



**PENGARUH VARIASI SUHU *POST WELD HEAT TREATMENT*
ANNEALING TERHADAP SIFAT MEKANIS MATERIAL BESI COR
KELABU YANG DISAMBUNG DENGAN METODE PENGELASAN
*SHIELDED METAL ARC WELDING (SMAW)***

SKRIPSI

Diajukan Dalam Rangka Menyelesaikan Studi Strata 1
Untuk Mencapai Gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

NAMA : **SRI WAHYU SISWANTO**

NIM : 5250402044

JURUSAN : TEKNIK MESIN

PROGRAM STUDI : TEKNIK MESIN S1

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG**

2007

ABSTRAK

Sri Wahyu Siswanto, 2007. TM, FT, UNNES “Pengaruh Variasi Suhu *Post Weld Heat Treatment Annealing* Terhadap Sifat Mekanis Material Besi Cor Kelabu Yang Disambung Dengan Metode Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW)”.

Material besi cor kelabu merupakan material yang mempunyai sifat getas dan kurang mampu menahan tegangan akibat siklus pengelasan. Sifat getas atau rendahnya keuletan besi cor kelabu diakibatkan oleh grafit serpih pada besi cor kelabu. Pada penyambungan material besi cor kelabu menggunakan metode pengelasan SMAW perlu adanya perlakuan panas paska pengelasan (*post weld heat treatment annealing*) untuk menghindari permasalahan-permasalahan pengelasan besi cor kelabu terutama timbulnya *residual stress* akibat gradien temperatur yang terlalu tinggi. Pengaruh variasi suhu yang optimal pada *post weld heat treatment annealing* juga diharapkan dapat meningkatkan sifat mekanis pada pengelasan material besi cor kelabu.

Langkah penelitian ini adalah dengan memberikan variasi suhu *post weld heat treatment annealing* setelah proses pengelasan, yaitu dengan variasi suhu 150⁰C, 300⁰C, 450⁰C dan 600⁰C dengan laju pemanasan sebesar 90⁰C/jam, selanjutnya dibentuk spesimen uji tarik. Ukuran spesimen uji tarik sesuai dengan standar ASTM E8-1996. Pengelasan dilakukan secara manual dengan posisi pengelasan bawah tangan (*down hand*) dan kampuh berbentuk V terbuka dengan sudut 70⁰, sebelum dilakukan proses pengelasan material yang digunakan diuji komposisi untuk mengetahui unsur dalam material tersebut. Spesimen dihaluskan dan dietza untuk mengetahui daerah hasil pengelasan, kemudian dilakukan foto struktur mikro dan uji kekerasan sebagai data pendukung. Spesimen diuji tarik dengan mesin uji tarik hidrolik *servo pulser*.

Pengaruh variasi suhu *post weld heat treatment annealing* terhadap sifat mekanis material besi cor kelabu dengan metode pengelasan *shielded metal arc welding* (SMAW) pada penelitian ini diindikasikan dengan nilai kekuatan tarik *raw material* sebesar 22,57 kg/mm², pengelasan *non* PWHT sebesar 9,85 kg/mm², pengelasan PWHT 150⁰C sebesar 11,79 kg/mm², pengelasan PWHT 300⁰C sebesar 12,39 kg/mm², pengelasan PWHT 450⁰C sebesar 14,20 kg/mm² dan pengelasan PWHT 600⁰C sebesar 15,41 kg/mm². Struktur mikro dari material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan berupa grafit serpih, perlit dan ferit. Struktur mikro setelah dilakukan proses pengelasan berupa matrik ferit dan grafit pada daerah logam las, matrik perlit yang kasar dan grafit serpih pada daerah *HAZ* (*Heat Affected Zone*) dan struktur perlit, grafit serpih dan ferit pada daerah logam induk.

Kata kunci: *Post weld heat treatment, annealing* dan besi cor kelabu.

HALAMAN PENGESAHAN

Telah dipertahankan dalam ujian pada Panitia Ujian Skripsi Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang pada:

Hari :

Tanggal :

Ketua

Sekretaris

Drs. Suprpto, M.Pd
NIP. 131 125 645

Basyirun, S.Pd. M.T
NIP. 132 094 389

Tim Penguji:

Pembimbing I

Penguji I

Ir. Subarmono, M.T, P.E.
NIP. 130 937 457

Ir. Subarmono, M.T, P.E.
NIP. 130 937 457

Pembimbing II

Penguji II

Rusiyanto, S.Pd, M.T.
NIP. 132 240 461

Rusiyanto, S.Pd, M.T.
NIP. 132 240 461

Penguji III

Hadromi, S.Pd, M.T.
NIP. 132 093 201

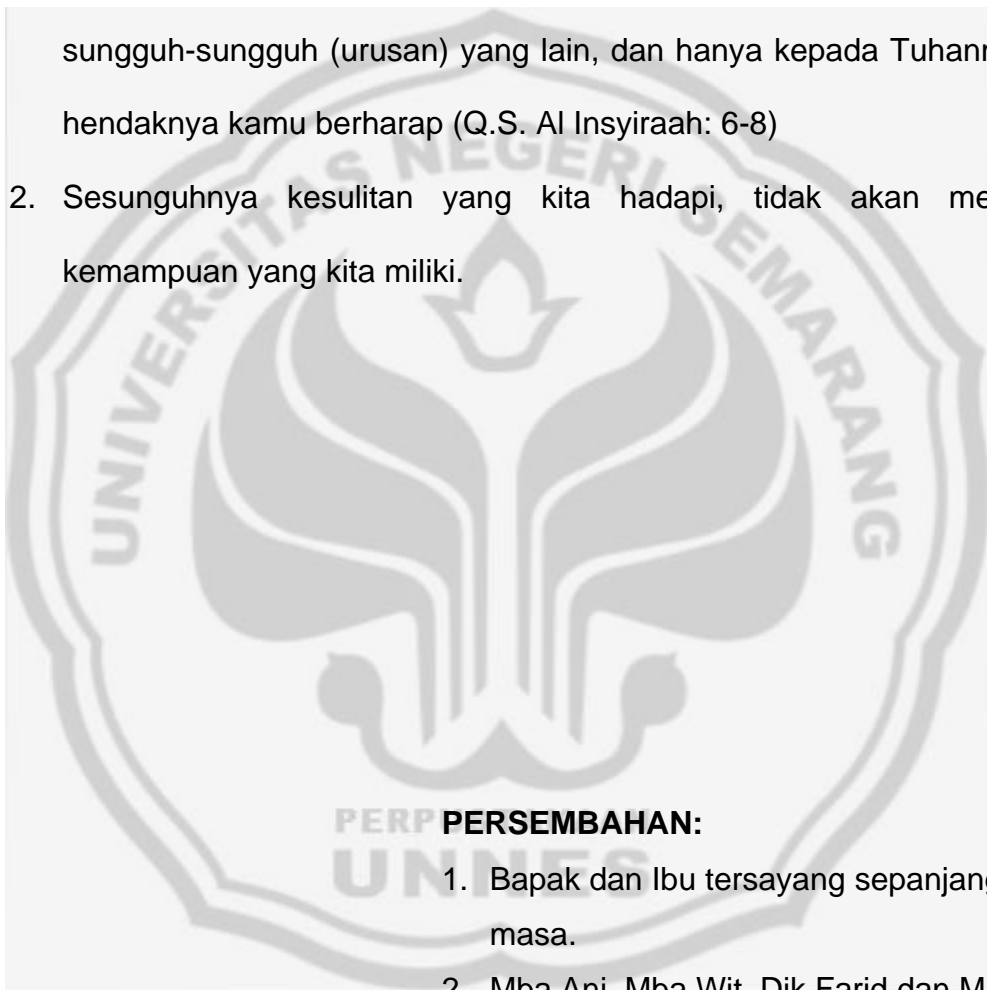
Mengetahui,
Dekan Fakultas Teknik

Prof. DR. Soesanto
NIP. 130 875753

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

MOTTO:

1. Sesungguhnya sesudah kesulitan itu pasti ada kemudahan maka, apabila kamu telah selesai (dari suatu urusan), kerjakanlah dengan sungguh-sungguh (urusan) yang lain, dan hanya kepada Tuhanmulah hendaknya kamu berharap (Q.S. Al Insyiraah: 6-8)
2. Sesungguhnya kesulitan yang kita hadapi, tidak akan melebihi kemampuan yang kita miliki.



PERSEMBAHAN:

1. Bapak dan Ibu tersayang sepanjang masa.
2. Mba Ani, Mba Wit, Dik Farid dan Mas Sukono tersayang.
3. Adik Maulida Destiany, semangatku tercinta.
4. Semua saudaraku di rumah.
5. Teman-teman TM S1 angkatan 2002.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, dengan mengucapkan segala puji syukur kehadirat ALLAH SWT, yang telah melimpahkan rahmat serta hidayahnya sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan penelitian dan menyusun skripsi sebagai salah satu syarat menyelesaikan studi serta memperoleh gelar Sarjana Strata S1 di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Dalam pelaksanaan penelitian hingga tersusunnya skripsi ini, penulis tidak lepas dari berbagai hambatan dan kesulitan, namun atas bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini, maka perkenankanlah penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

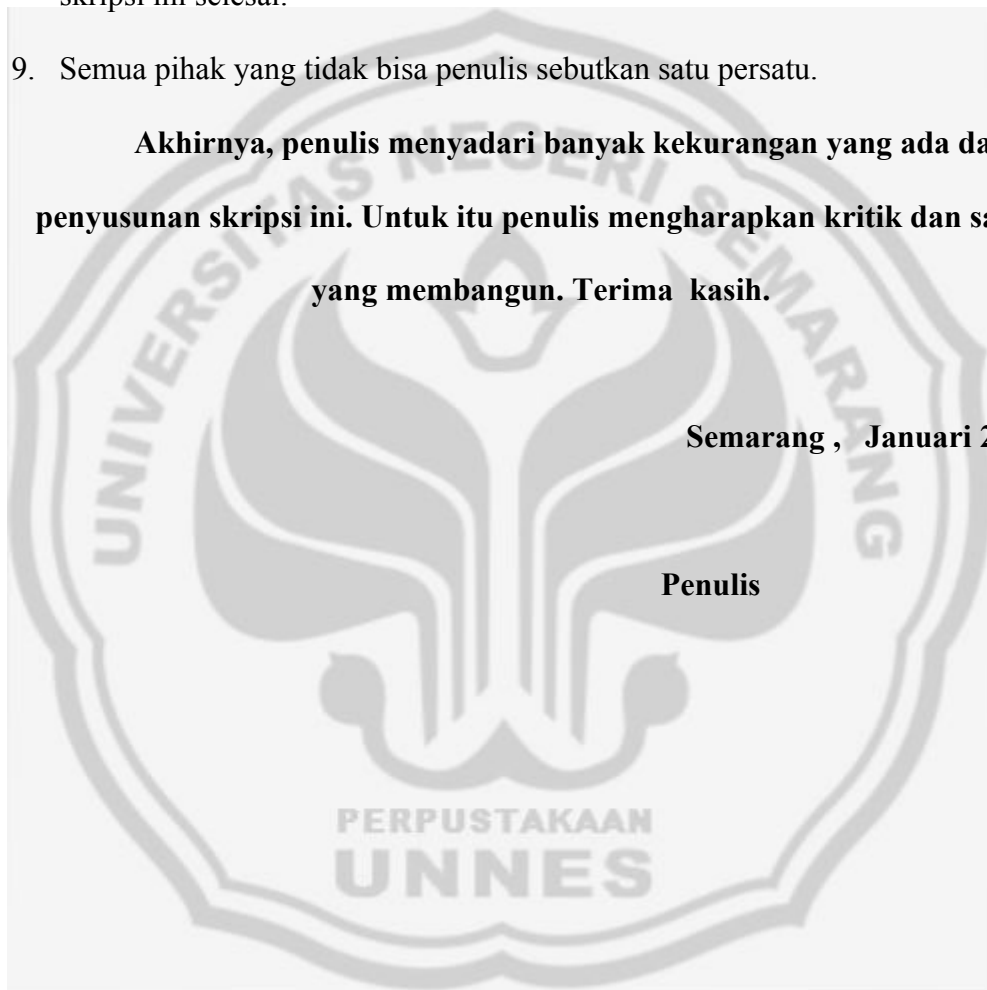
1. Prof. Dr. Soesanto, Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
2. Drs. Pramono, Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.
3. Bapak Ir. Subarmono, M.T, P.E, Dosen pembimbing I yang telah banyak meluangkan waktu dan kesabarannya di tengah kesibukan dan rutinitas untuk memberikan arahan serta masukan dalam menyelesaikan skripsi ini.
4. Bapak Rusiyanto, S.Pd, M.T, Dosen pembimbing II yang telah banyak meluangkan waktu dan kesabarannya di tengah kesibukan dan rutinitas untuk memberikan arahan serta masukan dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Seluruh pegawai Laboratorium Bahan Teknik Mesin SI dan D3 UGM yang sabar dalam membantu penelitian.

6. Seluruh pegawai BLKI Semarang yang telah membantu proses pengelasan dan pengovenan.
7. Seluruh keluargaku dan keluarga adik Maulida Destiany di rumah.
8. Teman-teman angkatan 2002 yang terus membantu dan mendukungku hingga skripsi ini selesai.
9. Semua pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhirnya, penulis menyadari banyak kekurangan yang ada dalam penyusunan skripsi ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Terima kasih.

Semarang , Januari 2007

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
ABSTRAK.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
MOTTO DAN PERSEMBAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. LATAR BELAKANG.....	1
B. PERMASALAHAN.....	3
C. TUJUAN PENELITIAN.....	4
D. MANFAAT PENELITIAN.....	5
E. SISTEMATIKA SKRIPSI.....	5
BAB II LANDASAN TEORI DAN KERANGKA BERPIKIR.....	7
A. LANDASAN TEORI.....	7
1. Pengertian Las.....	7
2. <i>Shielded Metal Arc Welding (SMAW)</i>	8
3. Elektroda.....	9
4. Jenis Sambungan Las.....	11
5. Daerah Lasan.....	12
6. Metalurgi Las.....	13
7. <i>Post Weld Heat Treatment Annealing</i>	16
8. Besi cor Kelabu.....	19
9. Tegangan Sisa.....	22
10. Pengujian Komposisi.....	23

11. Pengujian Kekerasan <i>Vickers</i>	25
12. Pengujian Tarik.....	27
13. Bentuk Permukaan Patah Pengujian Tarik.....	31
B. KERANGKA BERPIKIR.....	32
C. HIPOTESIS.....	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
A. Bahan Spesimen Penelitian.....	35
B. Persiapan Alat Penelitian.....	35
C. Waktu dan Tempat Penelitian.....	37
D. Cara Pembuatan Spesimen.....	37
E. Pelaksanaan Eksperimen.....	41
F. Diagram Alir Penelitian.....	48
G. Analisis Data.....	49
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN.....	50
A. Hasil Penelitian.....	50
1. Hasil Uji komposisi material.....	50
2. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik.....	51
3. Hasil Pengujian Kekerasan.....	55
4. Hasil Pengamatan Foto Struktur Mikro.....	67
5. Hasil Pengamatan Penampang Patah Uji Tarik.....	82
B. Pembahasan.....	84
BAB V PENUTUP.....	88
A. Simpulan.....	88
B. Saran.....	90
DAFTAR PUSTAKA.....	91
LAMPIRAN.....	92

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Klasifikasi elektroda terbungkus untuk pengelasan besi cor	11
Tabel 2. Klasifikasi besi cor kelabu	20
Tabel 3. Komposisi kimia material.	50
Tabel 4. Data hasil pengujian tarik	51
Tabel 5. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen <i>Raw Material</i>	55
Tabel 6. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan <i>non</i> PWHT	56
Tabel 7. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 150 ⁰ C	58
Tabel 8. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 300 ⁰ C	60
Tabel 9. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 450 ⁰ C	62
Tabel 10. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 600 ⁰ C	62

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Las busur listrik dengan elektroda terbungkus.....	8
Gambar 2. Elektroda las	10
Gambar 3. Daerah lasan	13
Gambar 4. Diagram Perubahan Struktur.....	14
Gambar.5. Diagram fasa sistem Fe-C	18
Gambar 6. <i>The Vickers diamond pyramid indentor</i>	27
Gambar 7. Diagram tegangan-regangan bahan tidak ulet.....	30
Gambar 8. Bentuk permukaan patah.....	31
Gambar 9. Gambar kampuh V terbuka	38
Gambar 10. Oven pemanas logam merk <i>hofmann</i>	39
Gambar 11. Bentuk spesimen benda uji tarik	41
Gambar 12. Mesin uji tarik hidrolik <i>servo pulser</i>	43
Gambar 13. Alat foto makro	44
Gambar 14. Alat pemoles spesimen.....	45
Gambar 15. Mikroskop optik	47
Gambar 16. Diagram alir penelitian.....	48
Gambar 17. Grafik kekuatan tarik maksimum (σ_u)	52
Gambar 18. Grafik pertambahan panjang (e).....	54
Gambar 19. Grafik nilai kekerasan pengelasan <i>non PWHT</i>	57
Gambar 20. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 150 ⁰ C	59
Gambar 21. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 300 ⁰ C	61

