



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS PASCA LAS
TERHADAP SIFAT MEKANIS SAMBUNGAN LAS
TABUNG LPG 3 KG**

TESIS

**BANARWOTO
0606150971**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
DESEMBER 2009**



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH PERLAKUAN PANAS PASCA LAS
TERHADAP SIFAT MEKANIS SAMBUNGAN LAS
TABUNG LPG 3 KG**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains

**BANARWOTO
0606150971**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
PROGRAM STUDI ILMU MATERIAL
JAKARTA
DESEMBER 2009**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Banarwoto

NPM : 0606150971

Tanda Tangan :

Tanggal : 30 November 2009

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Banarwoto
NPM : 0606150971
Program Studi : Ilmu Material
Judul Tesis : Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las
Terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las
Tabung LPG 3 Kg

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlakukan untuk memperoleh gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. DR. Ir. DN. Adnyana APU (.....)

Ketua : Dr. Bambang Soegijono (.....)

Penguji I : Dr. Muhammad Hikam (.....)

Penguji II : Dr. Azwar Manaf, M.Met (.....)

Penguji III : Dr. Suhardjo Poertadji (.....)

Ditetapkan di : Jakarta
Tanggal : 21 Desember 2009

KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Sains pada Program Studi Ilmu Material Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan tesis ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. DR. Ir. DN. Adnyana, APU, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini.
2. Bapak Suhadi, ST dari PT Hi-Test yang telah membantu dalam menyediakan fasilitas pengujian mekanikal.
3. Bapak Dr. Bambang Soegijono selaku Ketua Program Studi Ilmu Material.
4. Bapak Dr. Muhammad Hikam selaku Pembimbing Akademik dan dosen penguji.
5. Bapak Dr. Azwar Manaf, M.Met selaku dosen penguji.
6. Bapak Dr. Suhardjo Poertadji selaku dosen penguji.
7. Istriku tercinta Wini dan anakku Sachi yang selalu menjadi motivator serta membuat hari-hari selalu ceria.
8. Keluarga tercinta yang telah memberikan bantuan moral dan material; dan
9. Teman-teman kuliah yang telah banyak banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Jakarta, 1 Desember 2009

Penulis

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Banarwoto
NPM : 0606150971
Program Studi : Ilmu Material
Departemen : Fisika
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Jenis Karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las Tabung LPG 3 Kg

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 1 Desember 2009

Yang menyatakan

(Banarwoto)

ABSTRAK

Nama : Banarwoto
Program studi : Ilmu Material
Judul : Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Sifat Mekanis
Sambungan Las Tabung LPG 3 Kg

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca las terhadap sifat mekanis sambungan las tabung LPG 3 kg. Pengelasan dilakukan pada baja karbon rendah JIS SG 295 yaitu material yang banyak digunakan untuk fabrikasi tabung LPG 3 kg.

Teknik pengelasan yang digunakan adalah *Submerged Arc Welding* (SAW), selanjutnya dilakukan proses perlakuan panas pasca las. Penelitian dilakukan dengan melakukan variasi perlakuan panas pasca las terhadap sambungan las tabung LPG 3 kg meliputi : tanpa perlakuan panas, dengan perlakuan panas temperatur 600⁰C dan 650⁰C, masing masing dengan waktu 10, 30, 45 dan 60 menit. Untuk mengetahui pengaruh perlakuan panas pasca las terhadap sifat mekanisnya, dilakukan beberapa pengujian yang meliputi uji tarik, uji kekerasan serta foto struktur makro dan mikronya.

Dari penelitian ini diperoleh kesimpulan bahwa waktu dan temperatur perlakuan panas pasca las tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan mekanis sambungan las tabung LPG 3 Kg. Namun demikian ditemukan ketidaksesuaian bentuk sambungan *joggle offset* terhadap ketentuan SNI 1452-2007.

Kata kunci : *submerged arc welding, perlakuan panas pasca las, tabung lpg 3kg*

ABSTRACT

Name : Banarwoto

Study Program: Material Science

Title : The Effect of Post Weld Heat Treatment on Mechanical Properties of Weld Joint of 3 Kg LPG Bottle

This study aims to determine the effect of post weld heat treatment on mechanical properties of weld joint of 3 kg LPG bottle. Welding is performed on low carbon steel JIS SG 295 as a widely used material for the manufacture of 3-kg LPG bottle.

Welding technique used is Submerged Arc Welding (SAW) and continued with the process of post weld heat treatment. Research was carried out by doing a variation of post weld heat treatment for 3 kg LPG bottle including : no heat treatment, heat treatment with temperature of 600⁰C and 650⁰C, with a holding time of 10, 30, 45 and 60 minutes respectively. To study the effect of post-weld heat treatment on the mechanical property – structure relationship, a number of examination was performed, including : tensile test, hardness test, macrostructure and microstructure examination.

The results obtained concluded that the time and temperature post-weld heat treatment does not have a significant effect on mechanical properties of weld joint of 3 Kg LPG bottle. However, we found that the join design (joggle offset) not comply with SNI 1452-2007.

Key words : *submerged arc welding, post weld heat treatment, 3kg lpg bottles*

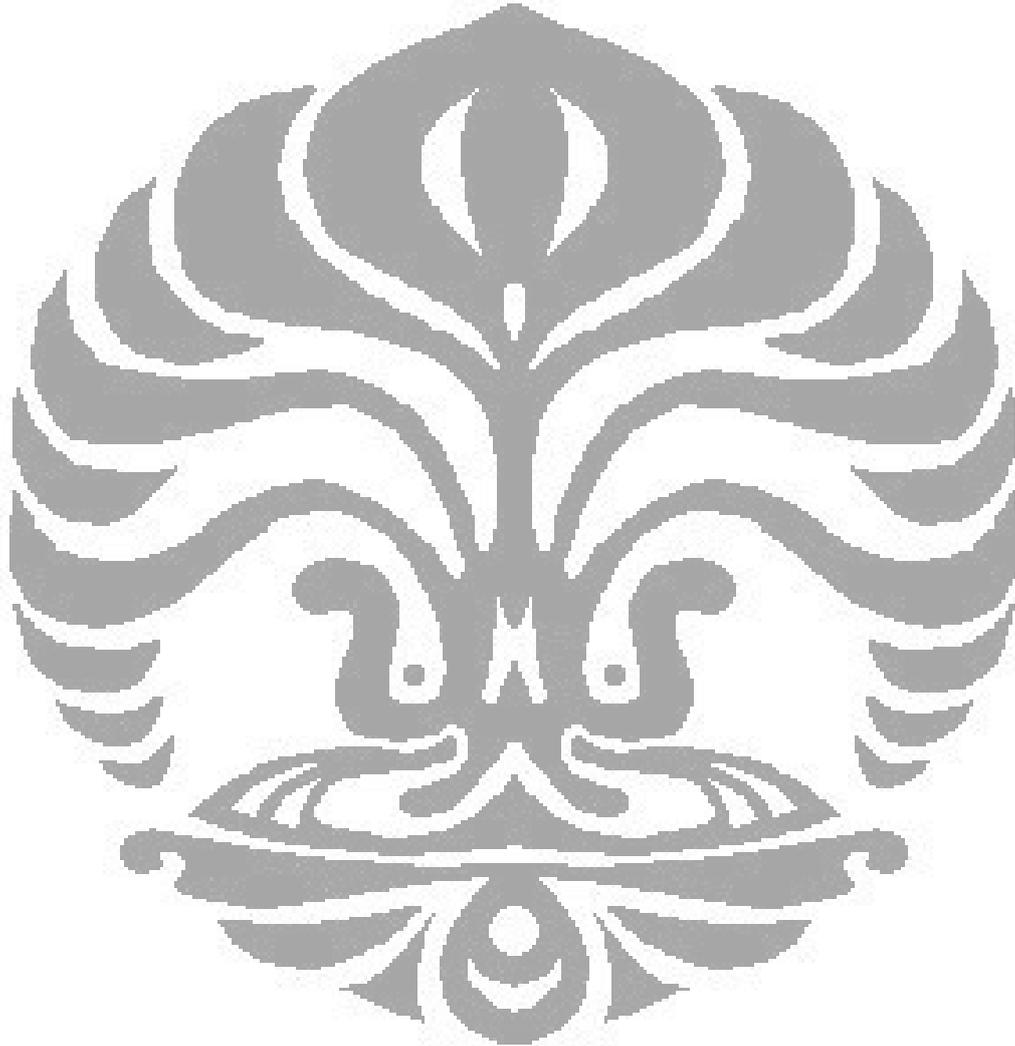
DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR...v	
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR RUMUS.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
1. PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Penelitian.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 <i>Liquefied Petroleum Gas</i> (LPG).....	4
2.2 Tabung LPG 3 Kg.....	4
2.2.1 Proses Fabrikasi Tabung LPG.....	5
2.3 Proses pengelasan.....	6
2.3.1 Parameter Pengelasan.....	6
2.3.2 Pengelasan <i>Submerged Arc Welding</i> (SAW).....	7
2.3.3 Posisi Pengelasan.....	8
2.3.4 Polaritas Pengelasan.....	9
2.3.5 Simbol elektroda dan maknanya.....	10
2.4 Masukan Panas (<i>Heat Input</i>).....	11
2.5 Struktur Mikro.....	11
2.5.1 Faktor-faktor Yang Mempengaruhi Struktur Logam.....	12

2.5.1.1	Komposisi Kimia.....	12
2.5.1.2	Pengaruh Proses Fabrikasi.....	13
2.5.1.3	Perlakuan Panas.....	14
2.6	Kemulusan dan Mutu Sambungan Las.....	16
3.	METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1	Alat dan Bahan.....	19
3.2.	Cara Kerja.....	19
3.2.1	Proses Perlakuan Panas Pasca Las.....	19
3.2.2	Proses Pengelasan Tabung LPG 3 Kg.....	19
3.2.3	Pengujian Tarik.....	20
3.2.4	Pengujian Kekerasan.....	21
3.2.5	Pengujian Metalography.....	22
4.	HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	24
4.1	Evaluasi Hasil Pengujian Tarik.....	24
4.2	Evaluasi Hasil Pengujian Kekerasan.....	27
4.3	Evaluasi Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las Tabung LPG 3 Kg.....	30
4.4	Evaluasi Hasil Pengujian Metalography.....	30
4.4.1	Struktur Makro.....	30
4.4.2	Struktur Mikro.....	32
5.	KESIMPULAN DAN SARAN.....	44
	DAFTAR PUSTAKA.....	45
	LAMPIRAN.....	46

DAFTAR TABEL

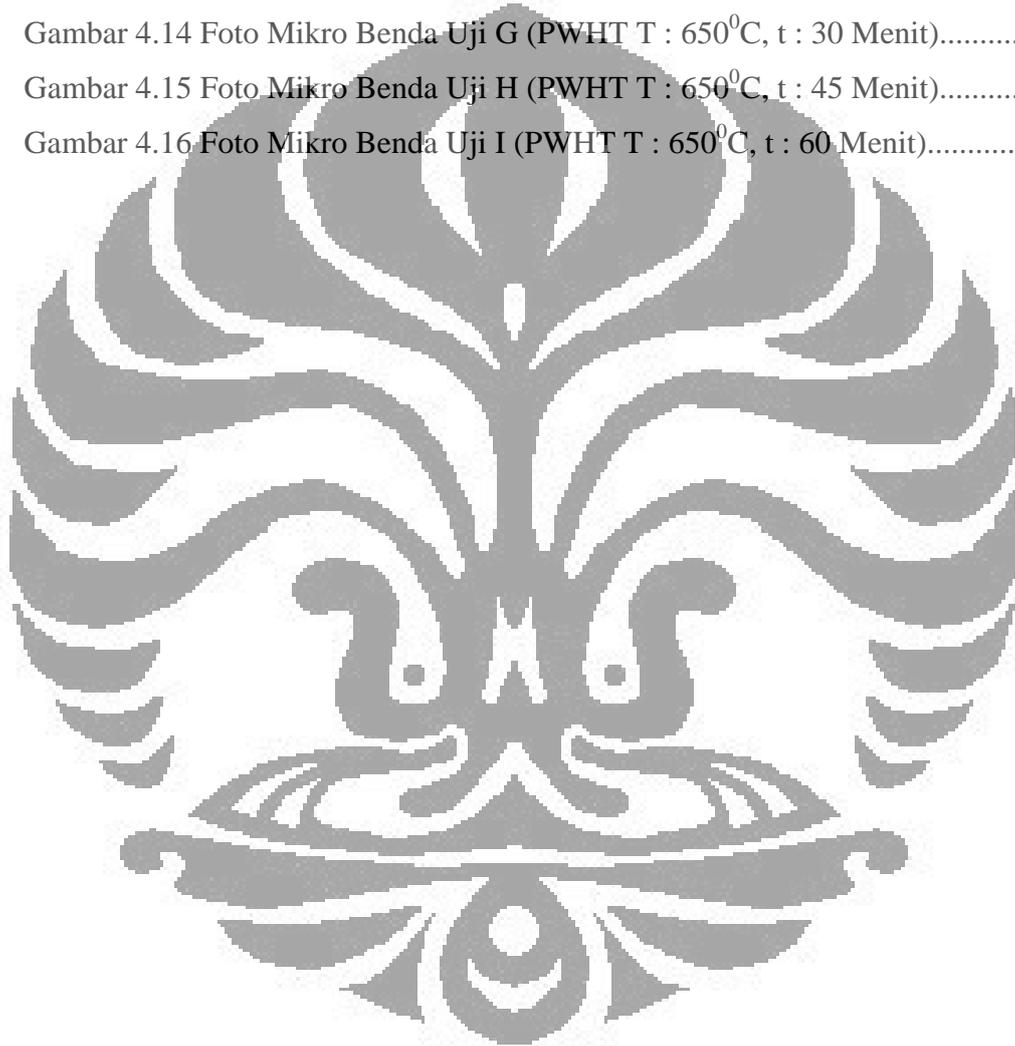
Tabel 4.1. Nilai Rata-rata Hasil Pengujian Tarik.....	24
Tabel 4.2. Nilai Rata-rata Hasil Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	27



DAFTAR GAMBAR

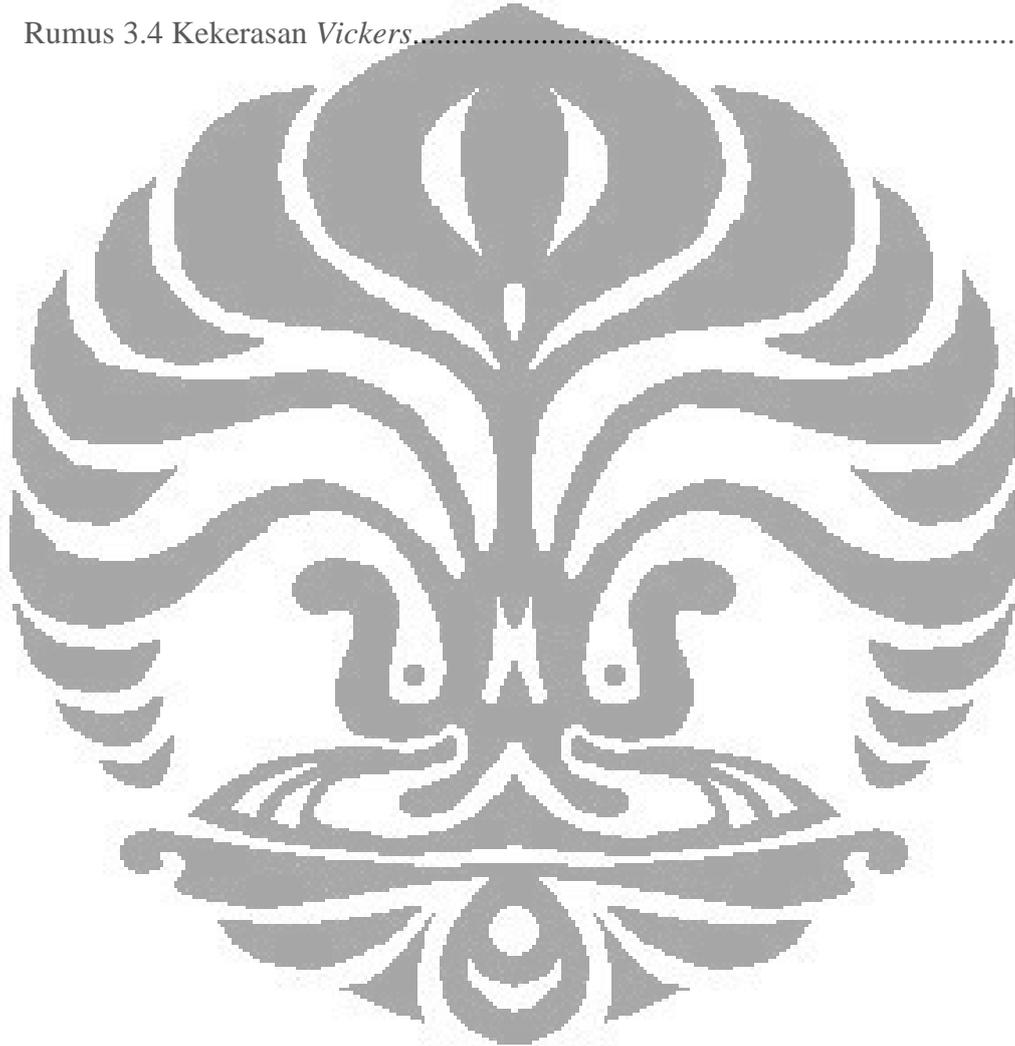
Gambar 2.1. Konstruksi Tabung LPG 3 kg.....	5
Gambar 2.2. Proses Pengelasan SAW Tabung LPG 3 Kg.....	8
Gambar 2.3. Posisi Pengelasan Pada Pelat.....	8
Gambar 2.4. Posisi Pengelasan Pada Pipa.....	9
Gambar 2.5. Polaritas Pengelasan.....	9
Gambar 2.6 Bagian-bagian Dari Sambungan Las.....	12
Gambar 2.7 Diagram Fasa Besi Karbon (Fe-C).....	13
Gambar 2.8 Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Selama Pendinginan Lambat Dari Fasa Austenit Menuju Temperatur Kamar.....	14
Gambar 2.9 Diagram TTT Untuk Baja Karbon.....	15
Gambar 2.10 Diagram CCT Untuk Baja Karbon.....	16
Gambar 3.1. Diagram Metodologi Penelitian.....	18
Gambar 3.2. Benda Uji Untuk Proses PWHT.....	19
Gambar 3.3. Bentuk Kampuh Sambungan Las Badan Tabung.....	20
Gambar 3.4. Spesimen Uji Tarik.....	21
Gambar 3.5. Lokasi Uji Kekerasan.....	22
Gambar 3.6. Lokasi Uji <i>Metalography</i>	23
Gambar 4.1. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekuatan Tarik.....	25
Gambar 4.2. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekuatan Luluh.....	25
Gambar 4.3. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap <i>Elongation</i>	26
Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Daerah Logam Induk.....	28
Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Daerah HAZ.....	28
Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Logam Las.....	29

