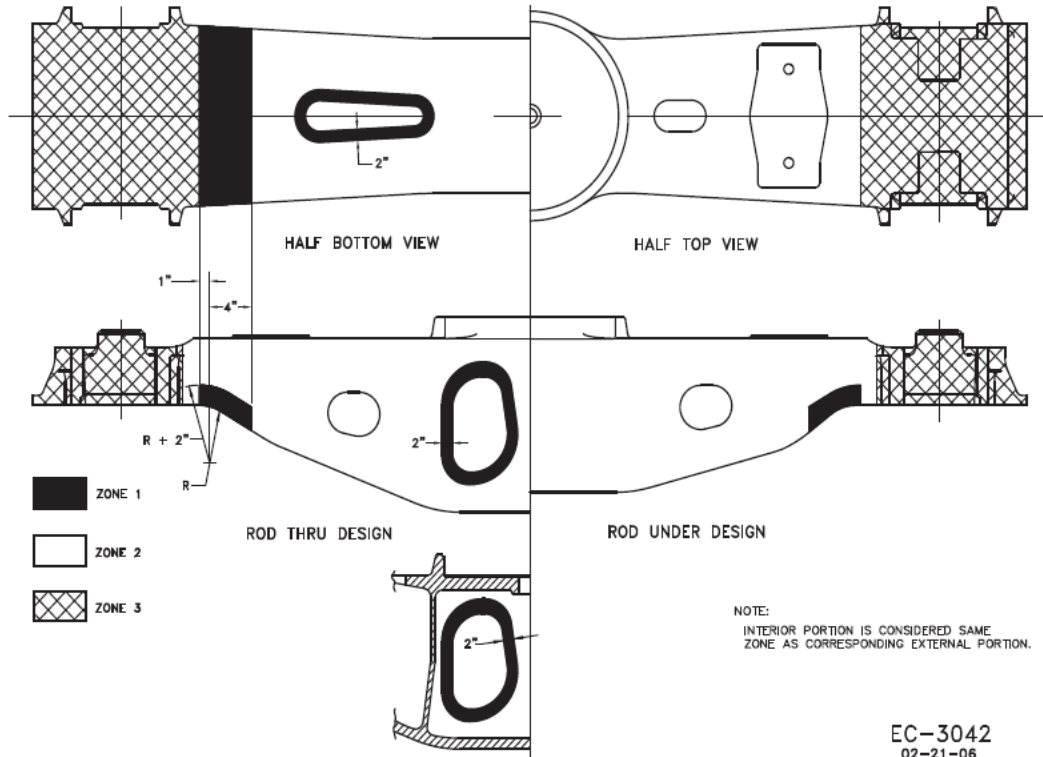
- AAR Standard. (2007). *Casting steel*. In AAR Manual of Standards and Recommended practices Casting Details (pp. 41-49). USA: igormetaldata.
- Abdullah, A., Malaki, M., & Eskandari, A. (2012). *Strength enhancement of the welded structures by ultrasonic peening*. Mater 38 , 7-8.
- ASTM A370. (2002). *Standard Test methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. USA: ANSI.
- Augustino, I. F. (2013). *Pembuatan Welding Prosedur Material Casting AAR M201 Gr.B⁺ pada Proyek "Bogie S2HC9C" di PT.Barata Berdasarkan AWS D15.1*. Surabaya: Perpustakaan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Tugas Akhir.
- _____. (1996). *Welding Science and Technology*. AWS Vol 1. New York: American Welding Society.
- Basary, R. M. (2006). *Pengukuran Tegangan Sisa Menggunakan Difraksi Sinar-X dan Strain Gauge pada Pengelasan Submerged Arc Welding*. Surabaya: Perpustakaan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Tugas Akhir.
- Dewan, M. W., Liang, J., Wahab, M. A., & Okeil, A. M. (2014). *Effect of post-weld heat treatment and electrolytic plasma processing on tungsten inert gas welded AISI 4140 alloy steel*. Science Direct. Materials and Design 54 , 6-13.
- Dong, P., Song, S., & Zhang, J. (2014). *Analysis of residual stress relief mechanisms in post-weld heat treatment*. Science Direct. International Journal of Pressure Vessels and Piping 122 , 6-14.
- Harsono, O. W., & Toshie. (1996). *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: PT. Pradnya Paramita.
- Haryadi, G. D.(2006). *Pengaruh Suhu Tempering Terhadap Kekerasan, Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro*. Rotasi. Volume 8 Nomor 2. Surabaya: Perpustakaan Jurusan Teknik Mesin FT-UNDIP.
- JaHAzi, M., & Egbali, B. (2000). *The influence of hot rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of an ultra-high strength steel*. Science Direct. J Mater Process Technol 103 , 276-9.

- Putra, Y. P. (____). *Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Fillet TJoint dengan Metode Elemen Hingga*. Surabaya: Perpustakaan Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh nopember. Tugas Akhir.
- Saputra, W. A. (2012). *Analisis pengaruh aplikasi post weld heat treatment (PWHT) pada pengelasan cast steel (SC42) dengan karbon steel (Grade E) terhadap sifat mekanik dan metalurgi*. Surabaya: Perpustakaan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS). Tugas Akhir.
- Setiawan, I. (2012). *Pengaruh post weld heat treatment terhadap sifat mekanis dan korosi*. Cilegon - Banten: Perpustakaan Jurusan Teknik Mesin Sultan Ageng Tirtayasa. Tugas Akhir .
- Sri Yuni Setyawati. (____). *Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt joint dan T-joint dengan Variasi Tebal Plat*. Surabaya: Perpustakaan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Tugas Akhir.
- Tau, L., Chan, S., & Shin, C. (1996). *Hydrogen enhanced fatigue crack propagation of bainitic and tempered martensitic steels*. Science Direct. Corros Sci 38, 2049-60.
- Venkata, K. A., Kumar, S., Dey, H. C., Smith, D. J., Bouchard, P. J., & Truman, C. E. (2014). *Study on the Effect of Post Weld Heat Treatment Parameters on the Relaxation of Welding Residual Stresses in Electron Beam Welded P91 Steel Plates*. Science Direct. Procedia Engineering 86 , 223-233.

LAMPIRAN

Lampiran A. *Bogie Identification*

A.1 *Bolster*

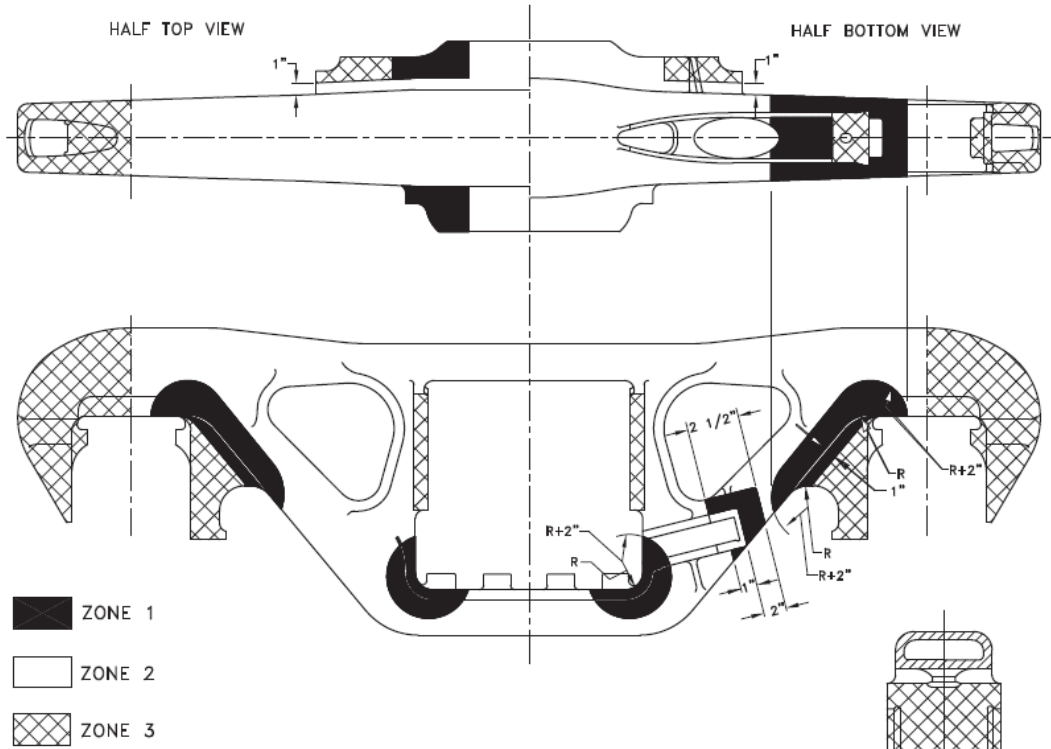


	Grade B and B+	Grade C Normalized or Quenched and Tempered
Welds in Zone 1	Furnace temper ^{a/}	Furnace temper ^{b/}
Welds in Zone 2	Two or more equal passes—no heat treat	Temper
Welds in Zone 3	Heat treat optional	Heat treat optional

^{a/} Zone 1 temper will be a furnace temper.

^{b/} Internal ribs under the bolster center bowl are considered Zone 1 locations.

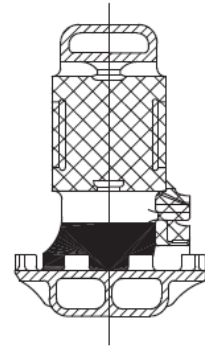
A.2 Side Frame



	Grade B and B+	Grade C Normalized or Quenched and Tempered
Welds in Zone 1	Furnace temper ^{a/}	Furnace temper ^{b/}
Welds in Zone 2	Two or more equal passes—no heat treat	Temper
Welds in Zone 3	Heat treat optional	Heat treat optional

^{a/} Zone 1 temper will be a furnace temper.

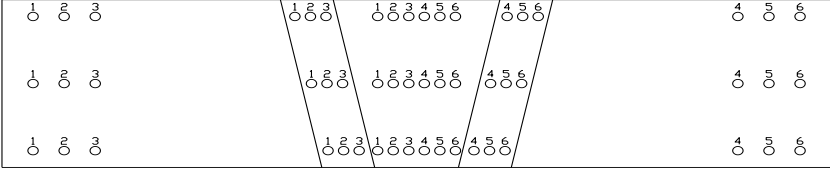
^{b/} Internal ribs under the bolster center bowl are considered Zone 1 locations.