Gambar 22. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 450 ⁰ C	63
Gambar 23. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 600 ⁰ C	65
Gambar 24. Grafik nilai kekerasan gabungan.....	66
Gambar 25. Mikro foto dari besi tuang biasa.....	67
Gambar 26. Struktur mikro <i>raw material</i>	68
Gambar 27. Struktur mikro logam las pengelasan <i>non</i> PWHT.....	69
Gambar 28. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 150 ⁰ C.....	70
Gambar 29. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 300 ⁰ C.....	70
Gambar 30. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 450 ⁰ C.....	71
Gambar 31. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 600 ⁰ C.....	72
Gambar 32. Struktur mikro daerah <i>HAZ</i> pengelasan <i>non</i> PWHT	73
Gambar 33. Struktur mikro daerah <i>HAZ</i> pengelasan PWHT 150 ⁰ C.....	74
Gambar 34. Struktur mikro daerah <i>HAZ</i> pengelasan PWHT 300 ⁰ C.....	74
Gambar 35. Struktur mikro daerah <i>HAZ</i> pengelasan PWHT 450 ⁰ C.....	75
Gambar 36. Struktur mikro daerah <i>HAZ</i> pengelasan PWHT 600 ⁰ C.....	76
Gambar 37. Struktur mikro logam induk pengelasan <i>non</i> PWHT	77
Gambar 38. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 150 ⁰ C.....	78
Gambar 39. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 300 ⁰ C.....	78
Gambar 40. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 450 ⁰ C.....	79
Gambar 41. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 600 ⁰ C.....	80
Gambar 42. Struktur mikro batas logam las dengan daerah <i>HAZ</i> pada pengelasan PWHT 450 ⁰ C	81

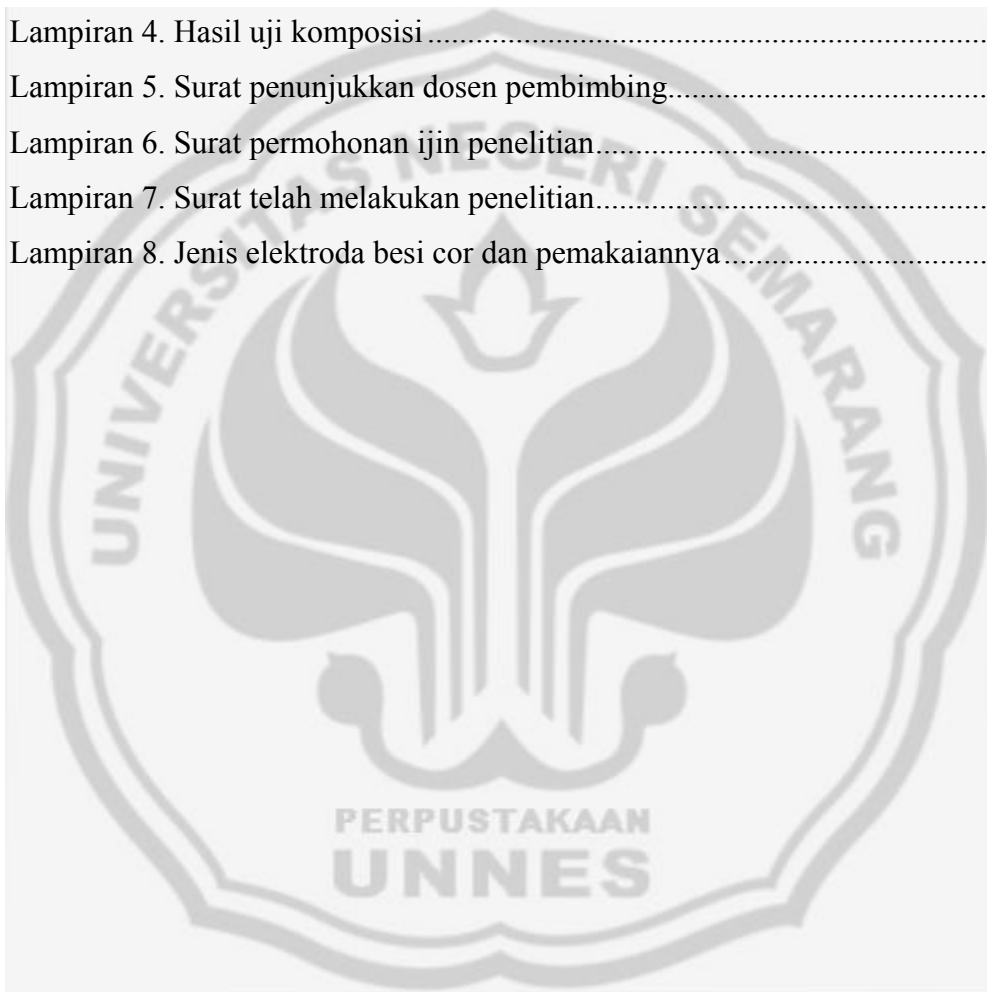
Gambar 43. Struktur mikro batas daerah *HAZ* dengan logam induk pada
pengelasan PWHT 4500C 82

Gambar 44. Penampang patah hasil uji tarik 83



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Perhitungan hasil data penelitian.....	94
Lampiran 2. Grafik hasil uji tarik.....	95
Lampiran 3. Standar spesimen uji tarik ASTM E8.....	96
Lampiran 4. Hasil uji komposisi.....	98
Lampiran 5. Surat penunjukkan dosen pembimbing.....	111
Lampiran 6. Surat permohonan ijin penelitian.....	118
Lampiran 7. Surat telah melakukan penelitian.....	120
Lampiran 8. Jenis elektroda besi cor dan pemakaiannya.....	122



BAB I

PENDAHULUAN

A. LATAR BELAKANG

Penggunaan bahan logam terutama besi cor sudah digunakan dalam lingkup yang luas, dunia otomotif misalnya penggunaan besi cor cukup besar. Hal ini dapat dilihat dari banyaknya komponen-komponen otomotif yang terbuat dari besi cor. Beberapa contoh komponen otomotif yang terbuat dari besi cor antara lain blok silinder, tutup silinder, rumah engkol, tromol rem dan lain-lain. Luasnya penggunaan besi cor dikarenakan kelebihan-kelebihan yang ada pada besi cor, selain mudah didapat dan murah, besi cor juga memiliki kemampuan cor yang sangat baik untuk bentuk-bentuk yang rumit.

Besi cor kelabu merupakan jenis besi cor yang paling banyak digunakan. Adapun sifat-sifat yang menguntungkan yang didapat pada besi cor kelabu antara lain: mudah dituang atau dicor menjadi menjadi bentuk yang rumit, harga relatif murah dibandingkan dengan jenis besi cor yang lain, tahan aus atau gesekan, faktor redam yang tinggi dan kekuatan tekan (*compressive strength*) yang tinggi, selain keuntungan-keuntungan tersebut, besi cor kelabu juga mempunyai beberapa kekurangan antara lain: mempunyai sifat getas, keuletan rendah dan kurang mampu menahan tegangan akibat siklus pengelasan.

Kekurangan-kekurangan yang ada pada besi cor kelabu tersebut menyebabkan besi cor kelabu mempunyai sifat mampu las yang lebih rendah dibandingkan dengan besi cor yang lain. Sifat mampu las yang rendah pada

besi cor kelabu dapat menimbulkan berbagai permasalahan dalam proses pengelasan terutama retak las yang disebabkan adanya tegangan sisa.

Menurut Wiryosumarto (2000: 135) bahwa tegangan sisa merupakan tegangan yang bersifat menetap dan terjadi akibat siklus termal yang tidak merata pada seluruh luas penampang daerah lasan. Hal tersebut terjadi akibat distribusi suhu yang tidak merata dengan diikuti oleh siklus pendinginan yang tidak merata. Tegangan sisa dapat dihilangkan dengan cara termal yaitu dengan proses anil. Proses anil adalah satu perlakuan terhadap logam yang dapat meniadakan tegangan sisa (Amstead, 1997: 150).

Proses perlakuan panas pada material seperti pemanasan awal, pemanasan pada saat pengelasan dan pemanasan setelah pengelasan (*post weld heat treatment*), akan mempengaruhi sifat-sifat mekanis (keuletan, kerapuhan, kekerasan, kemampuan tarik), bentuk dan susunan logam las (ukuran butir, susunan kristal) serta kualitas daripada sambungan (ada atau tidaknya cacat-cacat) (Suharto, 1991: 44).

Proses pengelasan besi cor banyak mempergunakan pengelasan dengan metode las busur listrik dengan elektroda terlindung (*shielded metal arc welding*) (Wiryosumarto, 1991: 96). Proses pengelasan dengan las busur listrik banyak digunakan karena cara pemakaiannya yang mudah, peralatan yang sederhana dan dapat menghasilkan sambungan yang kuat.

Pengelasan dapat dikatakan berkualitas apabila sambungan itu mampu menahan beban atau gaya yang bekerja padanya. Beban atau gaya tersebut dapat berupa beban tarik, sehingga kualitas dan kekuatan dari hasil lasan dapat

diketahui dari besar kecilnya kekuatan tarik. Pengujian tarik merupakan salah satu cara yang digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik dari bahan yang diuji. Untuk mengetahui besarnya kekerasan material setelah proses pengelasan dapat kita lakukan uji kekerasan *Vickers*, uji kekerasan *Brinell* dan uji kekerasan *Rockwell*.

Berdasarkan dari alasan dan pemikiran diatas maka peneliti lebih memfokuskan pada “Pengaruh Variasi Suhu *Post Weld Heat Treatment Annealing* Terhadap Sifat Mekanis Material Besi Cor Kelabu Yang Disambung Dengan Metode Pengelasan *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*”.

B. PERMASALAHAN

Sesuai dengan judul dan latar belakang diatas, maka permasalahan yang akan diteliti dalam penelitian ini adalah :

1. Berapakah besar kekuatan tarik dan nilai kekerasan *Vickers* material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan dan setelah dilakukan proses pengelasan tanpa *post weld heat treatment annealing* ?
2. Berapakah suhu optimal *post weld heat treatment annealing* untuk material besi cor kelabu dengan variasi suhu yang digunakan 150⁰C, 300⁰C, 450⁰C dan 600⁰C ?
3. Bagaimanakah struktur mikro dari material besi cor kelabu akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan *shielded metal arc welding* ?

4. Bagaimanakah sifat patah dari benda uji akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan *shielded metal arc welding* ?

C. TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan dari permasalahan yang dikemukakan maka tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui berapakah besar kekuatan tarik dan nilai kekerasan *Vickers* material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan dan setelah dilakukan proses pengelasan tanpa *post weld heat treatment annealing* ?
2. Untuk mengetahui berapakah suhu optimal *post weld heat treatment annealing* untuk material besi cor kelabu dengan variasi suhu yang digunakan 150⁰C, 300⁰C, 450⁰C dan 600⁰C ?
3. Untuk mengetahui bagaimanakah struktur mikro dari material besi cor kelabu akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan *shielded metal arc welding* ?
4. Untuk mengetahui bagaimanakah sifat patah dari benda uji akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan *shielded metal arc welding* ?

D. MANFAAT PENELITIAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan ini, maka peneliti berharap penelitian ini dapat diambil manfaatnya, antara lain:

1. Memberi masukan bagi kalangan akademisi, praktisi dan pihak terkait berapakah suhu optimal *post weld heat treatment annealing* untuk material besi cor kelabu serta besar kekuatan tarik, nilai kekerasan *Vickers*, struktur mikro dan sifat patah material besi cor kelabu akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan dengan menggunakan metode pengelasan *shielded metal arc welding*.
2. Sebagai informasi yang penting bagi juru las dalam rangka usaha peningkatan kualitas hasil pengelasan material besi cor kelabu.
3. Sebagai literatur pada penelitian yang sejenisnya dalam rangka pengembangan teknologi khususnya bidang pengelasan.

E. SISTEMATIKA SKRIPSI

Sistematika skripsi ini mempunyai tiga bagian utama, yaitu:

1. Bagian awal

Bagian ini berisi: halaman judul, lembar pengesahan, motto dan persembahan, kata pengantar, daftar isi, daftar tabel, daftar gambar, lampiran dan abstrak.

2. Bagian isi yang terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Meliputi: Latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika skripsi.

BAB II LANDASAN TEORI DAN HIPOTESIS

Meliputi: Landasan teori, kerangka berfikir dan hipotesis.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Meliputi: Bahan spesimen penelitian, persiapan alat penelitian, waktu dan tempat penelitian, cara pembuatan spesimen, pelaksanaan eksperimen, diagram alir penelitian dan analisis data

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

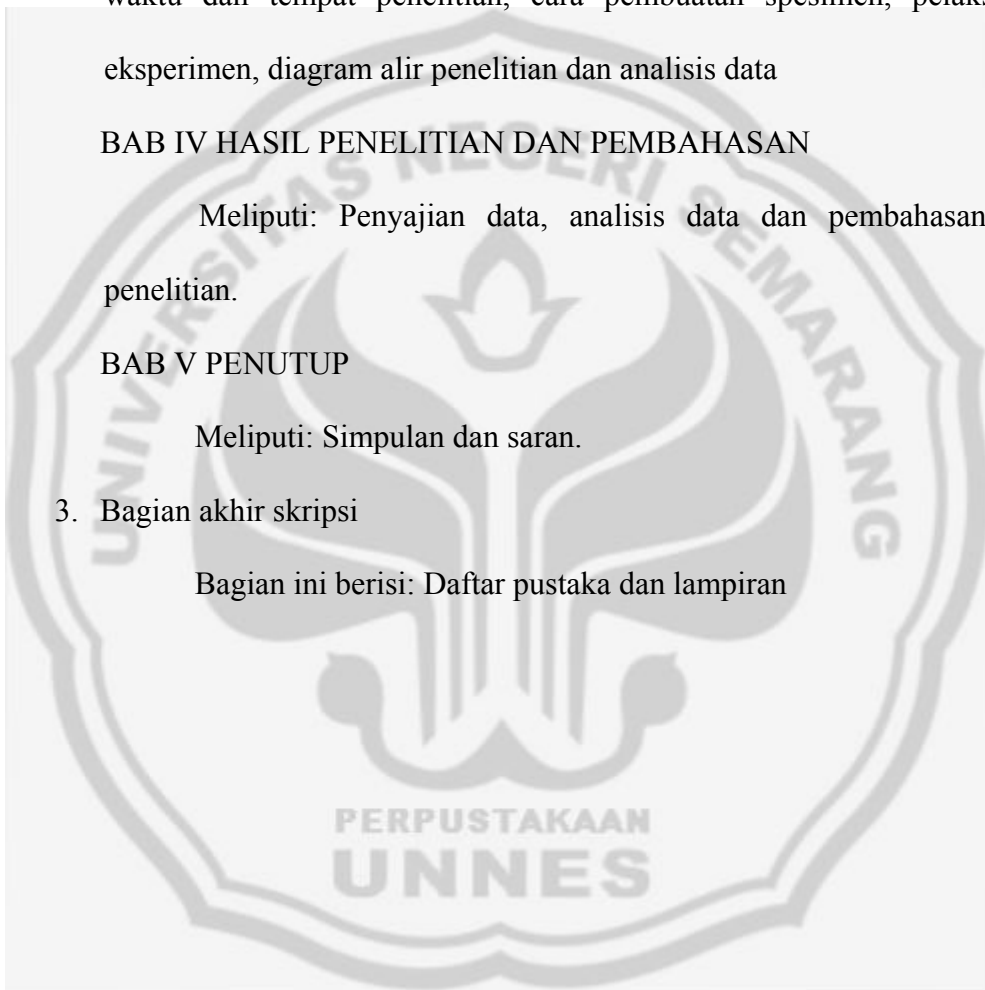
Meliputi: Penyajian data, analisis data dan pembahasan hasil penelitian.

BAB V PENUTUP

Meliputi: Simpulan dan saran.

3. Bagian akhir skripsi

Bagian ini berisi: Daftar pustaka dan lampiran



BAB II

LANDASAN TEORI DAN HIPOTESIS

F. LANDASAN TEORI

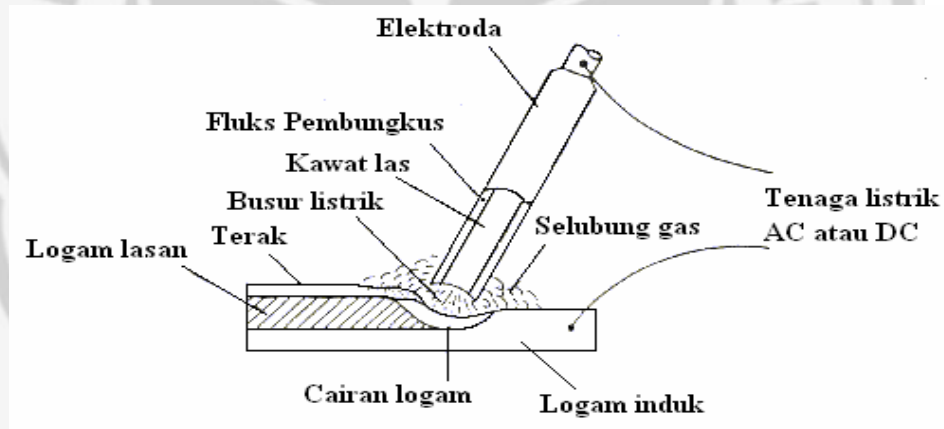
1. Pengertian Las

Definisi pengelasan menurut *Deutche Industrie Normen* (DIN) adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair, dengan kata lain las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas (Wiryo Sumarto, 2000: 1). Pengertian las secara sederhana adalah pengelasan merupakan proses penyambungan dua buah logam sampai titik rekristalisasi logam, baik menggunakan bahan tambah atau tidak dan menggunakan energi panas sebagai pencair bahan yang dilas.

Pengertian pengelasan menurut Sonawan (2004: 1) pengelasan atau *welding* adalah salah satu teknik penyambungan logam dengan cara mencairkan sebagian logam induk dan logam pengisi dengan atau tanpa tekanan dan dengan atau tanpa logam tambahan dan menghasilkan sambungan yang kontinyu, sedangkan menurut Widharto (2001: 1) pengelasan adalah salah satu cara untuk menyambung benda padat dengan jalan mencairkannya melalui pemanasan. Pengelasan juga disebut suatu cara penyambungan benda kerja yang mencair akan menyatu dengan bantuan bahan tambahan sehingga terbentuklah suatu sambungan kuat.

