



PENGARUH VARIASI TEMPERATUR POST WELD HEAT TREATMENT FULL ANNEALING PADA MATERIAL SA 516 G 70 TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN KETANGGUHAN

**Fauzy Widya Syaiful Ashari^{a*}, Akhmad Hafizh Ainul Rasyid^a,
Mochamad Arif Irfa'I^a, Novi Sukma Drastiawati^a**

^a Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

E-mail koresponden: fauzy.19024@mhs.unesa.ac.id

Abstract

SA 516 G70 material is a special material classified as low carbon steel, which is used as raw material for pressure vessels. SMAW welding is commonly utilized to connect parts of a pressure vessel. However, there are problems in the welding process, such as deformation of the metal structure and the occurrence of residual stresses, which may weaken the strength of the connection. To fix the issue, Post weld Heat Treatment Full Annealing is employed. This study aims to determine the effect of Post Weld Heat Treatment Full Annealing temperature on tensile strength, toughness, and microstructure. This research involved performing SMAW on SA 516 G70 material, followed by subjecting it in PWHT Full Annealing, then it maintained for one hour and cooled gradually. The type of research employed is a quantitative method with temperature variations of 800°C, 825°C, and 850°C. Subsequently, the materials underwent examination through tensile testing, impact testing, and microstructure observation. The results of this study demonstrate that the temperature fluctuation during PWHT Full Annealing has an impact on the outcomes of tensile testing, impact testing, and microstructure analysis. With the most significant temperature at 850° C with a tensile stress of 449.985 MPa, an impact price of 3.174 J/mm², has a microstructure of pearlite grains and the coarsest ferrite grains. This suggests that the material displays ductility and toughness.

Keywords: SA 516 G70 material, Pressure Vessel, Post weld Heat Treatment Full Annealing

Abstrak

Material SA 516 G70 adalah material khusus yang tergolong baja karbon rendah, yang digunakan sebagai bahan baku *pressure vessel*. Untuk menyambungkan bagian dari *pressure vessel*, pada umumnya menggunakan pengelasan SMAW. Namun terdapat permasalahan pada proses pengelasan yaitu, berubahnya struktur logam dan munculnya tegangan sisa, sehingga dapat mengurangi kekuatan sambungan. Untuk memperbaiki masalah tersebut, dilakukan *Post weld Heat Treatment Full Annealing*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing* terhadap kekuatan tarik, ketangguhan, dan struktur mikro. Pada penelitian ini dilakukan pengelasan SMAW pada material SA 516 G70, kemudian diberikan PWHT *Full Annealing*, ditahan selama 1 jam dan didinginkan dengan lambat. Jenis penelitian yang digunakan adalah metode kuantitatif dengan variasi temperatur 800°C, 825°C, dan 850°C. Kemudian diuji menggunakan pengujian tarik, pengujian impak, dan pengamatan struktur mikro. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa variasi temperatur PWHT *Full Annealing* berpengaruh terhadap hasil pengujian tarik, pengujian impak, dan struktur mikro. Dengan temperatur yang paling signifikan yaitu pada 850° C dengan Tegangan tarik sebesar 449,985 MPa, harga impak sebesar 3,174 J/mm², memiliki struktur mikro butir *pearlite* dan butir *ferrite* yang paling kasar. Yang menandakan bahwa material tersebut ulet dan tangguh.

Kata kunci: Material SA 516 G70, Pressure Vessel, Post weld Heat Treatment Full Annealing

1. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas merupakan sektor yang sangat penting bagi kelangsungan hidup umat manusia baik dalam hal pemenuhan energi maupun proses pembangunan. Pada proses produksi, penyimpanan, ataupun distribusi minyak dan gas banyak menggunakan peralatan yang menggunakan material baja, hal ini tak lepas dari sifat material baja yang memiliki ketahanan tinggi terhadap tekanan serta temperatur yang tinggi. Salah satu material yang cocok untuk digunakan pada peralatan industri minyak dan gas seperti *pressure vessel* dan boiler adalah plat SA 516 G70 yang tergolong kedalam baja karbon rendah,

material ini digunakan karena sifatnya yang tahan terhadap temperatur tinggi dan hasil yang baik pada sifat mekaniknya [1].

Untuk menyambungkan tiap lembaran plat pada proses produksi *pressure vessel*, pada umumnya menggunakan metode pengelasan SMAW. Pengelasan SMAW dipilih karena biaya yang murah dan dapat digunakan pada berbagai macam posisi pengelasan. Pengelasan SMAW atau bisa juga disebut las dengan elektroda terlindungi adalah metode penyambungan logam dengan menggunakan busur nyala listrik sebagai sumber panasnya dan menggunakan elektroda logam yang dibungkus dengan fluks. Metode las ini juga paling umum dipakai hampir disemua keperluan pengelasan material, selain itu pengelasan SMAW juga tergolong sebagai metode las yang sederhana juga memiliki fleksibilitas yang paling besar karena mudah dipindahkan serta dapat dioperasikan disemua posisi pengelasan [2], seperti diketahui dimensi *pressure vessel* yang bisa sangat besar dan bentuknya yang menyerupai tabung tentu membutuhkan fleksibilitas selama proses pengerjaannya. Selain memiliki beberapa kelebihan pengelasan juga menimbulkan beberapa permasalahan, yaitu berubahnya struktur logam pada area pengelasan dan sekitarnya akibat dari perbedaan temperatur pada weld metal dan logam induk, sehingga terjadi pemuaihan thermal yang tidak merata, timbulnya tegangan sisa dan adanya potensi cacat las. Tegangan sisa yang berlebih dari proses pengelasan merupakan potensi bahaya pada proses produksi *pressure vessel*, karena akan mempengaruhi sifat material dan kekuatan sambungan las apabila dibiarkan tanpa diberi perlakuan khusus. Untuk memperbaiki struktur logam dan mengurangi tegangan sisa tersebut maka diperlukan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment*.

Post weld Heat Treatment Full Annealing adalah metode perlakuan panas yang bertujuan untuk memperbaiki struktur dan mengurangi tegangan sisa yang dihasilkan dari proses penyambungan material menggunakan las SMAW. Dengan diberi perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* juga dapat meningkatkan dan memperbaiki sifat sambungan las juga meningkatkan keuletan material. *Post weld Heat Treatment Full Annealing* diawali dengan memanaskan material hingga mencapai temperatur diatas rentang transformasi Ac3 yaitu diatas 800°C. Setelah material berada pada temperatur target, kemudian dilakukan penahanan pada temperatur tersebut selama rentang waktu tertentu dan dilakukan pendinginan material dengan laju pendinginan yang lambat.

Pada penelitian yang dilakukan oleh Maulana Fahmi Choirudin pada tahun 2018 [1] yang membahas mengenai pengaruh waktu tahan pada proses *Post weld Heat Treatment Annealing* terhadap material SA 516 Grade 70 dengan temperatur 630°C dan waktu tahan 0,5 jam, 1 jam, 1,5 jam, hingga 2 jam. Menghasilkan kesimpulan yaitu, semakin lama waktu tahan pada proses *Post weld Heat Treatment Annealing* menyebabkan penurunan pada nilai kekuatan tarik dan nilai kekerasan, kemudian pada struktur mikro yang dihasilkan setelah proses *Post weld Heat Treatment Annealing* tidak terjadi perubahan yang signifikan jika dibanding dengan tanpa *Post weld Heat Treatment*.