Gambar 4.7 Foto Makro Benda Uji A, B, C, D, E, F, G, H, I.....	31
Gambar 4.8 Foto Mikro Benda Uji A (Tanpa PWHT).....	33
Gambar 4.9 Foto Mikro Benda Uji B (PWHT T : 600 ⁰ C, t : 10 Menit).....	34
Gambar 4.10 Foto Mikro Benda Uji C (PWHT T : 600 ⁰ C, t : 30 Menit).....	35
Gambar 4.11 Foto Mikro Benda Uji D (PWHT T : 600 ⁰ C, t : 45 Menit).....	36
Gambar 4.12 Foto Mikro Benda Uji E (PWHT T : 600 ⁰ C, t : 60 Menit).....	37
Gambar 4.13 Foto Mikro Benda Uji F (PWHT T : 650 ⁰ C, t : 10 Menit).....	39
Gambar 4.14 Foto Mikro Benda Uji G (PWHT T : 650 ⁰ C, t : 30 Menit).....	40
Gambar 4.15 Foto Mikro Benda Uji H (PWHT T : 650 ⁰ C, t : 45 Menit).....	41
Gambar 4.16 Foto Mikro Benda Uji I (PWHT T : 650 ⁰ C, t : 60 Menit).....	42



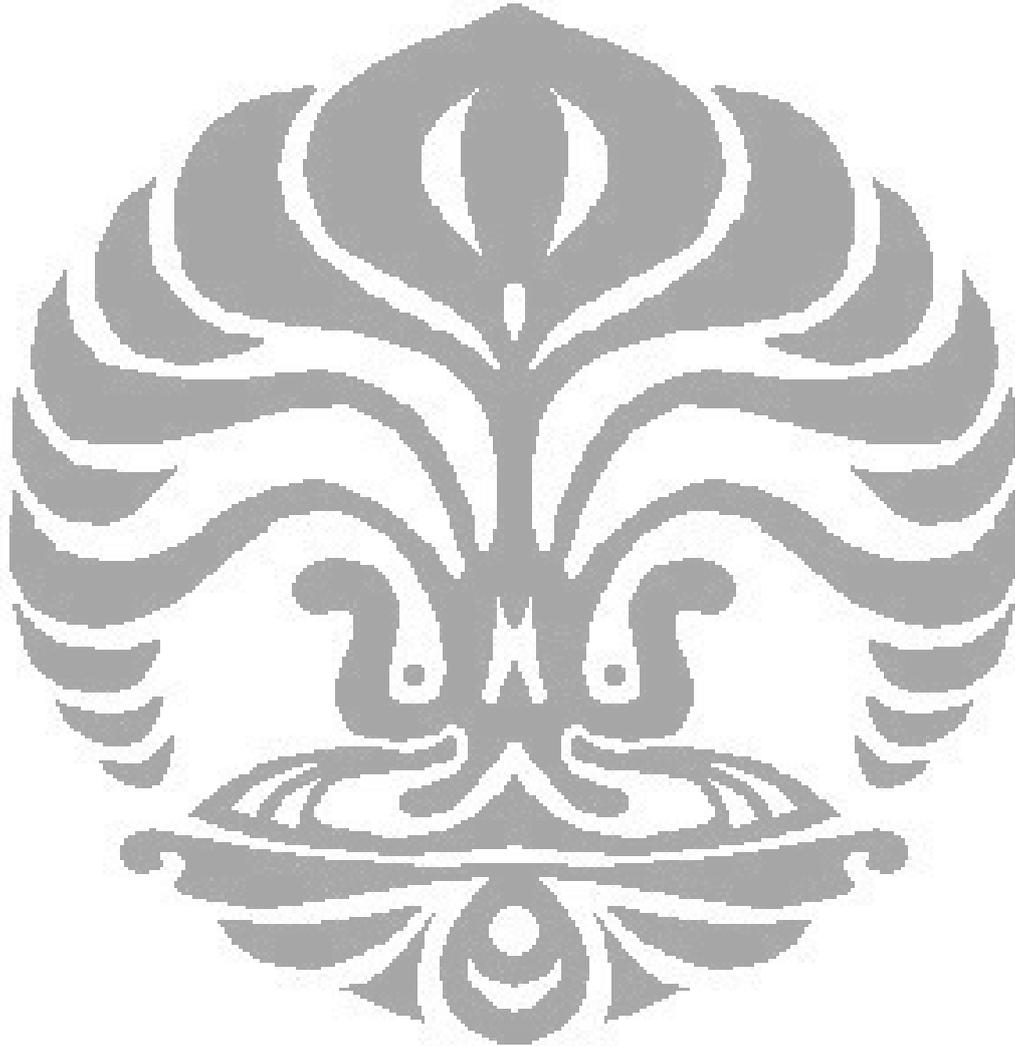
DAFTAR RUMUS

Rumus 2.1 Masukan Panas.....	11
Rumus 3.1 Tegangan Tarik.....	20
Rumus 3.2 Regangan.....	21
Rumus 3.3 Modulus Elastisitas.....	21
Rumus 3.4 Kekerasan <i>Vickers</i>	22



DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 HASIL PENGUJIAN TARIK.....47
LAMPIRAN 2 HASIL PENGUJIAN KEKERASAN.....50



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Penelitian

Dengan meningkatnya harga bahan bakar minyak di dunia, pemerintah cq. Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi saat ini sedang melakukan program konversi minyak tanah ke gas LPG secara bertahap di seluruh wilayah Indonesia¹. Untuk mendukung program konversi tersebut, berbagai infrastruktur pendukung juga mulai dibangun. Pemanfaatan gas suar bakar (*gas flare*)², mendorong pembangunan kilang baru, pembangunan tangki penampung gas LPG, pembangunan Stasiun Pengangkutan dan Pengisian Bulk Elpiji (SPPBE) dan fabrikasi tabung gas LPG 3 kg.

Distribusi gas LPG dari kilang ke pelanggan melalui beberapa jalur antara lain sebagai berikut:

1. Dari kilang, LPG akan dikirim menggunakan truk atau kereta (RTW) menuju SPPBE yang kemudian akan didistribusikan ke pelanggan menggunakan tabung LPG. Pola distribusi ini akan ekonomis apabila diterapkan untuk daerah yang posisi geografisnya tidak jauh dari lokasi kilang.
2. Jalur distribusi yang kedua yaitu untuk daerah yang jauh dari lokasi kilang. LPG dari kilang akan dikirim ke pelabuhan-pelabuhan transit (terminal LPG) menggunakan kapal. Begitu sampai di pelabuhan tujuan, LPG akan disimpan dalam *spherical tank* (tangki bola)³. Dari terminal tersebut LPG akan dikirim ke SPPBE dan dilanjutkan dengan distribusi ke pelanggan melalui tabung LPG.

Untuk mendukung program konversi tersebut di atas, pemerintah membuka kesempatan kepada investor untuk membangun fasilitas pendukungnya, dimana salah satunya yaitu fabrikasi tabung LPG 3 kg⁴. Dengan fungsi regulasi yang melekat, pemerintah berkewajiban melakukan pengawasan terhadap seluruh proses fabrikasi, instalasi pengisian, pengangkutan, penanganan & penggunaan

serta pemeriksaan berkala tabung LPG 3 kg. Tabung LPG 3 kg dapat dikategorikan sebagai peralatan khusus dan bersifat kritikal karena hal-hal berikut ini:

1. Pemakai tabung LPG 3 kg adalah konsumen rumah tangga yang kebanyakan adalah masyarakat yang sebelumnya sebagai pengguna minyak tanah yang belum terbiasa dan terdidik untuk menggunakan kompor LPG, sementara itu perlu perlakuan berbeda dalam penggunaan kompor gas ini dibandingkan dengan penggunaan kompor minyak tanah. Kurangnya edukasi ini menyebabkan masih seringnya terjadi beberapa kecelakaan kejadian tabung meledak.
2. Isi dari tabung yang berupa gas LPG, dimana dari sifatnya merupakan fluida yang berbahaya karena mudah terbakar.
3. Mutu tabung LPG 3 kg yang masih perlu peningkatan. Dari hasil pengawasan yang telah dilakukan di tingkat produsen tabung, ditemukan beberapa kegagalan produk yang salah satunya diindikasikan dengan ditemukannya cacat dilokasi pengelasan.
4. Penanganan tabung LPG 3 kg yang tidak sesuai dengan pedoman, baik di tempat instalasi pengisian, pengangkutan, penanganan dan penggunaan tabung LPG 3 kg.

1.2 Perumusan Masalah

Proses pengelasan dalam fabrikasi tabung LPG 3 kg harus memenuhi standar dan peraturan yang berlaku serta sesuai dengan desain yang telah direncanakan. Dalam fabrikasi tabung LPG 3 kg, bahan yang digunakan adalah baja karbon rendah JIS SG 295⁴. Setelah proses pengelasan akan dilanjutkan dengan proses perlakuan panas pasca las (PWHT). Sebelum proses pengelasan dimulai, fabrikator tabung harus menyusun *Welding Procedures Specification* (WPS) sebagai pedoman juru las maupun inspektur las dalam melakukan aktivitas pengelasan⁵. Beberapa parameter dipilih pada saat penyusunan WPS tersebut. Salah satu parameter penting adalah proses perlakuan panas pasca las (PWHT), dimana pemilihan temperatur serta waktu pemanasan sangat berpengaruh terhadap kualitas sambungan las tabung LPG yang diperoleh.

Pemilihan temperatur dan waktu PWHT disamping untuk mendapatkan hasil yang terbaik dari segi keamanan maupun ketangguhannya juga untuk menghasilkan produk yang ekonomis dari sisi biayanya. Sehingga diharapkan dapat mendukung suksesnya program konversi yang sedang dilaksanakan pemerintah.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui bagaimana pengaruh perlakuan panas pasca las (PWHT)⁴ terhadap sifat mekanis sambungan las tabung LPG 3 kg sehingga akan dihasilkan tabung LPG yang memenuhi syarat dan dapat digunakan dengan aman serta biaya yang lebih efisien.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Liquefied Petroleum Gas (LPG)

LPG merupakan campuran gas hidrokarbon yang dicairkan, mempunyai komponen utama propana dan/atau butana⁶. Pada tekanan dan temperatur normal LPG ada dalam fasa gas tetapi umumnya LPG disimpan dalam tabung bertekanan. LPG dalam tabung baja pada temperatur *ambien* mempunyai tekanan sekitar 480 kPa (70 psi), tetapi jika tabung disimpan pada temperatur tinggi, dekat sumber panas atau terkena sinar matahari langsung, maka tekanannya dapat naik cukup tinggi. Produk LPG dicairkan melalui proses pendinginan, tetapi dijaga dalam fasa cair dengan pemberian tekanan. Saat LPG disimpan dalam tanki atau tabung silinder, LPG tersebut berada dalam wujud gas dan cair yang berkesetimbangan.

LPG lebih berat dari udara dan sulit terdispersi, cenderung bergerak ke level rendah dan bisa sampai pada jarak yang jauh. LPG tersebut akan mengalir di sepanjang lantai ke saluran ruang bawah tanah dan tempat lain yang terletak di bawah. LPG tidak boleh digunakan atau disimpan di ruang bawah tanah, karena hal ini dapat mengakibatkan sesak nafas jika LPG terlepas di ruangan tertutup. LPG yang disimpan dalam tabung baja biasanya diodorisasi untuk memungkinkan mendeteksi gas yang terlepas dari tabung/tanki dengan mengenali baunya sebelum campuran LPG dan udara tersebut mencapai batas bawah flamabilitasnya. Pada beberapa keadaan kebocoran LPG dapat diketahui dengan penglihatan, dimana di lokasi kebocoran akan terjadi efek pendinginan pada udara di sekitarnya, menyebabkan kondensasi dan bahkan pembekuan uap air.

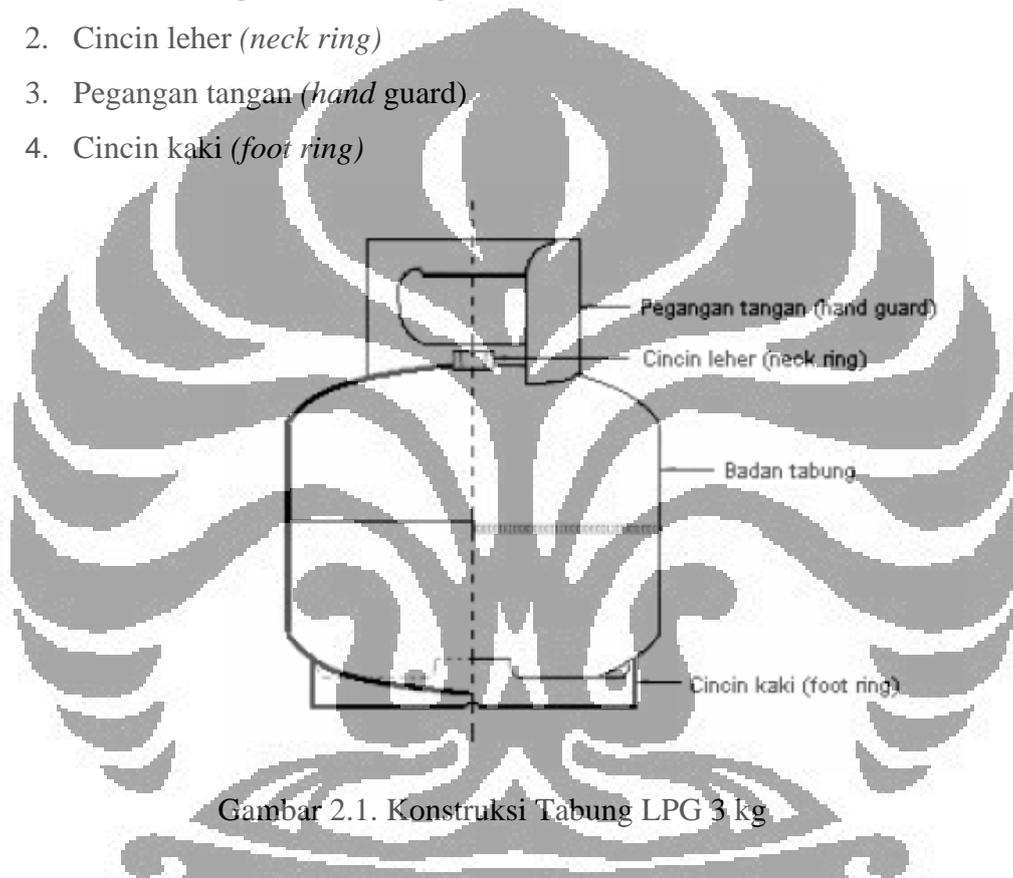
2.2 Tabung LPG 3 Kg

Tabung LPG adalah tabung bertekanan yang dibuat dari plat baja karbon canai panas, digunakan untuk menyimpan gas LPG dengan kapasitas pengisian antara 3 kg (7,3 liter) sampai dengan 50 kg (108 liter) dan tekanan disain minimum 18.6 kg/cm². Konstruksi tabung LPG terdiri dari dua dan tiga bagian, untuk tabung LPG 3 kg menggunakan konstruksi 2 bagian⁴. Bahan untuk badan

tabung adalah JIS SG 295, sedangkan bahan untuk cincin leher (*neck ring*) menggunakan S45C. Kemudian untuk cincin kaki (*foot ring*) dan pegangan tangan (*hand guard*) menggunakan baja canai panas kelas SS400 atau sesuai dengan bahan untuk badan tabung yang bersangkutan.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1 di bawah ini⁴, konstruksi tabung LPG 3 kg terdiri dari :

1. Badan tabung terdiri dari bagian atas dan bawah
2. Cincin leher (*neck ring*)
3. Pegangan tangan (*hand guard*)
4. Cincin kaki (*foot ring*)



Gambar 2.1. Konstruksi Tabung LPG 3 kg

2.2.1 Proses Fabrikasi Tabung LPG

Bahan tabung LPG terbuat dari baja lembaran yang kemudian dipotong melalui proses *blanking*⁴. Proses *blanking* pada produksi tabung LPG 3 kg yaitu pembentukan *blank* yang menjadi bagian badan tabung, terdiri dari *blank* untuk bagian atas dan bawah tabung. Proses selanjutnya adalah pembentukan melalui proses *deep drawing*⁴.

Proses *deep drawing* dilakukan dengan menekan material benda kerja yang berupa lembaran logam yang disebut dengan *blank* sehingga terjadi

peregangan mengikuti bentuk *dies*, bentuk akhir ditentukan oleh *punch* sebagai penekan dan *die* sebagai penahan benda kerja saat ditekan oleh *punch*

Untuk selanjutnya kedua bagian badan tabung tersebut disambung melalui proses pengelasan. Setelah pengelasan akan dilanjutkan dengan proses perlakuan panas pasca las untuk menghilangkan tegangan sisa baik pada saat proses *deep drawing* maupun saat pengelasan, serta fungsi-fungsi lainnya.

2.3 Proses Pengelasan

Las adalah proses penyambungan material yang banyak digunakan dalam fabrikasi bejana bertekanan⁷. Definisi las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam yang dilakukan dalam keadaan cair dan terjadi fusi³. Fusi disini dapat diartikan larutnya bahan yang akan disambung dengan bahan tambahan yaitu kawat elektroda. Untuk berhasilnya penyambungan diperlukan beberapa persyaratan yang harus dipenuhi, yakni³:

1. bahwa benda padat tersebut dapat cair/lebur oleh panas.
2. bahwa benda-benda padat yang disambung tersebut terdapat kesesuaian sifat lasnya sehingga tidak melemahkan atau menggagalkan sambungan tersebut.
3. bahwa cara-cara penyambungan sesuai dengan sifat benda padat dan tujuan penyambungannya.

Sumber panas untuk pengelasan dihasilkan dari proses-proses seperti busur nyala listrik, tahanan listrik, induksi listrik dll. Hingga saat ini terdapat beberapa jenis pengelasan antara lain : Las TIG (*Tungsten Inert Gas*), SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), SAW (*Submerged Arc Welding*), dan masih banyak lagi teknik pengelasan lainnya.

2.3.1 Parameter Pengelasan

Dalam pengelasan ada beberapa parameter pengelasan yang harus diikuti. Parameter pengelasan ini dirangkum dalam suatu dokumen yang disebut *Welding Prosedur Spesification* (WPS). Beberapa parameter yang diatur antara lain : jenis mesin las, arus listrik, polaritas tegangan listrik, jenis elektroda, posisi pengelasan,

bentuk kampuh, jenis material logam induk, perlakuan panas pra maupun pasca las serta parameter pengelasan lainnya.

2.3.2 Pengelasan *Submerged Arc Welding* (SAW)

Dalam fabrikasi tabung LPG 3 kg, digunakan proses pengelasan SAW⁴ atau disebut las busur rendam untuk penyambungan badan atas dan bawah tabung. Selain itu digunakan juga proses pengelasan *Gas Metal Arc Welding* (GMAW).

Las SAW adalah suatu cara mengelas dimana logam cair ditutup dengan fluks yang diatur melalui suatu penampang fluks dan logam pengisi yang berupa kawat pejal diumpankan secara kontinyu³.

Hal-hal di bawah ini merupakan kelebihan dan kekurangan dari las SAW :

1. Seluruh kolam las tertutup oleh fluks sehingga kualitas daerah las sangat baik.
2. Dapat digunakan kawat las yang besar sehingga arus pengelasan juga besar yang berimbas dengan dalamnya penetrasi dan meningkatkan efisiensi pengelasan.
3. Kampuh las dapat dibuat kecil sehingga dapat menghemat bahan las.
4. Proses las SAW adalah otomatis sehingga tidak diperlukan kemampuan juru las yang terlalu tinggi. Perubahan teknik pengelasan yang dilakukan oleh juru las tidak banyak pengaruhnya terhadap kualitas hasil lasan.
5. Busur las tidak kelihatan, sehingga kesalahan penentuan parameter las akan menggagalkan seluruh hasil lasan.
6. Posisi pengelasan terbatas hanya pada posisi horisontal.