2. *Shielded Metal Arc Welding (SMAW)*

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) atau las busur nyala listrik terlindung adalah pengelasan dengan mempergunakan busur nyala listrik sebagai sumber panas pencair logam (Widharto, 2001: 13). Las busur listrik merupakan pengelasan yang dilakukan dengan jalan mengubah arus listrik menjadi panas untuk melelehkan atau mencairkan permukaan benda yang akan disambung dengan membangkitkan busur nyala listrik melalui sebuah elektroda. Terjadinya busur nyala listrik tersebut diakibatkan oleh perbedaan tegangan listrik antara kedua kutub, yaitu benda kerja dan elektroda (Bintoro, 2000: 52).



Gambar 1. Las busur listrik dengan elektroda terbungkus
(Wirjosumarto, 2000: 9)

Busur nyala listrik yang menimbulkan panas digunakan untuk melelehkan atau melumerkan bidang-bidang benda kerja yang dilas atau disambung, dimana untuk mendapatkan busur nyala yaitu dengan mengontakkan (menggoreskan) elektroda las dengan benda kerja yang

akan dilas, setelah arus listrik mengalir dari elektroda ke benda kerja, maka kontak arus diputuskan dengan menarik elektroda sedikit keatas benda kerja, sehingga jarak antara elektroda dengan benda kerja menimbulkan busur nyala (busur listrik). Temperatur yang timbul pada busur nyala bisa mencapai 5000°C , sehingga mampu melelehkan elektroda dan benda kerja untuk membentuk paduan.

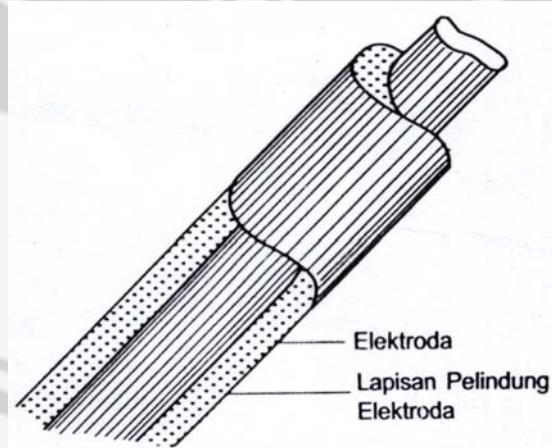
Pengelasan menggunakan metode *shielded metal arc welding* atau las busur nyala listrik terlindung ini, logam induk mengalami pencairan akibat pemanasan dari busur listrik yang timbul antara ujung elektroda dan permukaan benda kerja. Busur listrik yang ada dibangkitkan dari suatu mesin las. Elektroda yang dipakai berupa kawat yang dibungkus oleh pelindung berupa *flux* dan karena itu elektroda sering disebut kawat las. Elektroda ini selama pengelasan akan mengalami pencairan bersama-sama dengan logam induk yang menjadi bagian kumpuh las. Dengan adanya pencairan ini maka kumpuh las akan terisi oleh logam cair yang berasal dari elektroda dan logam induk.

3. Elektroda

Pengelasan dengan menggunakan *shielded metal arc welding* atau las busur listrik memerlukan kawat las atau elektroda yang terdiri dari satu inti terbuat dari logam dengan dilapisi oleh lapisan yang terbuat dari campuran zat kimia, selain berfungsi sebagai, pembangkit, elektroda juga berfungsi sebagai bahan tambah.

Elektroda terdiri dari dua buah bagian yaitu bagian yang bersalut (*fluks*) dan tidak bersalut yang merupakan pangkal menjepitkan tang las. Fungsi dari fluks atau lapisan elektroda dalam las adalah untuk melidungi logam cair dari lingkungan udara, menghasilkan gas pelindung, menstabilkan busur, dan sumber unsur paduan.

Jenis kawat elektroda bila ditinjau dari logam yang dilas dibedakan menjadi: elektroda untuk baja lunak, baja karbon tinggi, baja paduan, besi tuang dan logam *non ferro*. Bahan elektroda (*filler metal*) harus mempunyai kesamaan sifat dengan logam induk, maka sekaligus ini berarti bahwa tidak ada elektroda yang dapat dipakai untuk semua jenis pengelasan (Suharto, 1991: 80).



Gambar 2. Elektroda las (Bintoro, 2000: 53)

Tabel 1. Klasifikasi elektroda terbungkus untuk pengelasan besi cor
(JIS Z 3252-1976) (Wirjosumarto, 2000: 97).

Klasifikasi	Komposisi Kimia (%)							
	C	Mn	Si	P	S	Ni	Fe	Cu
DFC Ni	1,8 maks	1,0 maks	2,5 maks	0,04 maks	0,04 maks	92 min.	–	–
DFC NiFe	2,0 maks	2,5 maks	2,5 maks	0,04 maks	0,04 maks	40 – 60	Sisa	–
DFC NiCu	1,7 maks	2,0 maks	1,0 maks	0,04 maks	0,04 maks	60 min.	2,5 maks	25 – 35
DFC CI	1,0 – 5,0	1,9 maks	2,5 – 9,5	0,20 maks	0,04 maks	–	Sisa	–
DFC Fe	0,15 maks	0,8 maks	1,0 maks	0,03 maks	0,03 maks	–	Sisa	–

DFC NI merupakan kawat las khusus dengan inti nikel murni (98%), dipakai untuk pengelasan dingin pada berbagai macam besi cor, mempunyai kekuatan tarik (TS) 39,3 kg/mm² dan regangan (e) 5,9%. Arus yang digunakan adalah arus AC, DC+, untuk pengelasan yang sukar dianjurkan dengan arus DC–.

4. Jenis Sambungan Las

Proses penyambungan logam dengan jalan dilas hendaknya menghasilkan kualitas yang dipandang dari segi kekuatannya dan lapisan las dari logam yang dilas, dimana untuk menghasilkan sambungan las yang berkualitas baik, hendaknya pada ujung bidang atau bagian logam yang akan dilas perlu diberikan suatu bentuk kampuh tertentu.

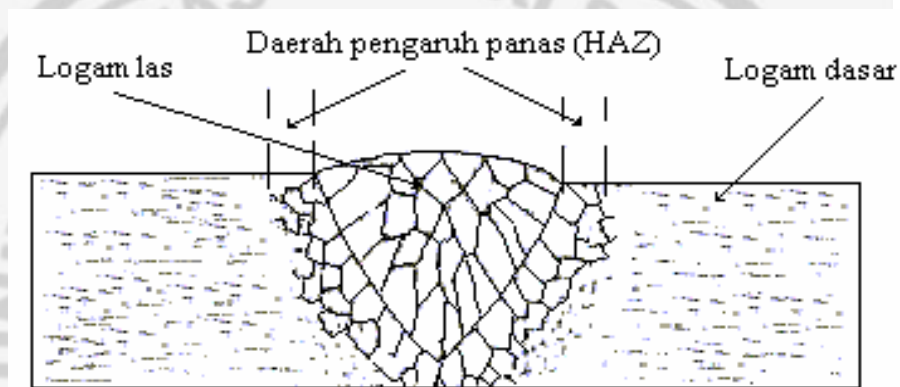
Pengerjaan bentuk kampuh las yang akan dibuat tergantung dari bentuk sambungan kampuh las, dimana bentuk sambungan kampuh las terdiri atas empat jenis yaitu sambungan kampuh sisi, sambungan kampuh berimpit, sambungan sudut dan sambungan T. Sambungan kampuh sisi adalah sambungan las yang dilakukan dengan jalan mengelas bagian ujung logam yang akan dilas. Pengerjaan bentuk kampuh las tergantung dari tebal logam yang akan dilas. Adapun sambungan kampuh sisi terdiri dari sambungan kampuh I, V, X dan U.

Sambungan kampuh V dipergunakan untuk menyambung logam atau plat yang tebalnya diantara 6 – 15 mm dimana sambungan kampuh V terdiri dari sambungan kampuh V terbuka dan sambungan kampuh V tertutup. Pada sambungan kampuh V terbuka dipergunakan untuk menyambung logam atau plat yang tebalnya 6 – 15 mm dan jarak antara plat yang satu dengan yang lainnya 1 – 2 mm dan tinggi 2 mm, sudut antara 60° – 80° (Arifin, 1977: 11).

5. Daerah Lasan

Daerah lasan terdiri dari tiga bagian yaitu logam las, daerah pengaruh panas yang dalam bahasa Inggrisnya adalah “*Heat Affected Zone*“ (HAZ) dan logam induk yang tak terpengaruhi. Logam las adalah bagian dari logam yang pada waktu pengelasan mencair dan kemudian membeku. Komposisi logam las terdiri dari komponen logam induk dan bahan tambah dari elektroda. Daerah pengaruh panas adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan

mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan cepat sehingga daerah ini yang paling kritis dari sambungan las. Logam induk adalah bagian logam dasar di mana panas dan suhu pengelasan tidak menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan struktur dan sifat, di samping ketiga pembagian utama tersebut masih ada satu daerah khusus yang antara logam las dan daerah pengaruh panas, yang disebut batas las (Wiryosumarto, 2000: 56).

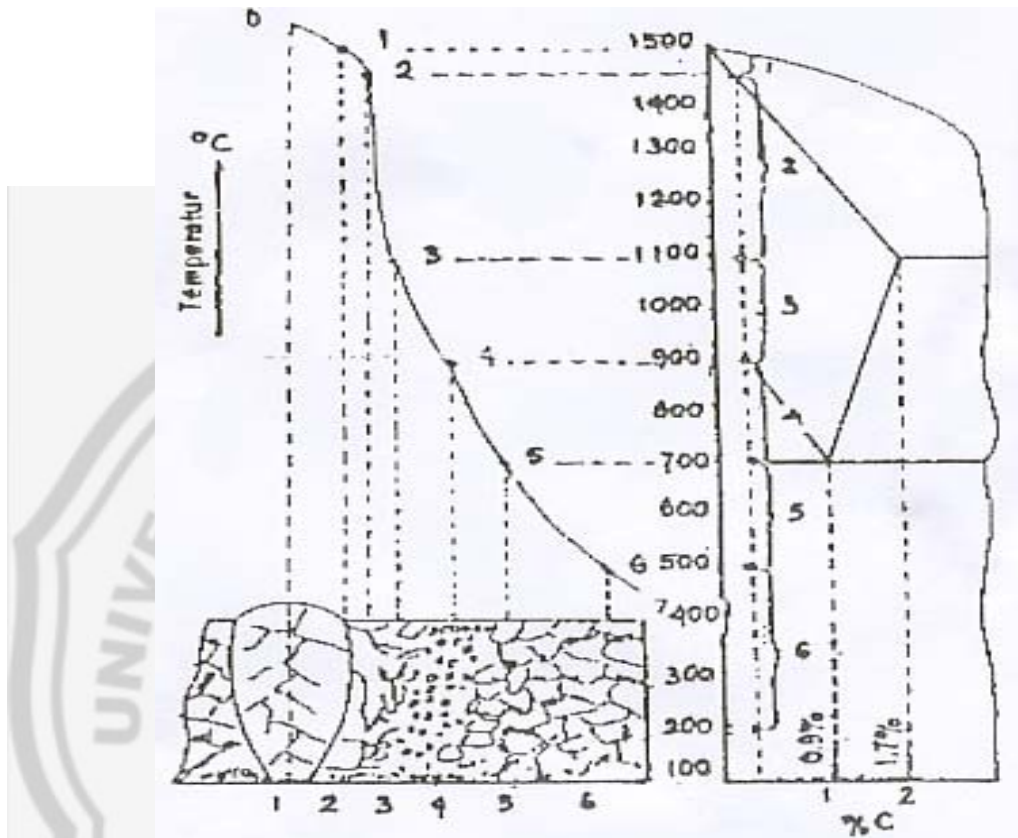


Gambar 3. Daerah lasan (Alip, 1989: 92)

6. Metalurgi Las

Logam yang disambung menggunakan las listrik tidak semua memiliki mutu yang baik, artinya tidak semua logam yang dilas mempunyai kekuatan sambungan yang baik, karena logam yang dilas mempunyai struktur yang berbeda (Arifin, 1977: 19). Selain itu prosedur pengelasan dan metode pengelasan juga berpengaruh terhadap struktur logam hasil lasan yang pada akhirnya berpengaruh terhadap mutu dari hasil lasan, karena perubahan struktur maka dengan sendirinya sifat-sifat yang dimiliki logam juga berubah.

Perubahan struktur logam saat terjadi pelumeran dan pendinginan di dalam proses pengelasan dapat dilihat pada diagram perubahan struktur:



Gambar 4. Diagram Perubahan Struktur (Arifin, 1977: 23)

Pada diagram ini dapat dilihat bahwa logam lasan (daerah 0 – 1 diatas garis suhu) akan berubah struktur menjadi logam asal induk dalam daerah batas las (daerah 1 – 2), dimana sebagian cairan logam terjadi pada daerah batas las dan waktu itu terjadi percampuran zat padat dengan fase cairan.

Pada daerah batas las yang lain (daerah 2 – 3) logam yang telah dipanaskan pada temperatur yang tinggi (1100°C – 1400°C) akan terjadi

pembentukan butir-butir dan pembentukan struktur, sehingga daerah ini merupakan daerah yang rapuh dari sambungan las.

Pada keadaan normal (daerah 3 – 4) yang mempunyai suhu tertinggi 1100°C (antara 900°C – 1100°C) akan terjadi pembentukan butir-butir halus, sehingga daerah ini terjadi perbaikan sifat-sifat mekanik dari logam.

Pada daerah 4 – 5 dengan suhu diatas 700°C dan dibawah 900°C (suhu sekitar 800°C) mulai terjadi pengkristalan pada logam (pengkristalan tidak sempurna).

Pada daerah 5 – 6 dengan suhu 500°C – 700°C telah terjadi pengkristalan kembali pada seluruh logam yang dilas dan tidak akan terjadi perubahan struktur pada logam.

Pada daerah 6 – 7 dengan suhu di bawah 500°C seluruh logam berubah menjadi logam yang tidak berbeda dengan logam asal sebelum dilas.

Lamanya pendinginan dalam suatu daerah suhu tertentu dari siklus termal las, sangat mempengaruhi kualitas sambungan, karena sebagian besar struktur mikro dan sifat mekanik sambungan las tergantung dari lamanya pendinginan. Pendinginan yang cepat akan membuat besi cor menjadi getas dan rapuh, sehingga kemampuan mekanis dari sambungan lasan akan menurun.

7. *Post Weld Heat Treatment Annealing*

Pengertian *post weld heat treatment* menurut Sonawan (2004: 58) adalah proses perlakuan panas paska pengelasan yang ditujukan untuk mengurangi pengaruh tegangan sisa. Adapun tujuan dari *post weld heat treatment* selain untuk mengurangi tegangan sisa adalah untuk mengontrol difusi H_2 pada sambungan, meningkatkan kemampuan dimesin, menurunkan kekerasan dan meningkatkan keliatan.

Menurut Van Vlack (1992: 437) *annealing* adalah proses laku panas dimana bahan mengalami pemanasan yang agak lama disusul dengan pendinginan perlahan-lahan. *Annealing* untuk besi cor adalah proses pemanasan besi cor sampai suatu temperatur dibawah garis A_1 , dan dibiarkan selama waktu tertentu, kemudian didinginkan perlahan-lahan dalam tungku pelunakan (Surdia dan Chijjiwa, 2000: 187).

Proses *annealing* secara umum adalah perlakuan panas dengan cara memanaskan material pada suhu tertentu kemudian menahannya pada waktu tertentu kemudian mendinginkan material secara perlahan-lahan dalam tungku.

Menurut Surdia dan Chijjiwa (2000: 188) terdapat beberapa ketentuan dalam proses *annealing* untuk besi cor antara lain:

Temperatur pelunakan	: 450 sampai 550 ⁰ C
Laju pemanasan	: 90 ⁰ C/jam
Waktu pelunakan	: (1 – 2) x (t / 25) jam, dimana, t : tebal dalam (mm)
Laju pendinginan maksimum	: 40 ⁰ C/jam

Proses perlakuan panas *annealing* pada material logam mempunyai beberapa tujuan antara lain:

- a. Menghilangkan tegangan sisa yang diakibatkan karena permesinan, pembentukan, pengerolan atau pengelasan.
- b. Meningkatkan atau mempertahankan keuletan dan ketangguhan material.
- c. Meningkatkan *machinability* material.
- d. Meminimalkan ketidaksamaan komposisi kimia logam.
- e. Menghaluskan ukuran butir.