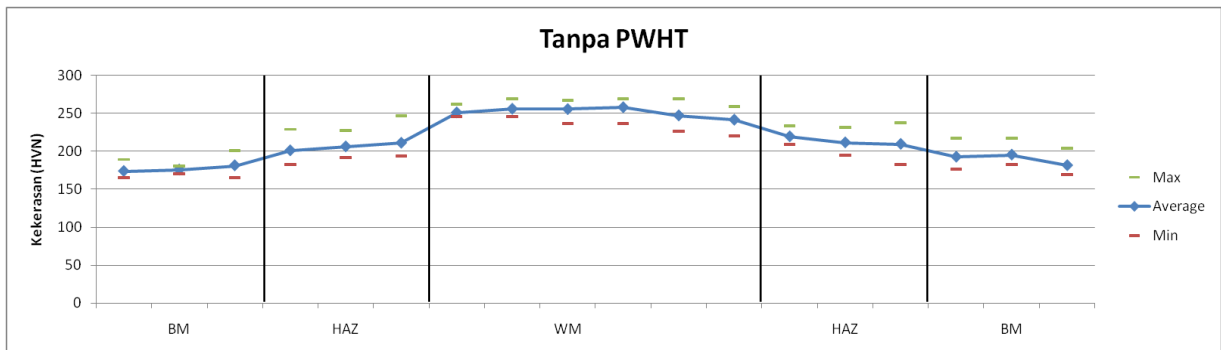
EC-3043
02-21-06

Lampiran B. Hasil Pengujian Kekerasan

B.1 Material tanpa PWHT

VICKERS HARDNESS TEST									
Load : 30 kgf Indentor : Piramid intan Time : 15 s HVN : $1.854 \times (P/d^2)$									
	Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata	HBN (10 mm Ball, 3000 kg load)
BM	Atas	1	0.543	0.543	0.543	0.295	189	200.957	202.914
		2	0.556	0.556	0.556	0.309	180		
		3	0.52	0.534	0.527	0.278	200		
		4	0.511	0.502	0.507	0.257	217		
		5	0.507	0.507	0.507	0.257	216		
		6	0.511	0.534	0.523	0.273	204		
	Tengah	1	0.578	0.583	0.581	0.337	165	175.266	170.443
		2	0.566	0.578	0.572	0.327	170		
		3	0.583	0.534	0.559	0.312	178		
		4	0.547	0.552	0.550	0.302	184		
		5	0.552	0.552	0.552	0.305	183		
		6	0.547	0.592	0.570	0.324	171		
	Bawah	1	0.583	0.57	0.577	0.332	167	173.708	168.708
		2	0.574	0.547	0.561	0.314	177		
		3	0.587	0.574	0.581	0.337	165		
		4	0.561	0.561	0.561	0.315	177		
		5	0.561	0.529	0.545	0.297	187		
		6	0.587	0.561	0.574	0.329	169		
HAZ	Atas	1	0.489	0.498	0.494	0.244	228	233.529	227.897
		2	0.493	0.498	0.496	0.246	227		
		3	0.48	0.471	0.476	0.226	246		
		4	0.471	0.507	0.489	0.239	233		
		5	0.493	0.489	0.491	0.241	231		
		6	0.48	0.489	0.485	0.235	237		
	Tengah	1	0.534	0.543	0.539	0.290	192	202.036	203.576
		2	0.525	0.552	0.539	0.290	192		
		3	0.534	0.538	0.536	0.287	194		
		4	0.511	0.502	0.507	0.257	217		
5		0.507	0.525	0.516	0.266	209			

		6	0.52	0.511	0.516	0.266	209		
	Bawah	1	0.538	0.565	0.552	0.304	183	193.938	190.722
		2	0.543	0.511	0.527	0.278	200		
		3	0.529	0.543	0.536	0.287	194		
		4	0.502	0.529	0.516	0.266	209		
		5	0.534	0.534	0.534	0.285	195		
		6	0.543	0.561	0.552	0.305	183		
WM	Atas	1	0.48	0.471	0.476	0.226	246	259.749	258.061
		2	0.466	0.471	0.469	0.219	253		
		3	0.457	0.462	0.460	0.211	263		
		4	0.457	0.453	0.455	0.207	269		
		5	0.448	0.462	0.455	0.207	269		
		6	0.457	0.471	0.464	0.215	258		
	Tengah	1	0.466	0.457	0.462	0.213	261	259.551	257.714
		2	0.448	0.462	0.455	0.207	269		
		3	0.448	0.466	0.457	0.209	266		
		4	0.448	0.462	0.455	0.207	269		
		5	0.466	0.484	0.475	0.226	247		
		6	0.48	0.471	0.476	0.226	246		
	Bawah	1	0.466	0.484	0.475	0.226	247	235.535	229.357
		2	0.471	0.48	0.476	0.226	246		
		3	0.48	0.489	0.485	0.235	237		
		4	0.48	0.489	0.485	0.235	237		
		5	0.498	0.493	0.496	0.246	227		
		6	0.498	0.507	0.503	0.253	220		



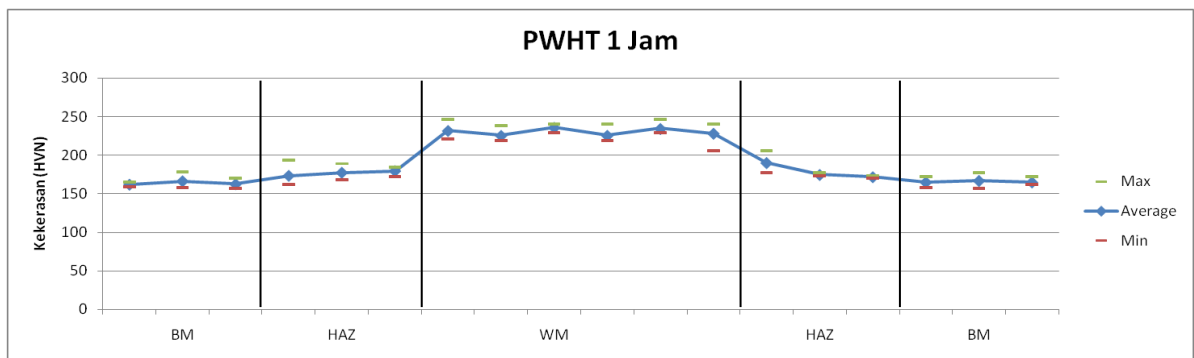
B.2 Material dengan PWHT 1 jam

VICKERS HARDNESS TEST

Load : 30 kgf	
Identor : Piramid intan	
Time : 15 s	
HVN : $1.854 \times (P/d^2)$	

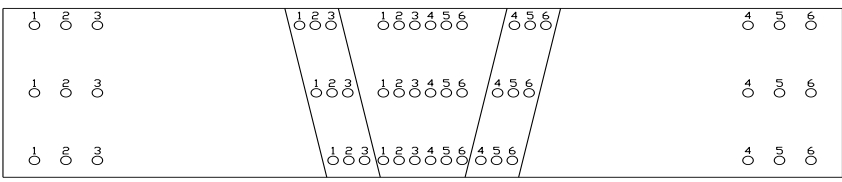
Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata	HBN (10 mm Ball, 3000 kg load)
BM	Atas	1	0.578	0.596	0.587	0.345	162.972	163.486
		2	0.61	0.578	0.594	0.353		
		3	0.601	0.592	0.597	0.356		
		4	0.57	0.592	0.581	0.338		
		5	0.561	0.596	0.579	0.335		
		6	0.552	0.587	0.570	0.324		
	Tengah	1	0.574	0.61	0.592	0.350	159.394	158.788
		2	0.57	0.601	0.586	0.343		
		3	0.583	0.596	0.590	0.348		
		4	0.601	0.587	0.594	0.353		
		5	0.614	0.578	0.596	0.355		
		6	0.601	0.574	0.588	0.345		
	Bawah	1	0.57	0.592	0.581	0.338	170.457	166.614
		2	0.543	0.574	0.559	0.312		
		3	0.556	0.587	0.572	0.327		
		4	0.601	0.538	0.570	0.324		
		5	0.552	0.57	0.561	0.315		
		6	0.601	0.574	0.588	0.345		
HAZ	Atas	1	0.57	0.592	0.581	0.338	175.152	170.253
		2	0.574	0.578	0.576	0.332		
		3	0.538	0.561	0.550	0.302		
		4	0.538	0.552	0.545	0.297		
		5	0.543	0.578	0.561	0.314		
		6	0.561	0.583	0.572	0.327		
	Tengah	1	0.578	0.596	0.587	0.345	171.857	166.964
		2	0.561	0.565	0.563	0.317		
		3	0.565	0.574	0.570	0.324		
		4	0.556	0.565	0.561	0.314		
		5	0.556	0.578	0.567	0.321		
		6	0.57	0.565	0.568	0.322		
	Bawah	1	0.529	0.543	0.536	0.287	185.762	189.524

		2	0.534	0.552	0.543	0.295	189		
		3	0.543	0.561	0.552	0.305	183		
		4	0.507	0.534	0.521	0.271	205		
		5	0.556	0.578	0.567	0.321	173		
		6	0.578	0.561	0.570	0.324	171		
WM	Atas	1	0.484	0.52	0.502	0.252	221	221.875	215.875
		2	0.502	0.507	0.505	0.255	219		
		3	0.48	0.484	0.482	0.232	239		
		4	0.489	0.52	0.505	0.255	219		
		5	0.48	0.507	0.494	0.244	228		
		6	0.502	0.538	0.520	0.270	206		
	Tengah	1	0.475	0.511	0.493	0.243	229	235.557	229.371
		2	0.466	0.502	0.484	0.234	237		
		3	0.462	0.502	0.482	0.232	239		
		4	0.475	0.489	0.482	0.232	239		
		5	0.484	0.502	0.493	0.243	229		
		6	0.48	0.484	0.482	0.232	239		
	Bawah	1	0.462	0.489	0.476	0.226	246	233.174	227.631
		2	0.489	0.516	0.503	0.253	220		
		3	0.484	0.502	0.493	0.243	229		
		4	0.493	0.516	0.505	0.255	219		
		5	0.462	0.489	0.476	0.226	246		
		6	0.466	0.498	0.482	0.232	239		



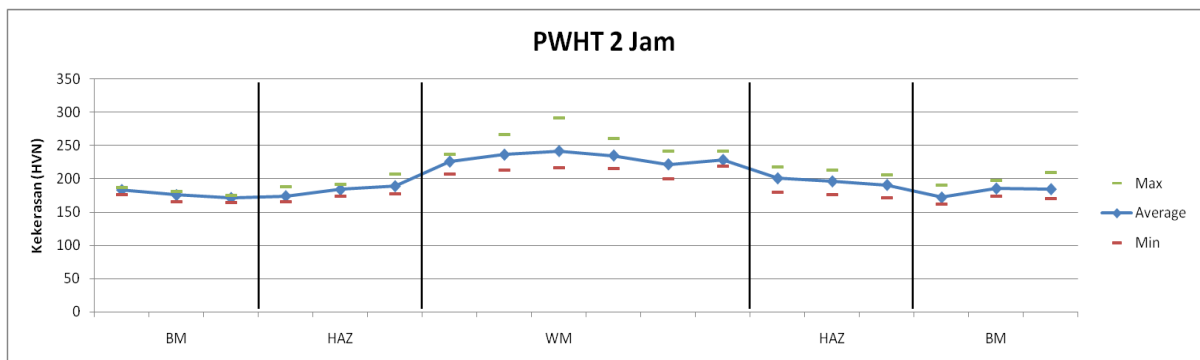
B.3 Material dengan PWHT 2 jam

VICKERS HARDNESS TEST

Load : 30 kgf	
Identor : Piramid intan	
Time : 15 s	
HVN : $1.854 \times (P/d^2)$	

Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata	HBN (10 mm Ball, 3000 kg load)	
BM	Atas	1	0.552	0.538	0.545	0.297	187	190.079	190.371
		2	0.547	0.561	0.554	0.307	181		
		3	0.561	0.57	0.566	0.320	174		
		4	0.547	0.534	0.541	0.292	190		
		5	0.516	0.543	0.530	0.280	198		
		6	0.502	0.529	0.516	0.266	209		
	Tengah	1	0.552	0.57	0.561	0.315	177	171.629	166.907
		2	0.57	0.587	0.579	0.335	166		
		3	0.57	0.592	0.581	0.338	165		
		4	0.57	0.596	0.583	0.340	164		
		5	0.516	0.583	0.550	0.302	184		
		6	0.556	0.574	0.565	0.319	174		
	Bawah	1	0.547	0.547	0.547	0.299	186	174.627	169.627
		2	0.578	0.534	0.556	0.309	180		
		3	0.556	0.57	0.563	0.317	175		
		4	0.561	0.61	0.586	0.343	162		
		5	0.556	0.574	0.565	0.319	174		
		6	0.57	0.574	0.572	0.327	170		
HAZ	Atas	1	0.538	0.547	0.543	0.294	189	199.436	199.872
		2	0.529	0.547	0.538	0.289	192		
		3	0.516	0.52	0.518	0.268	207		
		4	0.525	0.52	0.523	0.273	204		
		5	0.529	0.529	0.529	0.280	199		
		6	0.529	0.511	0.520	0.270	206		
	Tengah	1	0.57	0.583	0.577	0.332	167	175.433	170.722
		2	0.556	0.574	0.565	0.319	174		
		3	0.556	0.547	0.552	0.304	183		
		4	0.547	0.565	0.556	0.309	180		
		5	0.552	0.57	0.561	0.315	177		
		6	0.561	0.578	0.570	0.324	171		
HAZ	Bawah	1	0.57	0.587	0.579	0.335	166	192.624	190.602

		2	0.543	0.552	0.548	0.300	186		
		3	0.543	0.578	0.561	0.314	177		
		4	0.507	0.502	0.505	0.255	219		
		5	0.511	0.511	0.511	0.261	213		
		6	0.529	0.538	0.534	0.285	195		
WM	Atas	1	0.498	0.471	0.485	0.235	237	220.306	214.306
		2	0.493	0.493	0.493	0.243	229		
		3	0.498	0.516	0.507	0.257	216		
		4	0.484	0.534	0.509	0.259	215		
		5	0.507	0.547	0.527	0.278	200		
		6	0.493	0.502	0.498	0.248	225		
	Tengah	1	0.525	0.511	0.518	0.268	207	217.754	211.877
		2	0.511	0.511	0.511	0.261	213		
		3	0.507	0.507	0.507	0.257	216		
		4	0.493	0.493	0.493	0.243	229		
		5	0.493	0.507	0.500	0.250	222		
		6	0.502	0.507	0.505	0.255	219		
	Bawah	1	0.475	0.502	0.489	0.239	233	255.758	251.263
		2	0.448	0.466	0.457	0.209	266		
		3	0.417	0.457	0.437	0.191	291		
		4	0.453	0.471	0.462	0.213	261		
		5	0.466	0.493	0.480	0.230	242		
		6	0.471	0.489	0.480	0.230	241		



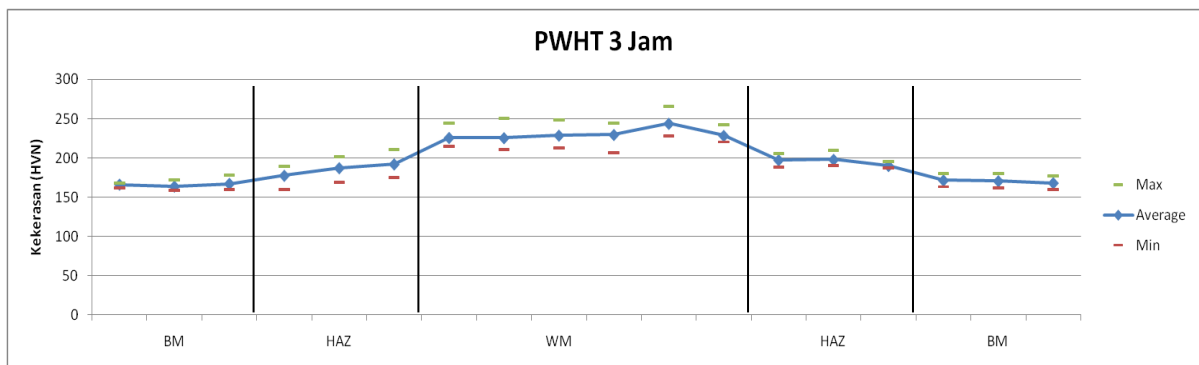
B.4 Material dengan PWHT 3 jam

VICKERS HARDNESS TEST

Load : 30 kgf	
Identor : Piramid intan	
Time : 15 s	
HVN : $1.854 \times (P/d^2)$	

Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata	HBN (10 mm Ball, 3000 kg load)	
BM	Atas	1	0.574	0.578	0.576	0.332	168	175.668	171.113
		2	0.561	0.578	0.570	0.324	171		
		3	0.561	0.556	0.559	0.312	178		
		4	0.547	0.565	0.556	0.309	180		
		5	0.552	0.561	0.557	0.310	180		
		6	0.574	0.547	0.561	0.314	177		
	Tengah	1	0.587	0.583	0.585	0.342	163	161.295	161.943
		2	0.587	0.596	0.592	0.350	159		
		3	0.592	0.587	0.590	0.348	160		
		4	0.583	0.583	0.583	0.340	164		
		5	0.596	0.574	0.585	0.342	163		
		6	0.587	0.592	0.590	0.348	160		
	Bawah	1	0.578	0.574	0.576	0.332	168	165.969	164.985
		2	0.583	0.596	0.590	0.348	160		
		3	0.583	0.587	0.585	0.342	163		
		4	0.587	0.556	0.572	0.327	170		
		5	0.578	0.57	0.574	0.329	169		
		6	0.578	0.578	0.578	0.334	166		
HAZ	Atas	1	0.547	0.538	0.543	0.294	189	191.782	190.526
		2	0.534	0.547	0.541	0.292	190		
		3	0.538	0.547	0.543	0.294	189		
		4	0.52	0.543	0.532	0.282	197		
		5	0.534	0.547	0.541	0.292	190		
		6	0.525	0.543	0.534	0.285	195		
	Tengah	1	0.587	0.592	0.590	0.348	160	179.083	177.708
		2	0.561	0.587	0.574	0.329	169		
		3	0.578	0.547	0.563	0.316	176		
		4	0.538	0.547	0.543	0.294	189		
		5	0.529	0.543	0.536	0.287	194		
		6	0.556	0.534	0.545	0.297	187		
	Bawah	1	0.547	0.556	0.552	0.304	183	199.642	200.284

		2	0.525	0.525	0.525	0.276	202		
		3	0.525	0.502	0.514	0.264	211		
		4	0.511	0.529	0.520	0.270	206		
		5	0.511	0.52	0.516	0.266	209		
		6	0.529	0.561	0.545	0.297	187		
WM	Atas	1	0.507	0.502	0.505	0.255	219	217.914	211.957
		2	0.516	0.511	0.514	0.264	211		
		3	0.507	0.516	0.512	0.262	213		
		4	0.52	0.516	0.518	0.268	207		
		5	0.484	0.484	0.484	0.234	237		
		6	0.502	0.502	0.502	0.252	221		
	Tengah	1	0.502	0.516	0.509	0.259	215	223.730	218.422
		2	0.498	0.52	0.509	0.259	215		
		3	0.493	0.502	0.498	0.248	225		
		4	0.475	0.493	0.484	0.234	237		
		5	0.489	0.498	0.494	0.244	228		
		6	0.498	0.502	0.500	0.250	222		
	Bawah	1	0.475	0.48	0.478	0.228	244	249.142	242.142
		2	0.462	0.48	0.471	0.222	251		
		3	0.462	0.484	0.473	0.224	249		
		4	0.466	0.489	0.478	0.228	244		
		5	0.453	0.462	0.458	0.209	266		
		6	0.475	0.484	0.480	0.230	242		



B.5 Material dengan PWHT 4 jam

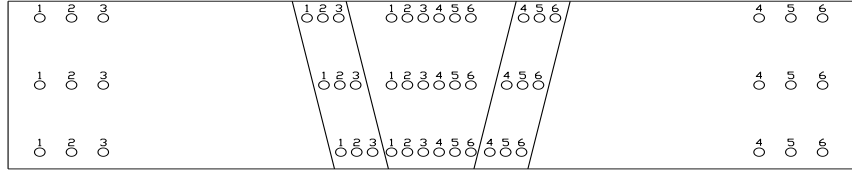
VICKERS HARDNESS TEST

Load : 30 kgf

Identor : Piramid intan

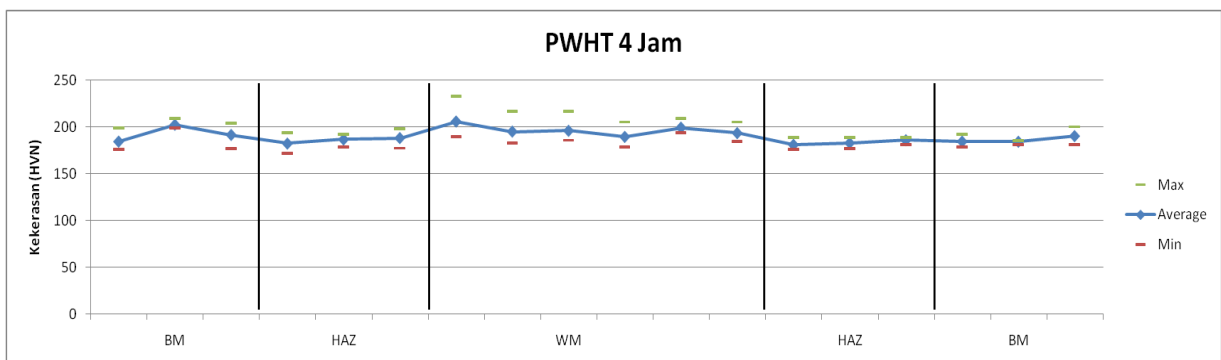
Time : 15 s

HVN : $1.854 \times (P/d^2)$



Lokasi		D1	D2	Dr	Dr ²	HVN	HVN rata-rata	HBN (10 mm Ball, 3000 kg load)	
BM	Atas	1	0.587	0.538	0.563	0.316	176	190.571	190.416
		2	0.52	0.511	0.516	0.266	209		
		3	0.525	0.52	0.523	0.273	204		
		4	0.547	0.529	0.538	0.289	192		
		5	0.556	0.552	0.554	0.307	181		
		6	0.552	0.556	0.554	0.307	181		
BM	Tengah	1	0.556	0.561	0.559	0.312	178	186.321	190.029
		2	0.529	0.529	0.529	0.280	199		
		3	0.561	0.561	0.561	0.315	177		
		4	0.57	0.547	0.559	0.312	178		
		5	0.552	0.543	0.548	0.300	186		
		6	0.525	0.529	0.527	0.278	200		
	Bawah	1	0.538	0.52	0.529	0.280	199	191.364	190.488
		2	0.529	0.529	0.529	0.280	199		
		3	0.534	0.538	0.536	0.287	194		
		4	0.561	0.543	0.552	0.305	183		
		5	0.552	0.543	0.548	0.300	186		
		6	0.538	0.547	0.543	0.294	189		
HAZ	Atas	1	0.552	0.52	0.536	0.287	194	189.482	190.317
		2	0.538	0.538	0.538	0.289	192		
		3	0.543	0.516	0.530	0.280	198		
		4	0.552	0.574	0.563	0.317	175		
		5	0.543	0.543	0.543	0.295	189		
		6	0.552	0.534	0.543	0.295	189		
	Tengah	1	0.561	0.578	0.570	0.324	171	177.185	173.642
		2	0.556	0.561	0.559	0.312	178		
		3	0.574	0.547	0.561	0.314	177		
		4	0.556	0.561	0.559	0.312	178		
		5	0.552	0.57	0.561	0.315	177		
		6	0.552	0.556	0.554	0.307	181		