Pada penelitian Ade Amelia Sapriana pada tahun 2022 [4], menunjukkan bahwa pada proses pengelasan SMAW material pipa ASTM A106 yang diberikan perlakuan panas PWHT *Annealing* dengan variasi temperatur 350°C, 550°C, dan 750°C dengan waktu tahan 60 menit yang kemudian dilakukan pengujian bending dan uji kekerasan. Menghasilkan kesimpulan yaitu, perubahan yang paling signifikan berada pada temperatur 750°C, pada temperatur tersebut terjadi perubahan pada sifat mekaniknya, yaitu peningkatan pada kekuatan bending dan penurunan pada kekerasan materialnya.

Terdapat beberapa hal yang dapat dievaluasi dari kedua penelitian tersebut, yaitu pada penelitian Choirudin [1] belum menunjukkan akibat yang akan terjadi jika dilakukan perubahan temperatur pada proses *Post weld Heat Treatment Annealing*. Kemudian, pada waktu tahan yang menghasilkan perubahan paling signifikan pada penelitian tersebut adalah selama 2 jam. Namun, berdasarkan ASME *Section VIII Division 1* tahun 2019, menjelaskan bahwa untuk material baja karbon rendah dengan ketebalan dibawah 25 mm dapat dilakukan PWHT dengan waktu tahan minimal 15 menit dan maksimal 1 jam [3]. Tentunya seiring dengan semakin lama waktu tahan, akan membutuhkan waktu serta sumber daya yang lebih banyak. Pada penelitian Ade Amelia Sapriana, belum menunjukkan struktur mikro yang muncul akibat perubahan temperatur *Post Weld Heat Treatment*, dan dilihat dari hasil yang diperoleh pada penelitian tersebut, dapat dilakukan peningkatan temperatur lebih tinggi lagi untuk memperoleh hasil yang lebih optimal.

Maka dari itu pada penelitian “Pengaruh Variasi Temperatur *Post Weld Heat Treatment Full Annealing* pada Material Sa 516 G 70 Terhadap Kekuatan Tarik dan Ketangguhan” dengan memberikan perlakuan panas *Post Weld Heat Treatment Full Annealing* dengan variasi temperatur 800°C, 825°C, dan 850°C, menggunakan waktu tahan maksimal sesuai ketentuan ASME, yaitu selama 1 jam. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh temperatur *Post Weld Heat Treatment Full Annealing* terhadap kekuatan tarik, ketangguhan dan struktur mikro dari material SA 516 Grade 70.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pressure Vessel

Pressure vessel atau bejana tekan adalah suatu wadah tertutup yang di desain agar mampu menyimpan suatu fluida bertekanan maupun tidak, baik dalam bentuk cair ataupun gas, dan mampu menahan berbagai macam beban lainnya. *Pressure vessel* digunakan pada berbagai macam aplikasi di banyak sektor industri seperti industri kimia, energi, migas (minyak dan gas), bahkan sampai pada peralatan rumah tangga.

Kegagalan yang terjadi selama proses perancangan dan pembuatan *Pressure vessel* dapat menimbulkan bahaya kecelakaan, seperti terjadinya bahaya yang terjadi apabila timbul ledakan hingga mengakibatkan korban jiwa dan kerusakan lingkungan. Kegagalan yang terjadi dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti desain awal yang tidak tepat, penggunaan material yang tidak sesuai, proses fabrikasi yang tidak tepat, serta perawatan yang kurang memadai [5][6].

2.2. Material SA 516 Grade 70

Umumnya, *Pressure vessel* yang kebanyakan menggunakan material SA 516 Grade 70. Material SA 516 G70 adalah material dengan kekuatan mekanik yang baik, mudah untuk diproses mesin, fabrikasi dan dapat dilas dengan baik. Material SA 516 G70 tergolong kedalam baja karbon rendah dengan kadar karbon maksimal 0,25%, struktur mikro dari baja karbon rendah terdiri dari unsur *ferrite* dan *pearlite*, sehingga sifatnya relatif lunak dan lemah tetapi memiliki keuletan dan ketangguhan yang luar biasa. Proses penyambungan pada material baja karbon rendah pada umumnya menggunakan metode pengelasan. [7] [8]. Berikut ini adalah komposisi dari material SA 516 G70.

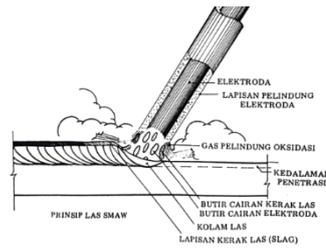
Tabel 1. Komposisi Kimia Material SA 516 G70

Komposisi Kimia	Persentase Berat
(C) Karbon	0,18 %
(Si) Silikon	0,22 %
(Mn) Mangan	1,07 %
(P) Fosfor	0,007 %
(S) Sulfur	0,003 %
(Nb) Niobium	<0,005 %
(Cu) Tembaga	0,01 %
(Cr) Krom	0,03 %
(Ni) Nikel	0,04 %
(Mo) Molybdenum	<0,005 %
(V) Vanadium	<0,002 %
(Al) Aluminium	0,06 %
(Ti) Titanium	<0,002 %
(N) Nitrogen	0,003 %
(B) Boron	<0,0005 %

2.3. Pengelasan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*)

Pengelasan merupakan metode penyambungan benda padat secara permanen dengan cara memanaskan logam tersebut hingga mencapai titik cairnya. Las sendiri merupakan ikatan metalurgi pada suatu sambungan logam atau paduan logam yang terjalin dalam kondisi logam tersebut lumer atau cair. Pengelasan termasuk metode yang paling banyak digunakan dalam proses penyambungan dua buah material logam agar menyatu dan dengan harapan hasil sambungan las tersebut dapat memiliki sifat yang menyerupai logam induk. Dari sekian banyak metode pengelasan yang ada, terdapat dua metode pengelasan yang banyak digunakan di Indonesia, yaitu *Shielded Metal Arc Welding* atau pengelasan dengan elektroda terlindungi, dan juga *Oxy Acetylene Welding* atau biasa disebut dengan las karbit [9] [2].

Pengelasan SMAW atau bisa juga disebut las dengan elektroda terlindungi adalah metode penyambungan logam dengan menggunakan busur nyala listrik sebagai sumber panasnya dan menggunakan elektroda logam yang dibungkus dengan fluks. Metode las ini juga paling umum dipakai hampir disemua keperluan pengelasan material, selain itu pengelasan SMAW juga tergolong sebagai metode las yang sederhana juga memiliki fleksibilitas yang paling besar karena dapat dioperasikan disemua posisi pengelasan [2].



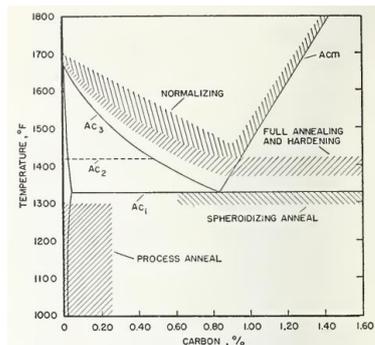
Gambar 1. Prinsip Pengelasan SMAW [9]

Prinsip dari pengelasan SMAW adalah apabila dua logam yang konduktif diberi aliran listrik cukup tinggi dengan tegangan yang tergolong rendah, maka akan menyebabkan loncatan elektron yang akan menimbulkan panas yang sangat tinggi, sehingga akan dengan mudah untuk melelehkan bagian ujung elektroda dan juga logam induk. Pada saat proses pengelasan logam inti dan fluks akan mencair secara bersamaan dan mengisi celah pada logam induk, karena berat jenis fluks elektroda lebih ringan dari bahan logam yang mencair, fluks yang mencair tersebut akan mengapung diatas cairan logam dan membentuk *slag* atau terak las yang akan mengisolasi jalur las dari udara luar, sehingga akan mencegah logam dari oksidasi.