Berdasarkan suhu pemanasan, perlakuan panas *annealing* dapat dibedakan menjadi:

- a. Anil penuh (*full annealing*)

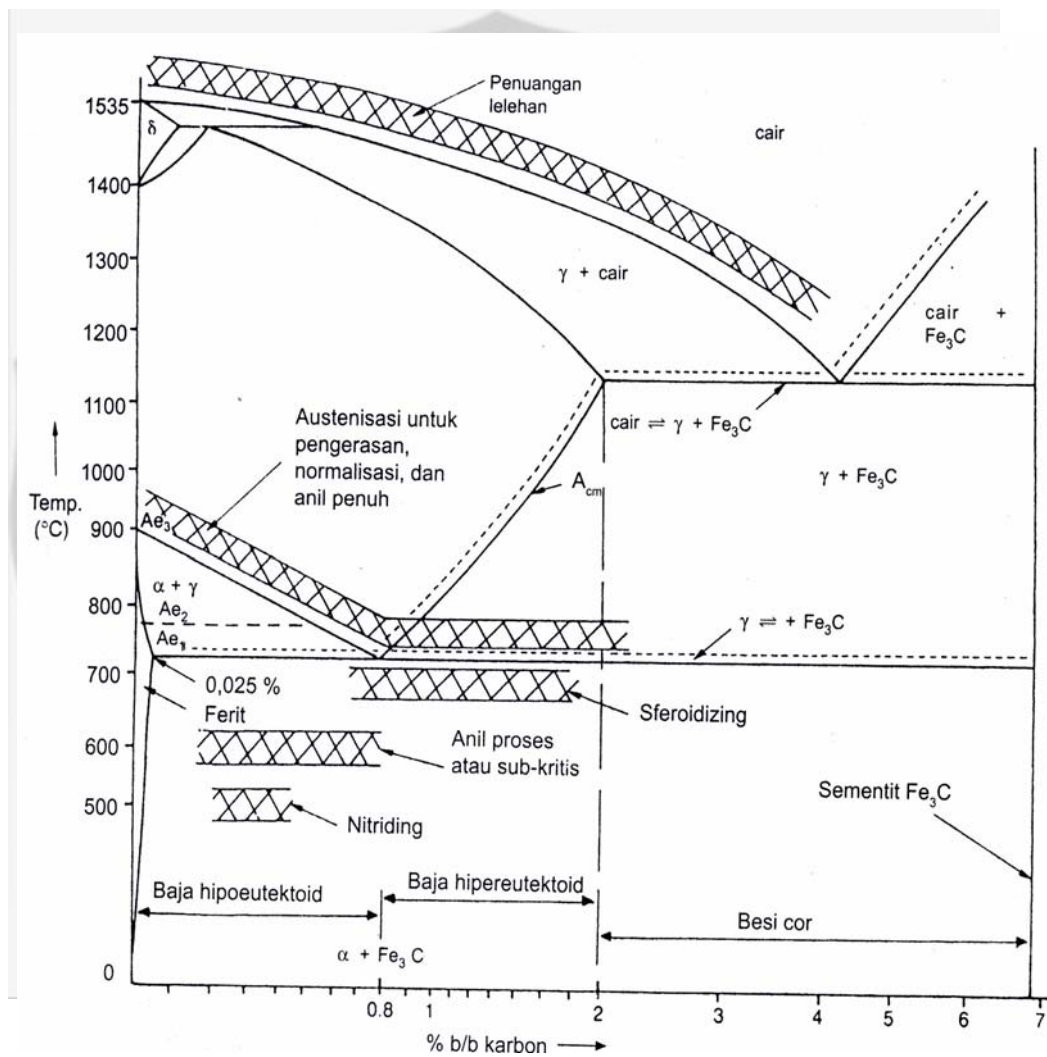
Anil penuh dilakukan dengan memanaskan material pada daerah austenit dengan pendinginan lambat. Material dipanaskan 30°C sampai 50°C diatas suhu kritis (A_3), karena pendinginan yang lambat, maka diperoleh keseimbangan struktur austenit yang homogen dalam material.

- b. Anil parsial (*partial annealing*)

Anil parsial (anil tak sempurna) adalah proses anil dengan pemanasan antara suhu kritis atas (A_3) dan suhu kritis bawah (A_1) diikuti dengan pendinginan lambat. Proses ini akan menghasilkan sifat mampu mesin yang baik pada material.

c. Anil subkritis (*process annealing*)

Anil subkritis dilakukan dengan pemanasan dibawah suhu kritis terbawah (A_1). Proses ini menghasilkan struktur perlit yang lebih keras dibandingkan hasil anil penuh.



Gambar 5. Diagram fasa sistem Fe-C (Smallman, 1999: 68)

8. Besi Cor Kelabu

Besi cor adalah paduan besi-karbon dengan kadar C lebih dari 2% dan masih ada tambahan unsur lain seperti Si, Mn, P, S dan lain sebagainya (Wiryosumarto, 2000: 95). Besi cor kelabu merupakan besi cor yang mempunyai grafit berbentuk serpih (*flakes*). Besi cor kelabu dihasilkan dari proses pengecoran yang mengalami laju pendinginan yang lambat selama berada dalam cetakan. Besi cor kelabu mempunyai sifat getas, keuletan rendah dan kurang mampu menahan tegangan akibat siklus pengelasan. Paduan besinya mengandung unsur antara lain: karbon, silikon, mangan, fosfor, sulfur dan unsur lainnya. Besi cor kelabu mempunyai permukaan patah berwarna kelabu sehingga dinamakan besi cor kelabu. Besi cor kelabu tidak siap untuk dilas karena bisa menyebabkan retak, tetapi kecenderungan ini dapat dikurangi bila besi cor kelabu mendapat perlakuan panas.

Pada besi cor, apakah akan terbentuk grafit atau sementit, dipengaruhi oleh komposisi kimia dan laju pendinginannya, agar dihasilkan besi cor kelabu antara lain dapat dilakukan dengan pendinginan yang cukup lambat, atau dengan kadar karbon yang tinggi. Kadar karbon yang tinggi akan mendorong terbentuknya grafit, yang akan lebih mudah terjadi apabila ditambahkan unsur-unsur penstabil grafit (*graphitizing element*). Adapun unsur yang mempercepat penggrafitan antara lain: Si, Ti, Ni, Al, Co, Au, Pt, Cu, sedangkan unsur yang menghambat penggrafitan yaitu: Cr, Te, V, Mn, P, W, Mg, B, O, H, N (Surdia dan Saito, 1985: 114).

Dalam besi cor kelabu, grafit terdistribusikan dalam matriks yang mana apabila ada tegangan akan terjadi konsentrasi tegangan disekitar grafit yang akan menyebabkan retak.

Tabel 2. Klasifikasi Besi Cor Kelabu (Wiryosumarto, 2000: 96)

Jenis dan Kelas	Simbol (JIS)	Komposisi Kimia (%)					Kekuatan tarik (kg/mm ²)	Sifat mampu las	
		C	Si	Mn	P	S			
Besi Cor Kelabu	Kelas 1	FC 10					10 ≤	Sedang	
	Kelas 2	FC 15					13 ≤		
	Kelas 3	FC 20	2,5	1,4	0,4	0,05	0,06		17 ≤
	Kelas 4	FC 25	–	–	–	–	–		22 ≤
	Kelas 5	FC 30	4,0	2,5	1,0	1,0	0,15		27 ≤
	Kelas 6	FC 35							32 ≤

Sifat - Sifat Mekanis dari Besi Cor Kelabu (Surdia dan Chijiwa, 2000: 29)

Sifat-sifat mekanis dari besi cor kelabu menunjukkan kecocokan sebagai material untuk bagian-bagian mesin. Sifat-sifat mekanis besi cor kelabu antara lain: kekuatan tarik, perpanjangan, kekerasan, kekuatan tekan, kekuatan bentur, tahanan aus, mampu mesin dan sebagainya.

a. Kekuatan tarik dan perpanjangan

Karbon memberikan pengaruh terbesar pada kekuatan tarik besi cor kelabu. Kadar karbon 2,5% mempunyai kekuatan tarik kurang lebih 350 N/mm² sedangkan pada kadar karbon 3,6% mempunyai kekuatan tarik 150 N/mm². Kandungan karbon yang tinggi menurunkan kekuatan

tariknya, silikon memberikan kecenderungan yang sama tetapi lebih lemah dari karbon. Besi cor kelabu menjadi lemah jika kandungan ferit silikon lebih dari 2% dan menjadi lebih getas jika prosentase silikon 2,2 sampai 2,5% atau lebih. Prosentase mangan kurang dari 1,2% menguatkan besi cor kelabu, fosfor dan belerang memberikan pengaruh kecil pada besi cor kelabu dalam daerah prosentase yang biasa. Perpanjangan besi cor dengan kadar karbon 2,5% – 3,6% pada umumnya kurang lebih 1%.

b. Kekerasan

Kekerasan besi cor kelabu berkisar antara 142 sampai 325 kekerasan *Vickers* dan sangat erat hubungannya dengan struktur, grafit kasar dalam matriks ferit menyebabkan kekerasan rendah dan grafit halus serta sedikit menyebabkan kekerasan yang lebih tinggi.

c. Mampu mesin dan tahan aus

Besi cor kelabu adalah material yang mempunyai sifat mampu mesin dan tahan aus. Kemampuan mesinnya yang sangat baik karena grafit bekerja sebagai pelumas. Kekerasan dan kekuatan tarik yang lebih rendah menyebabkan kemampuan mesin yang lebih baik. Dalam ketahanan ausnya struktur perlit lebih baik dari struktur ferit. Umumnya kekerasan yang lebih tinggi menyebabkan tahan aus yang lebih baik.

d. Kekuatan tekan

Kekuatan tekan dari besi cor kelabu adalah 3 sampai 5 kali lebih besar dari kekuatan tariknya, dan kebanyakan lebih besar dari kekuatan tekan baja.

9. Tegangan Sisa

Selama proses pengelasan terjadi distribusi suhu yang tidak merata, karena panas tersebut maka bagian yang dilas terjadi pengembangan termal, sedangkan bagian yang dingin tidak berubah, sehingga terbentuk penghalangan pengembangan yang mengakibatkan terjadinya peregangan. Peregangan ini akan menyebabkan terjadinya perubahan bentuk tetap, disamping perubahan bentuk tetap, yang dengan sendirinya terjadi regangan maka terjadi juga tegangan yang sifatnya tetap yang disebut tegangan sisa (Wiryo Sumarto, 2000: 135).

Secara sederhana tegangan sisa dapat diartikan tegangan yang bekerja pada suatu bahan jika gaya-gaya luar yang bekerja pada bahan tersebut dihilangkan. Tegangan sisa dan perubahan bentuk yang terjadi setelah pengelasan sangat mempengaruhi sifat mekanik sambungan struktur.

Selama pengelasan, daerah dibawah logam las akan mengalami pemuaian, sedangkan daerah dibawahnya mencoba menahannya. Bagian yang memuai itu akan mengalami tegangan tekan sedangkan daerahnya dibawahnya melawan dengan tegangan tarik. Sebaliknya, selama proses pendinginan, daerah dibawah logam las mengalami tegangan tarik dan daerah dibawahnya melawannya dengan tekanan. Tegangan-tegangan yang

terjadi pada pelat yang dilas ini terus ada hingga temperatur kamar. Tegangan yang demikian disebut tegangan sisa (Sonawan, 2004: 75). Tegangan sisa dapat menyebabkan terjadinya retak pada logam las maupun di HAZ, dengan membuat tegangan sisa serendah mungkin maka terjadinya retak dapat dihindari.

10. Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi adalah pengujian yang dilakukan untuk mengetahui kadar unsur-unsur yang terkandung dalam bahan. Proses pengujian komposisi berlangsung dengan pembakaran bahan menggunakan elektroda dimana terjadi suhu rekristalisasi, dari suhu rekristalisasi terjadi penguraian unsur yang masing-masing beda warnanya.

Penentuan kadar berdasarkan sensor perbedaan warna. Proses pembakaran elektroda ini tidak lebih dari tiga detik. Pengujian komposisi dapat dilakukan untuk menentukan jenis bahan yang digunakan dengan melihat prosentase unsur yang ada.

Pengaruh beberapa unsur yang terkandung pada material besi cor (Sumanto, 1996: 36):

a. Karbon

Karbon yang berada dalam struktur dapat berupa lapisan grafit atau besi karbida (sementit) yang rapuh. Biasanya apabila besi cor banyak mengandung sementit yang rapuh mempunyai sifat yang kurang baik dan untuk kebutuhan permesinan, kandungan karbon dibuat dalam jumlah kecil, dalam bentuk grafit. Apabila suatu besi cor banyak mengandung sementit maka besi cor ini disebut besi cor putih

dan bila besi cor banyak mengandung grafit akan disebut besi cor kelabu.

b. Silikon (Si)

Silikon menyebabkan sementit tidak stabil, sehingga memisah dan membentuk grafit, oleh karena itu kandungan silikon dalam jumlah besar menjadikan besi cor berwarna kelabu dan kandungan silikon yang rendah menjadikan besi cor berwarna putih.

c. Belerang (S)

Belerang menstabilkan sementit, menyebabkan besi tuang sungguh-sungguh rapuh, oleh karena itu selalu dijaga dalam jumlah yang sesedikit mungkin.

d. Mangan (Mn)

Mangan menguletkan dan menguatkan besi, sebab mangan banyak menetralkan belerang yang tidak dikehendaki dengan membentuk menjadi terak dan juga karena beberapa bagian mangan terurai dalam ferit.

e. Fosfor (P)

Fosfor membentuk campuran yang sangat rapuh dengan besi, oleh karena itu dijaga sesedikit mungkin untuk besi tuang dalam permesinan, seperti silikon, menaikkan keenceran, dapat memperbaiki kualitas tuangan yang dituangkan dengan penampang tipis.

f. Nikel (Ni)

Seperti silikon, menghasilkan grafit dan sementit sehingga menghasilkan besi cor kelabu. Nikel menghasilkan butiran yang halus

dan membantu untuk mencegah pembentukan butiran yang kasar pada bagian tebal, yang didinginkan perlahan-lahan. Ni juga menguletkan bagian tipis yang mudah rusak.

g. *Chromium* (Cr)

Chromium menstabilkan *carbide* dan membentuk *chromium carbide*, yang lebih keras daripada sementit biasa. Oleh karenanya dipergunakan dalam besi berdaya tahan tinggi.

h. *Molybdenum* (Mo)

Molybdenum menaikkan kekerasan yang tebal dan juga memperbaiki keuletan.

i. *Vanadium* (V)

Vanadium meningkatkan kekuatan dan kekerasan, tetapi yang lebih penting meningkatkan daya tahan panas dari besi cor, dengan menstabilkan sementit sehingga tidak memisah pada pemanasan.

11. Pengujian Kekerasan *Vickers*

Pengujian kekerasan adalah salah satu pengujian dari sekian banyak pengujian yang dipakai, karena dapat dilaksanakan benda uji yang relatif kecil tanpa kesukaran mengenai spesifikasi benda uji. Pengujian yang banyak dipakai adalah dengan cara menekankan penekanan tertentu kepada benda uji dengan beban tertentu dan mengukur bekas hasil penekanan yang terbentuk di atasnya (Surdia dan Saito, 1985: 31).

Salah satu pengujian yang standar untuk uji kekerasan adalah uji kekerasan *Vickers*. Keuntungan pengujian kekerasan *Vickers* adalah tidak hanya untuk bahan lunak akan tetapi juga untuk bahan keras, dengan bekas tekanan yang kecil sehingga merusak bahan percobaan lebih sedikit, pengukuran kekerasan lebih teliti, kekerasan benda kerja yang sangat tipis atau lapisan permukaan yang tipis dapat diukur dengan memilih gaya yang relatif kecil. Pada pengujian cara ini mula-mula permukaan logam yang diuji ditekan dengan *indenter* berbentuk piramida intan yang dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besar sudut antara permukaan-permukaan piramida yang berhadapan adalah sebesar 136°

Angka kekerasan piramida intan atau angka kekerasan *vickers* (VHN atau VPN). Kekerasan *vickers* merupakan angka kekuatan bahan uji terhadap pembebanan pada tiap luas penampang bidang yang menerima pembebanan. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$VHN = \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d^2} = \frac{1,854 \cdot P}{d^2} \dots\dots\dots (1)$$

dimana :

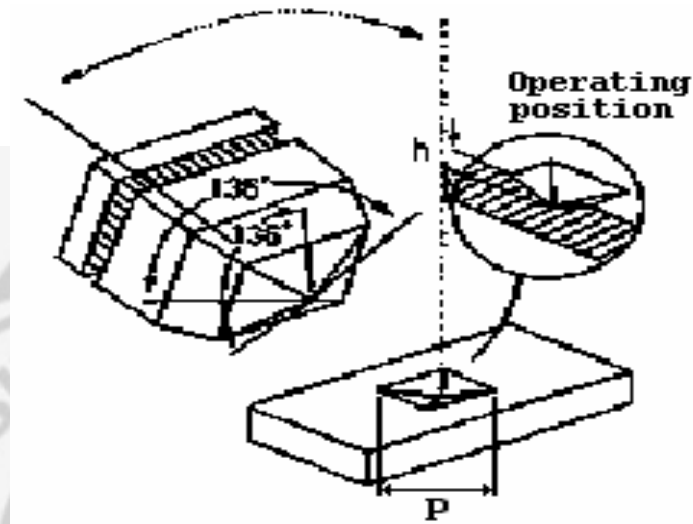
P = Beban yang diterapkan (kg)

α = Sudut antara permukaan intan yang berlawanan (136°)

d = Panjang diagonal rata-rata (mm)

Uji kekerasan *Vickers* banyak dipakai dalam kegiatan riset karena cara tersebut memberikan hasil berupa skala kekerasan yang kontinyu, untuk beban yang digunakan dalam penekanan antara 1 kg sampai 120 kg.

Gambar berikut adalah contoh hasil penekanan indentor piramida intan.



Gambar 6. *The Vickers diamond pyramid indenter*
 (Encarta Microsoft 2000” *Hardening Testing Machine*”,
<http://encarta.msn.Com/,US>)

12. Pengujian Tarik

Proses pengujian tarik mempunyai tujuan utama untuk mengetahui kekuatan tarik bahan uji. Bahan uji adalah bahan yang akan digunakan sebagai konstruksi, agar siap menerima pembebanan dalam bentuk tarikan.

Pembebanan tarik adalah pembebanan yang diberikan pada benda dengan memberikan gaya yang berlawanan pada benda dengan arah menjauh dari titik tengah atau dengan memberikan gaya tarik pada salah satu ujung benda dan ujung benda lain dijepit.

Hasil yang diperoleh dari proses pengujian tarik adalah grafik tegangan-regangan, parameter kekuatan dan ketelitian material pengujian dalam prosen perpanjangan, kontraksi atau reduksi penampang patah, dan bentuk permukaan patah.