Mesin las SAW otomatis ada berbagai macam jenisnya, pada jenis ini seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2 kepala las pada posisi tetap di atas benda kerja, sedangkan benda kerja berputar di bawah kepala las tersebut. Fluks yang diperlukan diumpankan melalui pipa penyalur dari penampung fluks yang juga terletak di atas benda kerja. Secara umum mesin las SAW melayani satu kawat elektroda saja, namun demikian tidak menutup kemungkinan apabila satu mesin las melayani dua atau tiga kawat elektroda untuk memperbaiki efisiensi pengelasan.



Gambar 2.2. Proses Pengelasan SAW Tabung LPG 3 Kg

2.3.3 Posisi Pengelasan

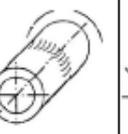
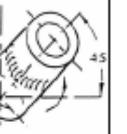
Posisi pengelasan yang dikenal dapat dilihat pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4 sebagai berikut:

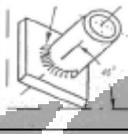
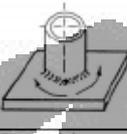
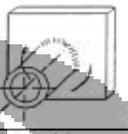
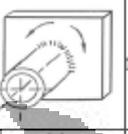
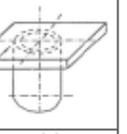
1. Pengelasan pada pelat
 - a. Las tumpul
 - b. Las fillet

Posisi 1G	Posisi 2G	Posisi 3G	Posisi (v-d)G	Posisi 4G
Datar	Horisontal	Vertikal ke atas	Vertikal ke bawah	Atas kepala
Posisi 1F	Posisi 2F	Posisi 3F	Posisi (v-d)F	Posisi 4F
Datar	Horisontal	Vertikal ke atas	Vertikal ke bawah	Atas kepala

Gambar 2.3. Posisi Pengelasan Pada Pelat

2. Pengelasan pada pipa
 - a. Las tumpul
 - b. Las filet

Posisi 1G	Posisi 2G	Posisi 5G	Posisi (v-d)G	Posisi 6G
				
Pipa : berputar Sumbu: horisontal Las : datar	Pipa : tetap Sumbu: vertikal Las : horisontal vertikal	Pipa : tetap Sumbu: horisontal Las : vertikal ke atas	Pipa : tetap Sumbu: horisontal Las : vertikal ke bawah	Pipa : tetap Sumbu: miring Las : ke atas

Posisi 1F	Posisi 2F	Posisi 3F	Posisi 3F	Posisi 4F
				
Pipa : berputar Sumbu: horisontal Las : datar	Pipa : tetap Sumbu: vertikal Las : horisontal vertikal	Pipa : tetap Sumbu: horisontal Las : vertikal ke atas	Pipa : tetap Sumbu: horisontal Las : vertikal ke bawah	Pipa : tetap Sumbu: vertikal Las : horisontal atas kepala

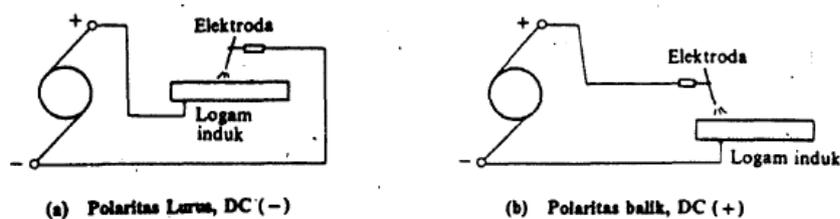
Gambar 2.4. Posisi Pengelasan Pada Pipa

2.3.4 Polaritas Pengelasan

Proses Pengelasan dapat menggunakan arus listrik searah maupun bolak-balik. Untuk arus bolak-balik, tidak ada masalah dengan polaritas, namun untuk arus searah maka polaritas harus benar-benar diperhatikan, sebab pemakaian polaritas yang berlawanan dengan yang seharusnya untuk elektroda tertentu akan mengakibatkan kurang maksimalnya hasil pengelasan. Sebagai contoh pemilihan suatu polaritas adalah untuk mendapatkan penetrasi las tertentu, ketika pemilihan arus terbalik tentunya akan mempengaruhi hasil penetrasi las yang akan dicapai.

Dalam dunia pengelasan dikenal dua jenis polaritas³, yakni polaritas lurus dan polaritas terbalik (lihat Gambar 2.5). Yang dimaksud polaritas lurus yakni apabila tangkai las dihubungkan dengan kutub negatif sedangkan klem las dihubungkan dengan kutub positif pada mesin las.

Sedangkan yang dimaksud dengan polaritas terbalik yakni apabila tangkai las dihubungkan dengan kutub positif dan klem las dihubungkan dengan kutub negatif pada mesin las.



Gambar 2.5. Polaritas Pengelasan

Beberapa jenis elektroda diciptakan untuk pengelasan dengan polaritas lurus dan sebagian lagi dengan polaritas terbalik. Kegunaan polaritas ada hubungannya dengan sifat *coating* elektroda. Ada sebagian *coating* bekerja lebih baik dengan polaritas lurus dan sebagian lainnya lebih baik dengan polaritas terbalik. *Coating* disamping sebagai anti oksidasi juga sebagai alat untuk menstabilkan nyala busur listrik.

2.3.5 Simbol Elektroda dan Maknanya

Sehubungan dengan banyaknya jenis elektroda yang dipergunakan dalam proses pengelasan, maka untuk memudahkan pemilihan dan pengidentifikasiannya agar sesuai dengan bahan yang akan dilas dan cara pengelasannya, dibuatlah sistem simbol atau kode yang akan mengidentifikasi jenis bahan lapis pelindungnya, kekuatan mekanisnya, posisi/cara pengelasannya dan jenis arus serta polaritas listrik yang dikehendaki³.

Kode elektroda (X) (XX) (X) (X) – (X)
(1) (2,3) (4) (5) (6)

1. Huruf pertama yaitu E, R, B, Cu dan Si, dimana :
 - E : berarti elektroda
 - R : berarti *rod* atau batang las
 - B : berarti *brazing* atau solder keras
 - Cu : berarti *copper* atau tembaga
 - Si : berarti silikon
2. Huruf kedua dan ketiga menunjukkan kekuatan tarik bahan las setelah dilas, misalkan E7018 berarti bahan tersebut kuat tariknya setelah dilaskan 70.000 psi.
3. Huruf keempat menunjukkan posisi pengelasan yang tepat dengan bahan las tersebut, misalnya E7018 dimana angka 1 menunjukkan bahwa elektroda boleh dipakai untuk semua posisi.
4. Huruf kelima menunjukkan jenis arus listrik yang sesuai untuk elektroda yang bersangkutan dan tipe lapis pelindung.

5. Tambahkan huruf terakhir menunjukkan adanya tambahan komposisi kimia pada elektroda misalkan A1, B1, M, G dll.

2.4 Heat Input (Masukan Panas)

Masukan panas selama pengelasan tergantung pada :

- Daya hantar panas dari logam yang disambung
- Geometri bahan yang disambung
- Jenis sambungan
- Teknik pengelasan termasuk parameter las

Besarnya masukan panas per satuan panjang las adalah :

$$E = \frac{V * I}{W_s} \text{ (joule/m)} \quad (2.1)$$

dimana

E = Energi (masukan panas) per satuan panjang las

V = Tegangan listrik dalam volt

I = Arus listrik dalam amper

Ws = Kecepatan pengelasan dalam m/detik

Apabila pengelasan menggunakan pemanasan awal, maka panas dari pemanasan awal tersebut termasuk dalam perhitungan masukan panas.

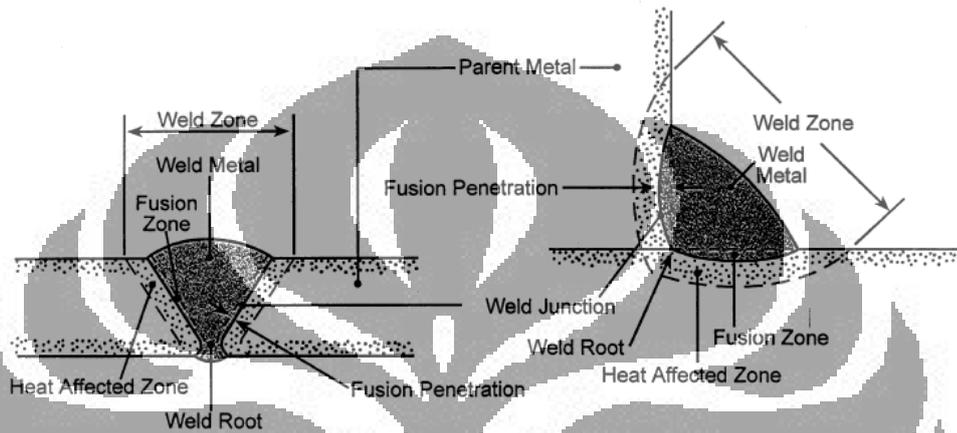
2.5 Struktur Mikro

Daerah las terdiri dari 3 bagian yaitu³:

1. Logam Lasan
Yaitu bagian logam pada waktu pengelasan yang mencair dan kemudian membeku.
2. Daerah pengaruh panas/*Heat Affected Zone* (HAZ)
Adalah logam induk yang bersebelahan dengan logam lasan yang selama proses pengelasan terpengaruh panas sehingga terjadi perubahan struktur mikro.
3. Logam induk yang tak terpengaruhi

Adalah logam induk dimana panas dan suhu pengelasan tidak mempengaruhi/menyebabkan perubahan struktur mikro.

Selain ketiga bagian di atas ada satu daerah khusus yang membatasi antara logam lasan dan daerah pengaruh panas yang disebut batas las (*weld junction*) yang bisa dilihat pada Gambar 2.6 dibawah.



Gambar 2.6 Bagian-bagian Dari Sambungan Las.

2.5.1 Faktor – faktor Yang Mempengaruhi Struktur Logam

Ada tiga faktor utama yang berperan mempengaruhi struktur suatu logam yaitu :

1. Komposisi kimia.
2. Proses fabrikasi logam.
3. Proses perlakuan panas.

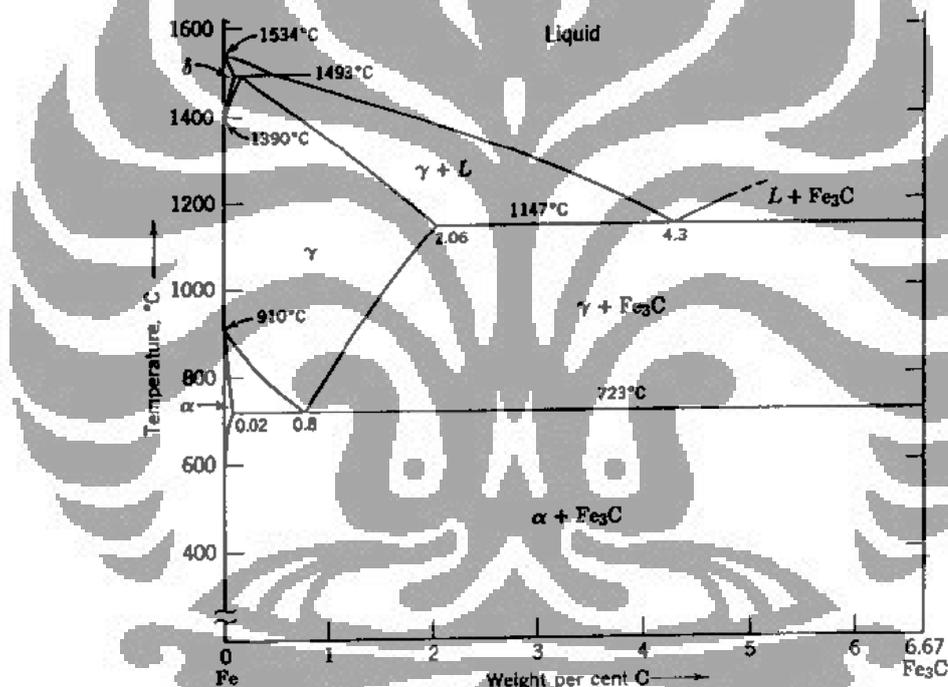
2.5.1.1 Komposisi Kimia

Dari diagram fasa besi karbon seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.7 dapat dijelaskan hal-hal sebagai berikut :

Besi murni pada suhu di bawah 910°C mempunyai struktur kristal bcc, dimana besi bcc tersebut dapat melarutkan karbon dalam jumlah yang sangat rendah yaitu sekitar 0.02% maksimum pada temperatur 723°C . Larutan padat interstisi dari karbon di dalam besi ini disebut besi alpha atau fasa ferit. Pada temperatur diantara 910°C dan 1390°C , atom-atom besi menyusun diri menjadi bentuk kristal fcc yang disebut besi gamma atau fasa austenit. Besi gamma ini

dapat melarutkan karbon dalam jumlah besar yaitu sekitar 2.06% maksimum pada temperatur 1147°C. Diantara 1390°C dan 1534°C, besi gamma berubah strukturnya menjadi besi bcc kembali yang disebut besi delta.

Diagram fasa besi karbon dalam Gambar 2.7 merupakan dasar dari baja karbon. Sampai dengan kandungan karbon 1.7%, sistem besi karbon masih dalam kategori baja karbon, sedangkan di atas 1.7% termasuk kategori besi tuang. Besarnya kadar karbon akan mempengaruhi sifat mekanisnya, dimana makin tinggi kadar karbon maka akan meningkatkan kekerasan/kuatannya akan tetapi keuletannya makin rendah. Pada besi tuang, sebagian besar kandungan karbonnya membentuk grafit yang menyebabkan sifat rapuh.



Gambar 2.7 Diagram Fasa Besi Karbon (Fe-C)⁸

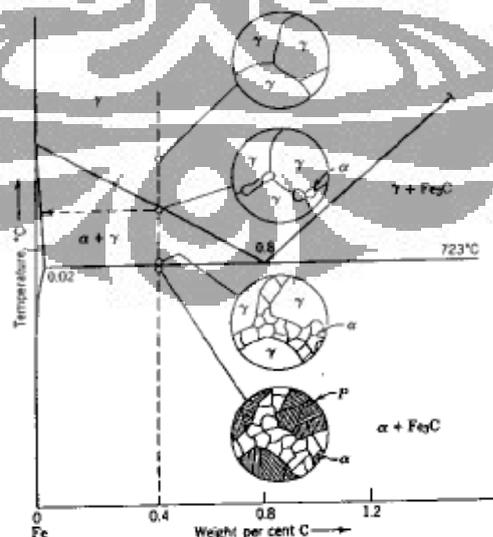
2.5.1.2 Pengaruh Proses Fabrikasi

Hasil dari proses pengecoran adalah produk berbentuk *billet* atau *slab* yang umumnya distribusi komposisi dan strukturnya belum merata dan kemungkinan masih mengandung cacat-cacat material. Untuk memperbaiki kekurangan tersebut, *billet* atau *slab* dipanaskan terlebih dahulu sampai mencapai kondisi homogen. Temperatur pemanasan tersebut adalah pada daerah austenit. Dalam kondisi panas, selanjutnya *billet* atau *slab* tersebut dilakukan proses

pengerolan untuk membuat pelat maupun rod. Pada proses pengerolan tersebut akan terjadi perubahan fasa dan struktur logam yang ditentukan oleh faktor-faktor seperti : elemen paduan, besarnya perubahan bentuk (besarnya reduksi penampang), temperatur kerja serta kecepatan pengerjaan. Pada proses pengerjaan panas, biasanya logam mempunyai kekuatan yang rendah. Untuk meningkatkan kekuatannya maka dilakukan proses pengerjaan dingin. Efek peningkatan kekuatan logam akibat pengerjaan dingin disebut pengerasan regangan (*strain hardening*). Kombinasi pengerjaan panas dan dingin dan dilanjutkan dengan proses perlakuan panas dapat menghasilkan struktur logam dengan butiran halus yang dapat memperbaiki sifat-sifat mekanisnya.

2.5.1.3 Perlakuan Panas

Dari diagram fasa seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.7 terlihat bahwa temperatur sekitar 723°C merupakan temperatur transformasi austenit menjadi fasa perlit (merupakan gabungan fasa ferit dan sementit). Proses transformasi fasa ini disebut reaksi eutektoid dan merupakan dasar perlakuan panas pada baja. Apabila baja dipanaskan hingga temperatur austenit dan kemudian didinginkan perlahan-lahan sampai temperatur kamar, maka struktur (fasa) yang dihasilkan adalah campuran dari ferit dan sementit atau karbida besi (Fe_3C) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 2.8 di bawah ini.



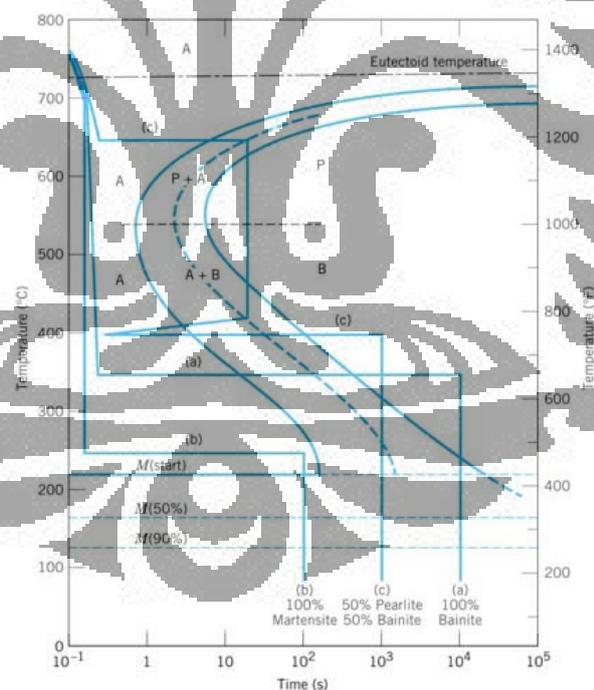
Gambar 2.8 Perubahan Struktur Mikro Baja Karbon Selama Pendinginan Lambat Dari Fasa Austenit Menuju Temperatur Kamar⁸

Apabila austenit didinginkan dengan cepat seperti yang terjadi pada pengelasan baja, maka transformasi sementit tidak terjadi dan hasil transformasi austenit akan berubah menjadi fasa baru yang dikenal sebagai bainit dan atau martensit.

Bainit mungkin terbentuk apabila austenit didinginkan dengan cepat hingga temperatur tertentu (sekitar 200 – 400°C).

Martensit dapat terjadi apabila austenit didinginkan dengan cepat sekali (dicelup) hingga temperatur di bawah temperatur pembentukan bainit.

Dari penjelasan di atas terlihat bahwa diagram fasa besi karbon tidak lagi dapat digunakan untuk menentukan transformasi fasa yang tergantung pada waktu (kecepatan) pendinginan. Untuk menentukan laju reaksi perubahan fasa yang terjadi dapat diperoleh dari diagram TTT (*time temperature transformation*). Diagram TTT untuk baja karbon dapat dilihat dalam Gambar 2.9 di bawah ini.