2.4. Post Weld Heat Treatment Full Annealing

Dalam pengertian yang berbeda *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) adalah suatu rangkaian proses pemanasan dan pendinginan suatu material dalam kondisi padat yang dilakukan setelah proses pengelasan untuk memperoleh atau memperbaiki sifat maupun kemampuan material yang dibutuhkan untuk suatu konstruksi seperti kekuatan (*strength*), kelunakkan (*softness*), ataupun memperhalus ukuran butir. [4].

Sedangkan *Full Annealing* adalah proses pelunakan dengan cara memanaskan material hingga temperatur di atas rentang transformasi (Ac_3) dan, setelah ditahan selama waktu yang cukup pada temperatur ini, kemudian didinginkan perlahan hingga temperatur kamar. *Full annealing* pada umumnya digunakan pada baja karbon rendah dan sedang, yang akan dikerjakan dengan mesin atau akan mengalami deformasi plastis selama proses pembentukan. Pada umumnya, material dipanaskan hingga temperatur sekitar $50^\circ C$ di atas garis Ac_3 untuk membentuk austenit. Material tersebut kemudian didinginkan dengan cara mematikan furnace. Sehingga baik furnace maupun material, mendingin ke temperatur kamar pada kecepatan yang sama, yang memakan waktu beberapa jam. Mikrostruktur yang terbentuk adalah *pearlite* kasar yang relatif lunak dan ulet [10][8].



Gambar 2. Temperatur perlakuan panas. [10]

Proses perlakuan panas terdiri dari mengkondisikan logam ke dalam siklus waktu - temperatur tertentu, yang terbagi menjadi tiga bagian, yaitu:

a) Pemanasan (*Heating*)

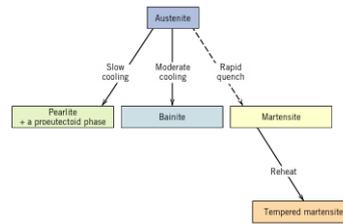
Pemanasan adalah proses untuk menaikkan temperatur material hingga berada diatas atau dibawah temperatur kritis suatu material. Pada material yang berada dalam kondisi yang memiliki tegangan tinggi akibat pengerjaan dingin maupun proses pengelasan, laju pemanasan harus diperhatikan agar tidak terjadi retak.

b) Menahan temperatur (*Holding*)

Holding adalah menahan temperatur material sesuai dengan temperatur pemanasan, untuk memastikan keseragaman temperatur di seluruh material.

c) Pendinginan (*Cooling*).

Pendinginan adalah proses penurunan temperatur suatu material dengan kecepatan tertentu. Kecepatan pendinginan juga perlu diperhatikan karena struktur mikro dan sifat material bergantung pada laju pendinginan yang digunakan.



Gambar 3. Pengaruh pendinginan terhadap struktur mikro [8]

Terdapat pengertian dari fasa yang terbentuk akibat kecepatan pendinginan yang tergolong lambat, yaitu:

a) *Pearlite* ($\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$)

Pendinginan yang berlangsung dengan lambat akan menghasilkan struktur *pearlite* yang besar dan kasar, sedangkan pendinginan yang lebih cepat akan menghasilkan struktur *pearlite* yang kecil dan halus. *pearlite* terdiri atas campuran *ferrite* dan sementit berlapis dalam suatu struktur butir. Struktur *pearlite* memiliki kekuatan tarik $\pm 84 \text{ kg/mm}^2$, keuletan berkisar 20% dan kekerasan 95 – 100 R_B. Namun pada material dengan struktur *pearlite* yang kasar akan menghasilkan kekuatan yang lebih rendah dari struktur *pearlite* halus. Struktur *pearlite* umumnya ditunjukkan oleh area yang memiliki warna gelap.

b) *Ferrite*

Ferrite adalah larutan padat karbon dalam suatu besi α . Struktur *ferrite* memiliki kekuatan tarik yang rendah yaitu $\pm 28 \text{ kg/mm}^2$, namun memiliki keuletan yang tinggi hingga mencapai 40% dan kekerasan yang kurang dari 90 R_B. Struktur *ferrite* umumnya ditunjukkan oleh area yang memiliki warna terang.

2.5. Pengujian Tarik

Pengujian tarik adalah salah satu metode pengujian merusak (*Destructive Test*) pada suatu material yg bertujuan untuk mengetahui sifat-sifat mekanik dari suatu material. Pada pengujian tarik, spesimen akan mengalami beban tarik secara uniaksial sehingga spesimen akan bertambah panjang.[11]. Hampir seluruh material memiliki kelemahan dalam menerima tegangan tarik yang uniform pada bagian penampangannya. Maka dari itu pengujian tarik paling sering digunakan untuk menentukan kekuatan suatu material [12].

Pengujian ini tarik bisa memberikan data – data yang sangat berguna khususnya di bidang produksi material, pengembangan material paduan baru, serta desain untuk sebuah produk. Data tersebut berisi sifat mekanik material, diantaranya :

a) kekuatan tarik maksimal

Merupakan suatu kemampuan material untuk menerima pembebanan tanpa terjadi deformasi plastis.

b) kekuatan luluh

Merupakan suatu kemampuan material untuk menerima pembebanan atau tegangan tanpa mengakibatkan material tersebut menjadi rusak atau putus.

c) keuletan

Merupakan suatu kemampuan material untuk berdeformasi secara plastis tanpa terjadi patah pada material tersebut, keuletan dapat diketahui dengan mengukur besarnya regangan plastis yang terjadi pada spesimen setelah material diuji hingga putus.

2.6. Uji Impak Charpy

Pengujian impak adalah salah satu metode pengujian untuk mengetahui ketangguhan material pada pembebanan yang mendadak, juga untuk menguji kecenderungan terjadinya patahan (*fracture*) pada suatu material. Suatu material dapat patah saat menerima beban secara mendadak, jika pada material tersebut terdapat konsentrasi tegangan, berada pada temperatur yang rendah, dan kecepatan tegangan yang tinggi. [11].

Pengujian impact yang sering digunakan adalah metode impact Charpy [12]. Spesimen uji yang digunakan pada uji impact adalah spesimen yang memiliki takikan dibagian tengahnya, yang kemudian dipukul dengan sebuah bandul dengan laju pembebanan yang tinggi. Takikan pada spesimen bertujuan untuk daerah konsentrasi tegangan sehingga energi dapat diserap pada satu titik. Sifat dan karakteristik material yang bisa diperoleh dari pengujian tarik diantaranya :

a) Kekuatan Impact (Impact Strength)

Kekuatan Impact menunjukkan besarnya energi untuk mematahkan spesimen uji. Kekuatan impact ini bisa juga disebut ketangguhan, khususnya pada beban kejut dan batang uji bertakik. Bahan yang tangguh memiliki nilai kekuatan impact yang tinggi.

b) Pola Patahan

Pengujian impact dapat digunakan untuk mengamati pola patahan yang terjadi. Jenis patahan pada material dapat berupa patah getas, patah ulet atau patah campuran.