Sifat-sifat penting yang terjadi dalam pengujian tarik antara lain yaitu:

- a. Batas sebanding, adalah tegangan tertinggi untuk daerah hubungan sebanding antara tegangan dan regangan yang persamaannya adalah berlaku hukum Hooke.
- b. Batas elastis, adalah tegangan terbesar yang masih dapat ditahan oleh bahan tanpa terjadi tegangan sisa permanen yang terukur pada saat beban ditiadakan.
- c. Tegangan luluh, adalah tegangan dimana bahan berubah bentuk tanpa beban berubah. Tegangan ditunjukkan oleh bahan yang ulet. Nilai tegangan luluh atau terganggan *yield* amat penting dalam perencanaan bagian-bagian mesin.
- d. Tegangan maksimum, adalah beban maksimum dibagi dengan beban awal benda uji.
- e. Keliatan atau keuletan, adalah suatu besaran kualitatif, yaitu sifat subyektif dari bahan. Ukuran keliatan dapat diperoleh dengan mencari elongansi benda dan deformasi penampang benda uji.

Menurut Wiryosumarto (2000: 181) tegangan dapat diperoleh dengan membagi beban dengan luas penampang mula-mula benda uji dan sifat-sifat tarikannya dapat dihitung dengan persamaan-persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \dots\dots\dots (2)$$

dimana :

σ = Tegangan tarik (kg/mm²)

F = Beban tarik (kg)

A₀ = Luas penampang awal (mm²)

Prosentase pertambahan panjang (regangan) diartikan sebagai perpanjangan tiap satuan panjang, yang diperoleh dengan membagi perpanjangan panjang ukur (ΔL) dengan panjang ukur mula-mula benda uji.

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

dimana :

e = Regangan (%)

L₁ = Panjang akhir (mm)

L₀ = Panjang mula (mm)

Pembebanan tarik dilakukan secara terus-menerus dengan menambahkan beban sehingga akan mengakibatkan perubahan bentuk pada benda berupa pertambahan panjang dan pengecilan serta bila diteruskan akan mengakibatkan kepatahan pada bahan.

Pengujian tarik dilaksanakan dengan mesin pengujian tarik selama pengujian akan mencatat setiap kondisi bahan sampai terjadinya tegangan ultimate (σ_u), juga sekaligus akan menggambarkan diagram tarik dari benda uji, adapun L_1 akan diketahui setelah benda uji patah dengan menggunakan pengukuran secara manual. Tegangan ultimate adalah beban tertinggi yang bekerja pada luas penampang semula.

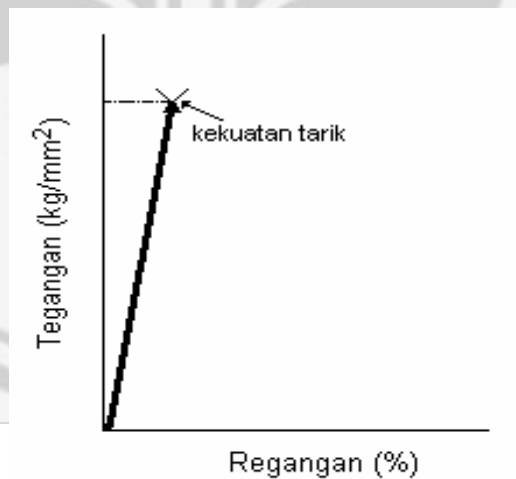
$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_o} \dots\dots\dots (5)$$

dimana :

σ_u = Tegangan *Ultimate* (kg/mm²)

F_u = Beban tertinggi yang bekerja (kg)

A_o = Luas penampang awal (mm²)

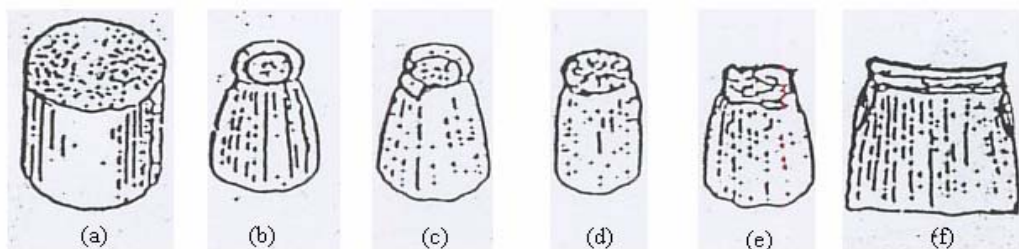


Gambar 7. Diagram tegangan-regangan bahan tidak ulet
(Van Vlack, 1992: 8)

13. Bentuk Permukaan Patah Pengujian Tarik

Perpatahan tarik dapat diklasifikasikan menurut bentuk tekstur dan warna. Jenis-jenis perpatahan mengenai bentuknya adalah simetri, kerucut mangkok (*cup cone*), rata, dan tidak teratur. Berbagai macam deskripsi tekstur adalah *silky* (seperti sutera), butir halus, butir kasar atau *granulator*, berserat (*fibrous*), *kristalin*, seperti kaca (*glass*) dan pudar.

Pemeriksaan permukaan patah dapat memberikan petunjuk nilai kekuatan dan keuletan material uji. Pembebanan tidak simetri akan menyebabkan jenis perpatahan tidak simetris. Ketidaksimetrisan ini mungkin disebabkan oleh ketidak homogenan material atau macam-macam cacat seperti: segregasi, lubang udara, inklusi benda-benda asing seperti terak.



- Keterangan :
- (a) *Granular*
 - (b) *Cup Cone Silky*
 - (c) *Cup Cone Silky*
 - (d) *Lisature*
 - (e) *Fibrous*
 - (f) *Cup Cone Silky (not simetris)*

Gambar 8. Bentuk permukaan patah

(Dieter, 1996: 23)

G. KERANGKA BERFIKIR

Penggunaan bahan logam terutama besi cor sudah digunakan dalam lingkup yang luas. Luasnya penggunaan besi cor dikarenakan kelebihan-kelebihan yang ada pada besi cor, selain mudah didapat dan murah, besi cor juga mempunyai kemampuan cor yang sangat baik untuk bentuk-bentuk yang rumit. Beberapa contoh penggunaan besi cor yaitu blok silinder, tutup silinder, rumah engkol, tromol rem.

Proses penyambungan dalam rangka perbaikan komponen besi cor banyak mempergunakan pengelasan terutama las busur listrik terlindung (SMAW), tetapi akibat pemanasan yang tinggi yang ditimbulkan dari energi panas las busur listrik timbul berbagai macam permasalahan. Permasalahan-permasalahan tersebut antara lain:

1. Pada saat terjadi pembekuan, akibat gradien temperatur yang besar menghasilkan regangan dan tegangan termal pada daerah tertentu. Regangan dan tegangan termal ini pada akhirnya dapat memicu pembentukan retak baik di logam las maupun di *HAZ*.
2. Perubahan fasa padat ke cair dan sebaliknya pada besi cor berlangsung dengan sangat cepat. Akibatnya, gas-gas yang ikut terlarut dalam kubangan logam las tidak cukup waktu untuk keluar dari daerah itu dan akhirnya terjebak, dengan demikian kadang-kadang setelah pengelasan, logam las banyak mengandung porositas.
3. Bila terjadi pendinginan terlalu cepat pada waktu pembekuan, akan terbentuk besi cor putih yang keras, getas dan mudah patah.

Permasalahan-permasalahan yang timbul pada proses pengelasan besi cor khususnya besi cor kelabu dapat menyebabkan adanya cacat las yang dapat menurunkan sifat mekanis dari besi cor kelabu tersebut. Untuk mengatasi masalah-masalah tersebut, di dalam proses pengelasan besi cor kelabu perlu adanya perlakuan panas.

Salah satu perlakuan panas tersebut adalah *post weld heat treatment annealing* yang dapat dimanfaatkan untuk mengurangi permasalahan yang timbul pada pengelasan besi cor kelabu. Adanya retak las akibat tegangan sisa dapat dihindari dengan pemberian *post weld heat treatment annealing*. Permasalahan ikut larutnya gas-gas dalam kubangan dapat teratasi dengan penggunaan *post weld heat treatment annealing*, dimana adanya pemberian *post weld heat treatment annealing* sama saja dengan memberikan waktu kepada logam las untuk mengeluarkan sebagian besar gas-gas yang ikut larut.

Penggunaan *post weld heat treatment annealing* pada proses pengelasan besi cor kelabu diduga akan menghasilkan sambungan besi cor yang memiliki kekuatan mekanis yang lebih baik, bila dibandingkan dengan tanpa pemberian *post weld heat treatment annealing*. Selain itu variasi suhu *post weld heat treatment annealing* diduga juga akan menghasilkan sifat mekanis yang berbeda-beda pula, sehingga perlu dicari suhu *post weld heat treatment annealing* yang paling efektif untuk pengelasan besi cor kelabu, agar didapatkan hasil sambungan yang memiliki kekuatan mekanis yang terbaik.

H. HIPOTESIS

Berdasarkan landasan teori dan kerangka berfikir di atas, maka hipotesis yang diajukan dalam penelitian ini adalah:

Kekuatan tarik akan meningkat apabila pengelasan besi cor kelabu diikuti dengan *post weld heat treatment annealing*.



BAB III

METODE PENELITIAN

Metode penelitian merupakan suatu cara yang digunakan dalam penelitian, sehingga pelaksanaan dan hasilnya dapat dipertanggungjawabkan secara kajian ilmiah. Penelitian yang dilaksanakan ini menggunakan metode eksperimen yakni metode untuk mencari hubungan sebab akibat antara faktor-faktor lain yang sengaja ditimbulkan oleh penelitian, dengan mengurangi atau menambah faktor-faktor lain yang bisa mengganggu.

Tahapan-tahapan kerja yang dilakukan untuk melakukan penelitian sehingga penelitian lebih terarah dalam kegiatannya, maka perlu dibagi dalam beberapa tahapan yaitu pelaksanaan eksperimen, diagram alir penelitian dan lembar pengamatan.

A. Bahan Spesimen Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis pelat besi cor kelabu (*grey cast iron*) dengan ketebalan pelat 13 mm, lebar pelat 100 mm dan panjang 200 mm.

B. Persiapan alat penelitian

Alat-alat yang dipersiapkan dalam pelaksanaan penelitian ini meliputi:

1. Mesin gergaji.
2. Mesin frais dan perlengkapannya
3. Kikir
4. Oven pemanas elektroda

5. Mesin las listrik AC

Spesifikasi Merk : *Cemont*
Buatan : Australia
Type : Sv 403

6. Peralatan pengelasan

7. Oven pemanas logam

Spesifikasi Merk : *Hofmann*
Buatan : Austria
Suhu maks : 1200⁰C

8. Mesin uji kekerasan *Vickers*

Spesifikasi Merk : KARL FRANK GMBH (Weinheim - Birkenau)
Type : 38505

9. Alat foto struktur mikro

Spesifikasi Merk : *Olympus*
Buatan : Jepang
Type : PM-10AD

10. Alat foto struktur makro

Spesifikasi Merk : *Olympus*
Buatan : Jepang
Type : S21145TR

11. Mesin uji tarik *hydraulic servo pulser*

Spesifikasi Merk : *Shimadzu*
Buatan : Jepang
Kapasitas : ± 20 ton
Type : EHF-EB20

C. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Agustus–September 2006.

Adapun tempat pelaksanaan penelitian dilakukan di:

1. Pengujian komposisi dilakukan di PT Itokoh Ceperindo Klaten.
2. Pembuatan kampuh V dilakukan di Bengkel Tugirin, Semarang.
3. Proses pengelasan dan pengovenan dilakukan di BLKI Semarang.
4. Pembuatan bentuk spesimen uji tarik dan spesimen kekerasan, dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin S1 Universitas Gadjah Mada.
5. Pengujian tarik dan pengujian kekerasan dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin S1 Universitas Gadjah Mada.
6. Pengujian foto mikro dan foto makro dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin D3 Universitas Gadjah Mada.

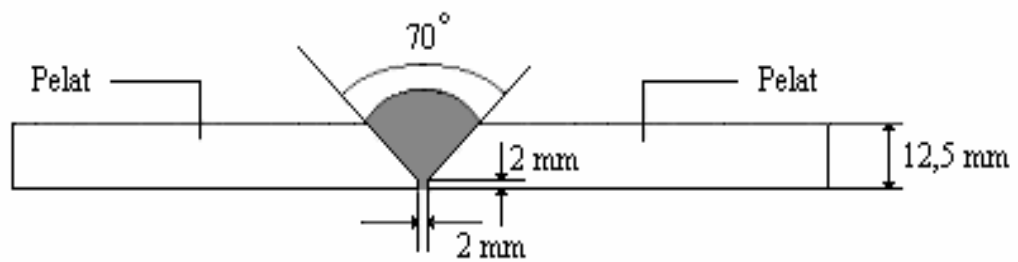
D. Cara Pembuatan Spesimen

Pembuatan spesimen dalam penelitian ini melalui beberapa tahap dan tempat, hal ini dilakukan untuk mendapat hasil benda uji yang presisi dan hasil penelitian yang optimal. Langkah-langkah dalam penelitian ini adalah:

1. Pembuatan Kampuh V Terbuka

Pembuatan kampuh V terbuka dengan menggunakan mesin skrap.

Bahan dengan ukuran panjang 200 mm salah satu sisinya di skrap dengan kemiringan 35° , sehingga permukaan berbentuk sudut 35° yang halus. Apabila dua bahan yang sudah diskrap 35° digabungkan maka akan terbentuk kampuh V terbuka dengan sudut 70° .



Gambar 9. Gambar kampung V terbuka

2. Proses pengelasan

Proses pengelasan dilakukan apabila material sudah dibentuk kampung V terbuka dengan sudut 70° , langkah-langkah yang dilakukan dalam proses pengelasan adalah:

- a. Mempersiapkan mesin las AC.
- b. Mempersiapkan benda kerja yang akan dilas pada meja las.
- c. Posisi pengelasan dengan menggunakan posisi pengelasan *down hand* (bawah tangan) atau mendatar.
- d. Mempersiapkan elektroda yang sesuai dengan logam yang akan dilas, dalam penelitian ini dipilih elektroda CIN 1 dengan diameter elektroda 3,2 mm, panjang elektroda 350 mm. Elektroda sebelum digunakan di oven selama 15 menit dengan suhu 200° , hal ini bertujuan untuk memanaskan elektroda, karena elektroda yang panas akan memudahkan penyalaan.
- e. Menyetel besar arus sesuai dengan jenis elektroda yang digunakan, untuk penggunaan elektroda CIN 1 disarankan menggunakan arus sebesar 90 – 110 A.

- f. Memasang elektroda pada stang penjepit.
- g. Menghidupkan mesin las dan memulai penyalaan elektroda dengan menggosokkan pada benda kerja.
- h. Mulai melakukan pengelasan dengan gerakan elektroda berbentuk spiral untuk kelima benda kerja.

3. Melakukan proses *post weld heat treatment annealing*.

Benda kerja setelah dilakukan proses pengelasan maka dilanjutkan dengan pemanasan benda kerja didalam oven pemanas dengan *holding time* selama 1 jam dan laju pemanasan sebesar $90^{\circ}\text{C}/\text{jam}$, dilanjutkan dengan pendinginan perlahan didalam oven pemanas hingga mencapai suhu kamar.



Gambar 10. Oven pemanas logam merk *hofmann*

Terdapat empat variasi suhu dalam proses pemanasan:

- a. Benda kerja pertama dipanaskan didalam oven pemanas dengan suhu 150°C .
- b. Benda kerja kedua dipanaskan didalam oven pemanas dengan suhu 300°C .
- c. Benda kerja ketiga dipanaskan didalam oven pemanas dengan suhu 450°C .
- d. Benda kerja keempat dipanaskan didalam oven pemanas dengan suhu 600°C .

4. Pembuatan spesimen uji tarik sesuai standar ASTM E8-1996

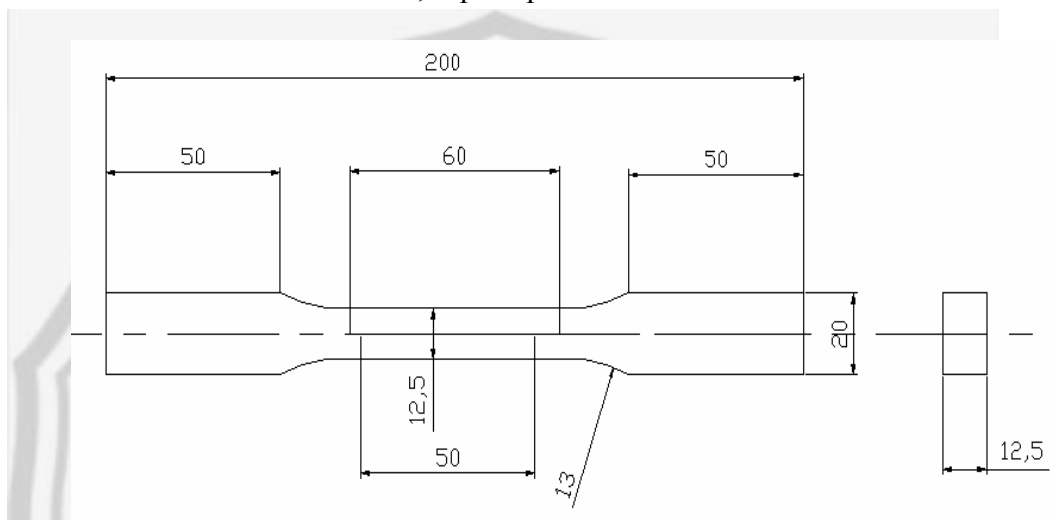
Setelah proses *post weld heat treatment annealing* selesai maka dilanjutkan pembuatan spesimen sesuai ASTM E8-1996 atau sesuai Gambar 11, yang nantinya akan di uji tarik, langkah-langkah pembuatannya sebagai berikut:

- a. Meratakan alur hasil pengelasan dengan mesin frais.
- b. Bahan dipotong-potong dengan ukuran panjang 200 mm dan lebar 22 mm.
- c. Membuat gambar pada kertas yang agak tebal sesuai dengan ukuran standar ASTM E8, yang nantinya untuk mal.
- d. Gambar atau mal ditempel pada bahan selanjutnya dilakukan pengefraisan sesuai dengan bentuk gambar dengan menggunakan pisau frais jari diameter 60 mm.

e. Bahan yang sudah terbentuk tersebut dirapikan permukaannya dengan kikir yang halus.