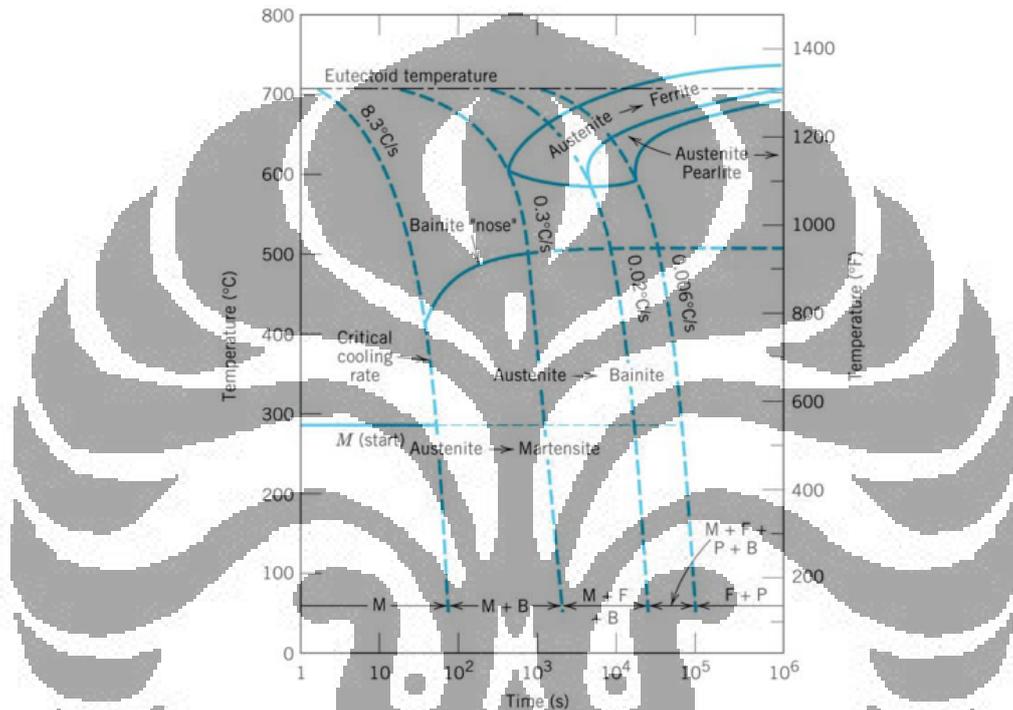


Gambar 2.9 Diagram TTT Untuk Baja Karbon⁸

Untuk mendapatkan hubungan antara kecepatan pendinginan dan struktur mikro (fasa) yang terbentuk bisa dilakukan dengan menggabungkan diagram kecepatan pendinginan ke dalam diagram TTT yang dikenal dengan diagram CCT (*continuous cooling transformation*) seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.10 di

bawah ini. Dari Gambar 2.10 dapat dilihat bahwa bila laju pendinginan dari austenit turun, maka struktur akhir yang terjadi berubah dari campuran ferit-perlit ke campuran ferit-perlit-bainit-martensit dan seterusnya sampai akhirnya terjadi struktur martensit

Dari penjelasan di atas terlihat bahwa diagram CCT sangat penting dalam melakukan proses perlakuan panas untuk menentukan struktur mikro yang akan terjadi. Hal yang sama pentingnya adalah untuk struktur proses pengelasan logam dimana diagram CCT tersebut dapat digunakan untuk menentukan perubahan struktur mikro yang terjadi pada bagian sambungan las.



Gambar 2.10 Diagram CCT Untuk Baja Karbon⁸

2.6 Kemulusan dan Mutu Sambungan Las

Kualitas dari sambungan las sangat dipengaruhi oleh kemulusan las yang artinya hasil dari pengelasan harus bebas dari cacat-cacat las, misalnya *porosity*, *incomplete fusion*, *incomplete penetration*, *undercut* dll^[3].

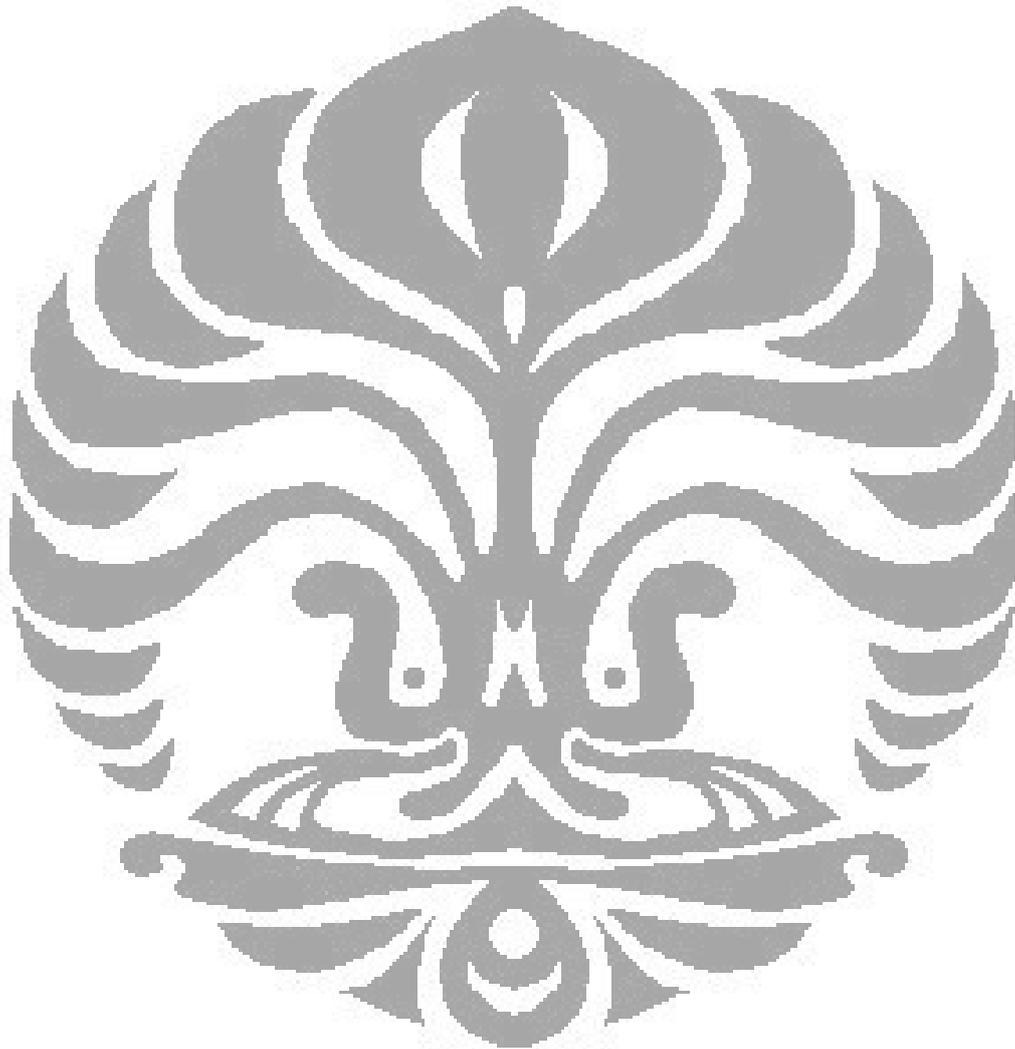
Seperti yang disyaratkan oleh standar bejana bertekanan khususnya tabung LPG 3 kg untuk mengetahui kemulusan dilakukan dengan cara :

- Pemeriksaan visual
- Pemeriksaan *radiography*

Tidak hanya kemulusan yang menjadi parameter mutu sambungan las, hal yang sangat penting adalah pada sifat mekanisnya. Untuk mengetahui sifat

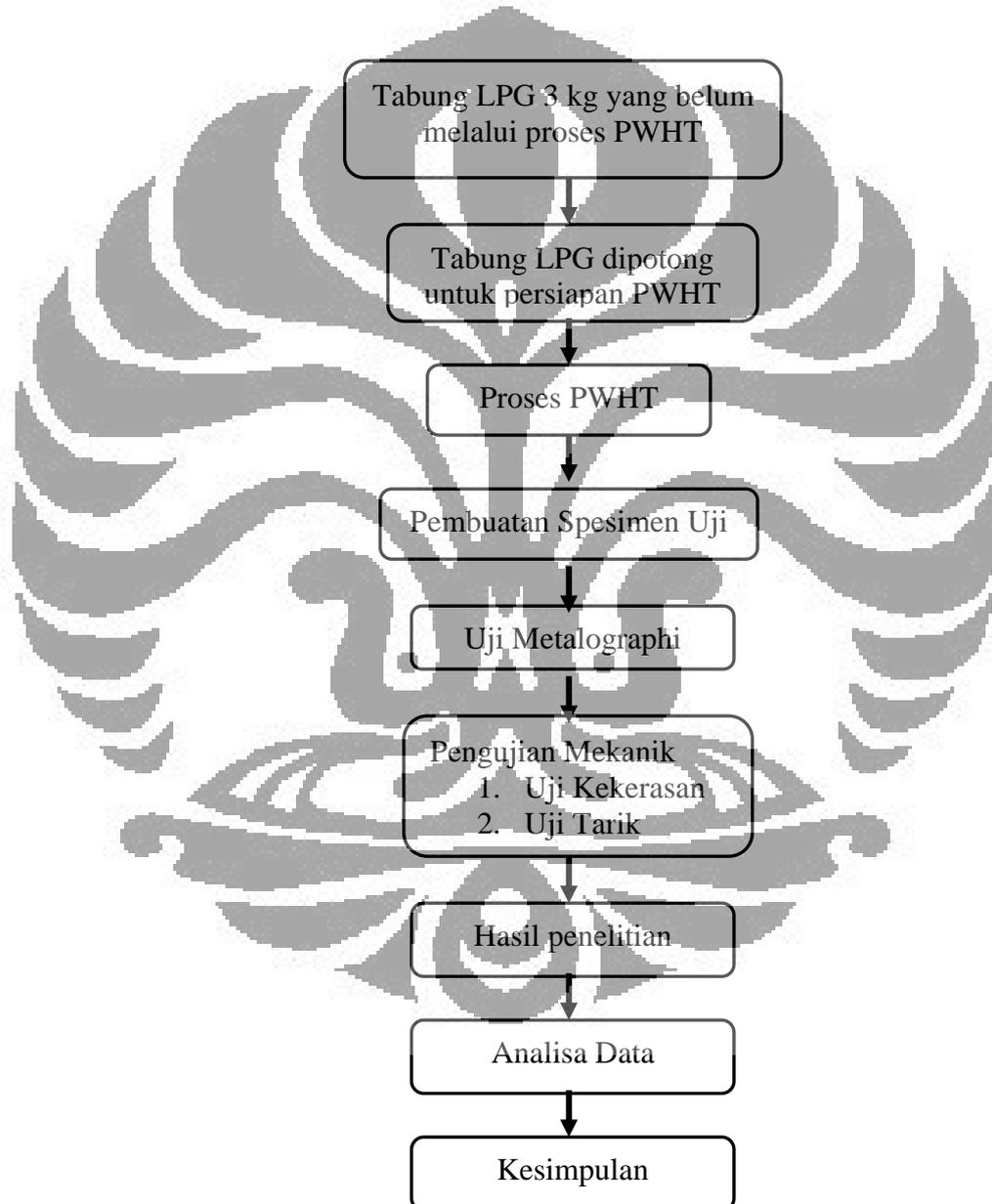
mekanis sambungan las dilakukan pengujian untuk menentukan sifat-sifat sebagai berikut:

- Kekuatan tarik
- Kekerasan



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari dan mencari pengaruh waktu dan temperatur perlakuan panas pasca las terhadap sifat mekanis dari sambungan las pada fabrikasi tabung LPG 3 kg. Adapun tahapan penelitian meliputi langkah-langkah sesuai Gambar 3.1. di bawah ini.



Gambar 3.1. Diagram metodologi penelitian

3.1 Alat dan Bahan

Penyiapan peralatan dan bahan penelitian meliputi tabung LPG 3 kg, alat potong tabung, alat PWHT, *stop watch*, alat uji tarik, alat uji kekerasan *Vickers*, alat foto makro dan mikro.

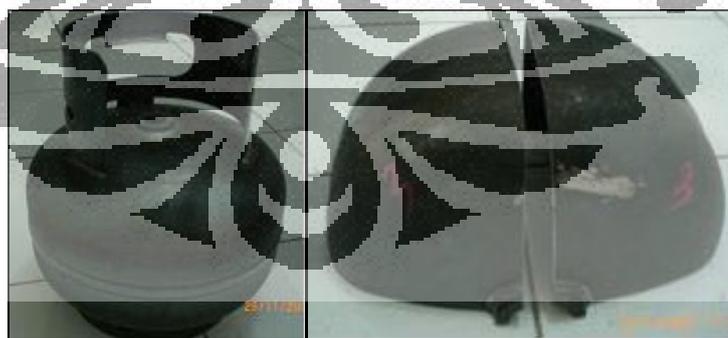
3.2. Cara Kerja

3.2.1 Proses Perlakuan Panas Pasca Las

Tabung LPG 3 kg dipotong seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2 di bawah. Selanjutnya potongan tabung tersebut dilakukan proses PWHT dengan perincian sebagai berikut :

1. sampel A tanpa proses PWHT
2. sampel B dengan PWHT 600⁰C dan waktu 10 menit
3. sampel C dengan PWHT 600⁰C dan waktu 30 menit
4. sampel D dengan PWHT 600⁰C dan waktu 45 menit
5. sampel E dengan PWHT 600⁰C dan waktu 60 menit
6. sampel F dengan PWHT 650⁰C dan waktu 10 menit
7. sampel G dengan PWHT 650⁰C dan waktu 30 menit
8. sampel H dengan PWHT 650⁰C dan waktu 45 menit
9. sampel I dengan PWHT 650⁰C dan waktu 60 menit

Benda uji yang telah dilakukan perlakuan panas pasca las selanjutnya didinginkan di udara terbuka.

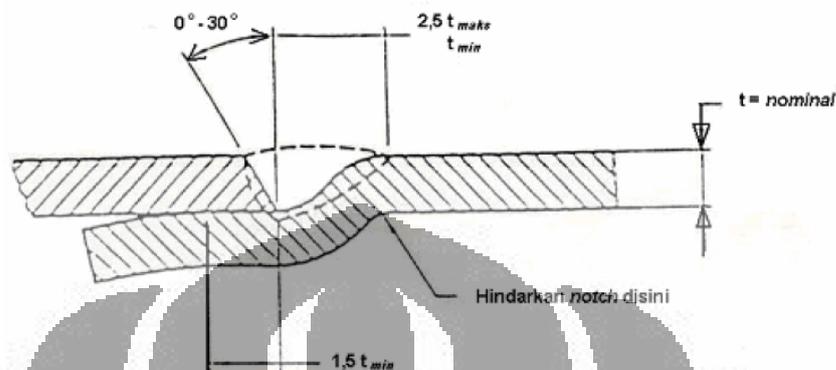


Gambar 3.2. Benda Uji Untuk Proses PWHT

3.2.2 Proses Pengelasan Tabung LPG 3 Kg

Proses pengelasan tabung LPG 3 kg oleh pabrik pembuat dilakukan dengan proses pengelasan SAW, sedangkan standar yang menjadi acuan adalah

SNI 13-3032-2002. Dalam penelitian ini difokuskan pada pengelasan melingkar pada area badan tabung yang disambung dengan dengan sistem kampuh tumpang (*joggle offset*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 dibawah ini.



Gambar 3.3. Bentuk Kampuh Sambungan Las Badan Tabung

Material yang digunakan untuk pembuatan badan tabung adalah JIS SG 295. Dari uji komposisi kimia, didapatkan hasil analisa sebagai berikut :

C : 0.165%	Mn : 0.61716%	V : 0.00142%	B : 0.00015%
Si : 0.1401%	Ni : 0.01051%	Cu : 0.01149%	Nb : 0.0007%
S : 0.00162%	Cr : 0.01427%	Ti : 0.0973%	
P : 0.00617%	Mo : 0.00266%	Al : 0.02924%	

Dari komposisi kimia di atas, didapatkan nilai karbon ekuivalen sebesar 0.27306 % dan termasuk kategori baja karbon rendah sehingga tidak memerlukan *pre-heating*.

3.2.3 Pengujian Tarik

Pengujian ini merupakan pengujian mekanis yang dilakukan secara statis, dimana benda uji dengan ukuran dan bentuk seperti pada Gambar 3.4 diberikan beban tarik yang kontinyu sampai benda uji patah. Sifat tarik selanjutnya dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut⁹.

Tegangan :

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3.1)$$

Didalam penulisan ini pengujian kekerasan dilakukan dengan mempergunakan metode *Vickers* sebagai berikut :

Pengujian menggunakan indentor piramida bujursangkar dengan sudut puncak 136° . Bentuk dari bekas tekanan berbentuk bujursangkar dan untuk pengukurannya diperlukan mikroskopmeter. *Vickers Hardness Number* (VHN) adalah :

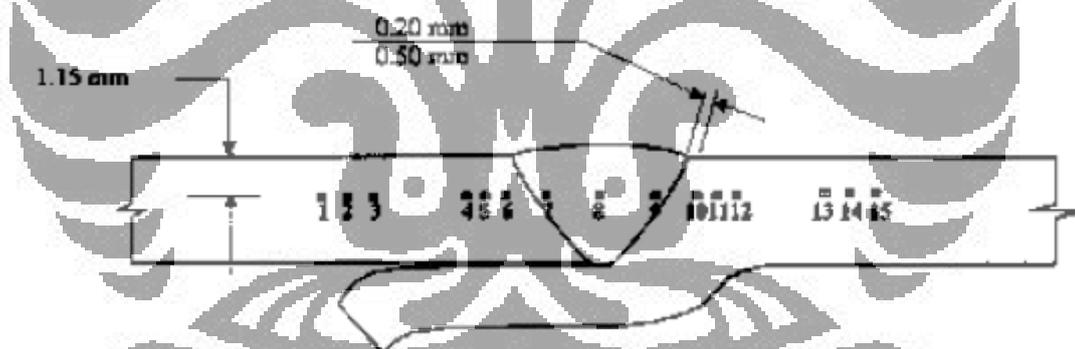
$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{D^2} = \frac{1.384P}{D^2} \quad (3.4)$$

dimana P = beban yang diberikan (kg)

D = diagonal rata-rata (mm)

θ = sudut puncak (136°)

Adapun lokasi pengujian *Vickers* dapat dilihat pada Gambar 3.5 di bawah ini.



