

# **Analisis Pengaruh PWHT Terhadap Tegangan Sisa Material API 5L X65 Pada Pengelasan *Submerged Arc Welding***

**Imah Luluk Kusminah<sup>1\*</sup>, Dika Anggara<sup>2</sup>, Maula Nafi<sup>3</sup>, dan Anggoro Ludiro Djati<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Pengelasan dan Fabrikasi, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

<sup>3</sup>Program Studi Teknik Mesin, Universitas 17 Agustus 1945 Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

<sup>4</sup>Program Studi Teknik Pengelasan, Jurusan Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60111, Indonesia

Email: imahluluk@ppns.ac.id

## **Abstrak**

Penelitian ini membahas metode pembuatan pipa penyalur menggunakan proses pengelasan *Submerged Arc Welding* (SAW), khususnya pada pipa dengan sambungan spiral. Material yang digunakan adalah API 5L X65. Pipa SAW dengan sambungan spiral lebih umum digunakan untuk sistem perpipaan bertekanan rendah, seperti air. Namun, pada kasus tertentu, produksi pipa SAW untuk penyaluran Sour Service membutuhkan perlakuan khusus. Pipa Sour Service memiliki tingkat korosi dan tegangan sisa yang tinggi, sehingga diperlukan Post Weld Heat Treatment (PWHT). Tegangan sisa pada pipa dapat menyebabkan regangan, distorsi, dan retakan. Distribusi tegangan sisa longitudinal dapat membentuk retakan pada sisi dalam dinding pipa. Oleh karena itu, PWHT diaplikasikan untuk mengurangi tegangan sisa dan menurunkan sensitivitas di area Heat Affected Zone (HAZ) guna mengurangi risiko akibat korosi. PWHT merupakan proses untuk mengubah struktur logam las dengan memanaskan logam pada suhu dan waktu tertentu. Penelitian ini fokus pada penentuan parameter PWHT yang tepat, agar PWHT sesuai dengan kriteria penerimaan dan dapat efektif mencegah terjadinya korosi pada pipa penyalur Sour Service. Hasil dari pengujian menunjukkan bahwa Nilai tegangan sisa setiap pipa tidak cukup bervariasi dan selisih setiap pipa kurang dari 1% SMYS sehingga perbedaan suhu PWHT pada pipa tidak begitu dominan mempengaruhi nilai tegangan sisa yang dihasilkan .

**Kata kunci:** API 5L X65, PWHT, SAW, Tegangan Sisa

## **Abstract**

*This research discusses the method of making pipe distributors using the Submerged Arc Welding (SAW) welding process, especially for pipes with spiral connections. The material used is API 5L X65. SAW pipes with spiral joints are more commonly used for low-pressure piping systems, such as air. However, in certain cases, the production of SAW pipes for Sour Service distribution requires special treatment. Sour Service pipes have a high level of corrosion and residual stress, so Post Weld Heat Treatment (PWHT) is required. Residual stresses in pipes can cause strains, distortions, and cracks. The longitudinal residual stress distribution can form cracks on the inside of the pipe wall. Therefore, PWHT is applied to reduce residual stress and reduce sensitivity in the Heat Affected Zone (HAZ) area to reduce the risk of corrosion. PWHT is a process of changing the structure of the weld metal by heating it at a certain temperature and time. This research focuses on determining the correct PWHT parameters so that the PWHT meets the acceptance criteria and effectively prevents corrosion in the Sour Service distribution pipe. The results of the test show that the residual stress value for each pipe does not vary enough and the difference for each pipe is less than 1% SMYS so that the difference in PWHT temperature in the pipe does not dominantly affect the resulting residual stress value.*

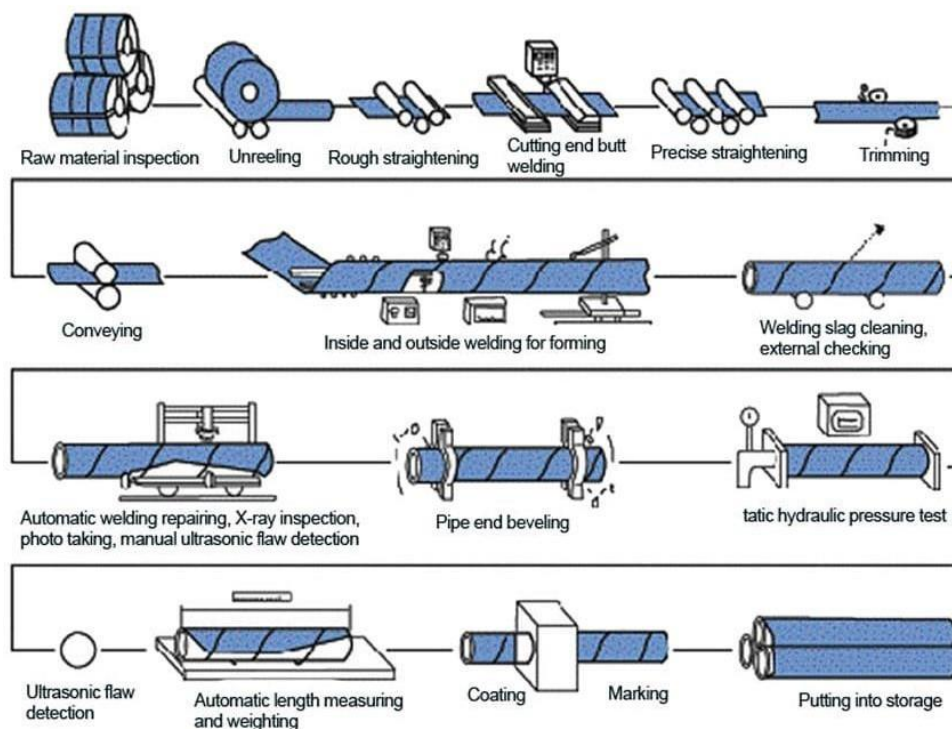
**Keywords:** API 5L X65, PWHT, SAW, Residual Stress