5. Dimensi spesimen

Spesimen benda uji tarik dalam penelitian ini sesuai dengan standar ASTM E8-1996, seperti pada Gambar dibawah ini:



Gambar 11. Bentuk spesimen benda uji tarik
(Derucher, 1981: 277)

E. Pelaksanaan Eksperimen

Terdapat enam kelompok dalam penelitian ini yaitu:

1. Kelompok pertama spesimen *raw material*.
2. Kelompok kedua spesimen pengelasan tanpa perlakuan panas.
3. Kelompok ketiga spesimen pengelasan dengan perlakuan *post weld heat treatment annealing* dengan suhu 150°C .
4. Kelompok keempat spesimen pengelasan dengan perlakuan *post weld heat treatment annealing* dengan suhu 300°C .

5. Kelompok kelima spesimen pengelasan dengan perlakuan *post weld heat treatment annealing* dengan suhu 450⁰C.
6. Kelompok keenam spesimen pengelasan dengan perlakuan *post weld heat treatment annealing* dengan suhu 600⁰C.

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini untuk tiap variasi masing empat spesimen, tiga buah untuk spesimen uji tarik dan satu buah untuk spesimen foto mikro struktur dan uji kekerasan *Vickers*.

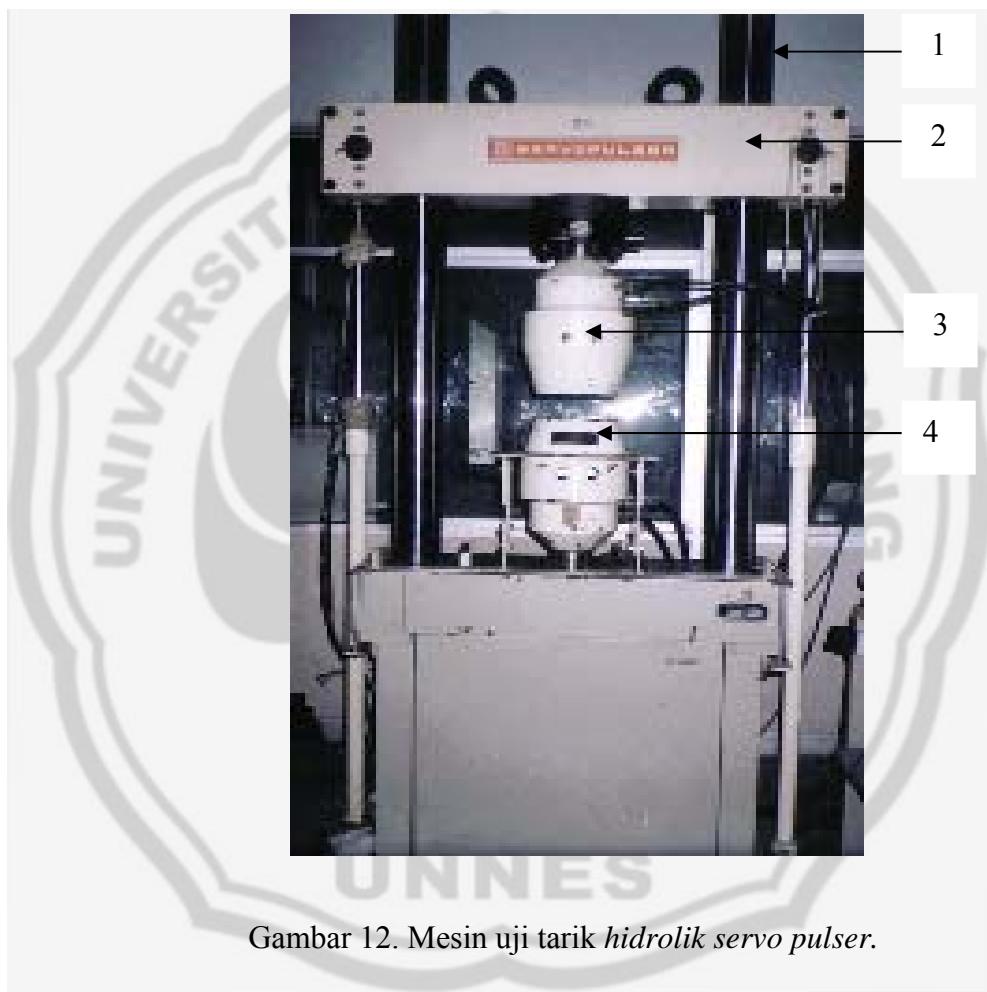
Adapun langkah-langkah pelaksanaan eksperimen meliputi uji tarik, uji foto struktur mikro, uji foto makro dan uji kekerasan. Adapun langkah-langkah tersebut adalah:

1. Pengujian Tarik

Prosedur dan pembacaan hasil pada pengujian tarik adalah sebagai berikut. Benda uji dijepit pada ragum uji tarik, setelah sebelumnya diketahui luas penampangnya dan panjang awalnya.

- a. Menyiapkan kertas *millimeter blok* dan letakkan kertas tersebut pada *plotter*.
- b. Kemudian benda uji dikenai beban 10 ton dengan menggunakan tenaga hidrolik hingga benda putus pada beban maksimal yang dapat di tahan benda tersebut
- c. Benda uji yang sudah putus lalu diukur berapa besar penampang dan panjang benda uji setelah putus.
- d. Gaya atau beban yang maksimum ditandai dengan putusya benda uji terdapat pada layar digital dan dicatat sebagai data.

- e. Hasil diagram terdapat pada kertas *millimeter blok* yang ada pada meja *plotter*.
- f. Hal terakhir yaitu menghitung kekuatan tarik dan perpanjangan dari data yang telah didapat dengan menggunakan persamaan yang ada.



Gambar 12. Mesin uji tarik *hidrolik servo pulser*.

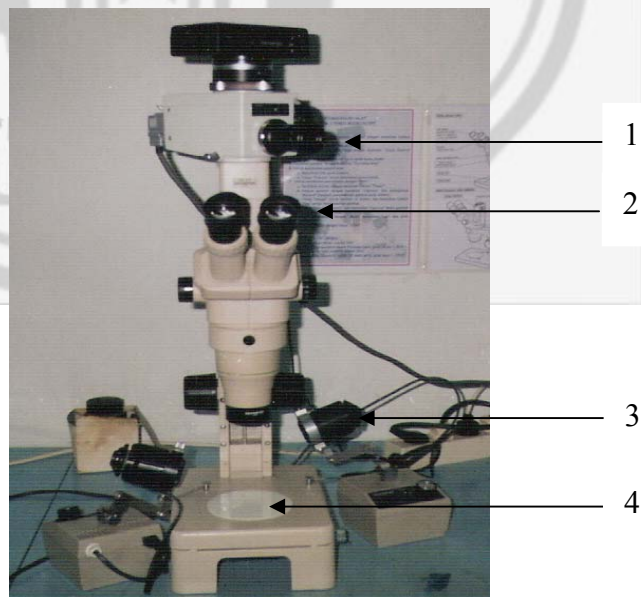
Keterangan gambar:

- | | |
|--------------------|----------------|
| 1. Batang hidrolik | 3. Ragum atas |
| 2. Dudukan ragum | 4. Ragum bawah |

2. Pengujian foto makro

Hasil patahan dari uji tarik selanjutnya kita foto makro, hal ini bertujuan untuk menganalisa bentuk patahan dari pengujian tersebut, adapun langkah-langkah dalam foto makro adalah sebagai berikut:

- a. Meletakkan spesimen pada landasan mikroskop optik, mengaktifkan mesin, mendekatkan lensa pembesar untuk melihat permukaan spesimen.
- b. Pengambilan foto struktur makro dengan perbesaran 9x untuk hasil patahan uji tarik. Melihat struktur makro apabila kurang jelas atau kabur, lensa difokuskan agar terlihat dengan jelas.
- c. Sebelum gambar diambil, film dipasang pada kamera yang telah disetel sedemikian rupa dengan menggunakan film asa 200. Usahakan pada saat pengambilan foto tidak ada hal apapun yang membuat mikroskop optik bergerak, karena apabila mikroskop optik bergerak akan mempengaruhi hasilnya



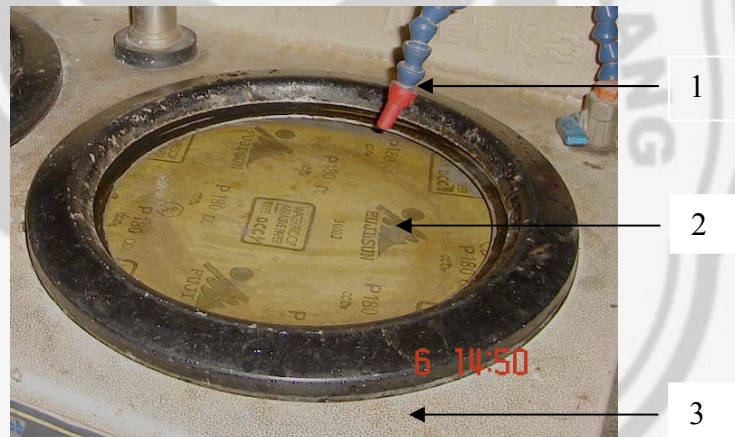
Gambar 13. Alat foto makro.

Keterangan gambar:

1. Lensa perbesaran
2. Lensa pelihat
3. Lampu
4. Meja benda kerja

3. Pengujian foto struktur mikro

Sebelum melakukan pengujian, benda uji yang berukuran 60 mm x 15 mm x 12,5 mm, perlu di poles dahulu. Pemolesan dengan menggunakan ampelas *grade* 200 sampai 1500. Setelah spesimen diampelas dengan ukuran 1500 sampai halus kemudian diberi *autosol* agar spesimen lebih halus dan mengkilap.



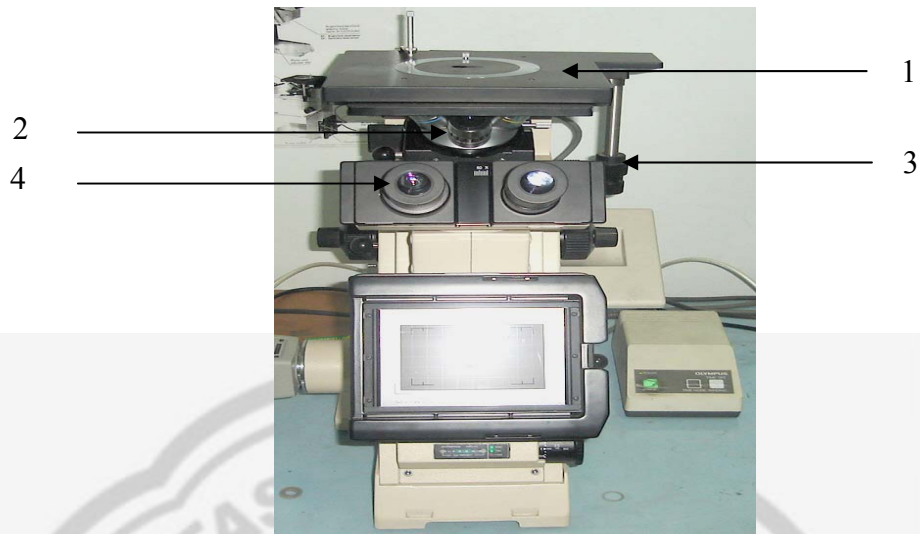
Gambar 14. Alat pemoles spesimen.

Keterangan gambar:

1. Pipa air
2. Ampelas
3. Meja mesin

Spesimen yang telah dipoles dilanjutkan dengan pengujian foto struktur mikro, adapun langkah-langkahnya sebagai berikut:

- a. Spesimen dibersihkan menggunakan kain, kemudian dioleskan cairan *etza* pada permukaan yang dikehendaki. Cairan *etza* disini yang digunakan adalah nital 2,5%, setelah selesai dioles dengan cairan *etza* kemudian dibilas dengan alkohol.
- b. Meletakkan spesimen pada landasan mikroskop optik, aktifkan mesin, dekatkan lensa pembesar untuk melihat permukaan spesimen. Pengambilan foto struktur mikro dengan perbesaran 500X. Melihat struktur mikro apabila kurang jelas atau kabur, lensa di fokuskan agar terlihat dengan jelas.
- c. Sebelum mengambil gambar, film dipasang pada kamera yang telah disetel sedemikian rupa dengan menggunakan film asa 200. Usahakan pada saat pengambilan foto tidak ada hal apapun yang membuat mikroskop optik bergerak, karena apabila mikroskop optik bergerak akan mempengaruhi hasilnya.



Gambar 15. Mikroskop optik.

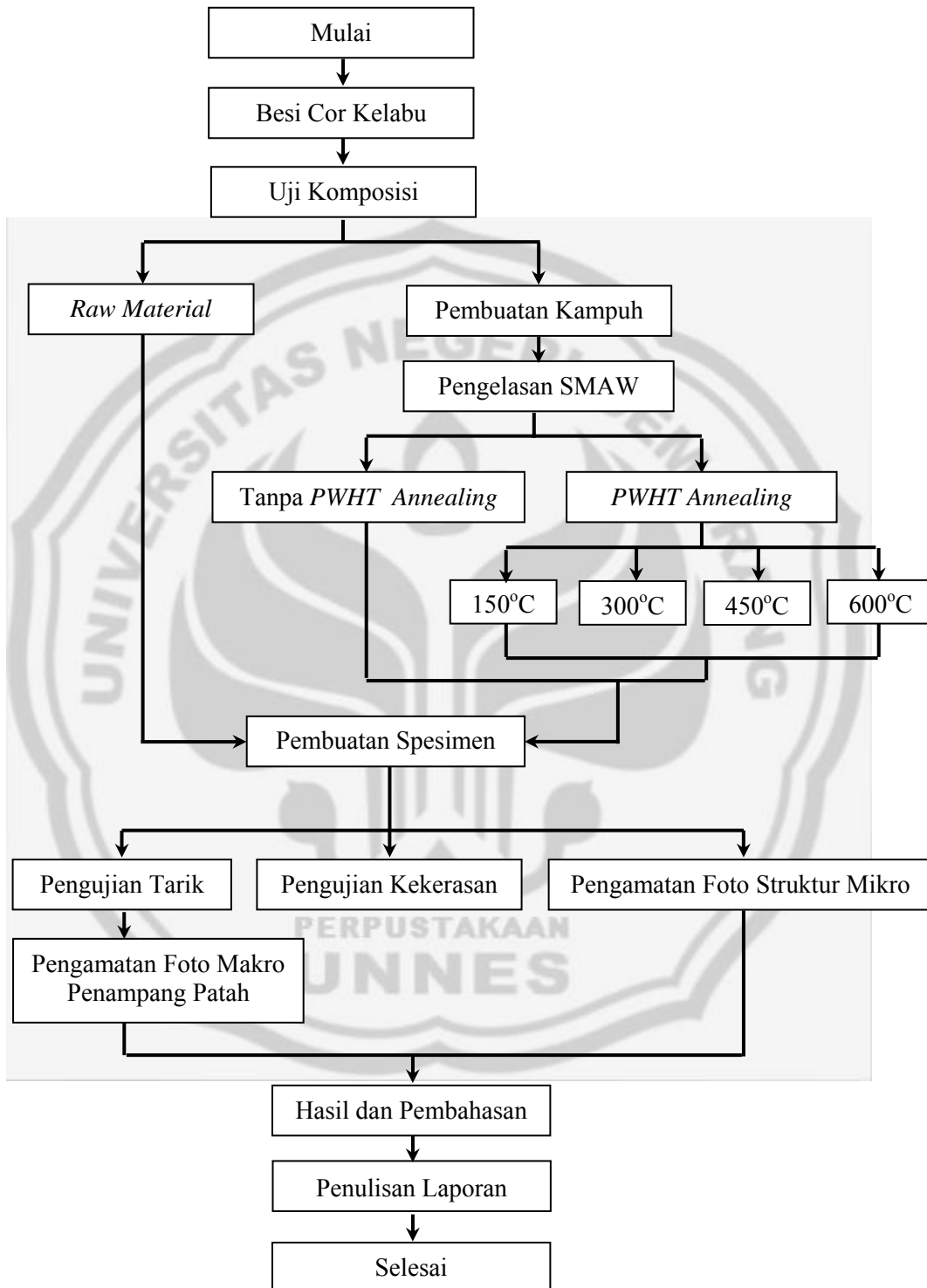
Keterangan gambar:

- | | |
|------------------------------|-----------------------------------|
| 1. Meja spesimen | 3. Lengan pengatur kedudukan meja |
| 2. Lensa pengatur perbesaran | 4. Lensa untuk melihat |
4. Pengujian kekerasan *Vickers*

Prosedur penekanan dan pembacaan hasil pengujian kekerasan *Vickers* adalah sebagai berikut:

- a. Bahan diletakan diatas landasan, dinaikan hingga menyentuh kerucut dimana jarum jam bergerak.
- b. Menempatkan fokus pembebanan pada daerah yang telah ditentukan.
- c. Benda uji diberi beban 30 kg hingga jarum berputar berlawanan dengan arah jarum jam, bila jarum berhenti beban utama sudah penuh, kemudian tombol berwarna merah ditekan.
- d. Setelah jarum jam berhenti ditunggu selama kurang lebih 5 detik beban utama dihilangkan hingga jarum berputar searah jarum jam
- e. Hasil kekerasannya dapat dibaca dengan melihat injakan atau penekanan piramid dengan menggunakan mikroskop logam.