2.7. Uji Metalografi

Uji metalografi adalah metode pengujian yang bertujuan untuk mengetahui struktur mikro suatu material. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk menganalisa butir, struktur, fase, dan dimensi dari suatu material logam. Pengujian ini menggunakan mikroskop optik, yang berfungsi untuk melihat objek yang ukurannya sangat kecil dengan pembesaran hingga ribuan kali, yang tidak bisa dilihat langsung dengan mata manusia. Hingga saat ini Mikroskop optik masih menjadi pilihan bagi para peneliti untuk mengamati struktur mikro dari suatu material [11].

Sifat fisis dan sifat mekanik dari suatu material ditentukan oleh struktur mikro dari material tersebut, yang ditunjukkan dengan besar, bentuk, dan orientasi butirnya, jumlah fasa, proporsi dan sufat dimana butir tersusun dan terdistribusi [1].

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kuantitatif, yaitu jenis penelitian yang datanya berupa angka-angka dan dianalisis dengan menggunakan statistik.

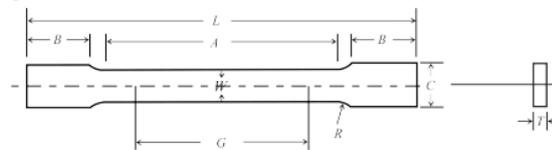
Data yang terdapat pada penelitian ini didapatkan melalui eksperimen, yang dilakukan dengan pengujian tarik dan impact. Sehingga dapat mengetahui pengaruh variasi temperatur pada proses *post weld heat treatment full annealing* terhadap kekuatan tarik, ketangguhan dan struktur mikro material SA 516 G70.

3.1. PWHT Full Annealing

PWHT Full Annealing menggunakan furnace dengan merk Linn Electro Therm yang memiliki temperatur maksimal 1200 °C. temperatur PWHT Full Annealing yang digunakan yaitu 800°C, 825°C, dan 850°C.

3.2. Spesimen Uji Tarik

Standar yang digunakan untuk material logam adalah ASTM E8 berdasarkan rekomendasi AWS B4.0 tahun 2016. Menggunakan mesin uji Tarno Grocki dengan kapasitas maksimal 15000 Kg, dan spesimen sebagai berikut.



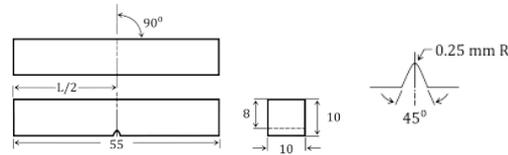
Gambar 4. Spesimen Uji Tarik

Keterangan :

L (Panjang spesimen)	: 200 mm
B (Panjang grip)	: 50 mm
A (Panjang bagian yang tereduksi)	: 57 mm
W (Lebar)	: 12,5 mm
C (Lebar grip)	: 20 mm
T (Ketebalan)	: 7 mm
R (Jari – jari fillet)	: 12,5 mm
G (Panjang gage)	: 50 mm

3.3. Spesimen Uji Impak

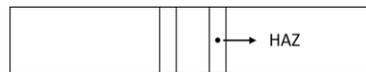
Standar pengujian impact charpy yang digunakan adalah ASTM E23 berdasarkan rekomendasi ASTM A370 tahun 2016 dan AWS B4.0 tahun 2016. Menggunakan mesin Universal Impact Tester Hung Ta, dengan berat pendulum 26,32 Kg dan panjang lengan pendulum 0,647 m, sudut awal (α) sebesar 150° dan dimensi spesimen sebagai berikut.



Gambar 5. Spesimen Uji Impak

3.4. Spesimen Uji Metalografi

Standar Uji Metalografi yang digunakan adalah ASTM E3. Menggunakan mikroskop optik dengan perbesaran 300 kali dan resolusi 20 μm . Spesimen yang digunakan berukuran panjang 55 mm dan lebar 10 mm. Pengujian metalografi dilakukan pada area HAZ, seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 6. Spesimen Uji Mikro

3.5. Objek penelitian

Objek yang digunakan pada penelitian ini adalah hasil pengelasan dari material plat SA 516 G70 yang diberikan perlakuan panas *post weld heat treatment full annealing* yang diberikan variasi temperatur 800°C , 825°C , dan 850°C . Spesimen uji yang digunakan adalah material SA 516 G70 ketebalan 10 mm dengan pengelasan *Butt joint single V* dengan sudut 60° .

3.6. Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

a) Variabel Bebas

Adapun variabel bebas dari penelitian ini adalah temperatur pada perlakuan panas, *post weld heat treatment full annealing*, dengan variasi temperatur yaitu 800°C , 825°C , dan 850°C .

b) Variabel Terikat

Adapun variabel terikat dari penelitian ini adalah hasil uji tarik, hasil uji impact, dan struktur mikro dari pengujian metalografi pada spesimen material SA 516 G70.

c) Variabel Kontrol

Adapun variabel kontrol dari penelitian ini adalah :

a) Plat SA 516 Grade 70 ketebalan 10 mm

b) Juru las yang berpengalaman.

c) Proses pengelasan SMAW menggunakan mesin las Miller Big Blue 600 X yang memiliki tegangan maksimal 92 Volt dan arus 55 – 600 Ampere. Menggunakan parameter yang sesuai dengan AWS B2.1/B2.1M [13], dan AWS A5.1/A5.1M [14] diantaranya:

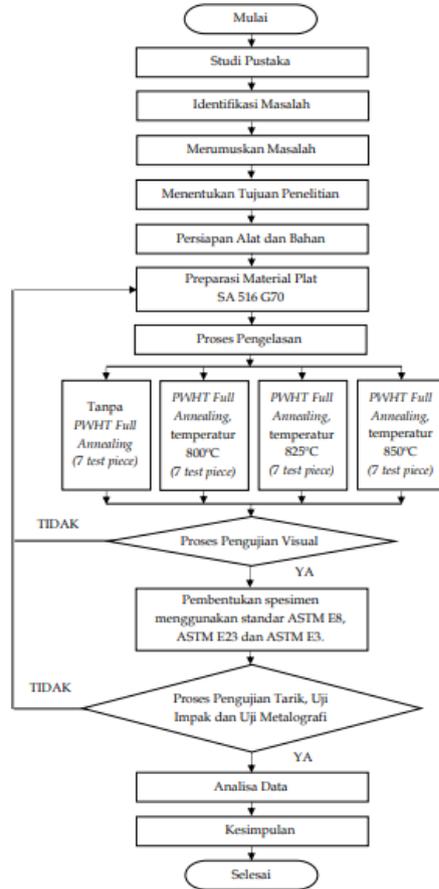
- Elektroda E7016 dengan diameter 3,2 mm.
- Sambungan *butt joint single V*, dengan sudut kampuh 60°
- Tegangan pengelasan sebesar 26 – 28 Volt.
- Arus pengelasan DC sebesar 100 Ampere
- Menggunakan polaritas terbalik (DCRP).
- Posisi pengelasan 1G (mendatar).
- Travel speed dianggap konstan pada 5 – 15 cm/menit

d) Lama waktu tahan sesuai ASME Section VIII Division 1, yaitu selama 1 jam.

e) Proses pendinginan dilakukan dengan cara mematikan furnace yang tetap dalam kondisi tertutup, dan dibiarkan mendingin hingga temperatur kamar.