	Bawah	1	0.57	0.538	0.554	0.307	181	186.269	190.024
		2	0.547	0.538	0.543	0.294	189		
		3	0.534	0.552	0.543	0.295	189		
		4	0.543	0.543	0.543	0.295	189		
		5	0.547	0.556	0.552	0.304	183		
		6	0.547	0.543	0.545	0.297	187		
WM	Atas	1	0.538	0.547	0.543	0.294	189	187.544	190.140
		2	0.552	0.552	0.552	0.305	183		
		3	0.561	0.534	0.548	0.300	186		
		4	0.552	0.547	0.550	0.302	184		
		5	0.534	0.538	0.536	0.287	194		
		6	0.534	0.547	0.541	0.292	190		
	Tengah	1	0.538	0.529	0.534	0.285	195	187.404	190.128
		2	0.538	0.556	0.547	0.299	186		
		3	0.552	0.543	0.548	0.300	186		
		4	0.552	0.565	0.559	0.312	178		
		5	0.534	0.534	0.534	0.285	195		
		6	0.552	0.547	0.550	0.302	184		
	Bawah	1	0.489	0.489	0.489	0.239	233	214.143	210.072
		2	0.498	0.516	0.507	0.257	216		
		3	0.498	0.516	0.507	0.257	216		
		4	0.516	0.525	0.521	0.271	205		
		5	0.516	0.516	0.516	0.266	209		
		6	0.516	0.525	0.521	0.271	205		



Lampiran C. Hasil Pengujian Impak

C.1 Material tanpa PWHT

Spesimen Stamp	Length l (mm)	Width W (mm)	Overall Thick t (mm)	Thick at Notch tn (mm)	Cross Section An (mm ²)	Type of Notch
51	55.02	10.36	10.48	8.84	92	v 45°
52	55.1	10.5	10.12	8.46	89	v 45°
53	55.14	10.58	9.62	7.96	84	v 45°
54	54.8	10.28	10.8	8.88	91	v 45°
55	55.32	10.3	11.26	9.66	99	v 45°
56	55.06	10.3	10.2	8.56	88	v 45°
57	55.12	10.34	11	9.44	98	v 45°
58	55.2	10.44	10.42	9.22	96	v 45°
59	55.08	10.42	11.22	9.44	98	v 45°

Spesimen Stamp	Location of Notch	Temp (°C)	Angle β (°)	E _{Impact} (J)	I.Strength (J/mm ²)	Lateral Expansion (mm)	Type of Fracture
51	WM	-7	105	53	0.58	0.04	Brittle
52	WM	-7	124	30	0.34	0.34	Brittle
53	WM	-7	96.5	64	0.76	0.52	Brittle
54	FL+1	-7	90.5	72	0.79	0.22	Brittle
55	FL+1	-7	78.5	88	0.88	0.88	Brittle
56	FL+1	-7	102	57	0.65	0.6	Brittle
57	FL+5	-7	95	66	0.68	0.94	Brittle
58	FL+5	-7	91.5	71	0.74	0.74	Brittle
59	FL+5	-7	105.5	52	0.53	0.58	Brittle

C.2 Material dengan PWHT 1 jam

Spesimen Stamp	Length l (mm)	Width W (mm)	Overall Thick t (mm)	Thick at Notch tn (mm)	Cross Section An (mm ²)	Type of Notch
11	55	11.16	12.96	11.08	124	v 45°
12	55	11.08	11.28	10.08	112	v 45°
13	55.02	11.1	11.58	10.04	111	v 45°
14	55.06	11	11.5	11.3	124	v 45°
15	55.18	11.08	10.9	9.62	107	v 45°
16	55.08	11.04	10.1	8.74	96	v 45°
17	55.04	10.96	11.76	10.72	117	v 45°
18	55.04	10.9	11.18	10.54	115	v 45°
19	55	10.94	11.36	9.94	109	v 45°

Spesimen Stamp	Location of Notch	Temp (°C)	Angle β (°)	E_{Impact} (J)	I.Strength (J/mm ²)	Lateral Expansion (mm)	Type of Fracture
11	WM	-7	27	142	1.15	0.24	Brittle
12	WM	-7	59.5	112	1.00	0.6	Brittle
13	WM	-7	118	36	0.32	0.26	Brittle
14	FL+1	-7	28	141	1.13	1.3	Brittle
15	FL+1	-7	73.5	95	0.89	0.8	Brittle
16	FL+1	-7	89	74	0.77	0.74	Brittle
17	FL+5	-7	13	148	1.26	0.92	Brittle
18	FL+5	-7	61	110	0.96	1.04	Brittle
19	FL+5	-7	83	82	0.75	0.9	Brittle

C.3 Material dengan PWHT 2 jam

Spesimen Stamp	Length l (mm)	Width W (mm)	Overall Thick t (mm)	Thick at Notch tn (mm)	Cross Section An (mm ²)	Type of Notch
21	55.36	10.76	10.36	9	97	v 45°
22	55.58	11.26	11.18	9.66	109	v 45°
23	55	11.44	12.16	10.84	124	v 45°
24	55.06	10.64	11.46	10.26	109	v 45°
25	55.92	10.64	11	9.6	102	v 45°
26	55.44	10.74	11.6	9.74	105	v 45°
27	55.18	10.68	10.08	10.02	107	v 45°
28	55.14	10.7	11.48	10.2	109	v 45°
29	55.04	10.76	11.7	10.84	117	v 45°

Spesimen Stamp	Location of Notch	Temp (°C)	Angle β (°)	E_{Impact} (J)	I.Strength (J/mm ²)	Lateral Expansion (mm)	Type of Fracture
21	WM	-7	123	29	0.30	0.24	Brittle
22	WM	-7	117	38	0.35	0.16	Brittle
23	WM	-7	103	55.5	0.45	0.56	Brittle
24	FL+1	-7	80	86.5	0.79	0.66	Brittle
25	FL+1	-7	60	111	1.09	1.1	Brittle
26	FL+1	-7	85.5	79	0.76	0.9	Brittle
27	FL+5	-7	57	115	1.07	1.32	Brittle
28	FL+5	-7	86	79	0.72	0.88	Brittle
29	FL+5	-7	88	75	0.64	0.76	Brittle

C.4 Material dengan PWHT 3 jam

Spesimen Stamp	Length l (mm)	Width W (mm)	Overall Thick t (mm)	Thick at Notch tn (mm)	Cross Section An (mm ²)	Type of Notch
31	55.1	11.22	10.8	9.3	104	v 45°
32	55.16	11.18	10.34	8.8	98	v 45°
33	55.4	11.18	9.82	8.14	91	v 45°
34	55.2	10.9	10.9	9.6	105	v 45°
35	55.08	10	11.06	9.7	97	v 45°
36	55.08	10.22	11.34	10.92	112	v 45°
37	55.06	10.2	11.76	10.3	105	v 45°
38	55.04	10.08	11.2	9.92	100	v 45°
39	55.06	10.14	10.36	8.9	90	v 45°

Spesimen Stamp	Location of Notch	Temp (°C)	Angle β (°)	E_{Impact} (J)	I.Strength (J/mm ²)	Lateral Expansion (mm)	Type of Fracture
31	WM	-7	129	24	0.23	0.26	Brittle
32	WM	-7	124	30	0.30	0.2	Brittle
33	WM	-7	117.5	37	0.41	0.4	Brittle
34	FL+1	-7	86	78.5	0.75	0.88	Brittle
35	FL+1	-7	75	92	0.95	1	Brittle
36	FL+1	-7	9	149	1.34	0.6	Brittle
37	FL+5	-7	91	71	0.68	0.68	Brittle
38	FL+5	-7	57	114	1.14	1.38	Brittle
39	FL+5	-7	104	55	0.61	0.62	Brittle

C.5 Material dengan PWHT 4 jam

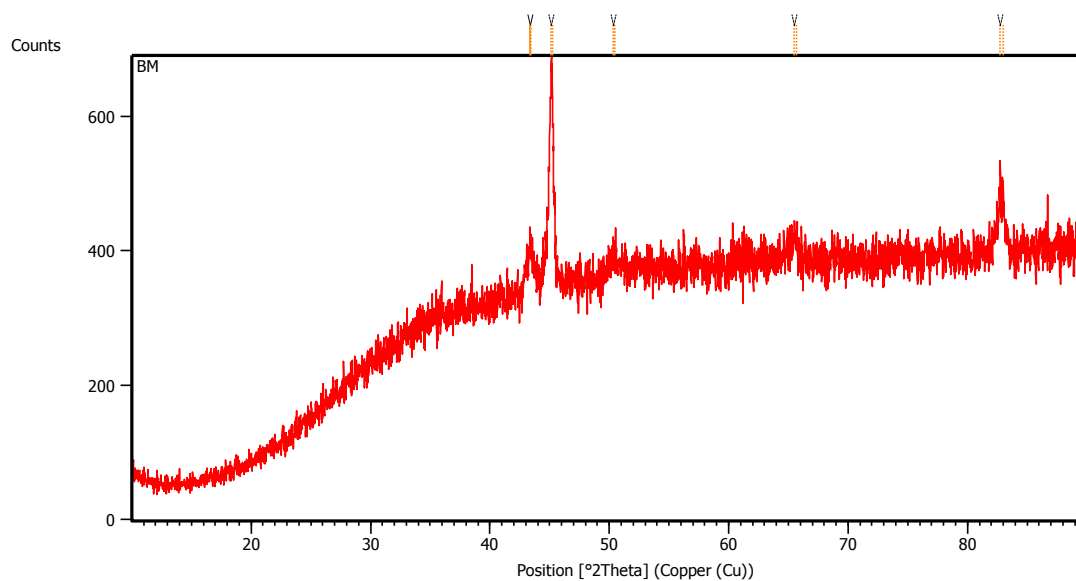
Spesimen Stamp	Length l (mm)	Width W (mm)	Overall Thick t (mm)	Thick at Notch tn (mm)	Cross Section An (mm ²)	Type of Notch
41	55.2	9.36	12.48	11	103	v 45°
42	55.1	9.12	12.2	10.72	98	v 45°
43	55.04	9.5	11.88	10.78	102	v 45°
44	55.1	10.18	12	10.6	108	v 45°
45	55.76	10.88	11.12	10.12	110	v 45°
46	55.44	11.38	12.04	10.96	125	v 45°
47	55.06	11.58	11.72	10.34	120	v 45°
48	55.3	11.1	10.6	9.84	109	v 45°
49	55.28	10.9	11.06	10.46	114	v 45°

Spesimen Stamp	Location of Notch	Temp (°C)	Angle β (°)	E_{Impact} (J)	I.Strength (J/mm ²)	Lateral Expansion (mm)	Type of Fracture
41	WM	-7	12	148	1.44	1.4	Brittle
42	WM	-7	16	149.5	1.53	1.56	Brittle
43	WM	-7	9	149	1.45	1.42	Brittle
44	FL+1	-7	56	116	1.07	1.06	Brittle
45	FL+1	-7	25	142.5	1.29	1.42	Brittle
46	FL+1	-7	39	132	1.06	1.58	Brittle
47	FL+5	-7	79	88	0.73	0.68	Brittle
48	FL+5	-7	61	110	1.01	1.28	Brittle
49	FL+5	-7	55	117	1.03	1.16	Brittle