## 1. Pendahuluan

PT. X adalah perusahaan yang memproduksi pipa dengan berbagai macam spesifikasi yang berlokasi di Jawa Timur. Perusahaan ini berfokus dan memiliki pengalaman pada pembuatan pipa, mulai dari pembuatan pipa untuk konstruksi hingga pembuatan pipa untuk *oil and gas*. Jenis pipa yang diproduksi adalah pipa spiral dan pipa HFW (*High Frequency Welding*).

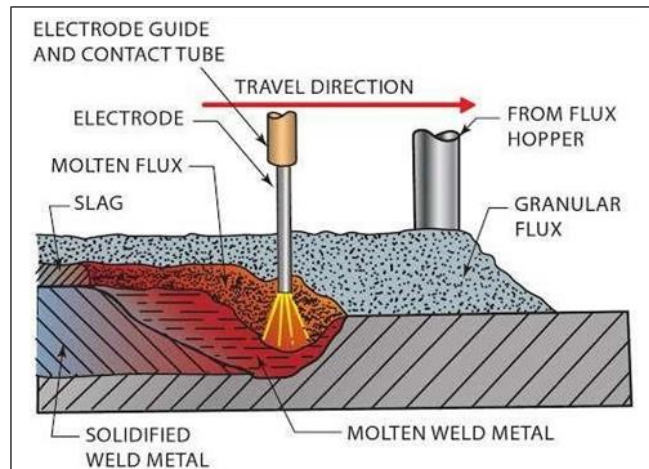
Salah satu metode pembuatan pipa penyalur adalah menggunakan proses pengelasan *Submerged Arc Welding* (SAW). SAW merupakan proses pengelasan otomatis dengan memanfaatkan material pengisi eksternal (elektroda kawat) sebagai penyambung pada plat yang telah digulung dan berbentuk silinder. Pipa SAW dengan sambungan spiral lebih tinggi diproduksi dibandingkan dengan pipa SAW dengan sambungan longitudinal. Pada umumnya pipa spiral biasanya hanya digunakan untuk sistem perpipaan bertekanan rendah seperti air sehingga tidak memerlukan perlakuan khusus seperti PWHT (Iman Fatkurokhim, 2017). Namun pada kasus yang terjadi pada PT. X dimana terdapat produksi pipa SAW yang akan digunakan untuk penyaluran *Sour Service*, dimana pipa penyalur *Sour Service* memiliki tingkat korosi yang tinggi sehingga diperlukannya perlakuan panas paska pengelasan atau *Post Weld Heat Treatment* untuk mencegah terjadinya tegangan sisa sehingga menimbulkan korosi dan kegagalan material.

Pipa yang diproduksi menggunakan metode pengelasan SAW dilakukan dengan mesin otomatis yang dijalankan oleh operator mesin sesuai dengan prosedur yang dibuat oleh engineer setempat. Sehingga metode pengelasan SAW memiliki tingkat efisiensi yang tinggi dan pipa yang dihasilkan memiliki tingkat cacat yang sangat rendah. Proses manufaktur/pembentukan dengan metode pengelasan SAW biasanya terdiri dari beberapa tahapan seperti yang digambarkan pada Gambar 1 berikut ini. Dengan rotasi rol, strip secara bertahap akan berubah bentuk menjadi lingkaran (Institute, 2007).



Gambar 1. Proses Manufaktur Pipa SAW (Al-Anezi et al., 2016)

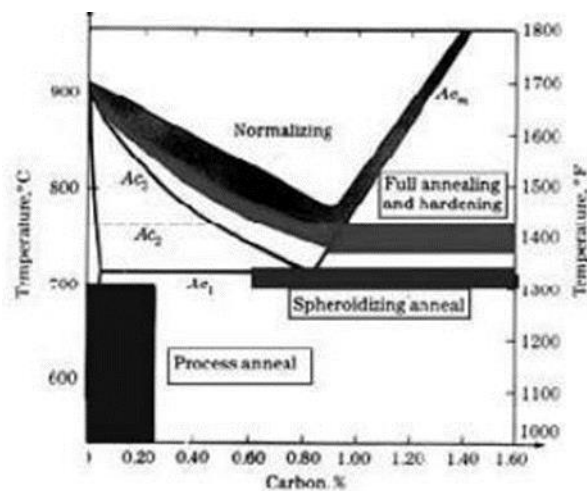
*Submerged Arc Welding* (SAW) merupakan salah satu jenis pengelasan busur listrik dimana proses pengelasan ini adalah memanaskan dan mencairkan benda kerja dan logam pengisi atau elektroda oleh busur listrik yang ada diantara logam induk dan elektroda (logam pengisi). Pengelasan SAW ini menggunakan fluks yang bentuknya seperti pasir untuk melindungi logam pengisi yang mencair saat proses pengelasan agar tidak terkontaminasi dari udara luar sehingga menghasilkan las - lasan yang baik (Perdana, S., Budiarto, U., Wibawa, A., & Santosa, 2020).