3.7. Rancangan penelitian

Adapun langkah – langkah penelitian yang dilaksanakan oleh peneliti adalah sebagai berikut :



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

3.8. Alat, Bahan, dan Instrumen Penelitian

Adapun Peralatan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya, mesin las SMAW, gerinda, penggaris, kapur, topeng las, sarung tangan, *electric furnace*, dan *smartphone*. Kemudian ada pula bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu plat SA 516 G70 dengan ketebalan 10 mm dan elektroda las E7016 diameter 3,2 mm. untuk menguji material pada penelitian ini digunakan instrumen yaitu mesin uji tarik, Mesin uji impact, dan Mikroskop optik untuk uji metalografi.

3.9. Proses Pengelasan Spesimen Uji

Adapun langkah langkah yang dilakukan selama proses pengelasan, agar mendapatkan hasil yang optimal dan terhindar dari cacat. Pertama siapkan material, elektroda, mesin las SMAW dan peralatan pendukung. Kemudian buat kampuh V tunggal dengan sudut 30° pada tepi material. Posisikan material untuk pengelasan mendatar. Kemudian nyalakan dan atur arus juga tegangan pada mesin las SMAW sesuai dengan parameter pengelasan pada variabel kontrol. Kemudian nyalakan elektroda dan lakukan pengelasan dengan kecepatan las yang stabil. Lakukan pengelasan hingga kampuh terisi penuh oleh las. Kemudian bersihkan dan ratakan spesimen dengan gerinda.

3.10. Proses *Post Weld Heat Treatment Full Annealing*

Untuk memastikan hasil yang baik, adapun prosedur *Post weld Heat Treatment Full Annealing* yang perlu diperhatikan. Pertama nyalakan furnace, dan masukkan plat yang baru selesai dilas secepat mungkin ke dalam mesin *furnace*, kemudian tingkatkan temperatur furnace hingga mencapai temperatur sesuai dengan variabel bebas dan tahan selama 1 jam. Kemudian dilanjutkan dengan mendinginkan furnace dan material didalamnya secara bersamaan dalam kondisi tertutup hingga mencapai temperatur kamar.

3.11. Teknik Analisis Data

Pada penelitian ini, data yang telah diperoleh melalui uji tarik dan uji impak, dikumpulkan dalam sebuah tabel dan digambarkan dalam bentuk diagram, kemudian data tersebut dianalisa menggunakan metode regresi linear sederhana menggunakan *software IBM SPSS Statistics*, untuk mengetahui arah dan besarnya pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat. Kemudian untuk hasil dari pengamatan struktur mikro, akan disajikan dalam bentuk gambar.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Uji Tarik

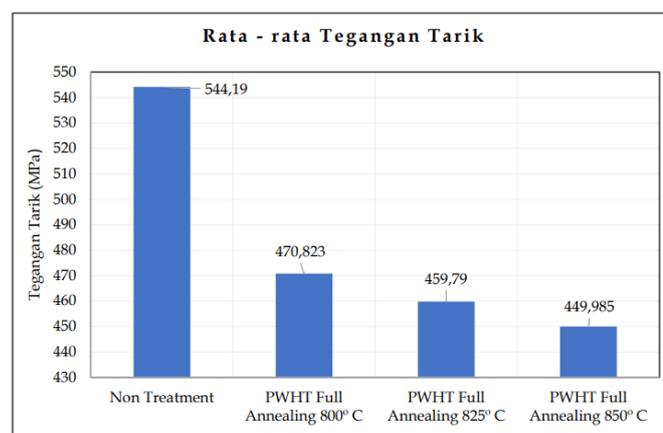
Pengujian Tarik dilakukan di Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang. Pengujian Tarik dilakukan dengan standar ASTM E8 [15], berdasarkan rekomendasi AWS B4.0 tahun 2016 [16]. Setelah uji tarik didapatkan hasil beban tarik maksimal dan perubahan panjang spesimen. Hasil tersebut kemudian dimasukkan kedalam tabel berikut :

Tabel 2. Data Hasil Uji Tarik

Spesimen		Hasil Uji Tarik			
		F (N)	ϵ (%)	σ (MPa)	E (MPa)
A	1	67502,4	17,4%	540,019	3103,559
	2	68721,52	17,0%	549,772	3233,954
	3	67847,36	16,8%	542,779	3230,827
	Rata-rata	68023,76	17,1%	544,190	3189,446
B	1	58729,44	19,2%	469,836	2447,060
	2	58590,28	18,8%	468,722	2493,203
	3	59239,04	19,0%	473,912	2494,275
	Rata-rata	58852,92	19,0%	470,823	2478,180
C	1	57092,84	20,2%	456,743	2261,103
	2	58268,84	20,6%	466,151	2262,868
	3	57059,52	20,0%	456,476	2282,381
	Rata-rata	57473,73	20,3%	459,790	2268,784
D	1	56257,88	24,0%	450,063	1875,263
	2	56698,88	24,4%	453,591	1858,980
	3	55787,48	24,6%	446,300	1814,227
	Rata-rata	56248,08	24,3%	449,985	1849,490

A : Tanpa PWHT *Full Annealing*
 B : PWHT *Full Annealing* 800° C
 C : PWHT *Full Annealing* 825° C
 D : PWHT *Full Annealing* 850° C

Berdasarkan data yang telah diperoleh pada tabel diatas, data tersebut kemudian digambarkan kedalam bentuk grafik, seperti dibawah ini.



Gambar 8. Grafik Tegangan Tarik

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 2, diketahui bahwa nilai rata-rata tegangan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen tanpa perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan nilai tegangan tarik rata-rata sebesar 544,190 MPa. Kemudian terjadi penurunan nilai tegangan tarik yang pada variasi temperatur perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* 800° C, 825° C, hingga 850° C. Dengan nilai rata-rata tegangan tarik pada *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan temperatur 800° C sebesar 470,823 MPa, kemudian pada *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan temperatur 825° C sebesar 459,790 MPa, hingga terendah ada pada variasi *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan temperatur 850° C dengan nilai tegangan tarik sebesar 449,985 MPa.



Gambar 9. Spesimen Uji Tarik

Melalui pengujian tarik dapat diketahui bahwa nilai tegangan tarik mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing*. Hal ini disebabkan oleh perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, karena dengan perlakuan ini menyebabkan struktur mikro pada material mengalami perubahan, sehingga mempengaruhi kekuatan tarik spesimen. Nilai tegangan tarik tertinggi diperoleh pada spesimen yang tidak diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* yang mendapat nilai rata-rata sebesar 544,190 MPa, memperoleh elongasi paling rendah dengan nilai rata-rata sebesar 17,1 %, dan modulus young yang memiliki nilai rata-rata tertinggi sebesar 3189,446 MPa, yang menandakan bahwa material tersebut memiliki sifat yang paling kuat dan paling kaku. Hal ini disebabkan oleh struktur mikro yang terdiri atas butir *pearlite* dan butir *ferrite* yang cenderung berukuran kecil dan halus, sehingga menyebabkan material memiliki sifat yang paling keras dan memiliki kekuatan tarik paling tinggi diantara variasi temperatur lainnya [17].

Sedangkan pada spesimen dengan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* temperatur 850° C mendapatkan nilai rata-rata sebesar 449,985 MPa, elongasi rata-rata sebesar 24,3 %, dan modulus young yang memiliki nilai rata-rata paling rendah, yang menandakan bahwa material tersebut memiliki sifat yang paling ulet. *Post weld Heat Treatment Full Annealing* menyebabkan struktur mikro yang terbentuk terdiri atas butir *pearlite* dan butir *ferrite* yang cenderung berukuran besar dan kasar, sehingga menyebabkan material memiliki sifat yang lunak namun ulet [17].