Lampiran D. Hasil Pengujian XRD

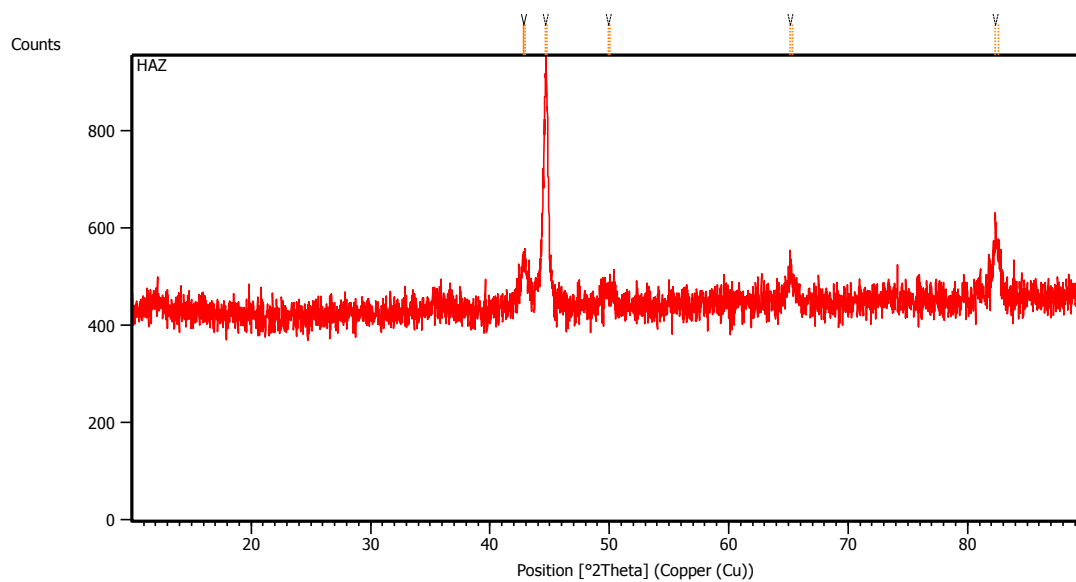
D.1 Material tanpa PWHT

❖ Logam induk (Base metal)



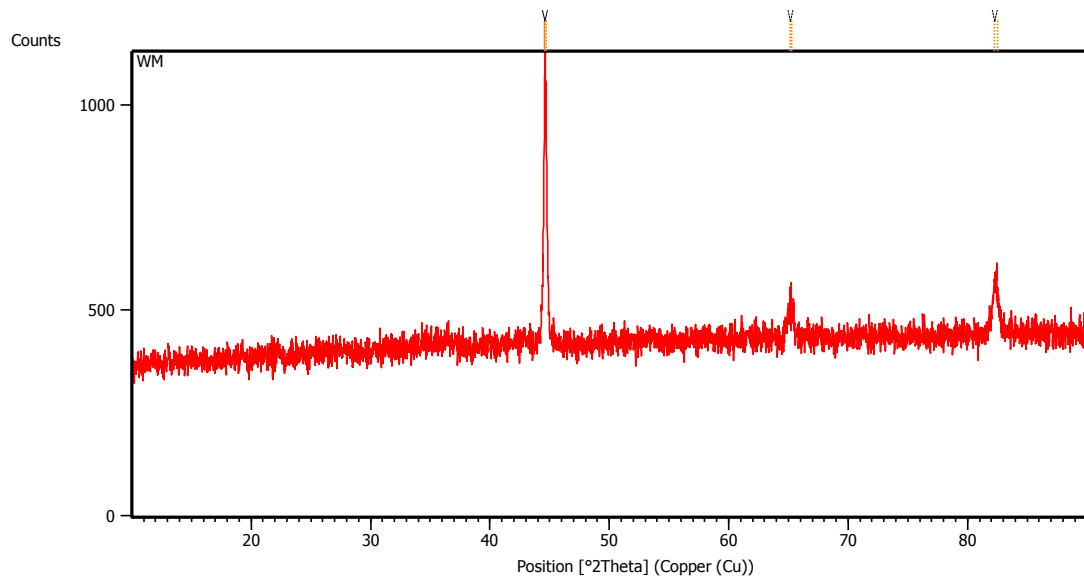
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
43.33(3)	40(3)	0.72(7)	2.08644	16.99
43.44(3)	20(3)	0.72(7)	2.08644	8.49
45.107(5)	233(8)	0.38(2)	2.00838	100.00
45.225(5)	117(8)	0.38(2)	2.00838	50.00
50.34(6)	20(3)	0.9(2)	1.81118	8.37
50.47(6)	10(3)	0.9(2)	1.81118	4.19
65.47(5)	27(10)	0.4(3)	1.42450	11.75
65.65(5)	14(10)	0.4(3)	1.42450	5.88
82.73(2)	80(9)	0.45(9)	1.16561	34.26
82.98(2)	40(9)	0.45(9)	1.16561	17.13

❖ Heat affected zone (HAZ)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.83(2)	64(5)	0.60(6)	2.10958	19.43
42.94(2)	32(5)	0.60(6)	2.10958	9.72
44.645(4)	328(8)	0.42(1)	2.02806	100.00
44.762(4)	164(8)	0.42(1)	2.02806	50.00
49.9(1)	23(10)	0.9(2)	1.82462	7.16
50.1(1)	12(10)	0.9(2)	1.82462	3.58
65.15(3)	49(8)	0.5(1)	1.43076	15.03
65.33(3)	25(8)	0.5(1)	1.43076	7.51
82.33(1)	84(6)	0.57(5)	1.17029	25.74
82.58(1)	42(6)	0.57(5)	1.17029	12.87

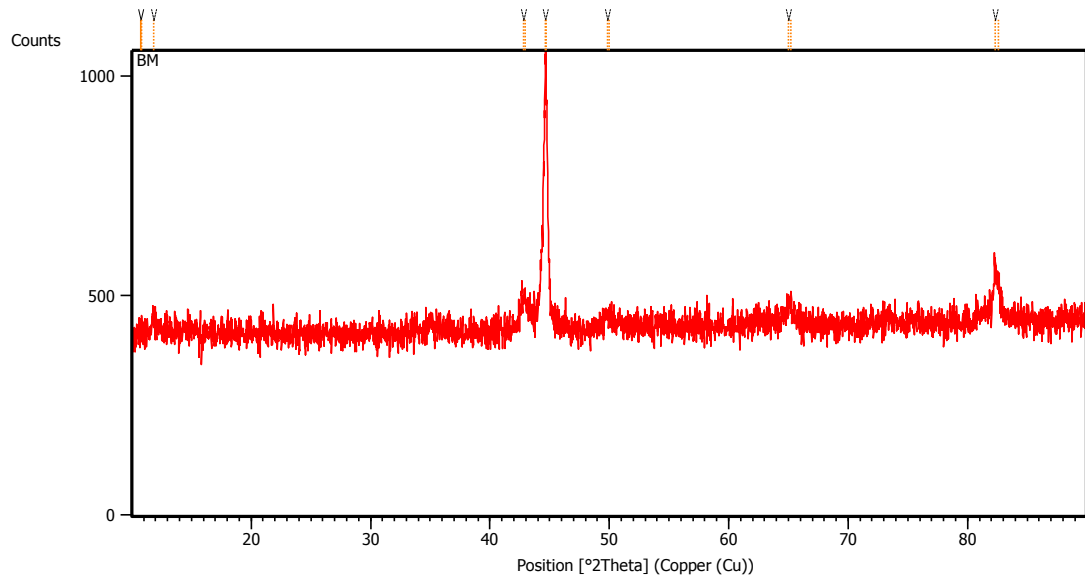
❖ Logam lasan (Weld metal)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.606(2)	513(14)	0.247(7)	2.02977	100.00
44.722(2)	256(14)	0.247(7)	2.02977	50.00
65.11(2)	55(5)	0.59(6)	1.43152	10.71
65.29(2)	27(5)	0.59(6)	1.43152	5.36
82.27(1)	108(9)	0.44(5)	1.17094	21.02
82.52(1)	54(9)	0.44(5)	1.17094	10.51

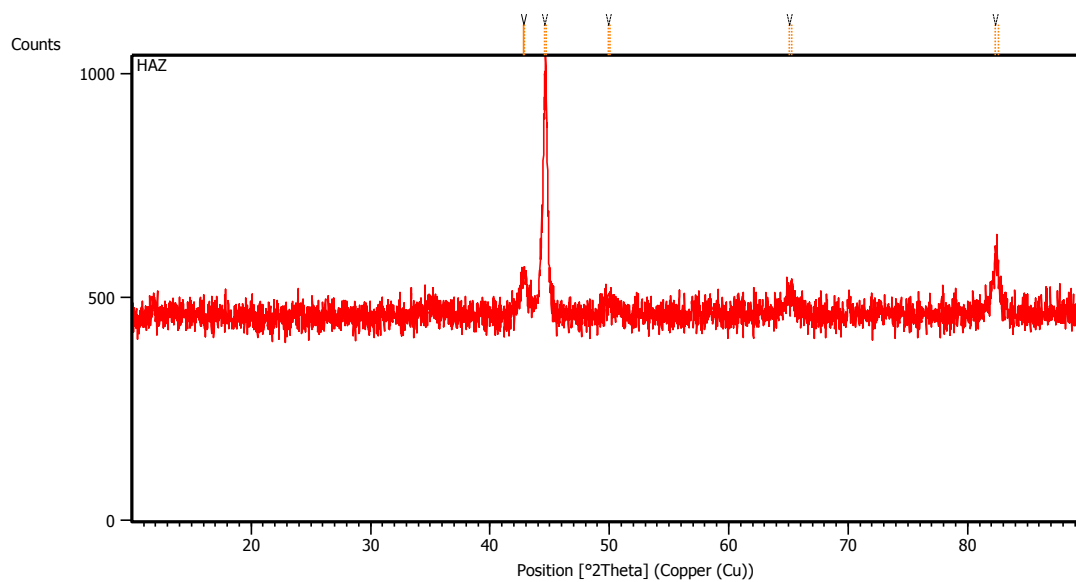
D.2 Material dengan PWHT 1 jam

❖ Logam induk (Base metal)



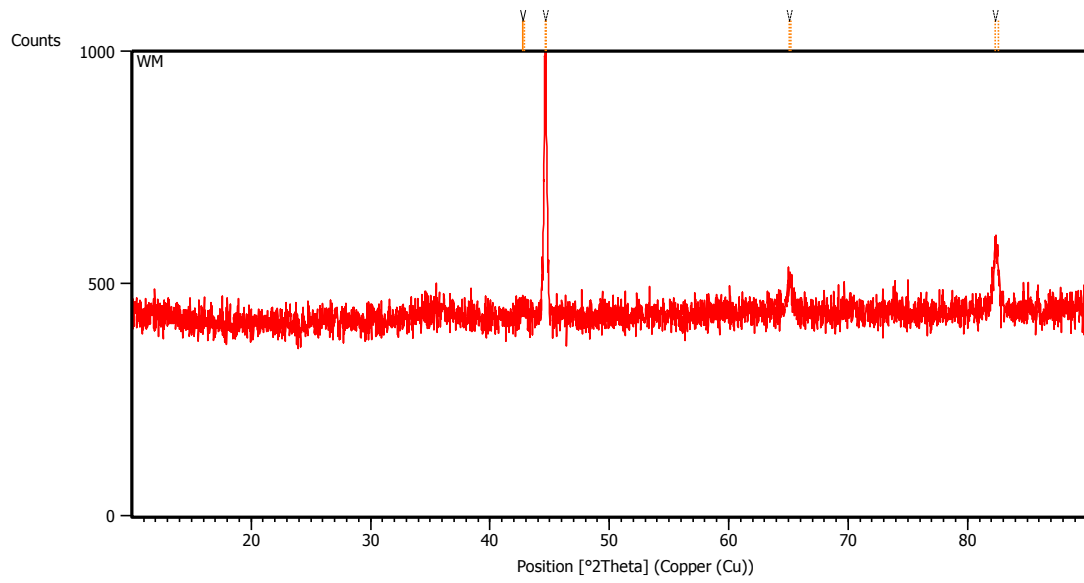
Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
10.8(2)	8(6)	0.6(5)	8.19508	1.71
10.8(2)	4(6)	0.6(5)	8.19508	0.86
11.82(4)	27(5)	0.5(2)	7.47856	5.80
11.85(4)	14(5)	0.5(2)	7.47856	2.90
42.84(3)	45(4)	0.77(8)	2.10928	9.61
42.95(3)	22(4)	0.77(8)	2.10928	4.81
44.621(3)	467(19)	0.31(1)	2.02911	100.00
44.738(3)	233(19)	0.31(1)	2.02911	50.00
49.87(7)	21(3)	1.2(2)	1.82714	4.43
50.00(7)	10(3)	1.2(2)	1.82714	2.22
65.01(4)	28(4)	0.6(2)	1.43337	5.94
65.20(4)	14(4)	0.6(2)	1.43337	2.97
82.32(1)	108(10)	0.29(5)	1.17039	23.15
82.57(1)	54(10)	0.29(5)	1.17039	11.58