Gambar 3.5. Lokasi Uji Kekerasan

3.2.5 Pengujian *Metalography*

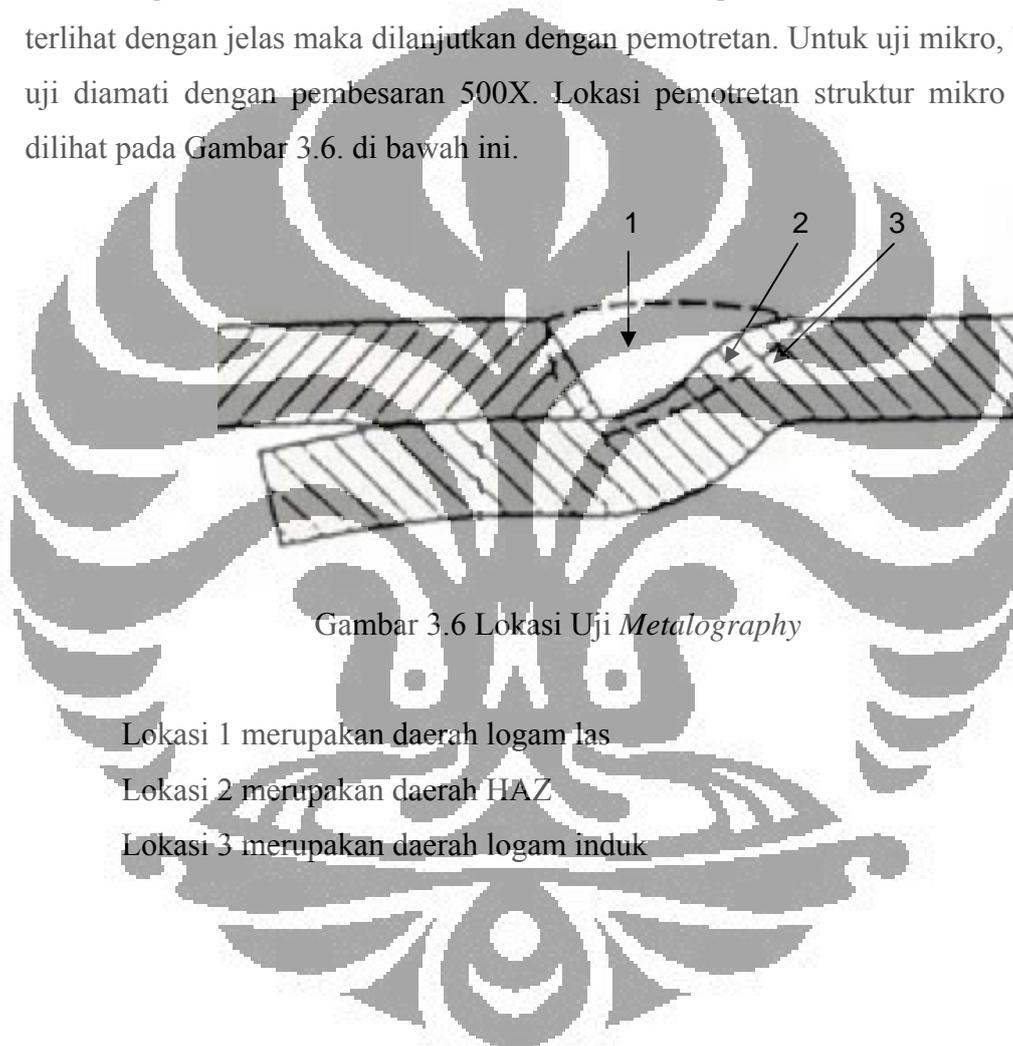
Pengujian *metalography* untuk mengetahui keadaan struktur makro dan mikro logam, hubungan antara struktur mikro dan sifat-sifat logam serta paduannya dengan menggunakan peralatan mikroskop.

Penyusunan struktur mikro suatu logam atau paduan terbentuk selama proses solidifikasi dari keadaan cair. Keadaan struktur mikro, maupun adanya

cacat atau penyimpangan pada struktur mempunyai pengaruh terhadap sifat mekanis dari logam.

Pelaksanaan pengujian diawali dengan menyiapkan benda uji yaitu dibersihkan, diamplas, dipolishing serta dietsa. Selanjutnya dengan menggunakan makroskop *metalography* dan mikroskop *metalography* dilakukan pemotretan.

Lokasi yang di amati meliputi daerah logam lasan, daerah HAZ serta daerah logam induk. Setelah struktur makro/mikro pada daerah-daerah tersebut terlihat dengan jelas maka dilanjutkan dengan pemotretan. Untuk uji mikro, benda uji diamati dengan pembesaran 500X. Lokasi pemotretan struktur mikro dapat dilihat pada Gambar 3.6. di bawah ini.



Gambar 3.6 Lokasi Uji *Metalography*

Lokasi 1 merupakan daerah logam las

Lokasi 2 merupakan daerah HAZ

Lokasi 3 merupakan daerah logam induk

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Evaluasi Hasil Pengujian Tarik

Kekuatan tarik sambungan las dapat dipengaruhi oleh sifat logam induk, daerah HAZ dan geometri serta distribusi tegangan dalam sambungan. Pada dasarnya kekuatan sambungan las sama dengan kekuatan logam induk asal saja pemilihan bahan las, cara dan prosedur pengelasannya dilakukan dengan benar.

Dari data hasil pengujian tarik (lampiran hasil pengujian tarik) yang dilakukan pada kedua batang uji untuk masing-masing sampel, dapat dibuat nilai rata-rata untuk masing-masing sampel, seperti yang tertera pada Tabel 4.1. di bawah ini.

Tabel 4.1. Nilai rata-rata Hasil Pengujian Tarik

Benda uji	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Luas Penampang (mm ²)	26.27	27.34	24.39	26.77	24.56	26.69	23.57	28.20	25.09
Beban luluh (kN)	11.1	10.8	9.4	9.7	9.4	9.7	9.7	10.0	9.9
Kuat Luluh (N/mm ²)	421.5	393.5	384.6	364.0	382.9	363.9	409.1	356.4	394.6
Beban maksimum (kN)	14.1	14.1	13.4	13.7	11.4	14.2	12.6	14.2	13.5
Kuat Tarik (N/mm ²)	536.1	515.1	548.7	512.8	463.3	532.5	536.3	503.3	538.0
Elongation (%)	23.8	20.7	20.5	22.9	9.9	24.0	19.6	24.7	16.6

Keterangan :

A : benda uji tanpa perlakuan panas

B : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 10 menit

C : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 30 menit

D : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 45 menit

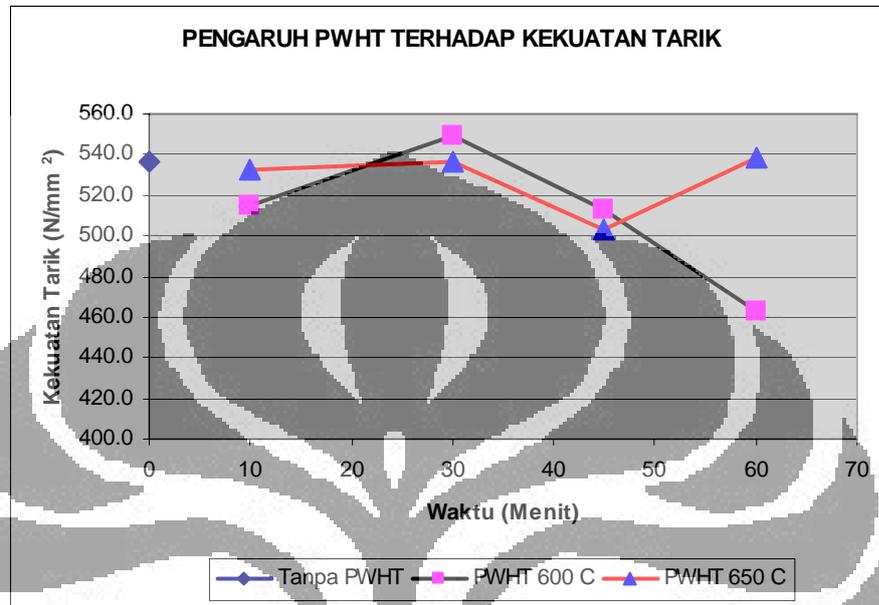
E : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 60 menit

F : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 10 menit

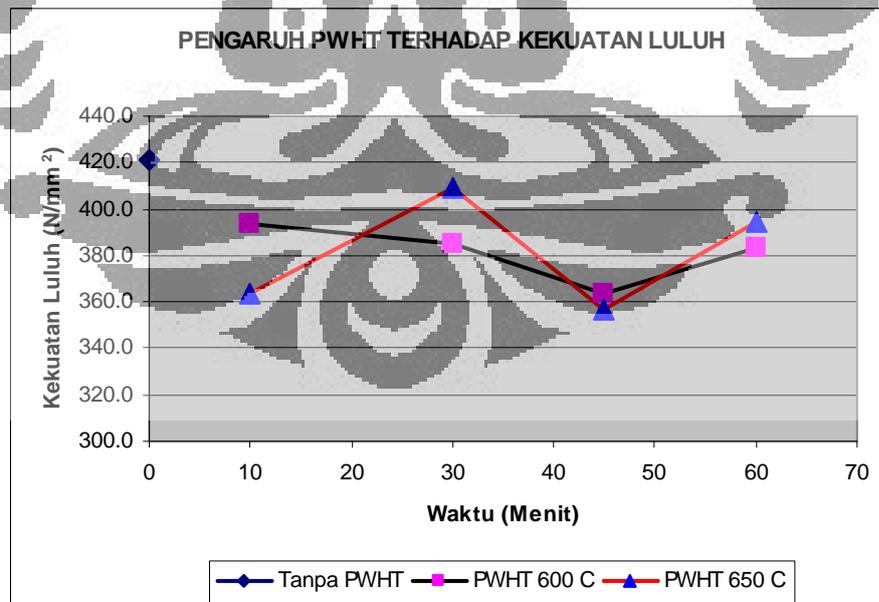
G : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 30 menit

H : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 45 menit

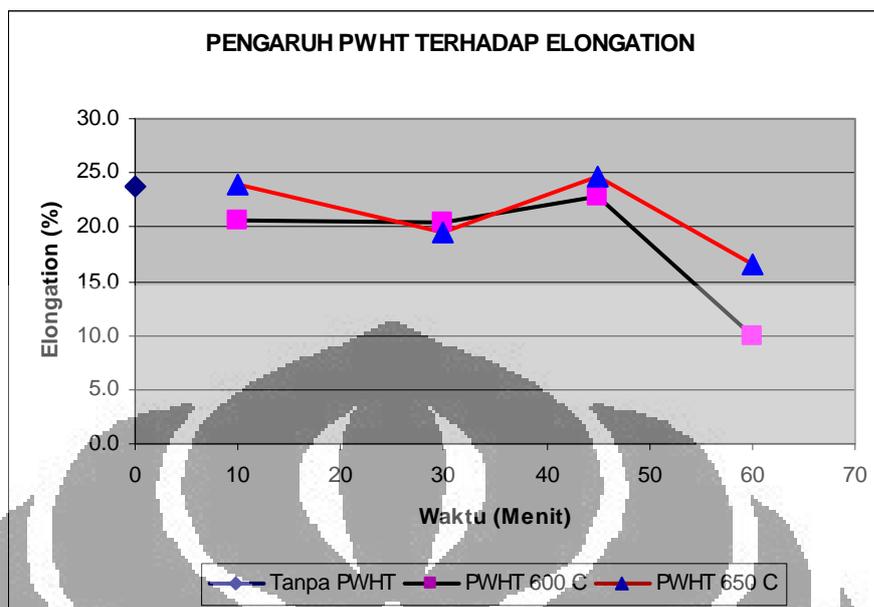
I : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 60 menit



Gambar 4.1. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekuatan Tarik



Gambar 4.2. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekuatan Luluh



Gambar 4.3. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap *Elongation*

Pada Gambar 4.1.; 4.2; dan 4.3. terlihat bahwa perlakuan panas pasca las mempengaruhi kekuatan tarik, kekuatan luluh dan nilai *elongation* dari sambungan las. Untuk nilai kekuatan tarik, perbedaan yang terjadi tidak terlalu signifikan, namun demikian terjadi penurunan nilai kekuatan tarik yang cukup besar untuk benda uji E (PWHT 600⁰C dan waktu 60 menit) sesuai Gambar 4.1. Sedangkan nilai kekuatan luluh terendah terjadi pada benda uji H (PWHT 650⁰C dan waktu 45 menit) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.2. Untuk nilai *elongation* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4.3, nilai terendah terjadi untuk benda uji E dan I (PWHT 600⁰C dan 650⁰C serta waktu 60 menit). Dari pengamatan terhadap patahan benda uji, ternyata terdapat cacat pengelasan berupa fusi yang kurang sempurna sehingga mempengaruhi kekuatan tarik, luluh dan *elongation*. Dari foto makro juga memperlihatkan bentuk kampuh *joggle offset* dari masing masing benda uji tidak seragam yang memungkinkan terjadinya penyimpangan dalam pengambilan data kekuatan tarik, kekuatan luluh maupun *elongation*nya. Meskipun demikian secara teoritis penurunan kekuatan tarik, kenaikan kekuatan luluh dan *elongation* akan terjadi seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu perlakuan panas pasca las.

4.2 Evaluasi Hasil Pengujian Kekerasan

Pada deposit las, pengujian kekerasan dipakai untuk menentukan nilai kekerasan pada daerah sambungan las, HAZ serta logam induk. Kekerasan yang dicapai pada umumnya tergantung dari struktur mikro yang terbentuk selama pemanasan dan pendinginan. Perbedaan nilai kekerasan yang terlalu besar kemungkinan dapat menimbulkan tegangan sisa yang besar, sehingga pada saat terjadinya pembebanan, daerah tersebut merupakan daerah sumber perpatahan.

Pengujian ini dilakukan pada daerah sambungan las, pada daerah HAZ, serta pada daerah logam induk.. Besarnya nilai kekerasan rata-rata yang diperoleh dari hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 4.2. di bawah ini.

Tabel 4.2. Nilai Rata-rata Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*

Posisi	Kode Benda Uji								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Logam Induk (VHN)	149.33	162.17	196.83	176.67	164.17	174.33	180.33	152.00	150.17
HAZ (VHN)	143.50	149.00	156.67	143.83	139.33	141.83	139.67	142.50	144.00
Logam Las (VHN)	161.67	167.67	167.00	162.33	155.67	154.00	158.33	153.00	151.67

Keterangan :

A : benda uji tanpa perlakuan panas

B : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 10 menit

C : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 30 menit

D : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 45 menit

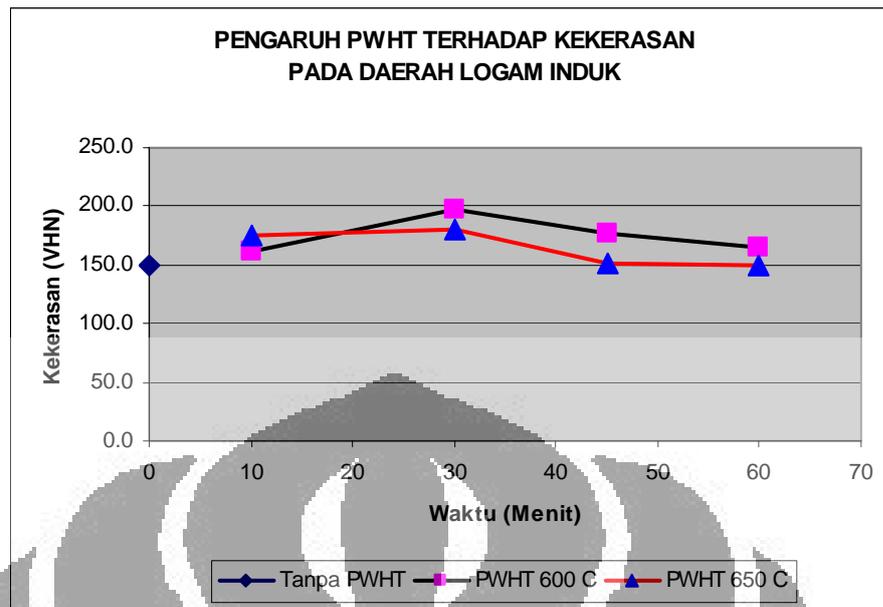
E : benda uji dengan perlakuan panas T : 600⁰C dan t : 60 menit

F : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 10 menit

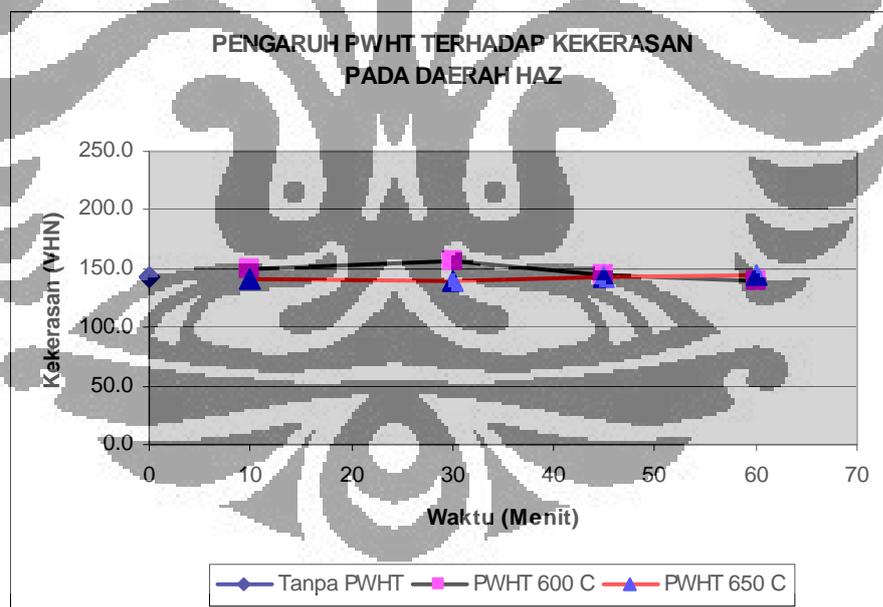
G : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 30 menit

H : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 45 menit

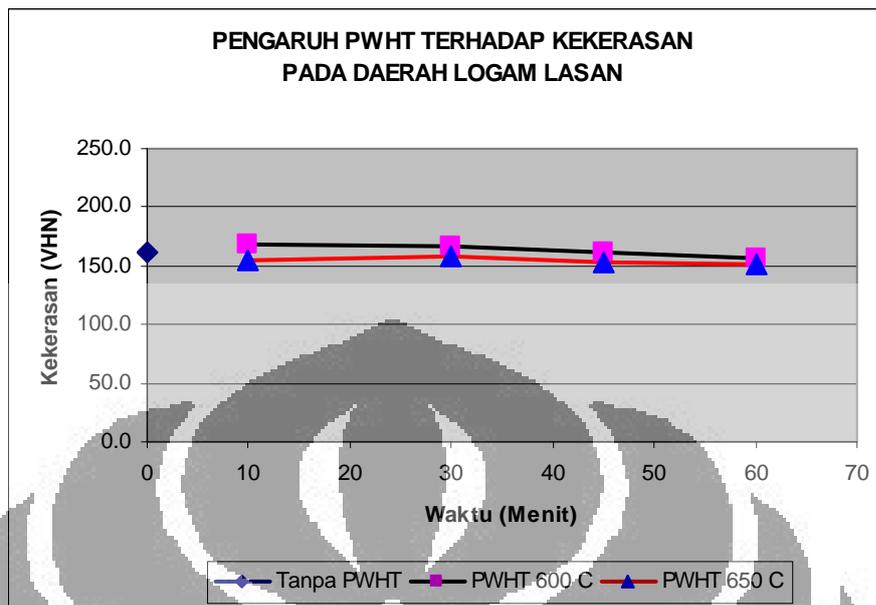
I : benda uji dengan perlakuan panas T : 650⁰C dan t : 60 menit



Gambar 4.4. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Daerah Logam Induk



Gambar 4.5. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Daerah HAZ



Gambar 4.6. Grafik Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Kekerasan Logam Las

Dari Gambar 4.4.; 4.5.; dan 4.6. di atas dapat dilihat bahwa perlakuan panas pasca las mempengaruhi nilai kekerasan dari logam induk, logam lasan dan daerah HAZ. Untuk daerah logam induk, nilai kekerasan cenderung tidak mengalami perubahan yang berarti karena logam induk merupakan daerah las yang tidak terpengaruh oleh panas dari proses pengelasan. Secara umum nilai kekerasan akan turun seiring dengan peningkatan temperatur dan waktu perlakuan panas pasca las, namun demikian seperti yang terlihat dalam Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 ternyata muncul nilai kekerasan yang justru mengalami peningkatan yaitu untuk benda uji C (PWHT 600°C dan waktu 30 menit). Dari hasil foto mikro tidak terlihat adanya cacat yang bisa menerangkan terjadinya kenaikan nilai kekerasan ini, namun demikian dari indikasi adanya cacat pada patahan benda uji pengujian tarik dan ketidakseragaman bentuk *joggle offset* pada foto makro hal ini dimungkinkan menyebabkan anomali nilai kekerasan dari benda uji meskipun telah dilakukan perlakuan panas pasca las.