F. Diagram Alir Penelitian



Gambar 16. Diagram alir penelitian

G. Analisis data.

Data yang diperoleh selanjutnya dianalisa dengan cara mengolah data yang terkumpul. Data mentah tersebut kemudian dimasukkan ke dalam persamaan-persamaan yang ada sehingga diperoleh data yang kuantitatif, yaitu data yang berupa angka-angka.

Analisis data uji tarik, uji kekerasan *Vickers* material besi cor kelabu akibat variasi suhu *post weld heat treatment annealing* merupakan deskripsi perbandingan antara data *raw materials*, pengelasan tanpa perlakuan (*non PWHT*) dan pengelasan dengan variasi suhu *post weld heat treatment annealing* 150⁰C, 300⁰C, 450⁰C dan 600⁰C. Penyajian data selanjutnya menggunakan diagram batang dan diagram garis.



BAB IV

B. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

HASIL PENELITIAN

1. Hasil Uji Komposisi Material

Hasil uji komposisi material pada penelitian ini ditabulasikan ke dalam Tabel 3 berikut:

Tabel 3. Komposisi kimia material.

C. U n s u r	Berat (%)	Unsur	Berat (%)
<i>Fe</i>	92,70	Mo	0,016
C	3,504	Cu	0,124
Si	2,818	V	0,015
Mn	0,424	Ti	0,017
P	0,094	Nb	< 0,004
S	0,070	Al	0,014
Ni	0,046	W	0,014
Cr	0,087		

Menurut Beumer (1980: 104), besi cor pada umumnya memiliki kadar karbon 2,5 sampai 3,6%. Peningkatan kadar karbon diatas 1%, akan membuat kekuatan tarik material logam menurun, sedangkan besi cor dengan kadar karbon 2,5 sampai 3,6%, ini jauh lebih tinggi dari 1%, jadi pada umumnya mempunyai kekuatan tarik yang rendah. Pada besi cor kelabu kandungan silisium berkisar 1,5 sampai 5,5% dan kadar mangan

yang rendah. Hal ini berakibat pada peningkatan pembentukan karbon bebas.

2. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik

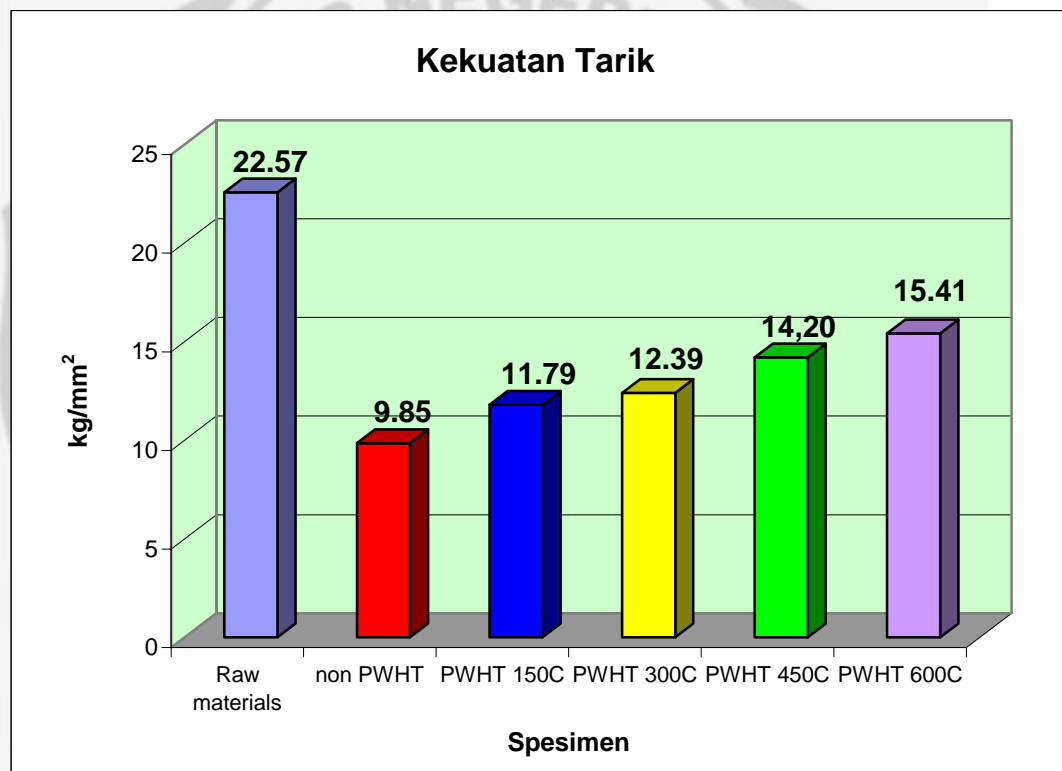
Data-data hasil pengujian tarik pada tiga kelompok pengujian yaitu spesimen *raw material*, spesimen pengelasan *non* PWHT dan spesimen pengelasan dengan PWHT kemudian dimasukkan dalam persamaan yang ada sehingga diperoleh data-data seperti: kekuatan tarik (σ_u), dan perpanjangan penampang (e). Data-data tersebut selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 4 dan perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

Tabel 4. Data hasil pengujian tarik

Spesimen	Kekuatan tarik σ_u (kg/mm ²)	Perpanjangan		
		l_0 (mm)	l_1 (mm)	e (%)
Raw material	21,30	50,19	50,23	0,080
	23,09	50,02	50,04	0,040
	23,32	49,80	49,81	0,020
Rata-rata	22,57	50,00	50,03	0,047
Pengelasan <i>non</i> PWHT	6,33	50,20	50,26	0,120
	11,81	49,60	49,75	0,302
	11,41	50,30	50,35	0,099
Rata-rata	9,85	49,03	50,12	0,174
PWHT 150 ⁰ C	13,20	50,04	50,14	0,200
	12,61	50,05	50,17	0,240
	9,57	50,32	50,46	0,278
Rata-rata	11,79	50,14	50,26	0,239
PWHT 300 ⁰ C	12,07	50,43	50,59	0,317
	13,07	49,64	49,82	0,363
	12,04	50,74	50,88	0,276
Rata-rata	12,39	50,27	50,68	0,319
PWHT 450 ⁰ C	16,32	50,49	50,66	0,337
	10,02	50,33	50,53	0,397
	16,25	50,08	50,31	0,459
Rata-rata	14,20	50,30	50,50	0,398
PWHT 600 ⁰ C	13,02	49,50	49,73	0,465

	16,25	50,24	50,49	0,498
	16,95	50,45	50,69	0,476
Rata-rata	15,41	50,06	50,30	0,480

Adapun data-data, Tabel 4 dari eksperimen tersebut dimasukkan dalam diagram batang untuk mempermudah analisisnya, diagram-diagram tersebut dapat dilihat di bawah ini:

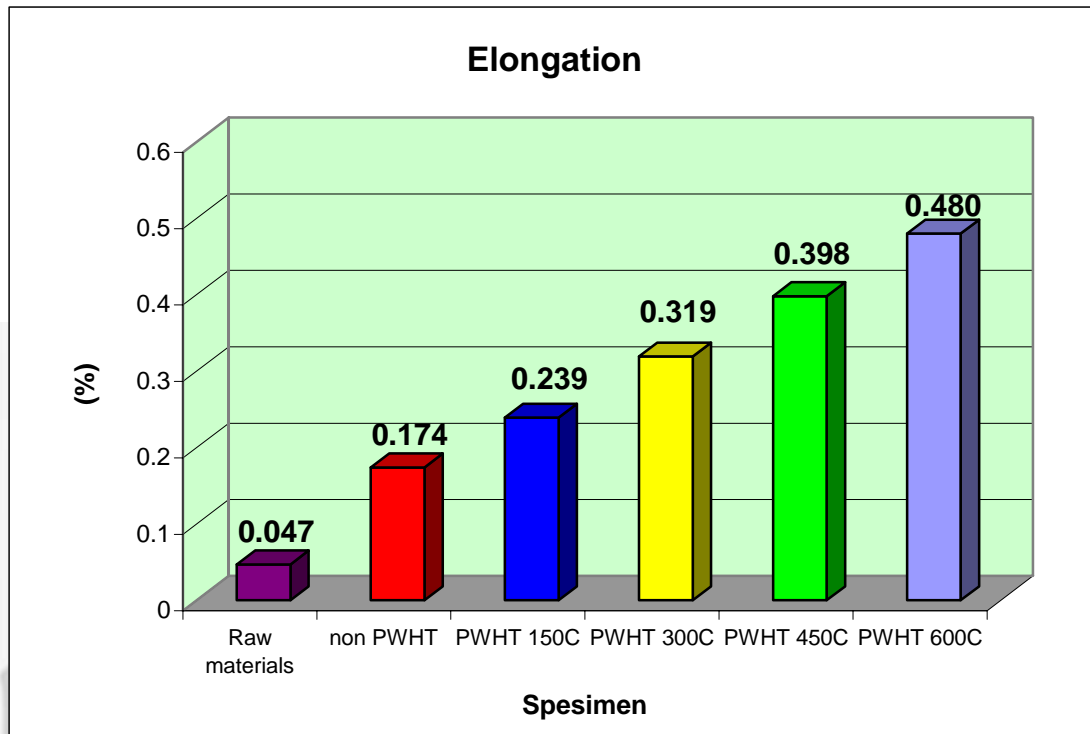


Gambar 17. Grafik kekuatan tarik maksimum (σ_u)

Data-data dari hasil eksperimen pengujian kekuatan tarik pada Gambar 17. menunjukkan nilai kekuatan tarik kelompok *raw material*, kelompok pengelasan *non PWHT*, kelompok pengelasan dengan perlakuan PWHT 150⁰C, perlakuan PWHT 300⁰C, perlakuan PWHT 450⁰C dan perlakuan PWHT 600⁰C.

Kelompok *raw material* mempunyai kekuatan tarik tertinggi yaitu sebesar 22,57 kg/mm². Kekuatan tarik kelompok pengelasan *non* PWHT mengalami penurunan terbesar terhadap kekuatan tarik kelompok *raw material* yaitu sebesar 56,36%, demikian juga dengan kekuatan tarik kelompok pengelasan dengan perlakuan PWHT juga mengalami penurunan terhadap kekuatan tarik kelompok *raw material*, yaitu untuk kelompok perlakuan PWHT 150⁰C mengalami penurunan sebesar 47,76%, untuk kelompok perlakuan PWHT 300⁰C mengalami penurunan sebesar 45,11%, untuk kelompok perlakuan PWHT 450⁰C mengalami penurunan sebesar 37,08% dan untuk kelompok perlakuan PWHT 600⁰C mengalami penurunan sebesar 31,72%.

Kelompok pengelasan dengan perlakuan PWHT 600⁰C mengalami kenaikan kekuatan tarik terhadap kelompok pengelasan yang lain, yaitu terhadap kelompok pengelasan *non* PWHT sebesar 36,08%, terhadap kelompok perlakuan PWHT 150⁰C sebesar 23,49%, terhadap kelompok perlakuan PWHT 300⁰C sebesar 19,60% dan terhadap kelompok perlakuan PWHT 450⁰C sebesar 7,85%.



Gambar 18. Grafik pertambahan panjang (e)

Data dari hasil pengujian tarik didapatkan nilai pertambahan panjang, pada kelompok *raw material* sebesar 0,047%. Pertambahan panjang yang terjadi pada kelompok pengelasan, semua mengalami kenaikan dibandingkan dengan *raw material*. Kelompok pengelasan *non PWHT* mengalami kenaikan sebesar 270,2% terhadap kelompok *raw material*, untuk kelompok perlakuan PWHT 150⁰C mengalami kenaikan sebesar 408,5%, demikian juga untuk kelompok perlakuan PWHT 300⁰C, kelompok perlakuan PWHT 450⁰C dan kelompok perlakuan PWHT 600⁰C mengalami kenaikan pertambahan panjang terhadap kelompok *raw material* masing-masing sebesar 578,7%, 746,8% dan 921,3%.

3. Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan menghasilkan data nilai kekerasan dari spesimen *raw material*, spesimen pengelasan *non* PWHT dan spesimen pengelasan dengan PWHT dengan variasi suhu *annealing* 150°C, *annealing* 300°C, *annealing* 450°C dan *annealing* 600°C. Pengujian kekerasan pada penelitian ini membandingkan kekerasan pada daerah logam las, daerah *HAZ*, dan logam induk, juga dilakukan uji kekerasan pada daerah batas las dengan *HAZ* dan batas *HAZ* dengan logam induk. Data-data tersebut selanjutnya dapat dilihat pada Tabel 5, 6, 7, 8, 9 dan 10, perhitungan selengkapnya dapat dilihat pada lampiran.

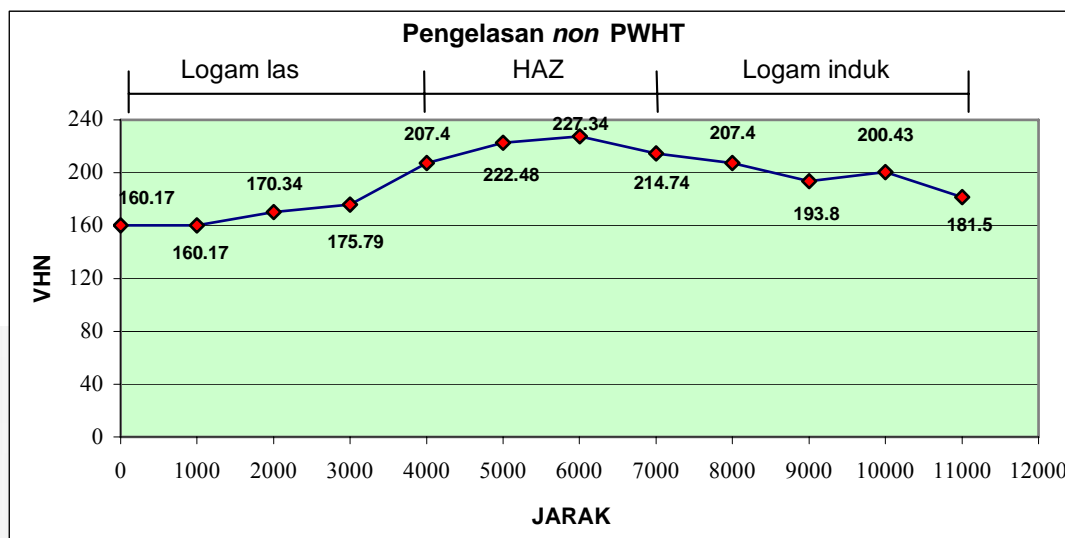
Tabel 5. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen *RawMaterial*

Kelompok Raw Material	
Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
0	222,48
1000	222,48
2000	214,74
3000	222,48
Rata-rata	220,55

Tabel 6. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan *non* PWHT

Spesimen Pengelasan <i>non</i> PWHT		
Daerah pengelasan	Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
Logam las	0	160,17
	1000	160,17
	2000	170,34
	3000	175,79
Rata-rata		166,62
Batas logam las dengan HAZ	4000	207,40
HAZ	5000	222,48
	6000	227,34
Rata-rata		224,91
Batas HAZ dengan logam induk	7000	214,74
Logam Induk	8.000	207,40
	9.000	193,80
	10.000	200,43
	11.000	181,50
Rata-rata		195,78

Nilai kekerasan dari kelompok pengelasan *non* PWHT pada Tabel 6 kemudian dimasukkan dalam diagram garis seperti di bawah ini, hal ini akan mempermudah pembacaan dan analisis nilai kekerasan pada masing-masing spesimen di setiap titiknya.



Gambar 19. Grafik nilai kekerasan pengelasan *non* PWHT

Gambar 19 menunjukkan grafik nilai kekerasan kelompok spesimen pengelasan *non* PWHT, jarak 0 μm sampai jarak 3000 μm adalah nilai kekerasan untuk daerah logam las, nilai kekerasan rata-rata dari daerah logam las ini adalah 166,62 VHN. Jarak 4000 μm pada grafik menunjukkan nilai kekerasan dari batas daerah logam las dengan daerah HAZ, nilai kekerasan batas logam las dan HAZ adalah 207,4 VHN. Jarak 5000 μm sampai 6000 μm merupakan daerah HAZ yang mempunyai nilai kekerasan rata-rata sebesar 224,91 VHN.

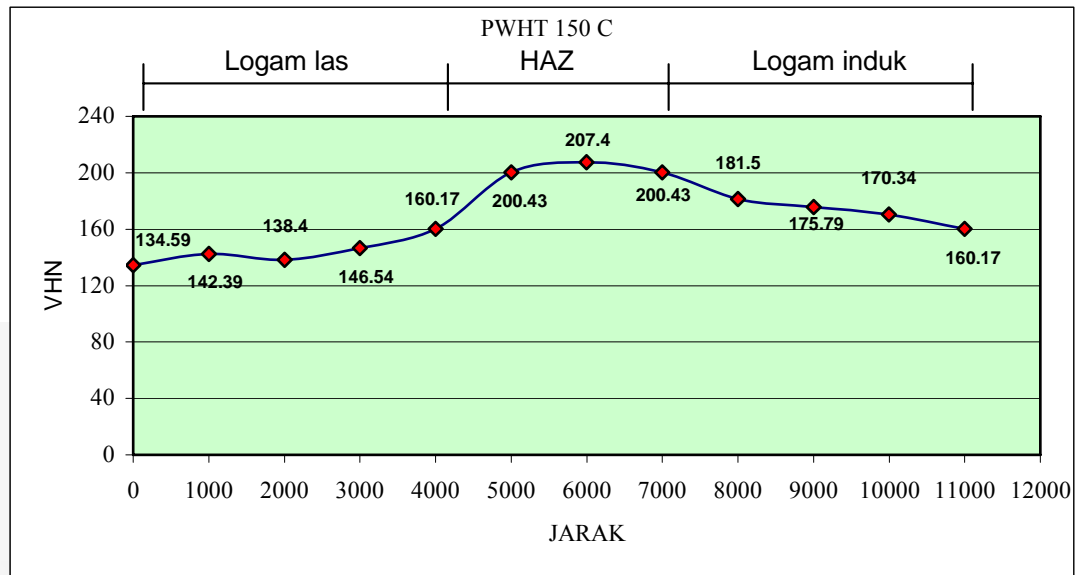
Jarak 7000 μm merupakan daerah batas HAZ dan logam induk yang mempunyai nilai kekerasan sebesar 214,74 VHN. Jarak 8000 μm sampai 11000 μm merupakan daerah tidak terpengaruh panas atau logam induk, nilai kekerasan rata-ratanya sebesar 195,78 VHN. Nilai kekerasan yang tertinggi pada spesimen pengelasan *non* PWHT terletak di daerah HAZ

yaitu sebesar 227,34 VHN dan mengalami kenaikan 3,08% dibanding nilai kekerasan *raw material*.