Gambar 2. Proses Pengelasan SAW (Sawaldi et al., 2019)

Pada saat dilakukan pengelasan, suatu material (terutama *carbon steel*) akan mengalami perubahan struktur mikro karena terjadinya proses pemanasan dan pendinginan. Perubahan struktur yang menjadi tidak homogen inilah yang menyebabkan terjadinya tegangan sisa pada material paska pengelasan. Dampak dari tegangan sisa ini material akan menjadi lebih keras akan tetapi ketangguhannya kecil. Ini tentu sifat yang tidak diharapkan. Oleh sebab itu, material harus dikembalikan ke sifat semula dengan cara pemanasan dengan suhu dan tempo waktu (*holding time*) tertentu (Sawaldi et al., 2019).

*Post weld heat treatment* (PWHT) merupakan proses perlakuan panas yang dilakukan pada hasil pengelasan suatu komponen. Pemanasan ini dilakukan hingga mencapai temperatur di bawah temperatur transformasi dengan laju pemanasan yang terkontrol dan juga dilakukan penahanan pada temperatur tersebut pada waktu tertentu kemudian laju pendinginan yang terkontrol. Tujuan utama dilakukan *Post weld heat treatment* adalah untuk menghilangkan tegangan sisa yang terjadi pada hasil pengelasan (Multazam, 2017).



Gambar 3. Diagram Hubungan Temperatur dengan *Heat Treatment* pada baja karbon (Multazam, 2017)

Dari Gambar 3 Menunjukkan bahwa Secara umum untuk baja karbon, temperatur austenitising yaitu 30-50°C diatas tempertur kritis A3 untuk baja *hypoeutectoid* dan 30-50°C diatas tempertur kritis A1.

Pada mesin PWHT yang ada dilapangan, hasil pengelasan dipanaskan kembali pada suhu A3 yaitu suhu diatas 800°C. Pipa yang keluar dari mesin pengelasan HFW akan dilakukan tiga kali pemanasan yaitu T1, T2 dan T3 dengan kecepatan yang sama kecepatan pengelasan. Lalu suhu *weld metal* diukur menggunakan *pyrometer* untuk memastikan suhu aktual pada material mencapai suhu A3. Pada jarak 60 meter pipa yang telah dilakukan PWHT didinginkan ke suhu kamar menggunakan metode *quenching* pada rentan waktu 6 menit dari proses PWHT.

PWHT (perlakuan panas paska pengelasan) merupakan suatu proses untuk mengubah struktur logam las dengan cara memanaskan logam dengan waktu dan temperatur yang ditentukan agar diperoleh sifat-sifat mekanik tertentu. Dalam hal ini PWHT yang dilakukan ini bertujuan untuk mengurangi tegangan sisa (*residual stress*). Serta PWHT ini juga bertujuan untuk meningkatkan sensitivitas di area HAZ untuk mengurangi risiko terjadinya *crack* dikarenakan korosi akibat cairan asam. Berdasarkan (Setiawan & Ilman, 2013), Metode PWHT yang diusulkan dapat mencapai efek perlakuan panas yang optimal dan dapat menghasilkan tegangan tarik atau bahkan tekan yang kecil pada permukaan bagian dalam las, sehingga dapat mengurangi masalah HIC.

Oleh karena itu, perlu menemukan parameter yang tepat agar PWHT sesuai dengan kriteria penerimaan. Parameter tersebut terdiri dari berapa lama material terpapar panas dari induktor, jarak induktor terhadap material, intensitas suhu yang dihasilkan induktor, dan suhu yang muncul pada layar *display* mesin PWHT.

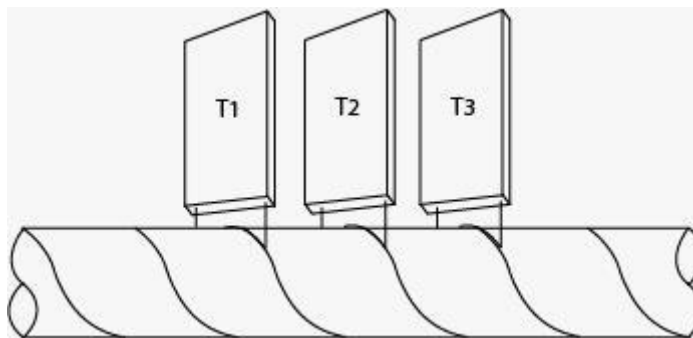
## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur yang meliputi mempelajari dan mengumpulkan sumber-sumber referensi yang relevan sebagai acuan dalam melakukan penelitian. Studi lapangan dilakukan guna mendapatkan keterangan ataupun data riil yang ada di lapangan seperti halnya saat proses produksi pipa SAW. Hasil dari pengamatan langsung adalah untuk mendapatkan gambaran secara langsung mengenai proses saat pemanasan pipa memanfaatkan induksi panas dan proses pendinginan pipa setelah dilakukan pemanasan. Sehingga dapat memberikan hasil yang lebih akurat dan untuk menghindari kesalahan penelitian serta dapat diungkapkan fakta-fakta sebagai realisasi dari teori yang ada. Tahap selanjutnya adalah mempersiapkan alat dan bahan sebelum dilakukan proses eksperimen.