4.3 Evaluasi Pengaruh Perlakuan Panas Pasca Las Terhadap Sifat Mekanis Sambungan Las Tabung LPG 3 Kg

Proses perlakuan panas pasca las menggunakan furnace yang diseting pada temperatur 600°C dan 650°C , masing-masing dengan waktu 10, 30, 45 dan 60 menit dengan harapan didapat hasil optimum dari proses ini. Benda uji dimasukkan furnace dan setelah tercapai waktunya maka dibiarkan pendinginannya di udara terbuka. Dari hasil penelitian, didapatkan hasil bahwa perlakuan panas pasca las tersebut mempengaruhi nilai kekuatan tarik, kekuatan luluh, *elongation* dan nilai kekerasannya. Terdapat hubungan antara *elongation* dan nilai kekerasan, dimana benda uji yang nilai kekerasannya tinggi maka *elongationnya* rendah. Secara teori, ketika terjadi peningkatan temperatur dan waktu perlakuan panas pasca las maka akan menurunkan kekuatannya, meningkatkan kekuatan luluhnya dan meningkatkan nilai *elongationnya*. Namun demikian data yang diperoleh dari penelitian menunjukkan beberapa pengecualian. Dari pengamatan patahan uji tarik dan foto makro pada bentuk sambungan, pengecualian di atas disebabkan adanya cacat yang terjadi di area pengelasan dan ketidaksempurnaan kampuh *joggle offset* pada material yang disambung.

4.4 Evaluasi Hasil pengujian metalography

4.4.1 Struktur Makro

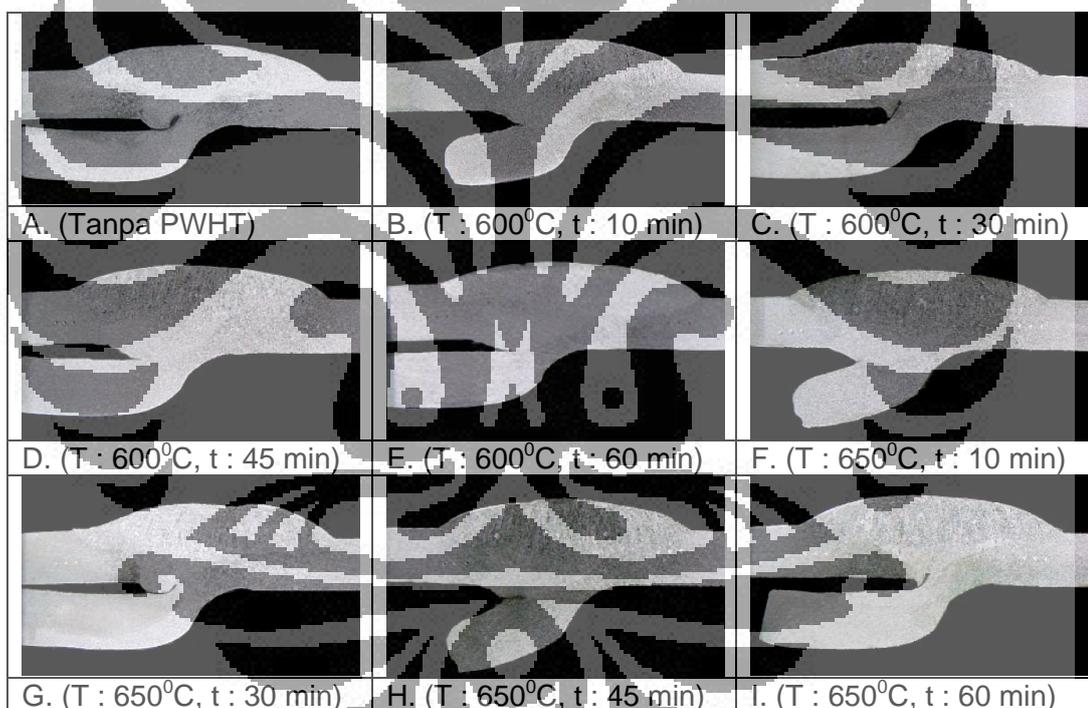
Hasil pengujian metalography berupa foto struktur makro dapat dilihat pada Gambar 4.7 di bawah ini. Dari hasil pemeriksaan struktur makro terlihat bahwa kualitas sambungan las tabung LPG 3 kg ini masih perlu ditingkatkan. Bentuk *joggle offset* yang tidak sesuai dengan standar acuan sangat berbahaya terhadap keamanan penggunaan tabung LPG 3 kg ini di masyarakat. Celah kosong di bawah akar lasan bisa menjadi awal retak yang bisa menjalar secara cepat ke lokasi lain, demikian juga terlihat kurang sempurnanya fusi di daerah pertemuan bahan atas dan bahan bawah tabung tersebut.

Pada benda uji A (tanpa PHWT), C (PWHT 600°C dan waktu 30 menit) dan I (PWHT 600°C dan waktu 30 menit) terlihat adanya indikasi awal retakan

pada akar las yang sangat berbahaya. Seiring dengan umur pemakaian tabung, retakan akan menjalar dan akhirnya akan menimbulkan kebocoran.

Pada benda uji B (PWHT 600°C dan waktu 10 menit), F (PWHT 650°C dan waktu 10 menit) dan H (PWHT 650°C dan waktu 45 menit) terlihat bahwa lebar las tidak sesuai dengan bentuk kampuh sambungan las seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 3.3 (1.5 t_{min}). Hal ini sangat berbahaya karena akan mempengaruhi kekuatan sambungan las

Dari keseluruhan foto makro terlihat bahwa bentuk kampuh sambungan las belum memenuhi persyaratan dalam SNI 1452-2007 seperti yang dapat dilihat dalam Gambar 3.3. Hal ini perlu mendapat perhatian serius karena sangat membahayakan mutu maupun kekuatan sambungan las tabung LPG 3 kg.

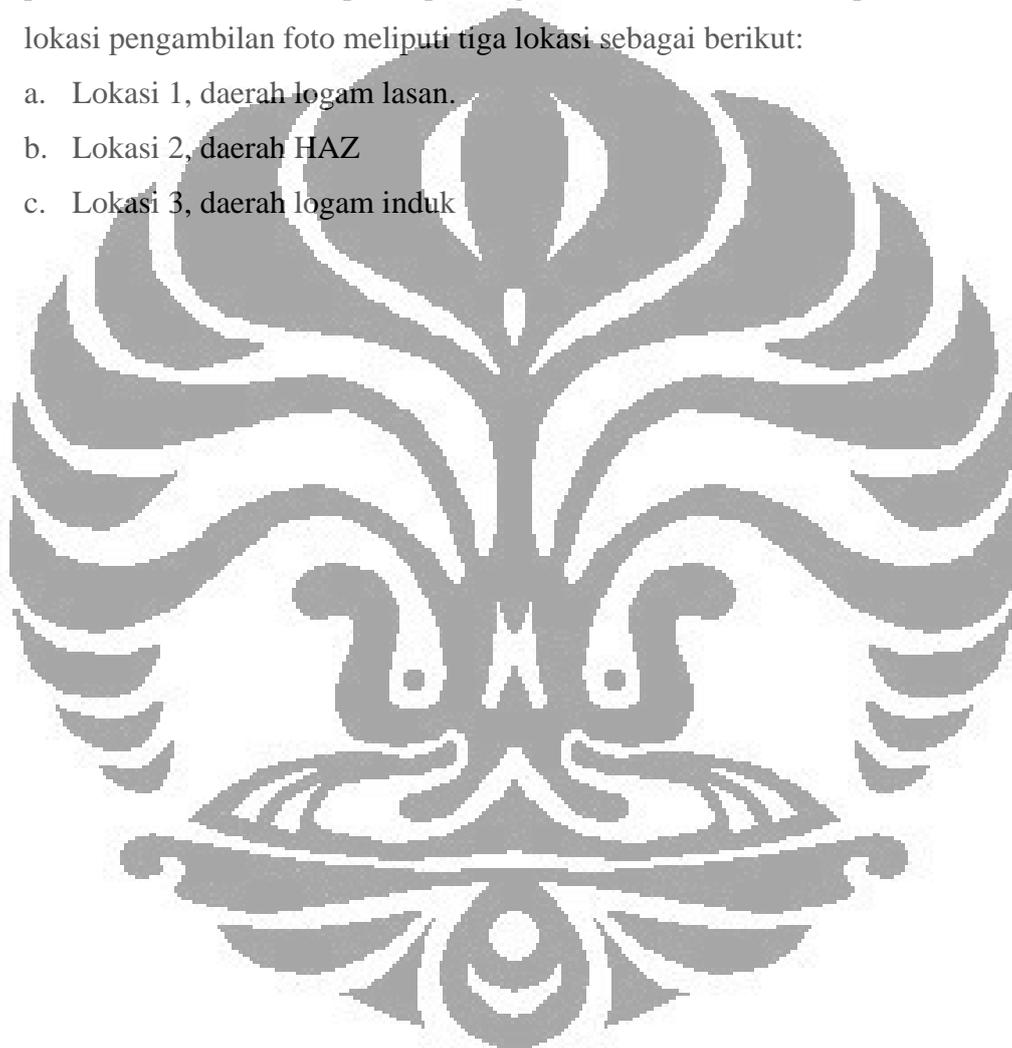


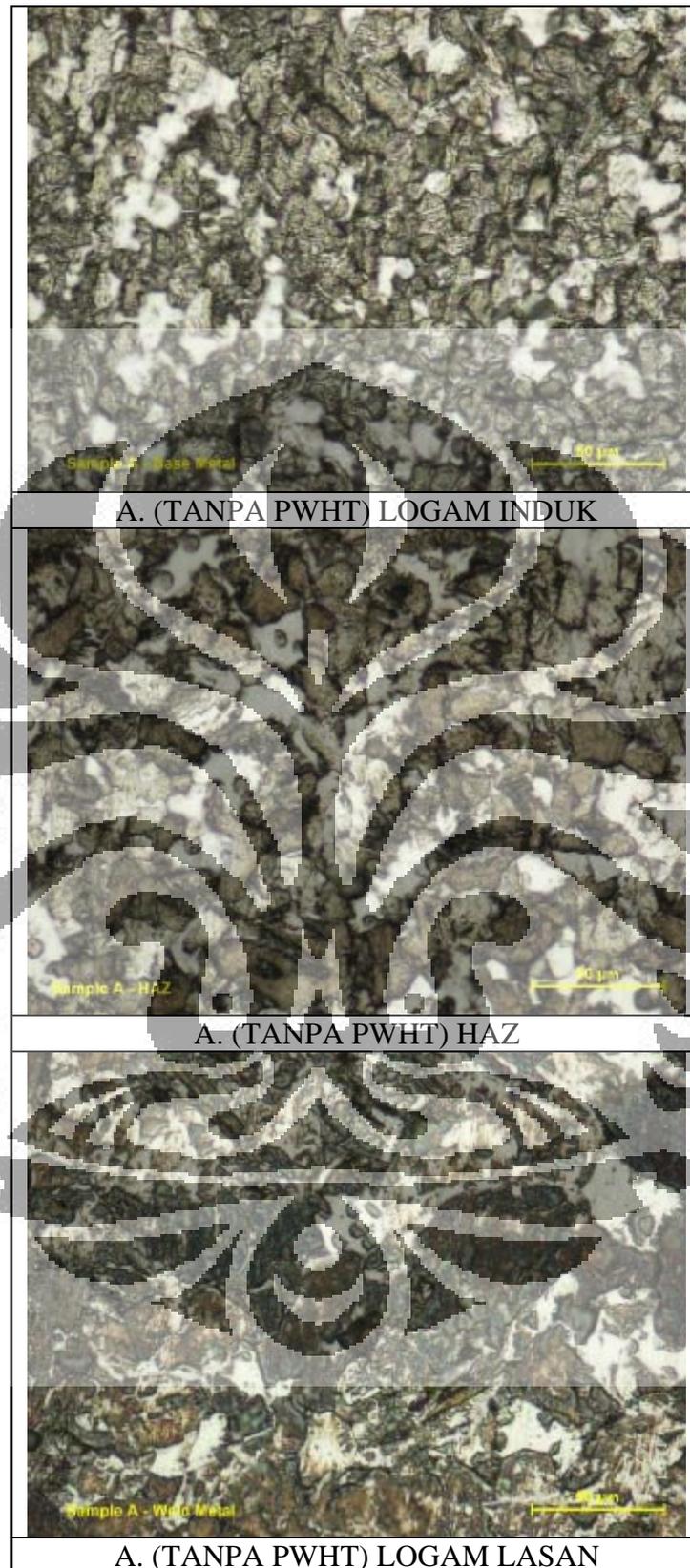
Gambar 4.7 Foto Makro Benda Uji A, B, C, D, E, F, G, H, I

4.4.2 Struktur Mikro

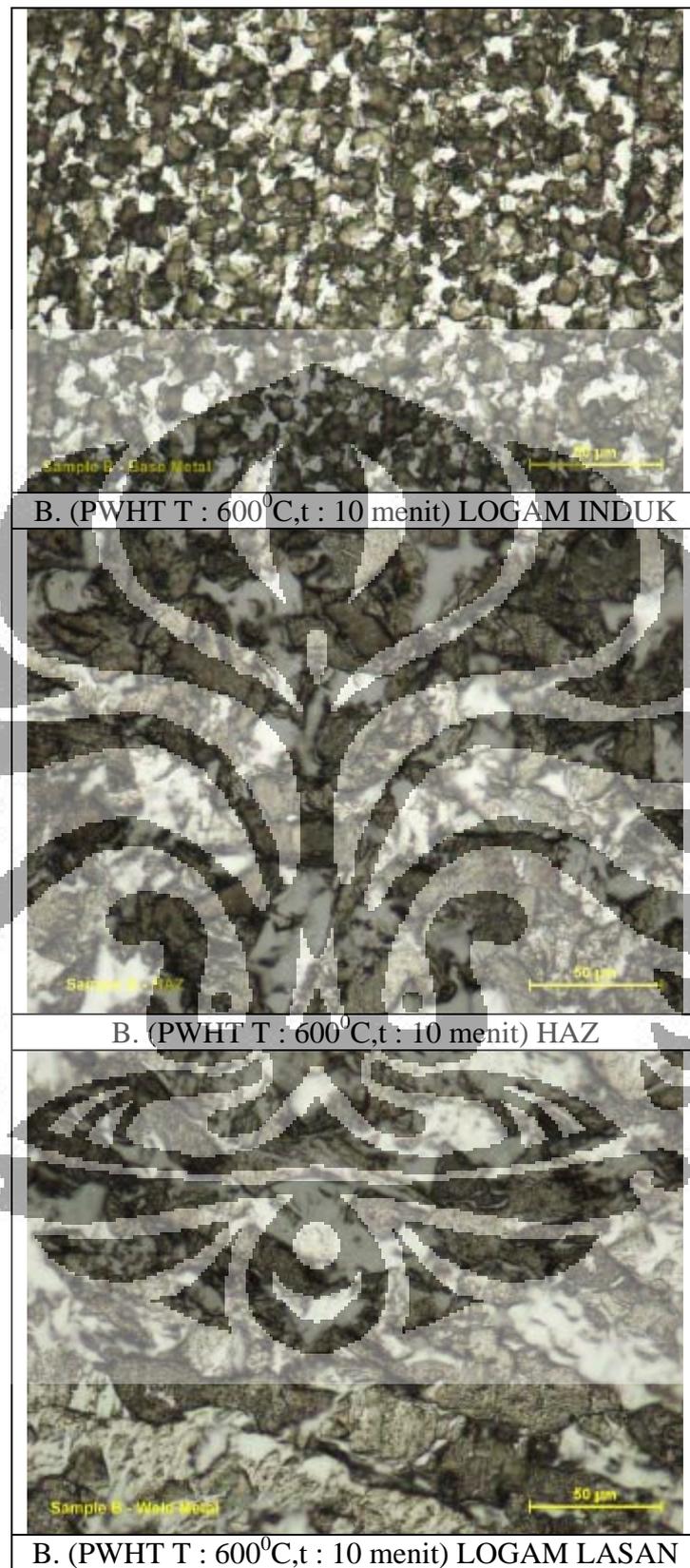
Hasil pengujian metalography berupa foto struktur mikro dengan perbesaran 500X dapat dilihat pada Gambar 4.8 dan 4.9 di bawah ini. Struktur mikro yang terjadi pada sepanjang logam lasan tidaklah sama. Bila dilihat dari daerah deposit las, daerah HAZ sampai daerah logam induk, strukturnya berbeda. Hal ini disebabkan karena adanya siklus panas yang terjadi, dimana tingkat suhu pemanasan las dan kecepatan pendinginan berbeda untuk setiap daerah. Adapun lokasi pengambilan foto meliputi tiga lokasi sebagai berikut:

- a. Lokasi 1, daerah logam lasan.
- b. Lokasi 2, daerah HAZ
- c. Lokasi 3, daerah logam induk