Pada material dengan butir yang kecil dan halus akan memiliki jumlah butir yang lebih banyak, dan juga akan semakin banyak batas butir yang dimiliki, batas butir yang berjumlah lebih banyak akan menghambat terjadinya dislokasi antar butir, sehingga material memiliki kekuatan tarik yang tinggi. Sedangkan pada material dengan butir yang besar dan kasar akan memiliki jumlah butir yang lebih sedikit, batas butir yang ada juga berjumlah lebih sedikit, sehingga kemampuan untuk menahan dislokasi antar butir akan berkurang dan kekuatan tarik yang dimiliki material akan berkurang. Sehingga dapat disimpulkan bahwa *Post weld Heat Treatment* menyebabkan penurunan nilai kekuatan tarik yang cukup signifikan, sesuai dengan tujuan *Post weld Heat Treatment Annealing* yaitu melunakkan material sehingga menurunkan nilai tegangan tarik pada material baja karbon. [18][19].

4.2. Hasil Uji Impak

Pengujian Impak dilakukan untuk mengetahui ketangguhan suatu material. Pengujian impak dilakukan menggunakan mesin uji impak yang berlokasi di Laboratorium Uji Material, Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Malang. Pengujian Impak Charpy dilakukan dengan standar ASTM E23 [20], berdasarkan rekomendasi ASTM A370 tahun 2016 [21] dan AWS B4.0 tahun 2016 [16], menggunakan spesimen dengan V-Notch sebesar 45°, sudut awal (α) sebesar 150°, panjang lengan pendulum 0,647 m dan berat pendulum 26,32 Kg.

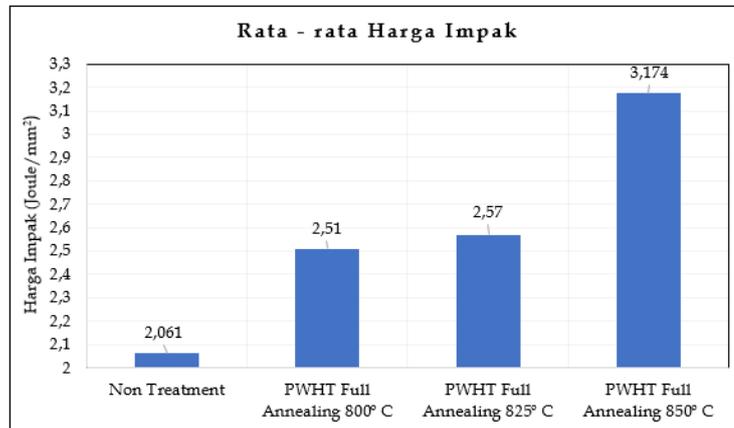
Setelah pengujian impact tersebut didapatkan hasil berupa sudut awal dan sudut akhir pendulum yang kemudian dilakukan perhitungan untuk memperoleh harga impact. Hasil perhitungan tersebut kemudian dimasukkan kedalam tabel berikut ini :

Tabel 3. Data Hasil Uji Impact

Spesimen		Hasil Uji Impact			
		β	A (mm ²)	E (Joule)	Harga Impact (J/mm ²)
A	1	83	80	164,864	2,061
	2	85	80	159,071	1,988
	3	84	80	161,970	2,025
	Rata-rata	84	80	164,853	2,061
B	1	76	80	184,899	2,311
	2	70	80	201,604	2,520
	3	68	80	207,042	2,588
	Rata-rata	71,333	80	200,820	2,510
C	1	66	80	212,404	2,655
	2	66	80	212,404	2,655
	3	68	80	207,042	2,588
	Rata-rata	66,667	80	205,594	2,570
D	1	51	80	249,550	3,119
	2	46	80	260,454	3,256
	3	48	80	256,194	3,202
	Rata-rata	48,333	80	253,937	3,174

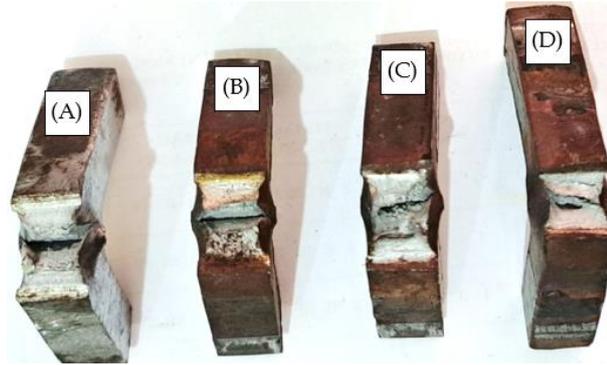
- A : Tanpa PWHT *Full Annealing*
- B : PWHT *Full Annealing* 800° C
- C : PWHT *Full Annealing* 825° C
- D : PWHT *Full Annealing* 850° C

Berdasarkan data yang telah diperoleh pada Tabel 2, data tersebut kemudian digambarkan kedalam bentuk grafik agar lebih mempermudah dalam proses analisis data pengujian impact, seperti Gambar 4 dibawah ini.



Gambar 10. Grafik Harga Impact

Berdasarkan Tabel 2 dan Gambar 4, diketahui bahwa nilai rata rata harga impact tertinggi diperoleh pada spesimen dengan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* 850°C dengan harga impact rata - rata sebesar 3,174 J/mm². Spesimen dengan harga impact terendah ada pada spesimen tanpa perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan rata – rata harga impact 2,061 J/mm². Kemudian terjadi peningkatan harga impact pada variasi dengan perlakuan *Post weld Heat Treatment Full Annealing* 800° C dengan harga impact sebesar 2,510 J/mm², kemudian *Post weld Heat Treatment Full Annealing* 825° C sebesar 2,570 J/mm², hingga tertinggi pada 850° C.



Gambar 11. Spesimen Uji Impak

- (A) Tanpa PWHT Full Annealing (Patahan Ulet)
- (B) PWHT *Full Annealing* 800° C (Patahan Ulet)
- (C) PWHT *Full Annealing* 825° C (Patahan Ulet)
- (D) PWHT *Full Annealing* 850° C (Patahan Ulet)

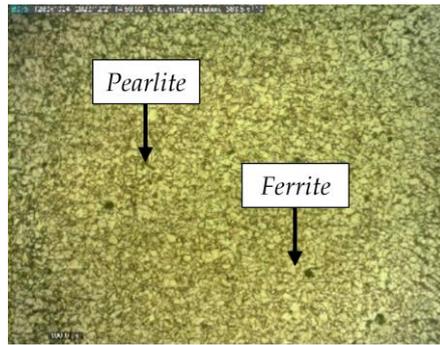
Melalui pengujian impak dapat diketahui bahwa harga impak mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, kemudian sesuai yang ditunjukkan pada gambar 8, pola patahan yang terbentuk akibat uji impak tergolong pola patahan ulet. Peningkatan harga impak ini disebabkan oleh perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, perlakuan ini menyebabkan terjadinya perubahan struktur mikro sehingga mempengaruhi ketangguhan spesimen. Harga impak tertinggi terdapat pada spesimen yang diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan variasi temperatur 850° C yang memperoleh harga impak rata - rata sebesar 3,174 J/mm² dan pola patahan yang tergolong kedalam patahan ulet, diakibatkan oleh struktur mikro yang terdiri atas butir *pearlite* dan *ferrite* yang cenderung berukuran besar dan kasar, sehingga menyebabkan material memiliki sifat yang ulet dan memiliki ketangguhan paling tinggi [17], [22].