Proses pengelasan *Submerged Arc Welding* dilakukan dengan otomatis yang dikendalikan oleh operator mesin SAW dan diawasi oleh supervisor dan QC/QA. Mesin SAW akan dijalankan dengan data sebagai berikut:

- Menyiapkan material baja karbon API 5L L450MO PSL 2 yang akan dilas
- Mesin SAW dijalankan dengan kecepatan 0,4 - 1,0 m/min
- Material yang telah melalui mesin SAW akan dipanaskan dengan suhu 850°C - 1100°C
- Untuk arus dan tegangan yang digunakan masing masing adalah 600 A – 900 A dan 25 V – 40 V
- Power yang digunakan untuk menjalan mesin SAW adalah 470 kW – 485 kW.

Setelah pipa dilakukan proses pengelasan SAW, maka pipa yang telah dilakukan proses perlakuan panas setelah pengelasan atau PWHT. Tujuan dari PWHT antara lain untuk memperbaiki sifat mekanis dan mengurangi tegangan sisa pada pipa setelah proses pengelasan dengan suhu yang tinggi. Adapun parameter yang akan digunakan untuk proses PWHT sebagai berikut:



**Gambar 4.** Desain Mesin PWHT pada Mesin SAW

Pipa yang telah selesai dilakukan pengelasan akan melewati tiga kali pemanasan PWHT dengan rincian suhu sebagai berikut.

**Tabel 1.** Variasi Suhu PWHT

No	PWHT1 (°C)	PWHT2 (°C)	PWHT3 (°C)
1	850	950	1000
2	900	1000	1050
3	950	1050	1100

Dalam pelaksanaannya PWHT dilakukan tiga kali dengan Panjang keseluruhan titik start ke titik selesai adalah 6500 mm selama 39 s dengan kecepatan pengelasan 100.007 mm/s. Suhu pada weldmetal akan diukur menggunakan pyrometer agar diketahui nilai suhu aktual weldmetal setelah melalui PWHT sebagai acuan variasi suhu PWHT. Jarak induktor ke pipa untuk proses PWHT adalah 10 mm, hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa PWHT mencakup daerah seluruh weld metal, daerah HAZ, dan base metal dekat HAZ.

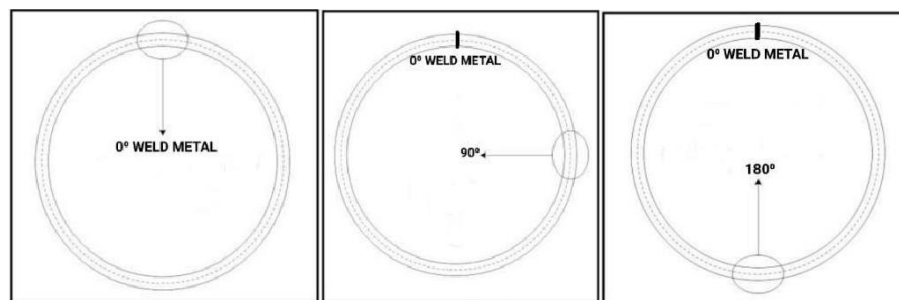
Setelah proses pengelasan HFW dan PWHT selesai dilakukan, proses selanjutnya adalah pengambilan sample untuk spesimen uji. Spesimen dilakukan uji tegangan sisa, berikut langkah-langkah menghitung tegangan sisa pada pipa :

1. Potong pipa dengan lebar yang ditentukan di MPS sejumlah 3 buah dari satu pipa.
2. Kemudian dilakukan marking pada area yang di uji 0° (weld metal), 90° dan 180°
3. Pengukuran awal (circum, thickness, dan jarak antar titik)
4. Lakukan pemotongan pada setiap area yang diuji 0°, 90° dan 180°. ditandai dengan lingkaran seperti gambar 6
5. Dilakukan pengukuran setelah di gergaji (jarak antar titik dan circum)
6. Setelah mendapatkan beberapa data pengukuran kita dapat memasukkannya dalam sebuah rumus. Rumusnya sebagai berikut: (Wiryosumarto H, 1994)

$$\sigma_n = \left[ \frac{E \cdot t}{1 - \nu^2} \right] \left[ \frac{1}{D_i} - \frac{1}{\left( \frac{x}{\pi} + D_i \right)} \right] \quad (1)$$

Dengan :

- E = modulus elastisitas (200000 MPa)
- t = ketebalan cincin uji (mm)
- $\nu$  = poisson ratio carbon steel (0.3)
- $D_i$  = OD awal cincin uji (mm)
- x = bukaan bersih (mm)



Gambar 5. Pemotongan Spesimen Pipa Pengujian Tegangan Sisa (Wiryosumarto H, 1994)

### 3. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini menggunakan material API 5L X65 yang memiliki mechanical properties seperti tabel 2 berikut :

**Tabel 2. Mechanical Properties of Pipe After Raw Material**

Parameters	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	YS/TS (%)	Elongation (%)	Charpy Impact	
					Avg (J)	CW Avg (J)
PWHT1	405	515	0.79	38	183	-
PWHT2	405	515	0.79	38	183	-
PWHT3	395	520	0.76	38	180	-

Material yang telah dilakukan pengelasan menjadi pipa akan dilakukan pengujian untuk mengetahui *mechanical properties* material pada pipa. Hasil pengujian dijelaskan pada Tabel 3 berikut.