❖ Heat affected zone (HAZ)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.79(3)	63(7)	0.65(8)	2.11164	15.66
42.90(3)	32(7)	0.65(8)	2.11164	7.83
44.600(4)	405(17)	0.38(1)	2.03002	100.00
44.716(4)	202(17)	0.38(1)	2.03002	50.00
49.91(7)	21(3)	1.1(1)	1.82581	5.26
50.04(7)	11(3)	1.1(1)	1.82581	2.63
65.08(4)	32(4)	0.7(2)	1.43210	7.96
65.26(4)	16(4)	0.7(2)	1.43210	3.98
82.31(2)	93(10)	0.53(6)	1.17052	22.92
82.56(2)	46(10)	0.53(6)	1.17052	11.46

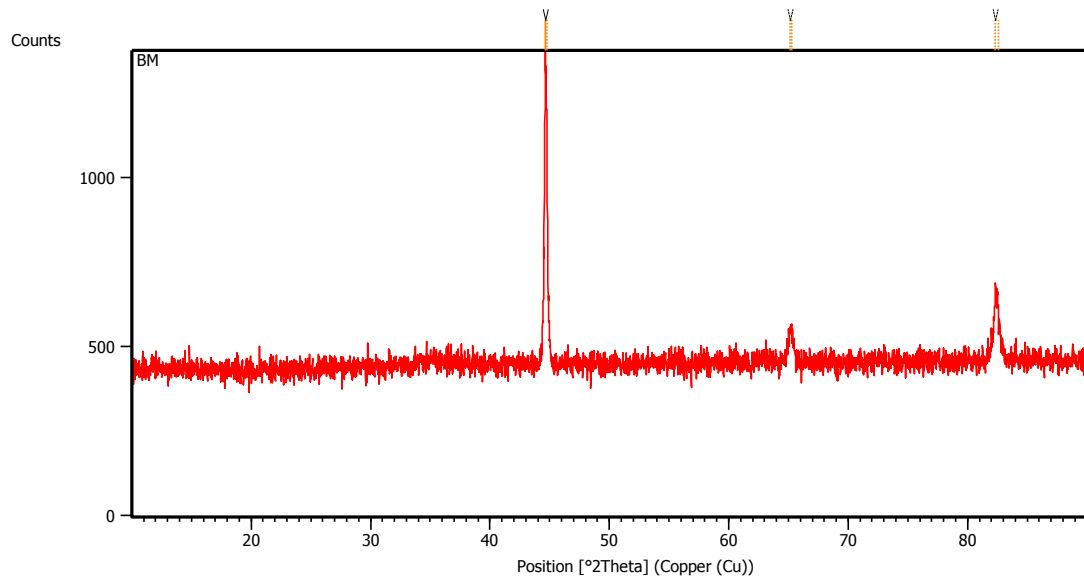
❖ Logam lasan (Weld metal)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
42.74(5)	19(5)	0.5(2)	2.11397	4.66
42.85(5)	10(5)	0.5(2)	2.11397	2.33
44.613(3)	417(11)	0.256(8)	2.02943	100.00
44.730(3)	209(11)	0.256(8)	2.02943	50.00
65.05(2)	51(7)	0.39(9)	1.43274	12.34
65.23(2)	26(7)	0.39(9)	1.43274	6.17
82.31(1)	119(10)	0.34(5)	1.17047	28.58
82.56(1)	60(10)	0.34(5)	1.17047	14.29

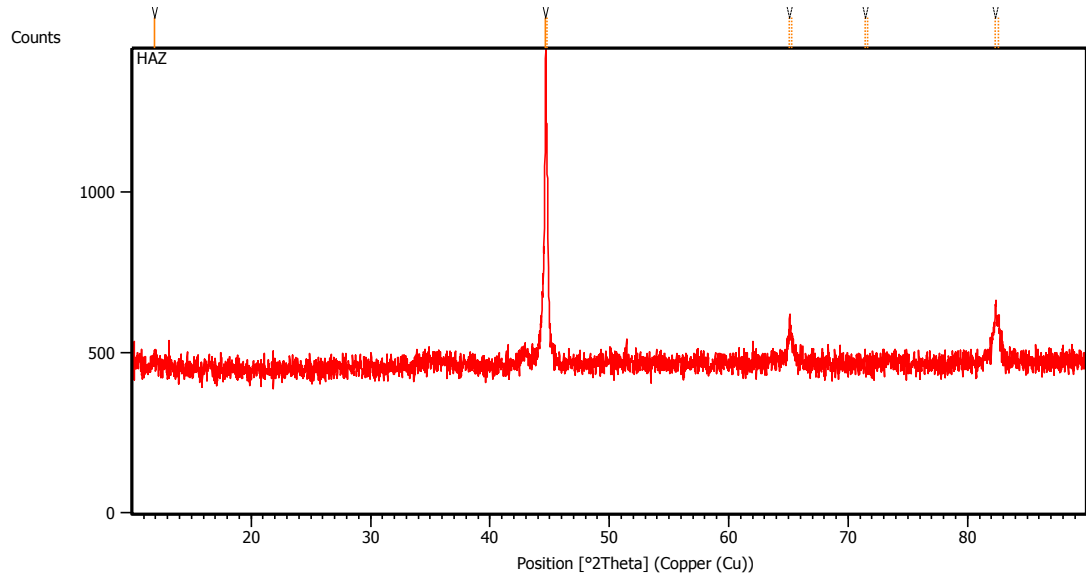
D.3 Material dengan *PWHT* 2 jam

❖ Logam induk (Base metal)



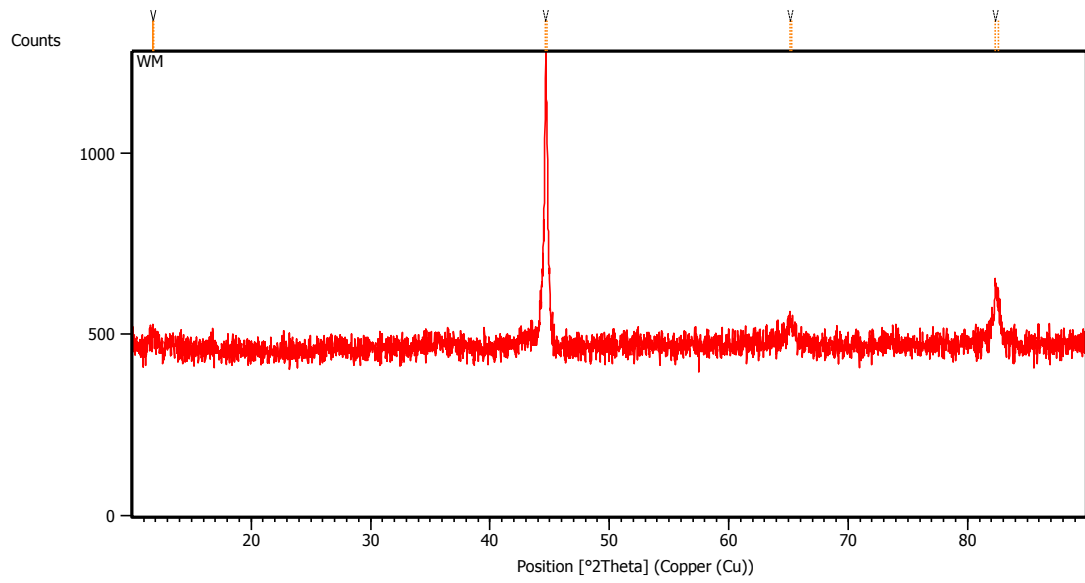
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
44.643(2)	685(19)	0.237(4)	2.02814	100.00
44.760(2)	342(19)	0.237(4)	2.02814	50.00
65.12(2)	74(6)	0.49(5)	1.43126	10.78
65.30(2)	37(6)	0.49(5)	1.43126	5.39
82.337(9)	152(8)	0.45(4)	1.17018	22.15
82.586(9)	76(8)	0.45(4)	1.17018	11.08

❖ Heat affected zone (HAZ)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.90(5)	17(4)	0.5(2)	7.42918	2.34
11.93(5)	9(4)	0.5(2)	7.42918	1.17
44.664(2)	746(25)	0.203(6)	2.02724	100.00
44.781(2)	373(25)	0.203(6)	2.02724	50.00
65.10(1)	91(12)	0.30(7)	1.43170	12.24
65.28(1)	46(12)	0.30(7)	1.43170	6.12
71.41(1)	41(13)	0.08(4)	1.31982	5.53
71.62(1)	21(13)	0.08(4)	1.31982	2.77
82.34(1)	135(11)	0.40(6)	1.17013	18.12
82.59(1)	68(11)	0.40(6)	1.17013	9.06

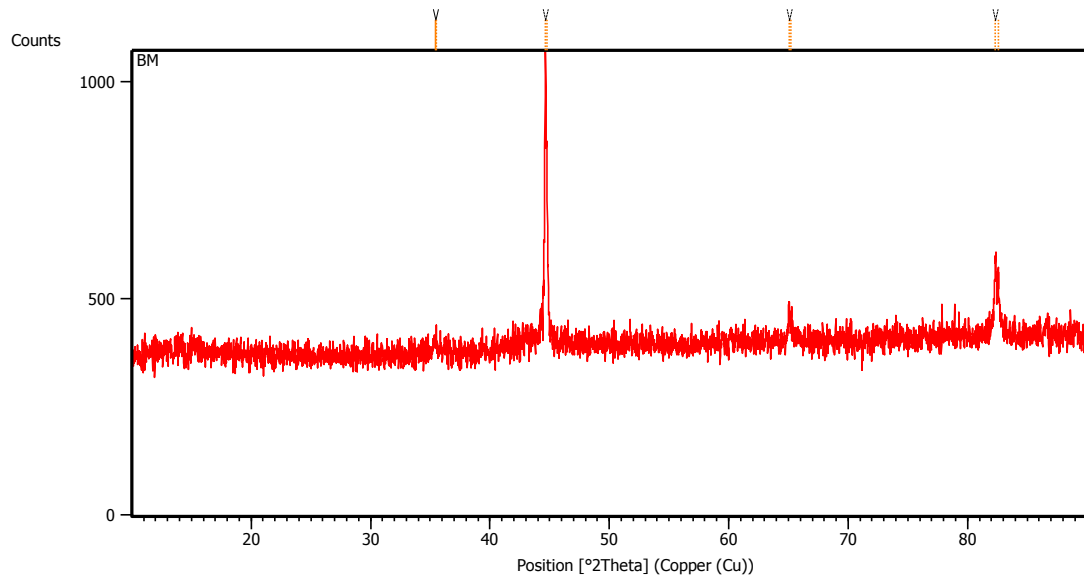
❖ Logam lasan (weld metal)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.79(5)	22(4)	0.7(2)	7.49876	3.83
11.82(5)	11(4)	0.7(2)	7.49876	1.92
44.662(2)	566(17)	0.269(9)	2.02735	100.00
44.779(2)	283(17)	0.269(9)	2.02735	50.00
65.12(3)	40(5)	0.6(1)	1.43122	7.15
65.31(3)	20(5)	0.6(1)	1.43122	3.58
82.34(1)	130(11)	0.36(5)	1.17012	22.92
82.59(1)	65(11)	0.36(5)	1.17012	11.46