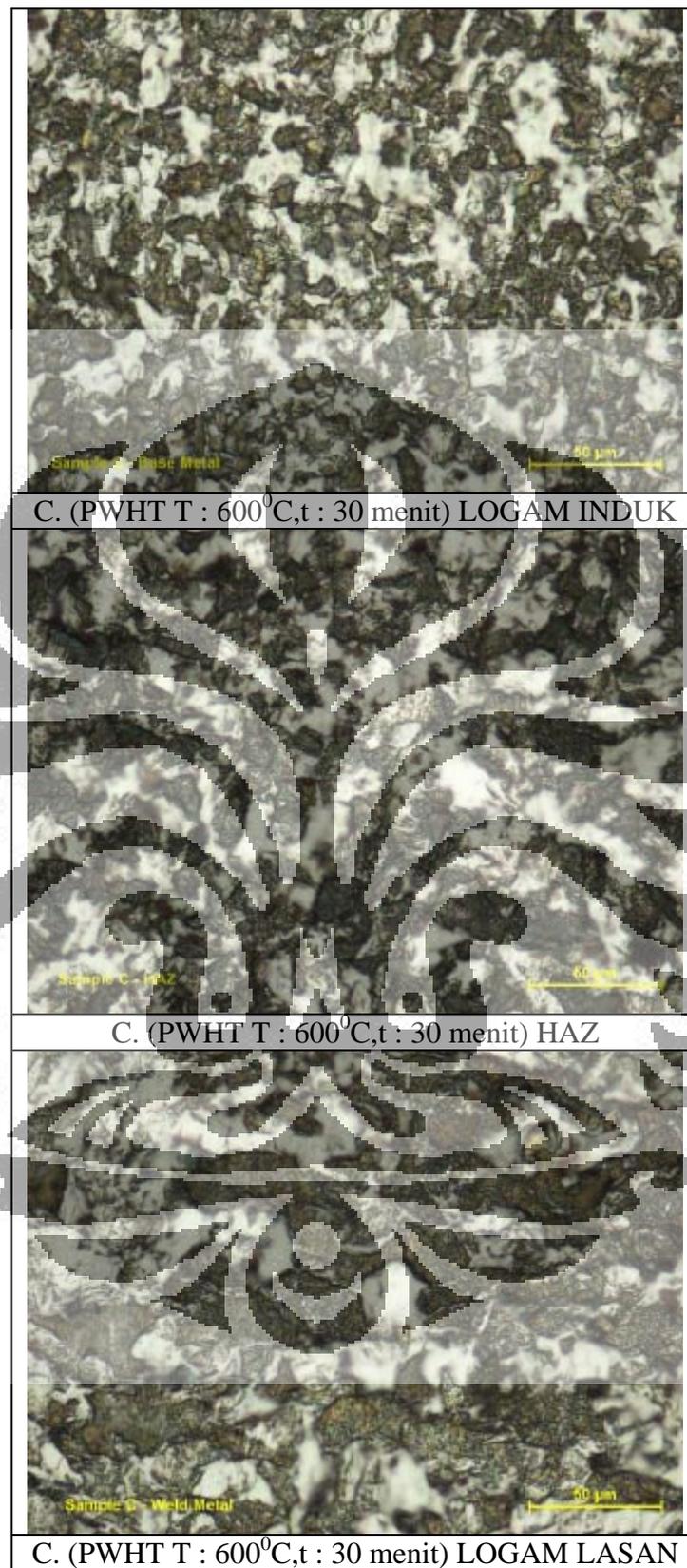




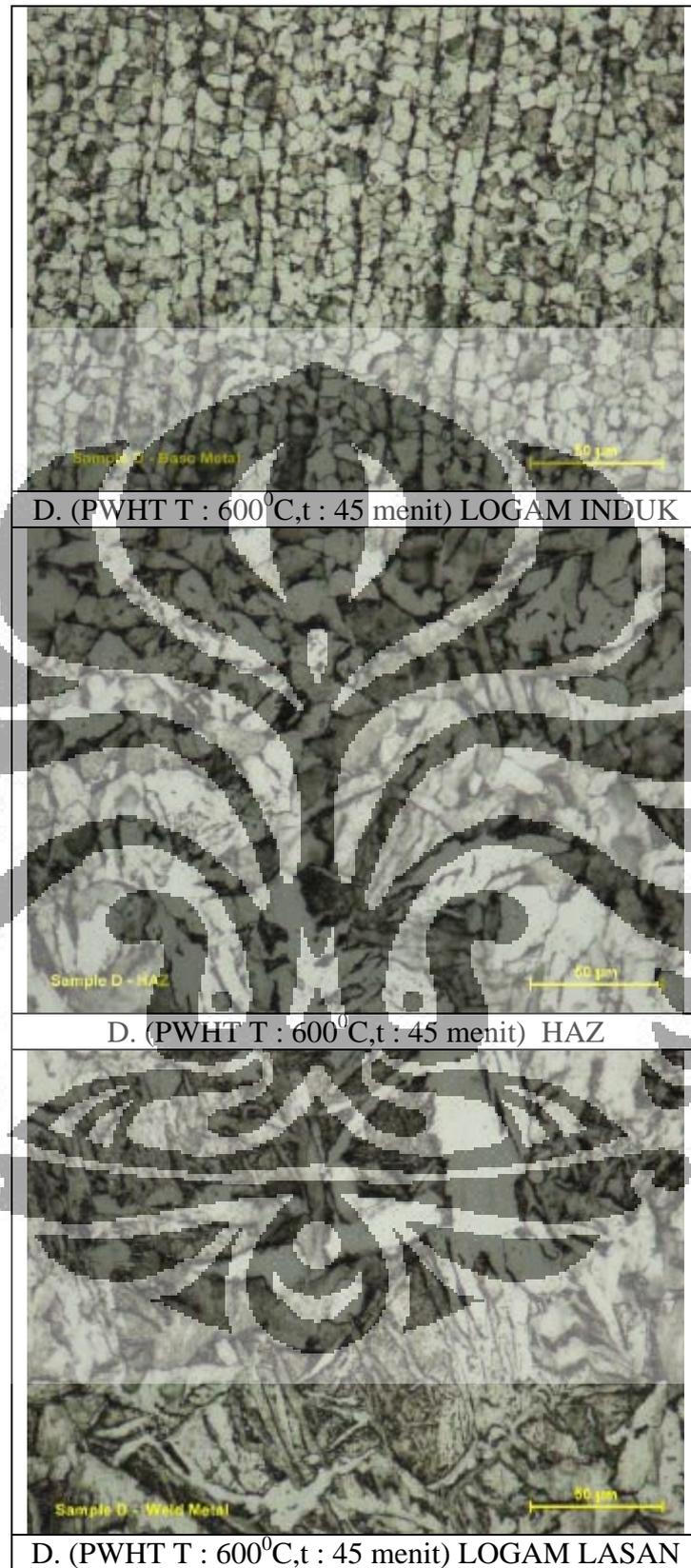
Gambar 4.8 Foto Mikro Benda Uji A (Tanpa PWHT)



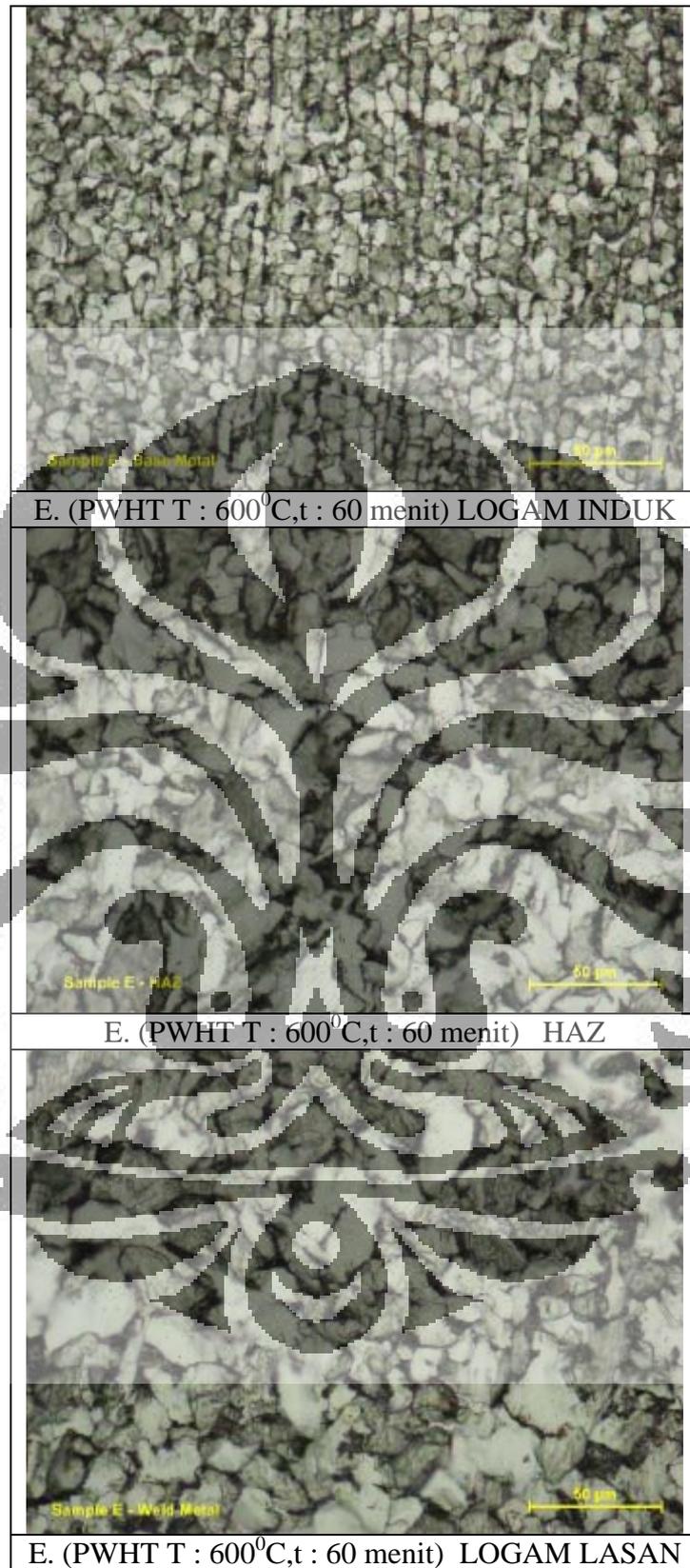
Gambar 4.9 Foto Foto Mikro Benda Uji B (PWHT T : 600⁰C,t : 10 menit)



Gambar 4.10 Foto Foto Mikro Benda Uji C (PWHT T : 600⁰C,t : 30 menit)



Gambar 4.11 Foto Foto Mikro Benda Uji D (PWHT T : 600⁰C,t : 45 menit)



Gambar 4.12 Foto Foto Mikro Benda Uji E (PWHT T : 600⁰C,t : 60 menit)

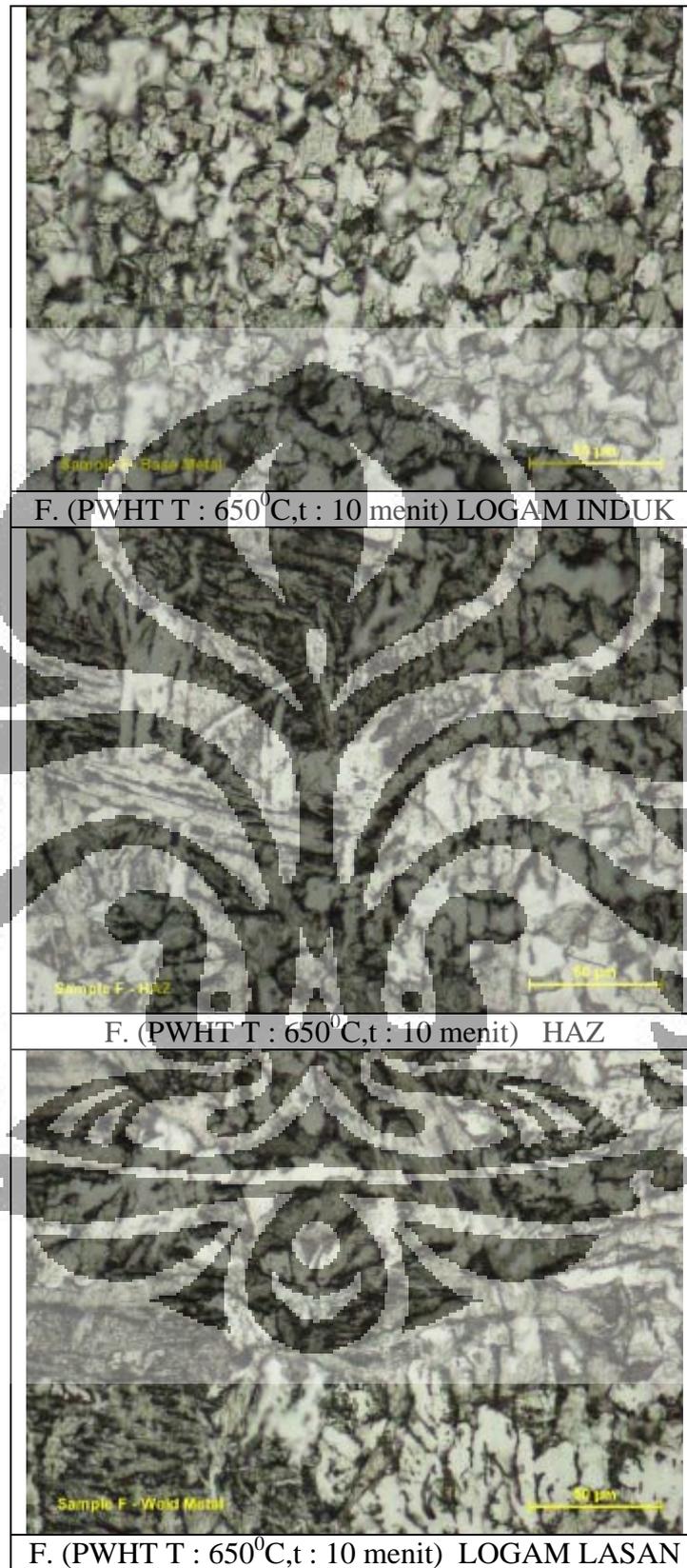
Struktur mikro benda uji A (tanpa PWHT) dapat dilihat dalam Gambar 4.8 di atas. Dari gambar terlihat bahwa struktur didominasi oleh ferit (terang) dan perlit (gelap). Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan halus. Berbeda dengan daerah HAZ dan daerah logam las dimana terdapat butiran yang lebih besar dan cenderung tidak teratur bentuknya terutama daerah logam las. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut : daerah logam induk merupakan daerah yang tidak terpengaruh panas dari proses las sehingga strukturnya cenderung tidak berubah, berbeda dengan daerah HAZ dan Logam las yang terkena pengaruh panas dari proses las. Khusus daerah logam las, strukturnya merupakan campuran dari material logam induk dan kawat las sehingga ukuran dan bentuk strukturnya sangat berbeda dengan logam induknya.

Struktur mikro benda uji B (PWHT 600⁰C dan waktu 10 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.9 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji A (tanpa PWHT). Untuk daerah HAZ dan daerah logam las ukuran butir cenderung tidak mengalami perubahan dibandingkan dengan benda uji A (tanpa PWHT). Hal ini dimungkinkan karena pendeknya waktu perlakuan panas (10 menit) sehingga belum banyak berpengaruh terhadap struktur mikro HAZ dan logam las.

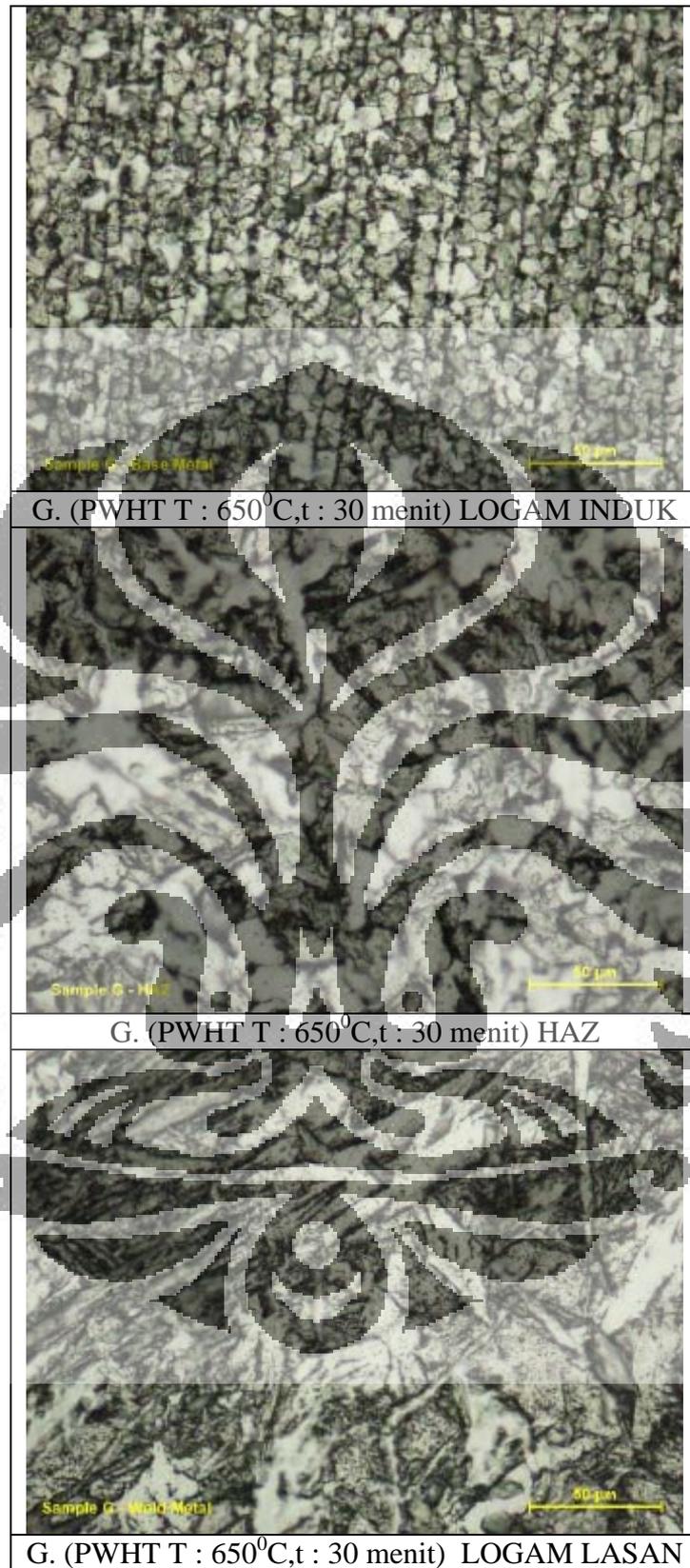
Struktur mikro benda uji C (PWHT 600⁰C dan waktu 30 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.10 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji A (tanpa PWHT) dan B (PWHT 600⁰C dan waktu 10 menit). Untuk daerah HAZ dan daerah logam las ukuran butir mulai terlihat mengalami perubahan dimana ferit mulai lebih dominan dibandingkan dengan perlit.

Struktur mikro benda uji D (PWHT 600⁰C dan waktu 45 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.11 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji A (tanpa PWHT) dan B (PWHT 600⁰C dan waktu 10 menit) dan C (PWHT 600⁰C dan waktu 30 menit). Terlihat juga alur pengerolan material pada saat proses pembentukannya. Untuk daerah HAZ dan daerah logam las ukuran butir mulai terlihat mengalami perubahan dimana dominasi ferit dibandingkan dengan perlit lebih kelihatan. Hal ini berakibat dengan turunnya nilai kekerasan material tersebut.

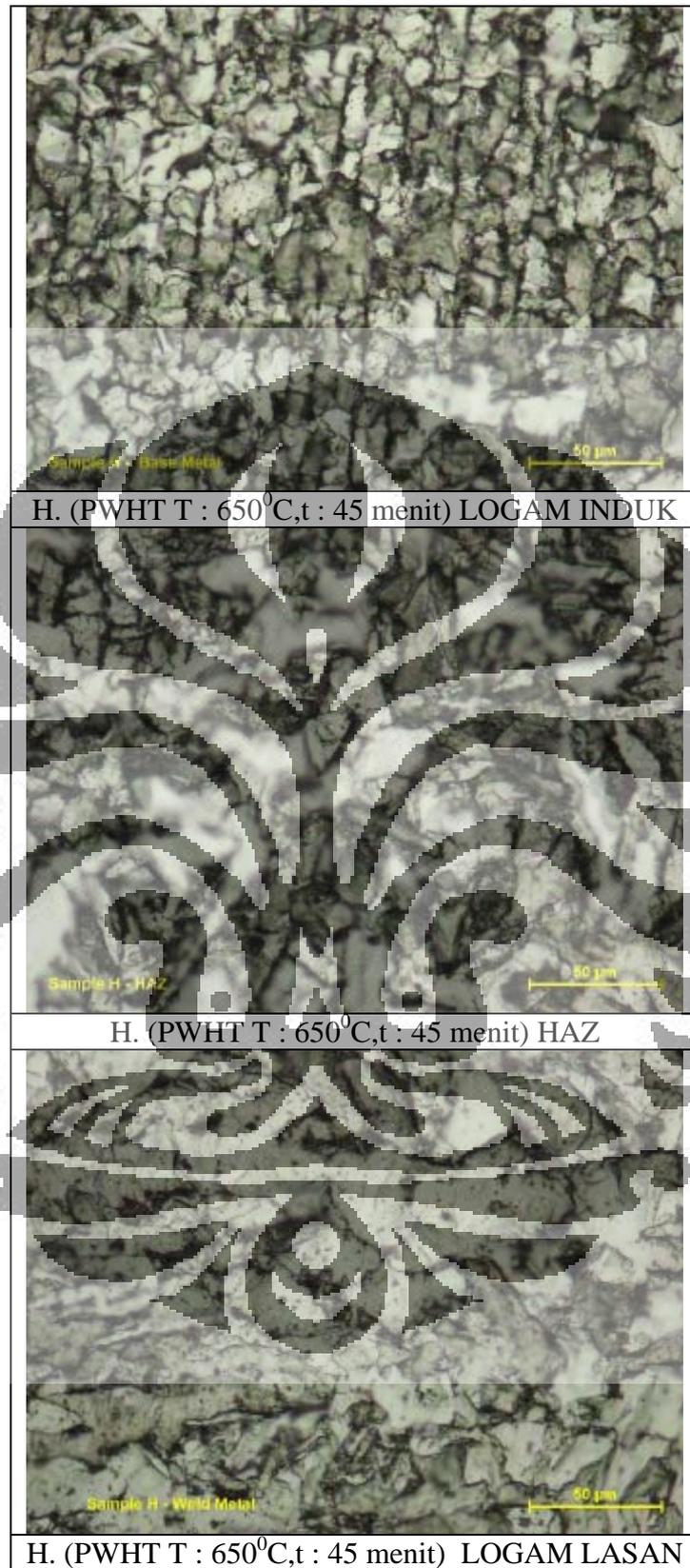
Struktur mikro benda uji E (PWHT 600⁰C dan waktu 60 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.12 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung hampir sama dengan benda uji E (PWHT 600⁰C dan waktu 45 menit). Namun demikian bentuk butiran di daerah HAZ dan logam las lebih teratur dibandingkan dengan benda uji D.