**Tabel 3. Mechanical Properties of Pipe After Welding**

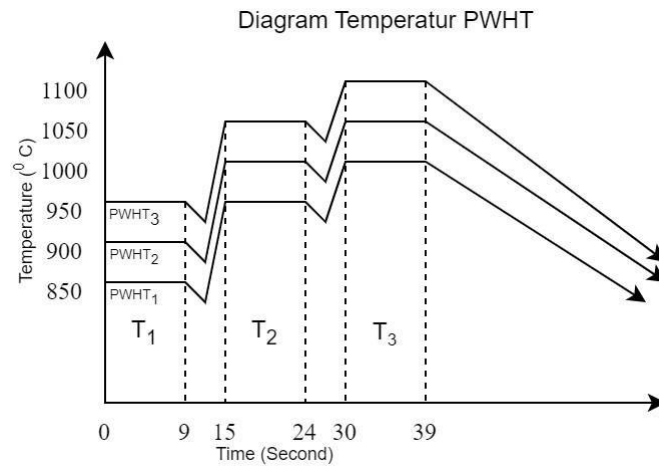
Parameters	Yield strength (N/mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	YS/TS (%)	Elongation (%)	Charpy Impact	
					Avg (J)	CW Avg (J)
PWHT1	440	470	0.936	40	78	60
PWHT2	448.8	483.2	0.929	40	178	164
PWHT3	448.8	483.2	0.929	40	185	170

Keterangan :

*Charpy Impact Avg* : Nilai rata-rata hasil *Charpy Test* pada badan pipa.

*Charpy Impact CWAvg* : Nilai rata-rata hasil *Charpy Test* pada *weld metal*.

Sebelum dilaksanakan pengujian, dilakukan PWHT dengan grafik sebagai berikut.



**Gambar 6.** Diagram Temperatur PWHT

Untuk parameter suhu akhir PWHT diambil pada pipa yang sudah melewati mesin PWHT dengan data sebagai berikut yang ditunjukkan pada tabel 4.

**Tabel 4.** Perubahan Suhu PWHT 1

T1 = 850°C			T2 = 950°C			T3 = 1000°C		
Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)
14-Jan-24	3.50.01 PM	845	14-Jan-24	3.50.01 PM	942	14-Jan-24	3.50.01 PM	991
14-Jan-24	3.50.08 PM	847	14-Jan-24	3.50.08 PM	941	14-Jan-24	3.50.08 PM	995
14-Jan-24	3.50.12 PM	847	14-Jan-24	3.50.12 PM	944	14-Jan-24	3.50.12 PM	995
14-Jan-24	3.50.19 PM	849	14-Jan-24	3.50.19 PM	942	14-Jan-24	3.50.19 PM	998
14-Jan-24	3.50.28 PM	850	14-Jan-24	3.50.28 PM	950	14-Jan-24	3.50.28 PM	1000
14-Jan-24	3.50.39 PM	849	14-Jan-24	3.50.39 PM	941	14-Jan-24	3.50.39 PM	999

Adapun Tabel 5 berikut ini menunjukkan parameter suhu final pada pipa dengan parameter suhu PWHT 2.

**Tabel 5** Perubahan Suhu PWHT 2

T1 = 900°C			T2 = 1000			T3 = 1050°C		
Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)
15-Jan-24	10.16.01 AM	899	15-Jan-24	10.16.01 AM	992	15-Jan-24	10.16.01 AM	1048
15-Jan-24	10.16.03 AM	901	15-Jan-24	10.16.03 AM	995	15-Jan-24	10.16.03 AM	1044

15-Jan-24	10.16.05 AM	900	15-Jan-24	10.16.05 AM	994	15-Jan-24	10.16.05 AM	1047
15-Jan-24	10.16.07 AM	901	15-Jan-24	10.16.07 AM	994	15-Jan-24	10.16.07 AM	1045
15-Jan-24	10.16.09 AM	901	15-Jan-24	10.16.09 AM	995	15-Jan-24	10.16.09 AM	1048
15-Jan-24	10.16.13 AM	900	15-Jan-24	10.16.13 AM	994	15-Jan-24	10.16.13 AM	1049
15-Jan-24	10.16.15 AM	902	15-Jan-24	10.16.15 AM	995	15-Jan-24	10.16.15 AM	1044
15-Jan-24	10.16.17 AM	900	15-Jan-24	10.16.17 AM	996	15-Jan-24	10.16.17 AM	1049
15-Jan-24	10.16.19 AM	900	15-Jan-24	10.16.19 AM	994	15-Jan-24	10.16.19 AM	1046
15-Jan-24	10.16.21 AM	902	15-Jan-24	10.16.21 AM	992	15-Jan-24	10.16.21 AM	1045
15-Jan-24	10.16.23 AM	903	15-Jan-24	10.16.23 AM	994	15-Jan-24	10.16.23 AM	1048
15-Jan-24	10.16.25 AM	901	15-Jan-24	10.16.25 AM	990	15-Jan-24	10.16.25 AM	1042
15-Jan-24	10.16.27 AM	904	15-Jan-24	10.16.27 AM	998	15-Jan-24	10.16.27 AM	1043
15-Jan-24	10.16.29 AM	903	15-Jan-24	10.16.29 AM	997	15-Jan-24	10.16.29 AM	1045
15-Jan-24	10.16.32 AM	900	15-Jan-24	10.16.32 AM	998	15-Jan-24	10.16.32 AM	1046
15-Jan-24	10.16.33 AM	901	15-Jan-24	10.16.33 AM	998	15-Jan-24	10.16.33 AM	1042
15-Jan-24	10.16.35 AM	900	15-Jan-24	10.16.35 AM	999	15-Jan-24	10.16.35 AM	1049
15-Jan-24	10.16.37 AM	901	15-Jan-24	10.16.37 AM	996	15-Jan-24	10.16.37 AM	1049