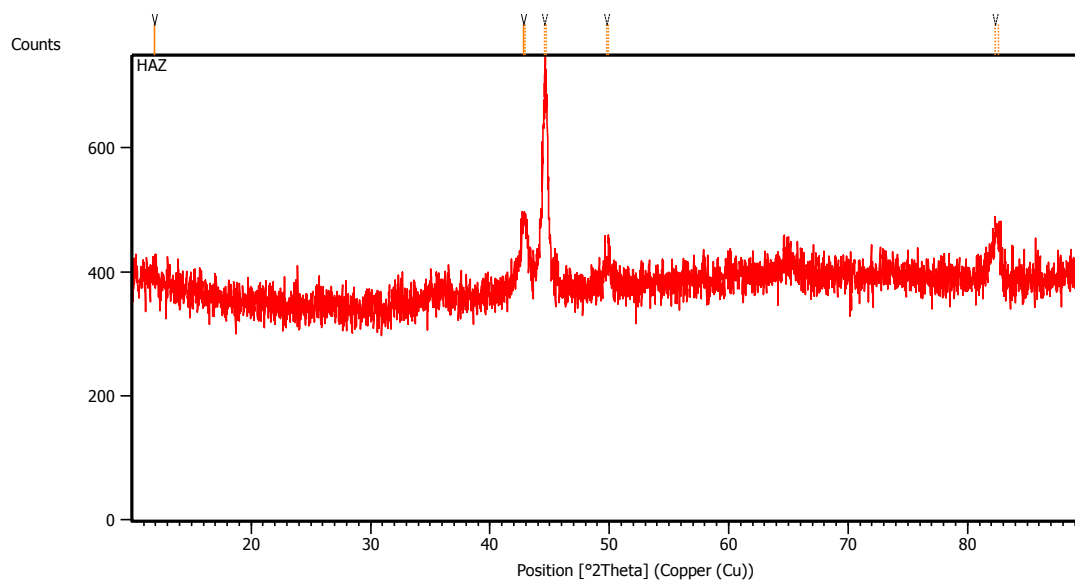
D.4 Material dengan PWHT 3 jam

❖ Logam induk (Base metal)



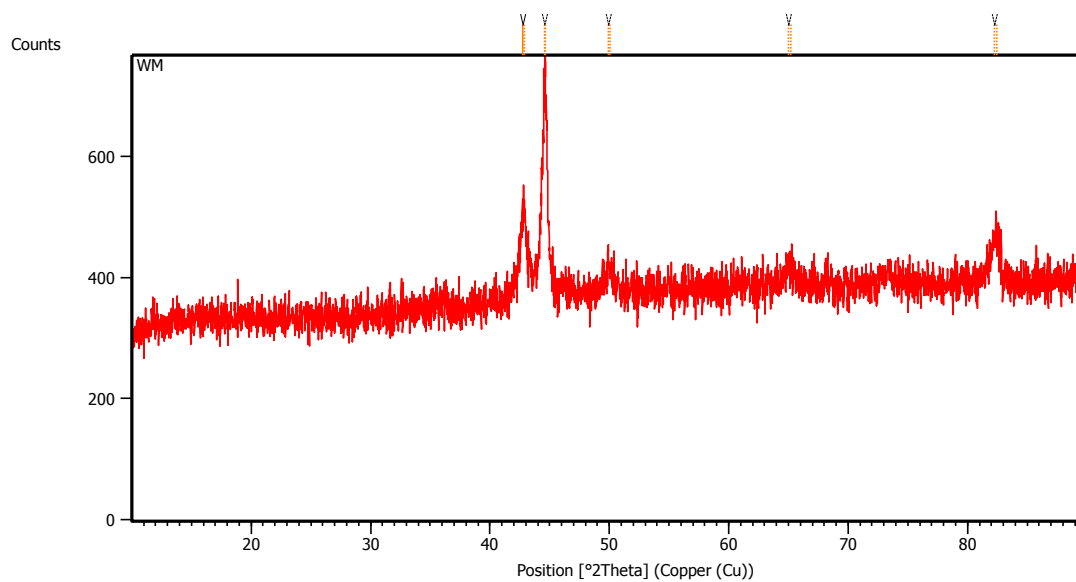
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
35.41(4)	20(7)	0.3(2)	2.53266	3.40
35.50(4)	10(7)	0.3(2)	2.53266	1.70
44.647(2)	592(19)	0.136(5)	2.02797	100.00
44.764(2)	296(19)	0.136(5)	2.02797	50.00
65.05(1)	73(12)	0.13(4)	1.43257	12.36
65.24(1)	37(12)	0.13(4)	1.43257	6.18
82.344(6)	168(11)	0.20(2)	1.17010	28.38
82.593(6)	84(11)	0.20(2)	1.17010	14.19

❖ Heat affected zone (HAZ)



Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
11.88(4)	17(4)	0.4(1)	7.44487	7.31
11.91(4)	9(4)	0.4(1)	7.44487	3.66
42.83(1)	79(4)	0.65(5)	2.10952	33.24
42.95(1)	40(4)	0.65(5)	2.10952	16.62
44.595(8)	239(11)	0.48(2)	2.03023	100.00
44.712(8)	120(11)	0.48(2)	2.03023	50.00
49.79(4)	30(4)	0.6(1)	1.82994	12.75
49.92(4)	15(4)	0.6(1)	1.82994	6.37
82.32(2)	52(4)	0.80(7)	1.17039	21.77
82.57(2)	26(4)	0.80(7)	1.17039	10.88

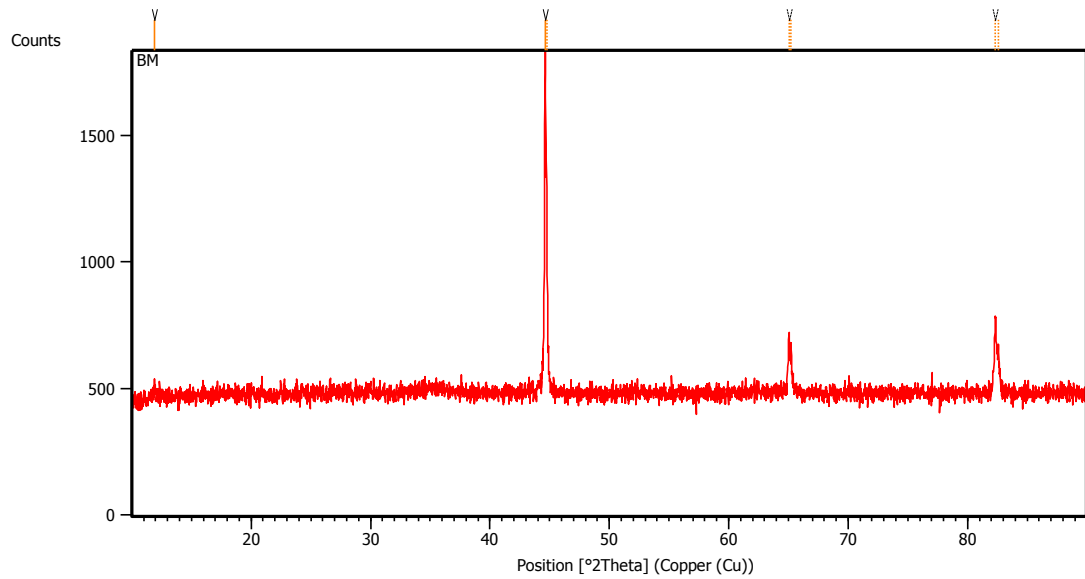
❖ Logam lasan (Weld metal)



Pos. [$^{\circ}2\text{Th.}$]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [$^{\circ}2\text{Th.}$]	d-spacing [\AA]	Rel. Int. [%]
42.77(1)	96(6)	0.63(4)	2.11237	39.31
42.89(1)	48(6)	0.63(4)	2.11237	19.65
44.554(5)	244(7)	0.46(1)	2.03201	100.00
44.670(5)	122(7)	0.46(1)	2.03201	50.00
49.91(3)	39(4)	0.38(5)	1.82572	16.03
50.04(3)	20(4)	0.38(5)	1.82572	8.01
65.02(6)	22(3)	0.9(2)	1.43333	8.81
65.20(6)	11(3)	0.9(2)	1.43333	4.41
82.22(3)	53(4)	0.85(8)	1.17158	21.50
82.47(3)	26(4)	0.85(8)	1.17158	10.75

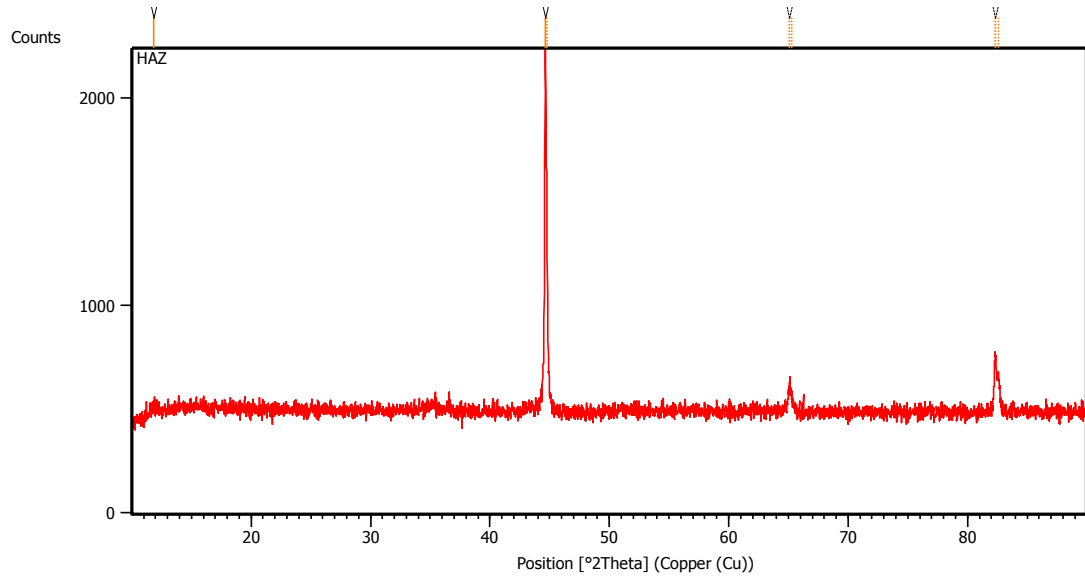
D.5 Material dengan PWHT 4 jam

❖ Logam induk (Base metal)