Sedangkan harga impak paling rendah terdapat pada spesimen yang tidak diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan harga impak rata - rata sebesar 2,061 J/mm². Hal ini disebabkan oleh struktur mikro yang terdiri atas butir *pearlite* dan butir *ferrite* yang cenderung berukuran kecil dan halus, sehingga menyebabkan material memiliki sifat yang cenderung lebih keras dan memiliki Tingkat ketangguhan yang lebih rendah.

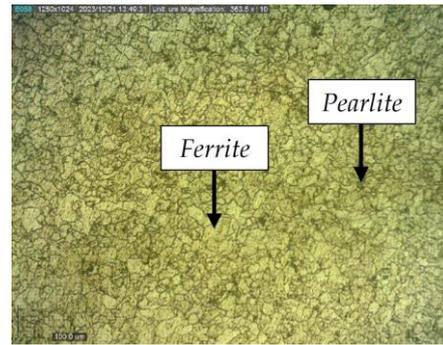
Semakin tinggi harga impak, menandakan bahwa material tersebut semakin tangguh dan semakin ulet [23] [24]. Selain itu, dengan *Post weld Heat Treatment Full Annealing* menyebabkan terjadinya penurunan jumlah kepadatan butir sehingga mengurangi dislokasi, mengurangi tegangan sisa, dan mengembalikan keuletan material.

4.3. Hasil Uji Foto Mikro

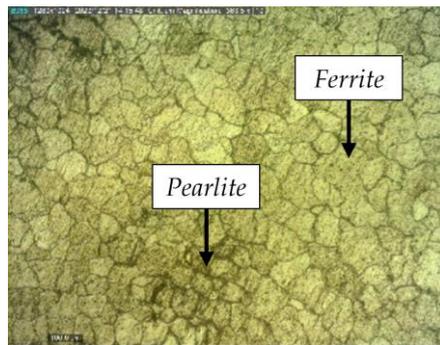
Pengujian Foto Mikro dilakukan menggunakan Mikroskop Optik, yang berlokasi di Laboratorium Pengujian Bahan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang. Pengujian Foto Mikro dilakukan dengan standar ASTM E3 [25], pada area *Heat Affected Zone* (HAZ), dengan perbesaraan 300 kali dan resolusi 20 µm. Dari pengujian foto mikro tersebut didapatkan hasil sesuai sebagai berikut ini :



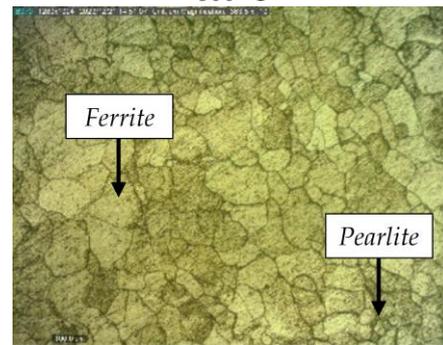
Gambar 12. HAZ Tanpa PWHT



Gambar 13. HAZ PWHT Full Annealing 800° C



Gambar 14. HAZ PWHT Full Annealing 825° C



Gambar 15. HAZ PWHT Full Annealing 850° C

Pada spesimen tanpa perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* memiliki struktur mikro yaitu *pearlite* dan *ferrite*, namun memiliki ukuran butir yang cenderung berukuran kecil dan halus, seperti pada Gambar 12.

Pada saat spesimen diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* hingga mencapai temperatur 800° C, yang mana pada temperatur tersebut terjadi perubahan fasa, dari fasa α (*ferrite*) menjadi fasa $\alpha + \gamma$ (*ferrite* dan *austenite*). Pada temperatur ini menyebabkan terbentuk sejumlah fasa *austenite*. Kemudian didinginkan dengan sangat lambat sehingga menyebabkan terbentuknya struktur *pearlite* dan *ferrite* yang diikuti pertumbuhan ukuran butir *pearlite* dan *ferrite* menjadi sedikit lebih besar dan kasar seperti ditunjukkan pada Gambar 13.

Pada saat spesimen diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* hingga mencapai temperatur 825° C, yang mana pada temperatur tersebut terjadi perubahan fasa, dari fasa α (*ferrite*) menjadi fasa $\alpha + \gamma$ (*ferrite* dan *austenite*). Pada temperatur yang lebih tinggi menyebabkan lebih banyak *austenite* yang terbentuk. Kemudian didinginkan dengan sangat lambat sehingga menyebabkan terbentuknya struktur *pearlite* dan *ferrite* yang juga diikuti oleh pertumbuhan ukuran butir, dengan ukuran yang lebih besar dan lebih kasar seperti ditunjukkan pada Gambar 14.

Pada saat spesimen diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* hingga mencapai temperatur 850° C, yang mana pada temperatur tersebut terjadi perubahan fasa, dari fasa α (*ferrite*) menjadi fasa $\alpha + \gamma$ (*ferrite* dan *austenite*). Pada temperatur yang semakin tinggi menyebabkan semakin banyak *austenite* yang terbentuk. Kemudian didinginkan dengan sangat lambat sehingga menyebabkan terbentuknya struktur *pearlite* dan *ferrite* yang juga diikuti oleh pertumbuhan ukuran butir, dengan ukuran yang jauh lebih besar dan kasar seperti ditunjukkan pada Gambar 15.

Sehingga dapat dilihat pada hasil uji foto mikro, spesimen tanpa perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* memiliki struktur mikro yaitu *pearlite* dan *ferrite*, namun memiliki ukuran butir cenderung halus dan kecil. Sedangkan spesimen dengan struktur mikro butir *pearlite* dan butir *ferrite* paling besar dan kasar, terdapat pada spesimen dengan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* temperatur 850° C. Ketika spesimen diberikan perlakuan panas temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, *ferrite* dan *pearlite* mengalami pertumbuhan butir seiring dengan peningkatan temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing*. Semakin

tinggi temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, menyebabkan ukuran butir *pearlite* dan *ferrite* semakin bulat dan besar [26] [27]

Selama proses *annealing*, transformasi terjadi terus menerus selama pendinginan berlangsung. Jika spesimen didinginkan dengan sangat lambat, maka akan ada waktu untuk terjadinya nukleasi pada temperatur rendah di sudut yang kecil, tepi, dan batas butir. Ketika inti-inti ini tumbuh, karbon yang larut ke dalam *austenite* akan mempunyai waktu untuk berdifusi dalam jarak yang jauh dan butiran *austenite* dapat mempertahankan komposisi seragam yang diberikan oleh diagram fase kesetimbangan. Akhirnya austenit mencapai komposisi eutektoid dan berubah menjadi *pearlite* [28].

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan pada material SA 516 Grade 70, yang diberikan perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan variasi temperatur, diperoleh kesimpulan. Pada pengujian tarik, tegangan tarik paling tinggi terdapat pada spesimen tanpa *Post weld Heat Treatment Full Annealing*, sebesar 544,190 MPa. Sedangkan tegangan tarik paling rendah terdapat pada spesimen dengan *Post weld Heat Treatment Full Annealing 850° C* sebesar 449,985 MPa. Sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing* akan mengakibatkan penurunan kekuatan tarik pada material SA 516 Grade 70.