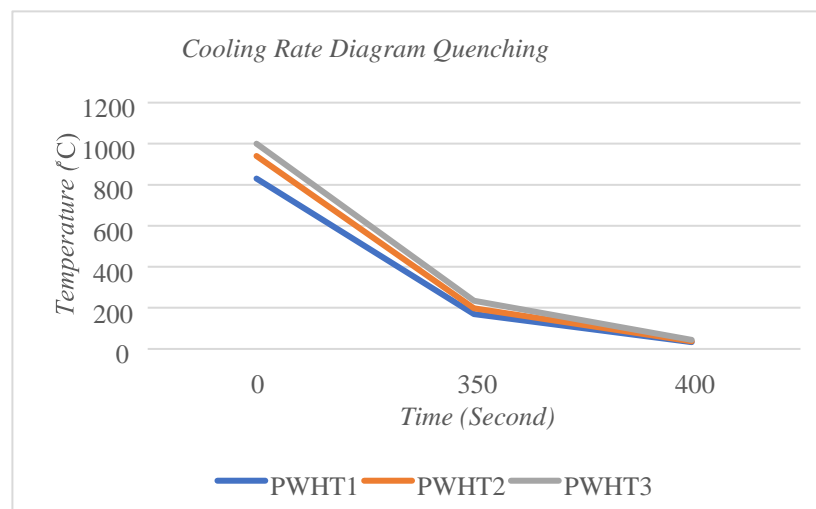
Adapun Tabel 6 ini menunjukkan parameter suhu final pada pipa dengan parameter suhu PWHT 3.



**Tabel 6. Perubahan Suhu PWHT 3**

T1 = 950°C			T2 = 1050°C			T3 = 1100°C		
Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)	Date	Time	Data (°C)
14-Jan-24	3.50.01 PM	949	14-Jan-24	3.50.01 PM	1046	14-Jan-24	3.50.01 PM	1099
15-Jan-24	4.30.59 PM	948	15-Jan-24	4.30.59 PM	1048	15-Jan-24	4.30.59 PM	1096
15-Jan-24	4.30.06 PM	949	15-Jan-24	4.30.06 PM	1046	15-Jan-24	4.30.06 PM	1097
15-Jan-24	4.30.09 PM	950	15-Jan-24	4.30.09 PM	1049	15-Jan-24	4.30.09 PM	1098
15-Jan-24	4.30.12 PM	951	15-Jan-24	4.30.12 PM	1044	15-Jan-24	4.30.12 PM	1095
15-Jan-24	4.30.23 PM	949	15-Jan-24	4.30.23 PM	1048	15-Jan-24	4.30.23 PM	1096
15-Jan-24	4.30.28 PM	949	15-Jan-24	4.30.28 PM	1047	15-Jan-24	4.30.28 PM	1095
15-Jan-24	4.30.31 PM	950	15-Jan-24	4.30.31 PM	1046	15-Jan-24	4.30.31 PM	1099
15-Jan-24	4.30.32 PM	951	15-Jan-24	4.30.32 PM	1049	15-Jan-24	4.30.32 PM	1098
15-Jan-24	4.30.35 PM	950	15-Jan-24	4.30.35 PM	1045	15-Jan-24	4.30.35 PM	1098

Selanjutnya pipa yang telah melalui mesin PWHT akan melalui pendinginan dengan metode quenching dengan air. Dengan laju pendinginan suhu quenching ditunjukkan pada Gambar 7 berikut ini.



**Gambar 7.** Diagram Pendinginan

Pada Gambar 7 diagram pendinginan (*quenching*) menunjukkan bahwa pipa dengan parameter suhu PWHT1, PWHT2, dan PWHT3 memasuki mesin *quenching* pada suhu 170°C, 198°C, dan 235°C. Pipa memasuki mesin *quenching* pada detik ke 350 setelah pipa keluar dari mesin PWHT dan pipa keluar dari mesin *quenching* pada detik ke 400 setelah keluar dari mesin PWHT. Sehingga dapat diketahui bahwa pada parameter suhu PWHT1, PWHT2, dan PWHT3 berturut-turut sebesar 1.89°C/s, 2.12°C/s, dan 2.18°C/s.