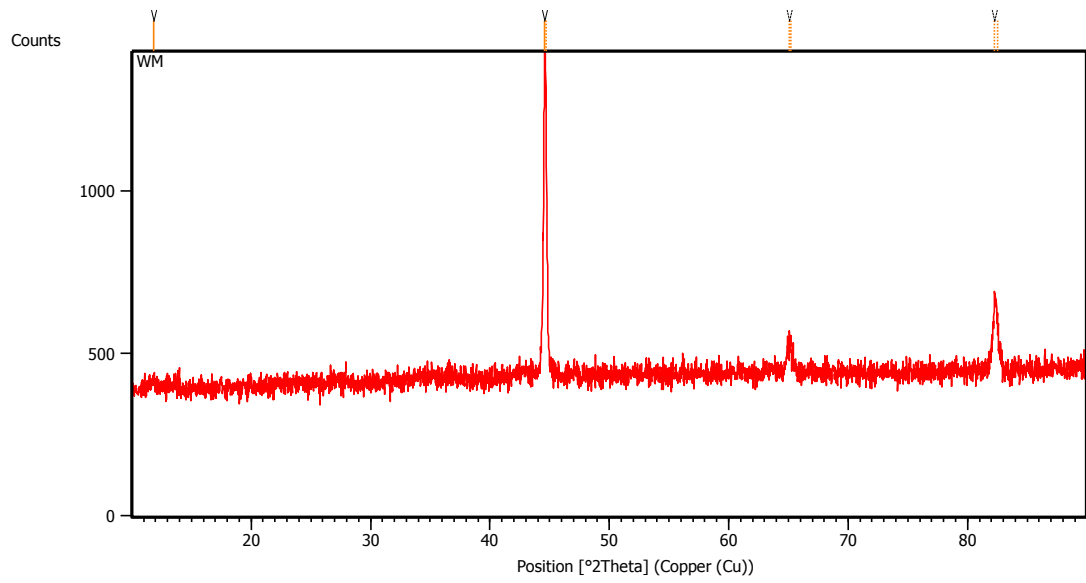
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.90(1)	45(4)	0.09(4)	7.43218	3.70
11.93(1)	22(4)	0.09(4)	7.43218	1.85
44.634(1)	1208(25)	0.126(3)	2.02856	100.00
44.751(1)	604(25)	0.126(3)	2.02856	50.00
65.047(5)	206(13)	0.18(2)	1.43272	17.09
65.229(5)	103(13)	0.18(2)	1.43272	8.54
82.335(4)	291(12)	0.20(1)	1.17020	24.07
82.584(4)	145(12)	0.20(1)	1.17020	12.03

❖ Heat affected zone (HAZ)



Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.80(5)	25(4)	0.7(1)	7.49120	1.61
11.83(5)	13(4)	0.7(1)	7.49120	0.80
44.6452(9)	1561(27)	0.133(3)	2.02806	100.00
44.7622(9)	780(27)	0.133(3)	2.02806	50.00
65.08(1)	106(12)	0.26(5)	1.43211	6.81
65.26(1)	53(12)	0.26(5)	1.43211	3.41
82.337(4)	276(11)	0.22(1)	1.17017	17.70
82.587(4)	138(11)	0.22(1)	1.17017	8.85

❖ Logam lasan (Weld metal)



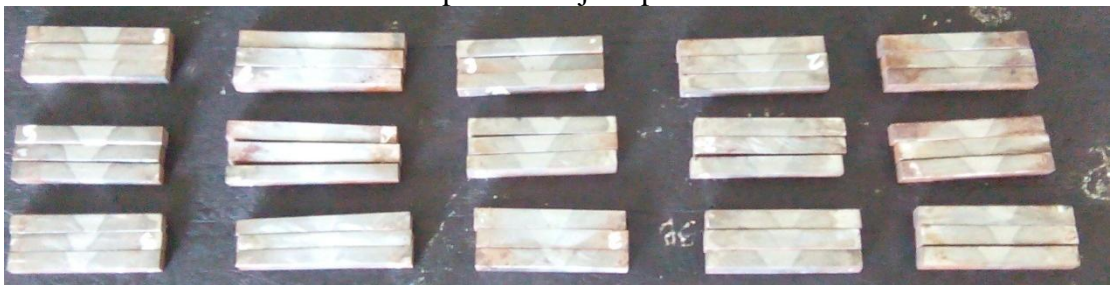
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	<i>FWHM</i> Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
11.83(4)	20(6)	0.3(2)	7.47314	2.67
11.86(4)	10(6)	0.3(2)	7.47314	1.33
44.588(2)	757(13)	0.255(5)	2.03054	100.00
44.704(2)	378(13)	0.255(5)	2.03054	50.00
65.04(2)	60(5)	0.50(6)	1.43284	7.86
65.22(2)	30(5)	0.50(6)	1.43284	3.93
82.274(8)	174(9)	0.41(3)	1.17092	23.06
82.523(8)	87(9)	0.41(3)	1.17092	11.53

Lampiran E. Spesimen Uji

E.1 Spesimen Uji Struktur Mikro dan Kekerasan



E.2 Spesimen Uji Impak



E.3 Spesimen Uji XRD



Lampiran F. Peralatan

F.1 Elektroda



F.2 Furnace dan Control



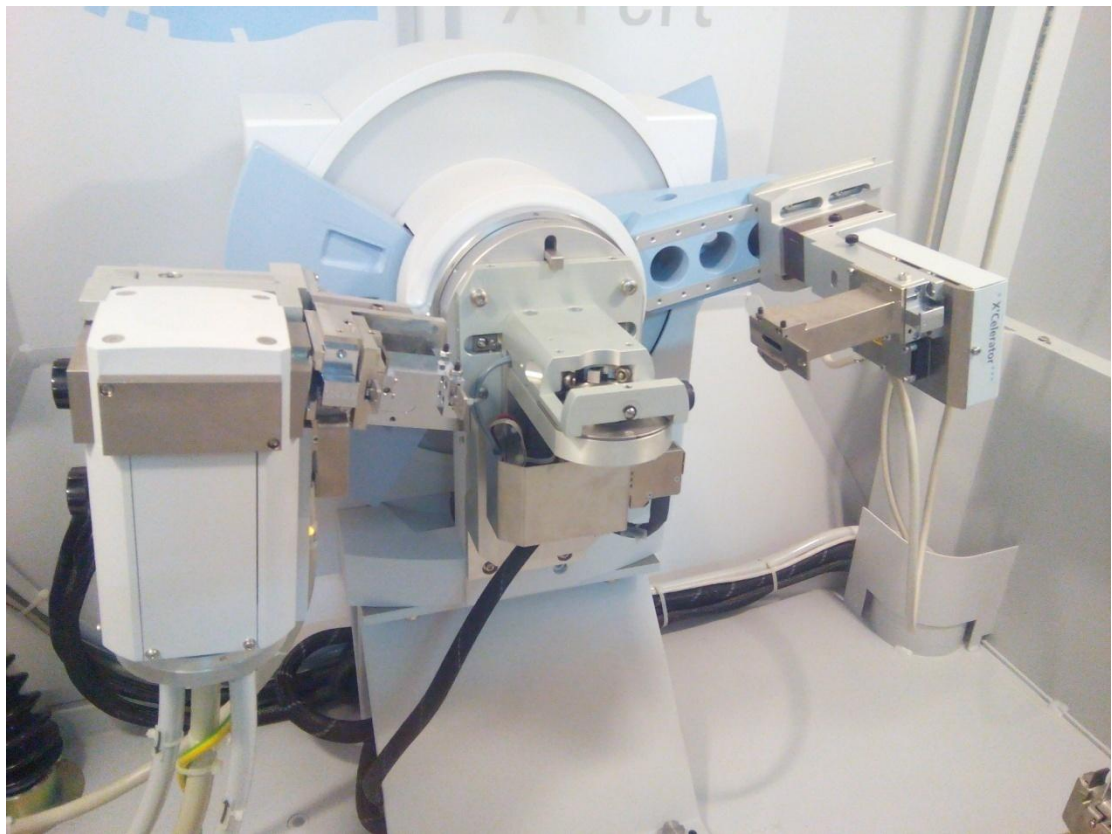
F.3 Mesin Uji Kekerasan



F.4 Chamber dan Thermocouple



F.5 Mesin XRD



Lampiran G. Hardness Conversion Table

Reference Table: Steel hardness conversion chart - all values approximate.				
Brinell	Rockwell	Rockwell	Vickers	N/mm²
HB	HRC	HRB	HV	
800	72			
780	71			
760	70			
752	69			
745	68			
746	67			
735	66			
711	65			
695	64			
681	63			
658	62			
642	61			
627	60			
613	59			
601	58		746	
592	57		727	
572	56		694	
552	55		649	
534	54	120	589	
513	53	119	567	
504	52	118	549	
486	51	118	531	
469	50	117	505	
468	49	117	497	
456	48	116	490	1569
445	47	115	474	1520
430	46	115	458	1471
419	45	114	448	1447
415	44	114	438	1422
402	43	114	424	1390
388	42	113	406	1363
375	41	112	393	1314
373	40	111	388	1265
360	39	111	376	1236
348	38	110	361	1187
341	37	109	351	1157
331	36	109	342	1118

322	35	108	332	1089
314	34	108	320	1049
308	33	107	311	1035
300	32	107	303	1020
290	31	106	292	990
277	30	105	285	971
271	29	104	277	941
264	28	103	271	892
262	27	103	262	880
255	26	102	258	870
250	25	101	255	853
245	24	100	252	838
240	23	100	247	824
233	22	99	241	794
229	21	98	235	775
223	20	97	227	755
216	19	96	222	716
212	18	95	218	706
208	17	95	210	696
203	16	94	201	680
199	15	93	199	667
191	14	92	197	657
190	13	92	186	648
186	12	91	184	637
183	11	90	183	617
180	10	89	180	608
175	9	88	178	685
170	7	87	175	559
167	6	86	172	555
166	5	86	168	549
163	4	85	162	539
160	3	84	160	535
156	2	83	158	530
154	1	82	152	515
149		81	149	500
147		80	147	490
143		79	146	482
141		78	144	481
139		77	142	480
137		76	140	475
135		75	137	467
131		74	134	461

127		72	129	451
121		70	127	431
116		68	124	422
114		67	121	412
111		66	118	402
107		64	115	382
105		62	112	378
103		61	108	373
95		56	104	
90		52	95	
81		41	85	
76		37	80	
Brinell	Rockwell	Rockwell	Vickers	N/mm²
HB	HRC	HRB	HV	
3000kg	150kg	100kg	Diamond Pyramid	Tensile strength (Approx)
10mm Ball	Brale	1/16" Ball	120kg	

BIOGRAFI PENULIS



Penulis bernama lengkap Immanuel Freddy Augustino, dilahirkan di Kediri, Jawa Timur pada tanggal 16 Maret 1992. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal selama dua belas tahun, yaitu di SD Mardi Sunu Surabaya, SMPN 4 Surabaya, SMAN 4 Surabaya. Penulis melanjutkan pendidikan ke program Diploma 4 di Jurusan Teknik Bangunan Kapal bidang minat Teknik Pengelasan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, melalui jalur PMDK Tahun 2009. Setelah lulus dari program diploma, penulis kemudian melanjutkan pendidikan ke Program Magister di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya melalui Program Beasiswa *Fresh Graduate* 2013. Selama aktif sebagai mahasiswa, penulis juga bekerja sebagai guru les. Penulis menyelesaikan studi magister dengan mengambil topik “Analisa Pengaruh Lama Waktu Tunggu pada Proses *PWHT* Terhadap Sifat Mekanik, Struktur Mikro dan Tegangan Sisa pada Pengelasan Baja AAR M201 Gr.B⁺” dengan dosen pembimbing Bapak Prof. Dr. Ir. Sulistijono, DEA.