Kemudian pada pengujian impact didapatkan hasil hasil pengujian impact tertinggi terdapat pada spesimen *Post weld Heat Treatment Full Annealing 850° C* yang memperoleh harga impact sebesar 3,174 J/mm². Sedangkan harga impact paling rendah terdapat pada spesimen tanpa *Post weld Heat Treatment Full Annealing* dengan harga impact sebesar 2,061 J/mm². Sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing* meningkatkan harga impact dan ketangguhan pada material SA 516 Grade 70.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran pada penelitian ini, yaitu :

- Diharapkan pada penelitian selanjutnya agar menggunakan material dengan ketebalan diatas 10 mm dan menggunakan variasi *holding time*, untuk mengetahui pengaruh yang diberikan oleh perlakuan panas *Post weld Heat Treatment Full Annealing* terhadap material SA 516 Grade 70.
- Diharapkan pada penelitian selanjutnya agar menambahkan variasi temperatur yang lebih tinggi hingga mencapai temperature maksimal *Post weld Heat Treatment Full Annealing* untuk mengetahui pengaruh temperatur *Post weld Heat Treatment Full Annealing* terhadap hasil pengelasan.
- Diharapkan pada penelitian selanjutnya agar menjaga *cooling rate* atau kecepatan pendinginan, untuk memastikan bahwa *Post weld Heat Treatment Full Annealing* berjalan dengan pendinginan lambat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Selesainya penelitian ini tentunya tidak lepas dari peranan banyak pihak yang turut memberikan bantuan selama berjalannya penelitian. Oleh karena itu, ijinakan penulis untuk menyampaikan terima kasih kepada pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian ini. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada, Bapak Gede Putu Yudasma selaku Direktur Utama PT. Puspertino Gresik, Bapak Muh. Mansur selaku VP Operation PT. Puspertino Gresik, Bapak Muh. Kanafi selaku Manager Produksi PT. Puspertino Gresik, Bapak Imanudin selaku QA/QC Manager PT. Puspertino Gresik, dan seluruh pihak PT. Puspertino Gresik yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan. Kemudian kedua orang tua saya bapak Ari Prianto, S.T. dan ibu Yuni Astuti S.E., S.Pd. yang selalu memberikan dukungan penuh baik materi maupun moral serta doanya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. F. Choirudin, "Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Pada Sambungan Las Baja ASTM SA 516 Grade 70," Universitas Jember, Jember, 2018.
- [2] Arifin A, *Proses Penyambungan Dan Peralatannya. Buku Ajar Proses Produksi*, 105–130. 2019.

- [3] American Society of Mechanical Engineers, *Rules for Construction of Pressure Vessels*, vol. Section VIII. United States of America: ASME International, 2019. [Online]. Available: <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>.
- [4] A. Amelia Sapriana, "Pengaruh Suhu PWHT Annealing Terhadap Kekuatan Bending dan Kekerasan Pipa ASTM 106 Grade B pada Pengelasan SMAW," *Jurnal Teknik Mesin UNESA*, vol. 10, pp. 147–152, 2022.
- [5] Yanto and M. A. H. Setiawan, "BESARNYA TEGANGAN LONGITUDINAL DAN TEGANGAN TANGENSIAL YANG TERJADI PADA DINDING BEJANA BERTEKANAN DI UNIT BPV (BACK PRESSURE VESSEL) AKIBAT ADANYA TEKanan FLUIDA DARI DALAM PADA PT. XYZ," *Jurnal Vokasi Teknik*, vol. 1, no. 03, 2023, doi: 10.12345/xxxxx.
- [6] A. M. Saragih, "ANALISA PRESSURE BEJANA TEKanan SESUAI STANDARD ASME," *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, 2024, doi: 10.46930/tekniksipil.v13i1.4125.
- [7] P. Kumar, H. K. Arya, and S. Verma, "Effect of Post Weld Heat Treatment on Impact Toughness of SA 516 GR. 70 Low Carbon Steel Welded by Saw Process," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 5, no. VII, pp. 971–974, 2017, [Online]. Available: www.ijraset.com
- [8] William. D. Callister and David. G. Rethwisch, *Materials science and engineering: an introduction*, 8th ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [9] S. Widharto, *Petunjuk Kerja Las*. Jakarta: Pradnya Paramita, 2003.
- [10] T. G. Digges, S. J. Rosenberg, and G. W. Geil, "Heat treatment and properties of iron and steel," Gaithersburg, MD, 1966. doi: 10.6028/NBS.MONO.88.
- [11] Widyastuti, H. Ardhyanta, H. Purwaningsih, and Rr. M. Quluq, *BUKU KARAKTERISASI MATERIAL*. Surabaya, 2018.
- [12] H. Wiryosumarto and T. Okumura, *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita, 2000.
- [13] American Welding Society, *Specification for Welding Procedure and Performance Qualification*. United States of America: American Welding Society, 2021. [Online]. Available: www.copyright.com
- [14] American Welding Society, *Specification for Carbon Steel Electrodes for Shielded Metal Arc Welding*. United States of America: American Welding Society, 2021.
- [15] ASTM International, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2016. doi: 10.1520/E0008_E0008M-16A.
- [16] American Welding Society, *Standard methods for mechanical testing of welds*, 8th ed. United States of America: American Welding Society, 2016.
- [17] H. A. Suhartono, "PENGARUH BESAR BUTIR TERHADAP KEKUATAN FATIK EKSPERIMEN, PERHITUNGAN DAN SIMULASI," *Jurnal Sains Materi Indonesia*, vol. 6, no. 3, pp. 37–45, 2005.
- [18] F. P. M. Muharam, "PENGARUH TEMPERATUR POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK PADA SAMBUNGAN LAS MIG BAJA AISI 1000 SS," UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA, YOGYAKARTA, 2021.
- [19] F. Z. N. Insan, "PENGARUH POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) TERHADAP SIFAT MEKANIK MATERIAL BAJA KARBON RENDAH HASIL PROSES SMAW," Universitas Negeri Jakarta, Jakarta, 2018.
- [20] ASTM International, *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken: ASTM International, 2012.
- [21] ASTM International, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. West Conshohocken: ASTM International. doi: 10.1520/A0370-16.
- [22] T. Fazli Ananda, "Pengaruh Proses Post Weld Heat Treatment Pada Hasil Pengelasan SMAW Terhadap Ketangguhan Baja Karbon Rendah," Universitas Negeri Padang, Padang, 2018.
- [23] T. F. Ananda, "Pengaruh Proses Post Weld Heat Treatment pada Hasil Pengelasan SMAW terhadap Ketangguhan Baja Karbon Rendah," 2018.
- [24] F. Abdullah, "PENGARUH VARIASI TEMPERATUR ANNEALING TERHADAP SIFAT FISIK DAN MEKANIK PADA SAMBUNGAN LAS SMAW BAJA AISI 1006," Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 2022.
- [25] ASTM International, *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. West Conshohocken, 2016.
- [26] P. Trihutomo, "PENGARUH PROSES ANNEALING PADA HASIL PENGELASAN TERHADAP SIFAT MEKANIK BAJA KARBON RENDAH," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 22, no. 1, pp. 81–88, 2014.

- [27] Suparman, "PENGARUH SUHU ANNEALING PADA POST WELD HEAT TREATMENT PENGELASAN BAJA BOHLER GRADE K-945 EMS 45 TERHADAP SIFAT FISIS DAN MEKANIS," Universitas Negeri Semarang, Semarang, 2006.
- [28] D. A. Porter, kenneth E. Easterling, and M. Y. Sherif, *Phase Transformations in Metals and Alloys*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.