Proses selanjutnya setelah material dilakukan pengelasan dan PWHT adalah pengujian tegangan sisa. Pengujian tegangan sisa (*residual stress*) adalah prosedur yang digunakan untuk mengukur tegangan yang tersisa dalam suatu material setelah proses pemanasan atau pengelasan. Tegangan sisa ini dapat berpengaruh pada sifat material, seperti ketahanan korosi dan umur lelah (*fatigue lives*). Untuk metode pengujian tegangan sisa pada penelitian ini ialah metode *splitting*. Metode *splitting*, juga dikenal sebagai "*crack compliance method*" atau "*slitting method*," adalah teknik yang digunakan untuk mengukur tegangan sisa dalam material. Metode ini melibatkan pembuatan retakan atau sayatan pada material dan mengukur perubahan regangan atau perpindahan yang diakibatkan oleh pelepasan tegangan sisa (Cheng & Finnie, 2007).

Nilai tegangan sisa dapat diketahui dengan menggunakan persamaan pada rumus perhitungan yang sudah dijelaskan diatas. Berikut untuk perhitungan serta hasil pengujian tegangan sisa pada PWHT 1.

**Tabel 7** Perhitungan uji tegangan sisa PWHT 1

Keterangan	Kode	Posisi		
		0	90	180
<i>Splitting relative orientation (deg) =</i>		0	90	180
<i>Circum before splitting (mm) =</i>	C0	1.592,90	1.592,80	1.593,30
<i>Circum after splitting (mm) =</i>	C1	1.609,10	1.619,30	1.624,70
<i>Pipe OD before splitting (mm) =</i>	D0	507,04	507,00	507,16
<i>Pipe OD after splitting (mm) =</i>	D1	512,19	515,44	517,16
<i>Mark distance before splitting (mm) =</i>	X0	10,02	10,52	10,71
<i>Mark distance after splitting (mm) =</i>	X1	28,83	37,44	44,07
<i>The opening displacement (mm) =</i>	x	18,81	26,92	33,36
<i>Thickness of test ring (mm) =</i>	t	12,12	12,41	12,43
<i>Specified minimum yield strength =</i>		450,00		
<i>Residual Stress acc. [<math>\sigma_1</math>] (MPa) =</i>	s1	54,03	89,93	106,34
<i>(% SMYS) =</i>		12,01	19,98	23,63
<i>Residual Stress acc. [<math>\sigma_2</math>] (MPa) =</i>	s2	62,63	91,33	112,84
<i>(% SMYS) =</i>		13,92	20,30	25,08

**Tabel 8** Perhitungan uji tegangan sisa PWHT 2

Keterangan	Kode	Posisi		
		0	90	180
<i>Splitting relative orientation (deg) =</i>		0	90	180
<i>Circum before splitting (mm) =</i>	C <sub>0</sub>	1.592,80	1.592,70	1.593,60
<i>Circum after splitting (mm) =</i>	C <sub>1</sub>	1.609,60	1.619,60	1.624,94
<i>Pipe OD before splitting (mm) =</i>	D <sub>0</sub>	507,00	506,97	507,26
<i>Pipe OD after splitting (mm) =</i>	D <sub>1</sub>	512,35	515,53	517,23
<i>Mark distance before splitting (mm) =</i>	X <sub>0</sub>	10,76	10,70	10,76
<i>Mark distance after splitting (mm) =</i>	X <sub>1</sub>	28,80	37,44	44,14

<i>The opening displacement (mm) =</i>	$x$	18,04	26,74	33,38
<i>Thickness of test ring (mm) =</i>	$t$	12,80	12,60	12,81
<i>Specified minimum yield strength =</i>		450,00		
<i>Residual Stress acc. [<math>\sigma_{h2}</math>] (MPa) =</i>	$s_2$	63,47	92,13	116,32
<i>(% SMYS) =</i>		14,11	20,47	25,85

**Tabel 9** Perhitungan uji tegangan sisa PWHT 3

Keterangan	Kode	Posisi		
		0	90	180
<i>Splitting relative orientation (deg) =</i>		0	90	180
<i>Circum before splitting (mm) =</i>	$C_0$	1.593,20	1.593,12	1.594,30
<i>Circum after splitting (mm) =</i>	$C_1$	1.611,10	1.619,60	1.625,21
<i>Pipe OD before splitting (mm) =</i>	$D_0$	507,13	507,11	507,48
<i>Pipe OD after splitting (mm) =</i>	$D_1$	512,83	515,53	517,32
<i>Mark distance before splitting (mm) =</i>	$X_0$	10,50	11,12	11,12
<i>Mark distance after splitting (mm) =</i>	$X_1$	28,94	37,70	44,65
<i>The opening displacement (mm) =</i>	$x$	18,44	26,58	33,53
<i>Thickness of test ring (mm) =</i>	$t$	13,10	12,92	12,95
<i>Specified minimum yield strength =</i>		450,00		
<i>Residual Stress acc. [<math>\sigma_{h2}</math>] (MPa) =</i>	$s_2$	66,35	93,86	118,00
<i>(% SMYS) =</i>		14,75	20,86	26,22

Dari data yang didapatkan terlihat bahwa nilai tegangan sisa relatif sama pada material yang telah melalui proses PWHT pada PWHT 1, PWHT 2, dan PWHT 3. Untuk hasil dan rata rata pengujian tegangan sisa dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 10 berikut ini.