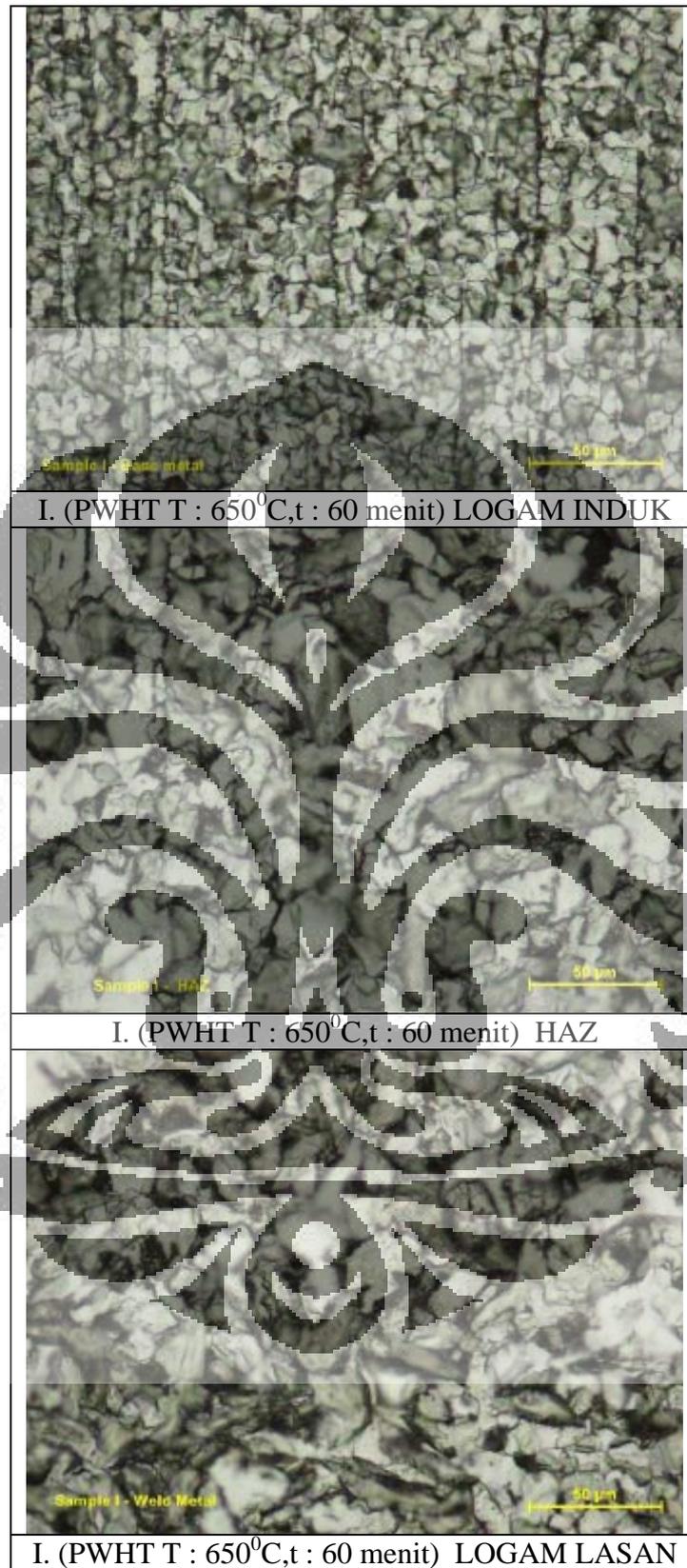
Gambar 4.13 Foto Foto Mikro Benda Uji F (PWHT T : 650⁰C,t : 10 menit)



Gambar 4.14 Foto Foto Mikro Benda Uji G (PWHT T : 650°C, t : 30 menit)



Gambar 4.15 Foto Foto Mikro Benda Uji H (PWHT T : 650⁰C,t : 45 menit)



Gambar 4.16 Foto Foto Mikro Benda Uji I (PWHT T : 650⁰C,t : 60 menit)

Struktur mikro benda uji F (PWHT 650⁰C dan waktu 10 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.13 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji A (tanpa PWHT). Untuk daerah HAZ dan daerah logam las terdapat struktur dengan bentuk tidak teratur dan acak terutama di daerah logam lasan. Hal ini dimungkinkan karena pendeknya waktu perlakuan panas (10 menit) sehingga belum banyak berpengaruh terhadap struktur mikro HAZ dan logam las.

Struktur mikro benda uji G (PWHT 650⁰C dan waktu 30 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.14 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji F (PWHT 650⁰C dan waktu 10 menit). Untuk daerah HAZ dan daerah logam las ukuran butir mulai terlihat mengalami perubahan dimana ferit mulai lebih dominan dibandingkan dengan perlit.

Struktur mikro benda uji H (PWHT 650⁰C dan waktu 45 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.15 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih seragam dan lebih halus dibandingkan dengan benda uji F (PWHT 650⁰C dan waktu 10 menit) dan G (PWHT 650⁰C dan waktu 30 menit). Terlihat juga alur pengerolan material pada saat proses pembentukannya. Untuk daerah HAZ dan daerah logam las ukuran butir mulai terlihat mengalami perubahan dimana dominasi ferit dibandingkan dengan perlit lebih kelihatan. Hal ini berakibat dengan turunnya nilai kekerasan material tersebut.

Struktur mikro benda uji I (PWHT 650⁰C dan waktu 60 menit) dapat dilihat dalam Gambar 4.16 di atas. Di daerah logam induk, ukuran butir cenderung lebih halus dibandingkan dengan benda uji H (PWHT 650⁰C dan waktu 45 menit). Begitu juga bentuk butiran di daerah HAZ dan logam las lebih teratur dibandingkan dengan benda uji H.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan pembahasan pada bab-bab sebelumnya, maka diambil kesimpulan bahwa perlakuan panas pasca las tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan mekanis sambungan las tabung LPG 3 Kg. Pengaruh yang terjadi terlihat pada gambar struktur mikro, dimana terjadi pertumbuhan butir yang berbeda dari masing-masing perlakuan panas tersebut. Namun demikian dari penelitian ditemukan bahwa terjadi ketidaksesuaian bentuk kampuh (*joggle offset*) terhadap ketentuan dalam SNI 1452-2007. Saat ini ketidaksesuaian ini belum memberikan pengaruh yang berarti, akan tetapi seiring dengan umur pemakaiannya ketidaksesuaian sambungan ini sangat berbahaya. Adanya celah kosong diantara dua pelat yang disambung dan dibawah akar las bisa menjadi awal retak yang bisa menjalar secara cepat ke lokasi lain, mengingat bahwa tabung gas ini dalam kondisi baru hanya diuji secara random setiap 500 tabung yang diproduksi dan akan dilakukan pengujian ulang setelah umur pakai mencapai 5 tahun.

Mengacu pada kesimpulan di atas serta untuk meningkatkan kualitas tabung LPG 3 kg ini, kami mengusulkan perlunya dilakukan hal-hal sebagai berikut :

1. Penelitian mengenai parameter lain pada *welding procedure specification* seperti jenis elektroda las, pemilihan arus listrik dll
2. Penelitian lanjutan di daerah kampuh *joggle offset*, dimana dalam penelitian ini terjadi ketidaksesuaian terhadap ketentuan SNI 1452-2007.
3. Penelitian pada area lengkung di badan tabung akibat proses *punch*, diperkirakan pada area ini akan terjadi tegangan sisa dan juga penipisan dinding tabung
4. Pengawasan lebih ketat terhadap seluruh proses produksi tabung LPG 3 Kg.

DAFTAR PUSTAKA

1. *Konversi Minyak Tanah ke LPG*, 2006, diakses 30 November 2009. <http://www.pertamina.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1663&Itemid=33>
2. *Optimalisasi Flare Gas dan Hydrogen Kilang Unit Pengolahan V Balikpapan - Selamatkan USD 18,6 Juta*, 2005, <http://www.pertamina.com/index.php?option=com_content&task=view&id=1556&Itemid=33>
3. Wiryosumarto, Harsono. *Teknologi pengelasan logam*. PT Pradnya Paramita, Jakarta, 1981.
4. SNI 1452 *Tabung Baja LPG*, Badan Standardisasi Nasional, 2007.
5. *ASME Boiler and Pressure Vessel Code an American National Standard, Section IX, Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operators*, 2004
6. *Liquefied Petroleum Gas*, diakses 20 November 2009. <http://en.wikipedia.org/wiki/Liquefied_petroleum_gas>
7. Henry H. Bednar, P.E. *Pressure Vessel Design Hand Book*. Van Nostrand Reinhold Company Inc, New York, 1981.
8. A.K.Jena, M.C. Chaturvedi. *Phase Transformation in Material*. Prentice Hall. 1992.
9. William D. Callister, Jr. *Material Science and Engineering*. John Willey & Sons, Inc, 1997

LAMPIRAN 1
Hasil Pengujian Tarik

Hasil Pengujian Tarik Sampel A (Tanpa PWHT)

Kode batang uji	A-T1	A-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	2.08 X 12.71	1.97 X 13.25	
Luas Penampang (mm ²)	26.44	26.10	26.27
Beban luluh (kN)	10.7	11.44	11.1
Kuat Luluh (N/mm ²)	404.7	438.3	421.5
Beban maksimum/putus (kN)	13.86	14.3	14.1
Kuat Tarik (N/mm ²)	524.3	547.8	536.1
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	25.31	24.22	24.8
Elongation (%)	26.55	21.1	23.8

Hasil Pengujian Tarik Sampel B (PWHT 600⁰C, 10 min)

Kode batang uji	B-T1	B-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	2.13 X 12.91	2.26 X 12.03	
Luas Penampang (mm ²)	27.50	27.19	27.34
Beban luluh (kN)	10.91	10.61	10.8
Kuat Luluh (N/mm ²)	396.8	390.2	393.5
Beban maksimum/putus (kN)	14.29	13.88	14.1
Kuat Tarik (N/mm ²)	519.7	510.5	515.1
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	24.06	24.21	24.1
Elongation (%)	20.3	21.05	20.7

Hasil Pengujian Tarik Sampel C (PWHT 600⁰C, 30 min)

Kode batang uji	C-T1	C-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	1.83 X 12.44	2.06 X 12.63	
Luas Penampang (mm ²)	22.77	26.02	24.39
Beban luluh (kN)	8.85	9.9	9.4
Kuat Luluh (N/mm ²)	388.8	380.5	384.6
Beban maksimum/putus (kN)	12.62	14.13	13.4
Kuat Tarik (N/mm ²)	554.4	543.1	548.7
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	23.79	24.39	24.1
Elongation (%)	18.95	21.95	20.5

Hasil Pengujian Tarik Sampel D (PWHT 600⁰C, 45 min)

Kode batang uji	D-T1	D-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	2.11 X 12.7	2.14 X 12.5	
Luas Penampang (mm ²)	26.80	26.75	26.77
Beban luluh (kN)	9.64	9.85	9.7
Kuat Luluh (N/mm ²)	359.7	368.2	364.0
Beban maksimum/putus (kN)	13.89	13.57	13.7
Kuat Tarik (N/mm ²)	518.3	507.3	512.8
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	24.56	24.6	24.6
Elongation (%)	22.8	23	22.9

Hasil Pengujian Tarik Sampel E (PWHT 600⁰C, 60 min)

Kode batang uji	E-T1	E-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	1.63 X 13.23	2.12 X 13	
Luas Penampang (mm ²)	21.56	27.56	24.56
Beban luluh (kN)	8.37	10.41	9.4
Kuat Luluh (N/mm ²)	388.1	377.7	382.9
Beban maksimum/putus (kN)	10.06	12.68	11.4
Kuat Tarik (N/mm ²)	466.5	460.1	463.3
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	21.85	22.09	22.0
Elongation (%)	9.25	10.45	9.9

Hasil Pengujian Tarik Sampel F (PWHT 650⁰C, 10 min)

Kode batang uji	F-T1	F-T2	Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	2.06 X 12.34	2.13 X 13.13	
Luas Penampang (mm ²)	25.42	27.97	26.69
Beban luluh (kN)	9.25	10.18	9.7
Kuat Luluh (N/mm ²)	363.9	364.0	363.9
Beban maksimum/putus (kN)	13.75	14.66	14.2
Kuat Tarik (N/mm ²)	540.9	524.2	532.5
L (mm)	20	20	20.0
Lo (mm)	25.47	24.12	24.8
Elongation (%)	27.35	20.6	24.0

Hasil Pengujian Tarik Sampel G (PWHT 650⁰C, 30 min)

Kode batang uji	G-T1		G-T2		Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	1.63	X 12.83	1.97	X 13.31	
Luas Penampang (mm ²)	20.91		26.22		23.57
Beban luluh (kN)	8.32		11.02		9.7
Kuat Luluh (N/mm ²)	397.8		420.3		409.1
Beban maksimum/putus (kN)	11.41		13.82		12.6
Kuat Tarik (N/mm ²)	545.6		527.1		536.3
L (mm)	20		20		20.0
Lo (mm)	24.06		23.76		23.9
Elongation (%)	20.3		18.8		19.6

Hasil Pengujian Tarik Sampel F (PWHT 650⁰C, 45 min)

Kode batang uji	H-T1		H-T2		Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	2.06	X 13.04	2.27	X 13.01	
Luas Penampang (mm ²)	26.86		29.53		28.20
Beban luluh (kN)	9.69		10.4		10.0
Kuat Luluh (N/mm ²)	360.7		352.2		356.4
Beban maksimum/putus (kN)	13.95		14.39		14.2
Kuat Tarik (N/mm ²)	519.3		487.3		503.3
L (mm)	20		20		20.0
Lo (mm)	25.01		24.85		24.9
Elongation (%)	25.05		24.25		24.7
Kode batang uji	I-T1		I-T2		Rata-rata

Hasil Pengujian Tarik Sampel F (PWHT 650⁰C, 60 min)

Kode batang uji	I-T1		I-T2		Rata-rata
Ukuran : Tebal x lebar (mm)	1.85	X 12.66	2.07	X 12.93	
Luas Penampang (mm ²)	23.42		26.77		25.09
Beban luluh (kN)	9.53		10.23		9.9
Kuat Luluh (N/mm ²)	406.9		382.2		394.6
Beban maksimum/putus (kN)	13.17		13.75		13.5
Kuat Tarik (N/mm ²)	562.3		513.7		538.0
L (mm)	20		20		20.0
Lo (mm)	23.96		22.68		23.3
Elongation (%)	19.8		13.4		16.6

LAMPIRAN 2
Hasil Pengujian Kekerasan

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel A (Tanpa PWHT)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	142	-	-
2	156	-	-
3	153	-	-
4	-	133	-
5	-	136	-
6	-	133	-
7	-	-	169
8	-	-	153
9	-	-	163
10	-	155	-
11	-	157	-
12	-	147	-
13	146	-	-
14	143	-	-
15	156	-	-
Rata – rata	149.33	143.50	161.67

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel B (PWHT 600⁰C, 10 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	177	-	-
2	165	-	-
3	153	-	-
4	-	141	-
5	-	155	-
6	-	151	-
7	-	-	162
8	-	-	165
9	-	-	176
10	-	149	-
11	-	150	-
12	-	148	-
13	141	-	-
14	165	-	-
15	172	-	-
Rata - rata	162.17	149.00	167.67

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel C (PWHT 600⁰C, 30 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	200	-	-
2	201	-	-
3	190	-	-
4	-	156	-
5	-	159	-
6	-	167	-
7	-	-	171
8	-	-	170
9	-	-	160
10	-	153	-
11	-	153	-
12	-	152	-
13	196	-	-
14	197	-	-
15	197	-	-
Rata – rata	196.83	156.67	167.00

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel D (PWHT 600⁰C, 45 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	175	-	-
2	164	-	-
3	150	-	-
4	-	140	-
5	-	141	-
6	-	144	-
7	-	-	161
8	-	-	163
9	-	-	163
10	-	151	-
11	-	144	-
12	-	143	-
13	185	-	-
14	187	-	-
15	199	-	-
Rata – rata	176.67	143.83	162.33

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel E (PWHT 600⁰C, 60 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	164	-	-
2	151	-	-
3	162	-	-
4	-	137	-
5	-	137	-
6	-	136	-
7	-	-	154
8	-	-	152
9	-	-	161
10	-	146	-
11	-	142	-
12	-	138	-
13	158	-	-
14	169	-	-
15	181	-	-
Rata – rata	164.17	139.33	155.67

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel F (PWHT 650⁰C, 10 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	162	-	-
2	153	-	-
3	160	-	-
4	-	138	-
5	-	140	-
6	-	137	-
7	-	-	156
8	-	-	152
9	-	-	154
10	-	146	-
11	-	145	-
12	-	145	-
13	184	-	-
14	190	-	-
15	197	-	-
Rata – rata	174.33	141.83	154.00

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel G (PWHT 650⁰C, 30 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	182	-	-
2	176	-	-
3	172	-	-
4	-	132	-
5	-	131	-
6	-	132	-
7	-	-	157
8	-	-	157
9	-	-	161
10	-	152	-
11	-	148	-
12	-	143	-
13	174	-	-
14	182	-	-
15	196	-	-
Rata – rata	180.33	139.67	158.33

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel H (PWHT 650⁰C, 45 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	168	-	-
2	155	-	-
3	137	-	-
4	-	134	-
5	-	153	-
6	-	156	-
7	-	-	156
8	-	-	148
9	-	-	155
10	-	141	-
11	-	136	-
12	-	135	-
13	157	-	-
14	147	-	-
15	148	-	-
Rata – rata	152.00	142.50	153.00

Hasil Pengujian Kekerasan Sampel I (PWHT 650⁰C, 60 min)

Posisi	VHN		
	Logam Induk	HAZ	Logam Las
1	160	-	-
2	155	-	-
3	136	-	-
4	-	146	-
5	-	146	-
6	-	150	-
7	-	-	153
8	-	-	151
9	-	-	151
10	-	147	-
11	-	140	-
12	-	135	-
13	152	-	-
14	151	-	-
15	147	-	-
Rata – rata	150.17	144.00	151.67