**Tabel 10. Data Hasil Pengujian Tegangan Sisa**

No	Treatment	Tegangan Sisa (% SMYS)			$\Sigma$ Avg Tegangan Sisa (% SMYS)
		0°	90°	180°	
1	PWHT1	13.92	20.30	25.08	19.76
2	PWHT2	14.11	20.47	25.85	20.14
3	PWHT3	14.75	20.86	26.22	20.61

Hasil dari pengujian tegangan adalah numerik dan mempunyai satuan % SMYS. Dapat dilihat pada perbedaan PWHT terhadap tegangan sisa, nilai rata-rata tegangan PWHT 1 adalah 19.76, pada PWHT 2 adalah 20.14, Sedangkan pada PWHT 3 adalah 20.61. Pada PWHT 1 nilai rata-rata tegangan sisanya terbilang paling rendah dari pada variabel perlakuan PWHT yang lain. Tetapi terdapat nilai rata-rata tegangan sisa yang paling tinggi di PWHT 3 yaitu 20.14.

Nilai tegangan sisa setiap pipa tidak cukup bervariasi dan selisih setiap pipa terbilang tidak banyak jadi perbedaan suhu PWHT pada pipa tidak begitu dominan mempengaruhi nilai tegangan sisa.

Nilai tegangan sisa setiap pipa tidak cukup bervariasi dan selisih setiap pipa terbilang tidak banyak jadi perbedaan suhu PWHT pada pipa tidak mempengaruhi nilai tegangan sisa. Namun terdapat peningkatan yang cukup signifikan dikarenakan setelah PWHT, perubahan volumetrik meningkat karena pertumbuhan butir, yang menyebabkan peningkatan besarnya tegangan sisa longitudinal (Hristo Anggigi, Untung Budiarto, 2019).

#### 4. Kesimpulan

Dari Analisa dan pembahasan data yang diperoleh dari hasil pengujian tegangan sisa mengenai perbandingan parameter PWHT1, PWHT2, dan PWHT3 pada pengelasan SAW material X65, dapat disimpulkan bahwa nilai rata-rata tegangan PWHT 1 adalah 19.76 % SMYS, pada PWHT 2 adalah 20.14 % SMYS, Sedangkan pada PWHT 3 adalah 20.61 % SMYS. Pada PWHT 1 nilai rata-rata tegangan sisanya terbilang paling rendah dari pada variabel perlakuan PWHT yang lain. Tetapi terdapat nilai rata-rata tegangan sisa yang paling tinggi di PWHT 3 yaitu 20.14. Nilai tegangan sisa setiap pipa tidak cukup bervariasi dan selisih setiap pipa terbilang tidak banyak jadi perbedaan suhu PWHT pada pipa tidak begitu dominan mempengaruhi nilai tegangan sisa.

#### 5. Ucapan Terima Kasih

Terimakasih kepada tim peneliti dan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya atas segala support dan fasilitasnya sehingga penulis bisa menyelesaikan penelitian ini.

#### 6. Daftar Pustaka

- Al-Anezi, M. A., Al-Ghamdi, T. A., Al-Otaibi, W. L., & Al-Muaili, S. M. (2016). *Chapter 19 - Manufacturing, testing, and operational techniques to prevent sour service damages* (A. S. H. Makhoul & M. B. T.-H. of M. F. A. with C. S. from the O. and G. I. Aliofkhaezai (eds.); pp. 393–410). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100117-2.00018-2>
- Cheng, W., & Finnie, I. (2007). *Residual Stress Measurement and the Slitting Method*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-39030-7>
- Hristo Anggigi, Untung Budiarto, A. F. Z. (2019). Analisa Pengaruh Temperatur Normalizing Pada Sambungan Las SMAW (Shielded Metal Arc Welding) Terhadap Kekuatan Tarik , Tekuk dan Mikrografi Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 7(2), 504–513.
- Iman Fatkurokhim, B. (2017). *Analisa Pengaruh Tegangan Sisa Dan Perubahan Distorsi Pada Pengelasan Struktur Pressure Vessels Pt. Petrokimia Gresik Dengan Variasi Welding Sequence Dengan Menggunakan Metode Elemen Hingga*. 67.
- Institute, A. P. (2007). API 5L Specification for line pipe. *Api Spec 5L, Forty Four*, 1–40.
- Multazam, A. (2017). *HARDENES PROCES CONTROL BAJA TAMBANG DENGAN QUENCHING METHOD*. 3(1), 56–62.
- Perdana, S., Budiarto, U., Wibawa, A., & Santosa, B. (2020). Pengaruh Variasi Waktu Penahanan (Holding Time) pada Perlakuan Panas Normalizing Setelah Pengelasan Submerged Arc Welding (SAW) pada Baja SS400 terhadap Kekuatan Tarik, Tekuk dan Mikrografi. *Jurnal Teknik Perkapalan*, 8(1).
- Sawaldi, A., Al Fathier, A. F., & Ibrahim, A. (2019). Pengaruh PWHT terhadap Struktur Mikro pada Lasan Pipa Baja ASTM A106 Grade B. *Journal of Welding Technology*, 1(2), 31–35. <https://doi.org/10.30811/jowt.v1i2.1643>
- Setiawan, I., & Ilman, M. N. (2013). Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanis dan Korosi Sambungan Las Spiral Saw pada Pipa Baja ASTM A252. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 5(1), 67–75.
- Wirjosumarto H, O. T. (1994). Teknologi Pengelasan. *Teknologi Pengelasan Logam=Welding Engineering*.