Tabel 7. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 150°C

Spesimen Pengelasan PWHT 150°C		
Daerah pengelasan	Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
Logam las	0	134.59
	1000	142.39
	2000	138.40
	3000	146.54
Rata-rata		140.48
Batas logam las dengan HAZ	4000	160.17
HAZ	5000	200.43
	6000	207.40
Rata-rata		203.92
Batas HAZ dengan logam induk	7000	200.43
Logam Induk	8.000	181.50
	9.000	175.79
	10.000	170.34
	11.000	160.17
Rata-rata		171.95

Dari Tabel 7 di atas, kemudian dibuat buat grafik seperti Gambar 20 di bawah ini agar mempermudah untuk pembacaan dan analisa.



Gambar 20. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 150⁰C

Gambar 20 menunjukkan grafik nilai kekerasan kelompok spesimen pengelasan PWHT 150⁰C, jarak 0 μm sampai jarak 3000 μm adalah nilai kekerasan untuk daerah logam las, nilai kekerasan rata-rata dari daerah logam las ini adalah 140,48 VHN. Jarak 4000 μm pada grafik menunjukkan nilai kekerasan dari batas daerah logam las dengan daerah HAZ, nilai kekerasan batas logam las dan HAZ adalah 160,17 VHN. Jarak 5000 μm sampai 6000 μm merupakan daerah HAZ yang mempunyai nilai kekerasan rata-rata sebesar 203,92 VHN.

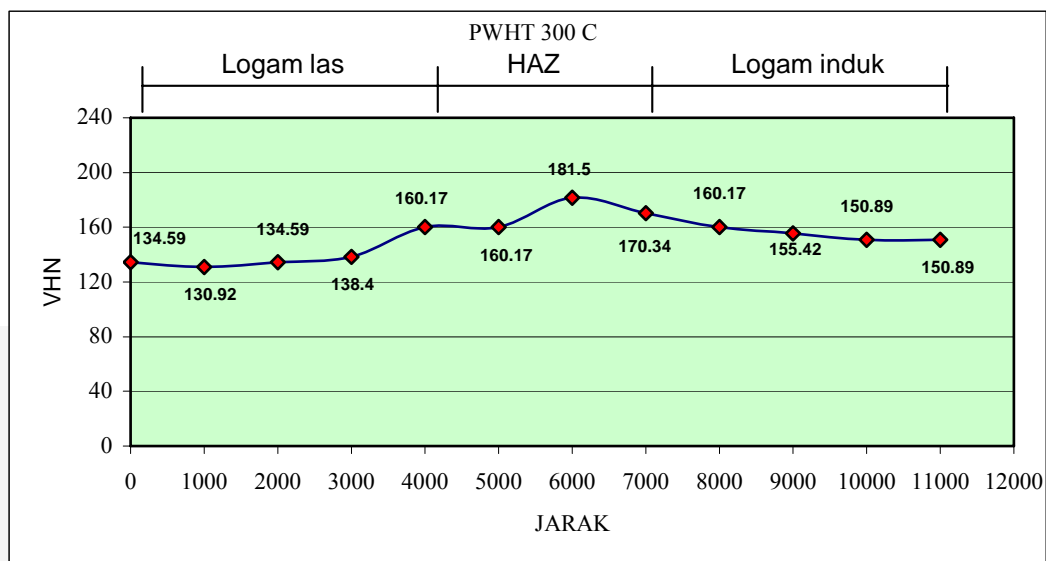
Jarak 7000 μm merupakan daerah batas HAZ dan logam induk yang mempunyai nilai kekerasan sebesar 200,43 VHN. Jarak 8000 μm sampai 11000 μm merupakan daerah tidak terpengaruh panas atau logam induk, nilai kekerasan rata-ratanya sebesar 171,95 VHN. Nilai kekerasan yang tertinggi pada spesimen pengelasan PWHT 150⁰C terletak di daerah HAZ

yaitu sebesar 207,40 VHN dan mengalami penurunan 5,96% dibanding nilai kekerasan *raw material*.

Tabel 8. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 300°C

Spesimen Pengelasan PWHT 300°C		
Daerah pengelasan	Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
Logam las	0	134,59
	1000	130,92
	2000	134,59
	3000	138,40
Rata-rata		134,63
Batas logam las dengan HAZ	4000	160,17
HAZ	5000	160,17
	6000	181,50
Rata-rata		170,84
Batas HAZ dengan logam induk	7000	170,34
Logam Induk	8.000	160,17
	9.000	155,42
	10.000	150,89
	11.000	150,89
Rata-rata		154.34

Dari Tabel 8 di atas, kemudian dibuat buat grafik seperti Gambar 21 di bawah ini agar mempermudah untuk pembacaan dan analisa.



Gambar 21. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 300°C

Gambar 21 menunjukkan grafik nilai kekerasan kelompok spesimen pengelasan PWHT 300°C, jarak 0 μm sampai jarak 3000 μm adalah nilai kekerasan untuk daerah logam las, nilai kekerasan rata-rata dari daerah logam las ini adalah 134,63 VHN. Jarak 4000 μm pada grafik menunjukkan nilai kekerasan dari batas daerah logam las dengan daerah HAZ, nilai kekerasan batas logam las dan HAZ adalah 160,17 VHN. Jarak 5000 μm sampai 6000 μm merupakan daerah HAZ yang mempunyai nilai kekerasan rata-rata sebesar 170,84 VHN.

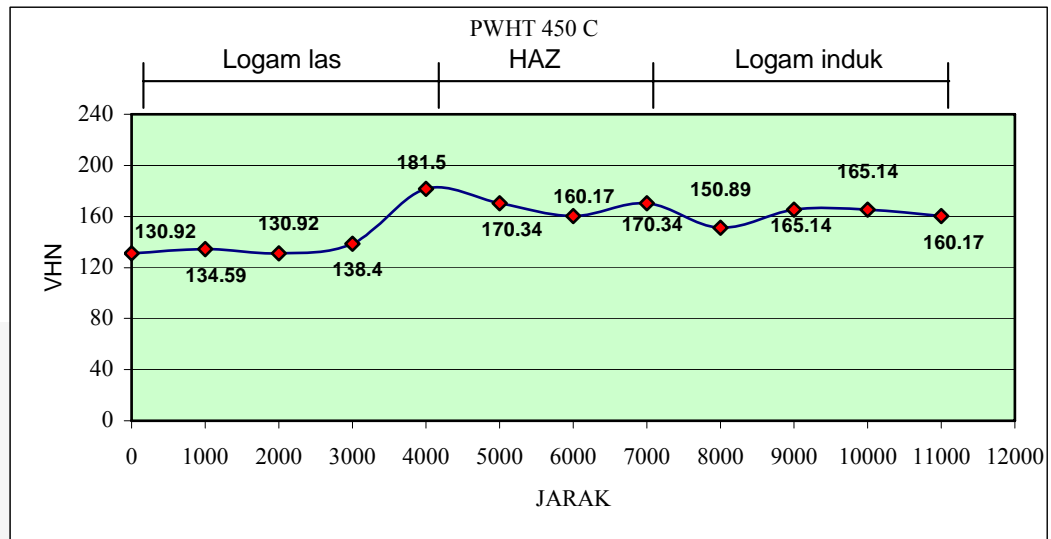
Jarak 7000 μm merupakan daerah batas HAZ dan logam induk yang mempunyai nilai kekerasan sebesar 170,34 VHN. Jarak 8000 μm sampai 11000 μm merupakan daerah tidak terpengaruh panas atau logam induk, nilai kekerasan rata-ratanya sebesar 154,34 VHN. Nilai kekerasan yang tertinggi pada spesimen pengelasan PWHT 300°C terletak di daerah HAZ

yaitu sebesar 181,50 VHN dan mengalami penurunan 17,71% dibanding nilai kekerasan *raw material*.

Tabel 9. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 450⁰C

Spesimen Pengelasan PWHT 450⁰C		
Daerah pengelasan	Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
Logam las	0	130,92
	1000	134,59
	2000	130,92
	3000	138,40
Rata-rata		133,71
Batas logam las dengan HAZ	4000	181,50
HAZ	5000	170,34
	6000	160,17
Rata-rata		165,26
Batas HAZ dengan logam induk	7000	170,34
Logam Induk	8.000	150,89
	9.000	165,14
	10.000	165,14
	11.000	160,17
Rata-rata		160,34

Dari Tabel 9 di atas, kemudian dibuat buat grafik seperti Gambar 22 di bawah ini agar mempermudah untuk pembacaan dan analisa.



Gambar 22. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 450⁰C

Gambar 22 menunjukkan grafik nilai kekerasan kelompok spesimen pengelasan PWHT 450⁰C, jarak 0 μm sampai jarak 3000 μm adalah nilai kekerasan untuk daerah logam las, nilai kekerasan rata-rata dari daerah logam las ini adalah 133,71 VHN. Jarak 4000 μm pada grafik menunjukkan nilai kekerasan dari batas daerah logam las dengan daerah HAZ, nilai kekerasan batas logam las dan HAZ adalah 181,50 VHN. Jarak 5000 μm sampai 6000 μm merupakan daerah HAZ yang mempunyai nilai kekerasan rata-rata sebesar 165,26 VHN.

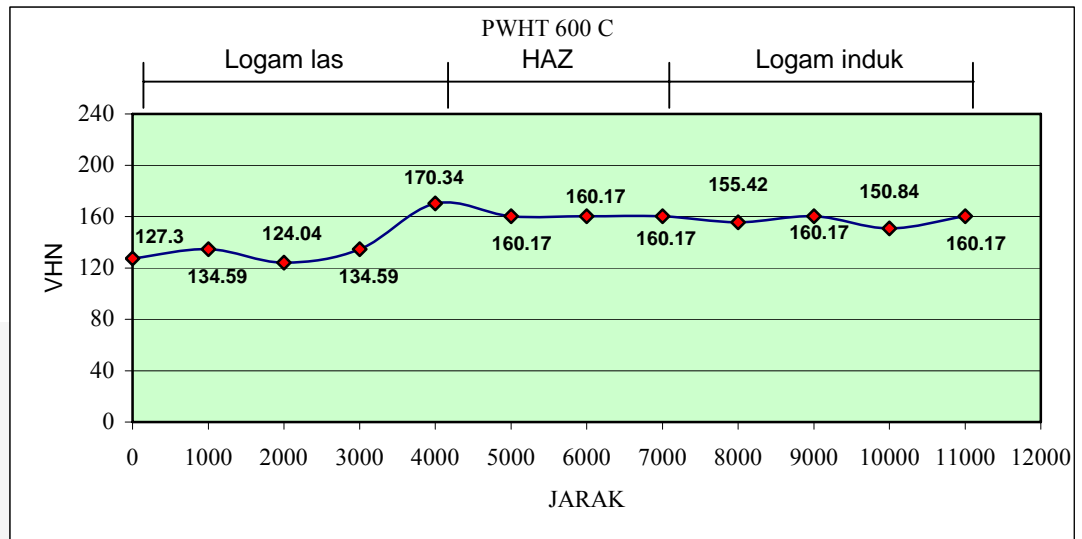
Jarak 7000 μm merupakan daerah batas HAZ dan logam induk yang mempunyai nilai kekerasan sebesar 170,34 VHN. Jarak 8000 μm sampai 11000 μm merupakan daerah tidak terpengaruh panas atau logam induk, nilai kekerasan rata-ratanya sebesar 160,34 VHN. Nilai kekerasan yang tertinggi pada spesimen pengelasan PWHT 450⁰C terletak di daerah

batas logam las dengan daerah HAZ yaitu sebesar 181,50 VHN dan mengalami penurunan 17,71% dibanding nilai kekerasan *raw material*.

Tabel 10. Tabel Nilai Kekerasan Spesimen Pengelasan PWHT 600⁰C

Spesimen Pengelasan PWHT 600⁰C		
Daerah pengelasan	Jarak (μm)	Nilai kekerasan (VHN)
Logam las	0	127,30
	1000	134,59
	2000	124,04
	3000	134,59
Rata-rata		130,13
Batas logam las dengan HAZ	4000	170,34
HAZ	5000	160,17
	6000	160,17
Rata-rata		160,17
Batas HAZ dengan logam induk	7000	160,17
Logam Induk	8.000	155,42
	9.000	160,17
	10.000	150,84
	11.000	160,17
Rata-rata		156,65

Dari Tabel 10 di atas, kemudian dibuat buat grafik seperti Gambar 23 di bawah ini agar mempermudah untuk pembacaan dan analisa.

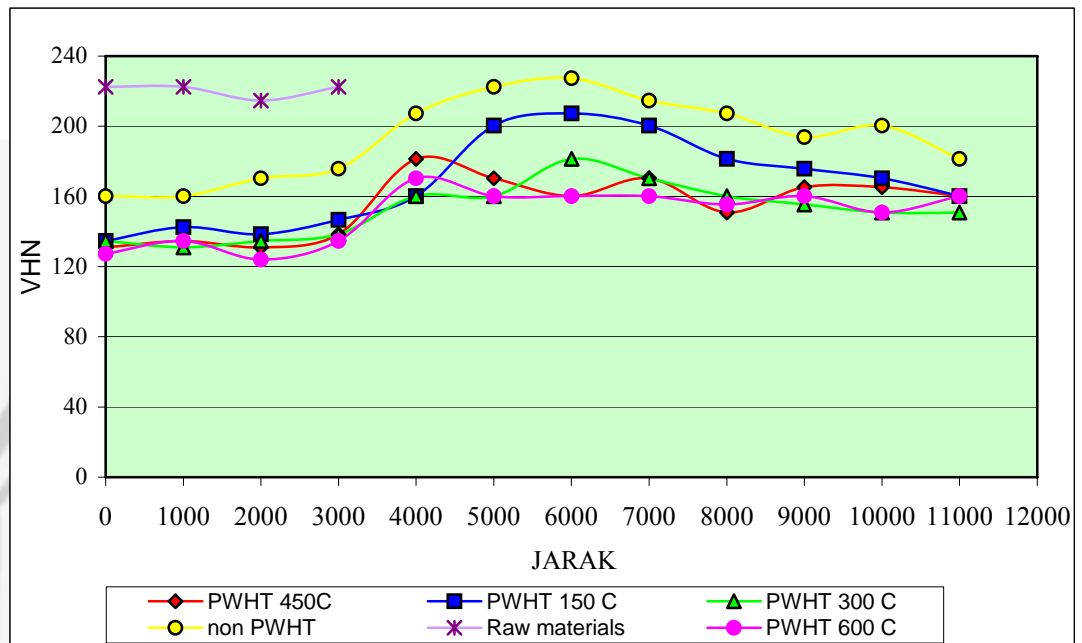


Gambar 23. Grafik nilai kekerasan pengelasan PWHT 600°C

Gambar 23 menunjukkan grafik nilai kekerasan kelompok spesimen pengelasan PWHT 600°C, jarak 0 μm sampai jarak 3000 μm adalah nilai kekerasan untuk daerah logam las, nilai kekerasan rata-rata dari daerah logam las ini adalah 130,13 VHN. Jarak 4000 μm pada grafik menunjukkan nilai kekerasan dari batas daerah logam las dengan daerah HAZ, nilai kekerasan batas logam las dan HAZ adalah 170,34 VHN. Jarak 5000 μm sampai 6000 μm merupakan daerah HAZ yang mempunyai nilai kekerasan rata-rata sebesar 160,17 VHN.

Jarak 7000 μm merupakan daerah batas HAZ dan logam induk yang mempunyai nilai kekerasan sebesar 160,17 VHN. Jarak 8000 μm sampai 11000 μm merupakan daerah tidak terpengaruh panas atau logam induk, nilai kekerasan rata-ratanya sebesar 156,65 VHN. Nilai kekerasan yang tertinggi pada spesimen pengelasan PWHT 600°C terletak di daerah

batas logam las dengan daerah HAZ yaitu sebesar 170,34 VHN dan mengalami penurunan 22,77% dibanding nilai kekerasan *raw material*.



Gambar 24. Grafik nilai kekerasan gabungan.

Gambar 24 merupakan gabungan nilai kekerasan *raw material*, pengelasan *non* PWHT, pengelasan PWHT 150⁰C, pengelasan PWHT 300⁰C, pengelasan PWHT 450⁰C dan pengelasan PWHT 600⁰C. Pengelasan *non* PWHT mempunyai nilai kekerasan disetiap daerah hasil pengelasan paling tinggi diantara nilai kekerasan daerah-daerah hasil pengelasan dengan perlakuan PWHT. Hal ini dikarenakan laju pendinginan yang cepat pada spesimen pengelasan *non* PWHT akan menghasilkan struktur logam yang keras.

4. Hasil Pengamatan Foto Struktur Mikro

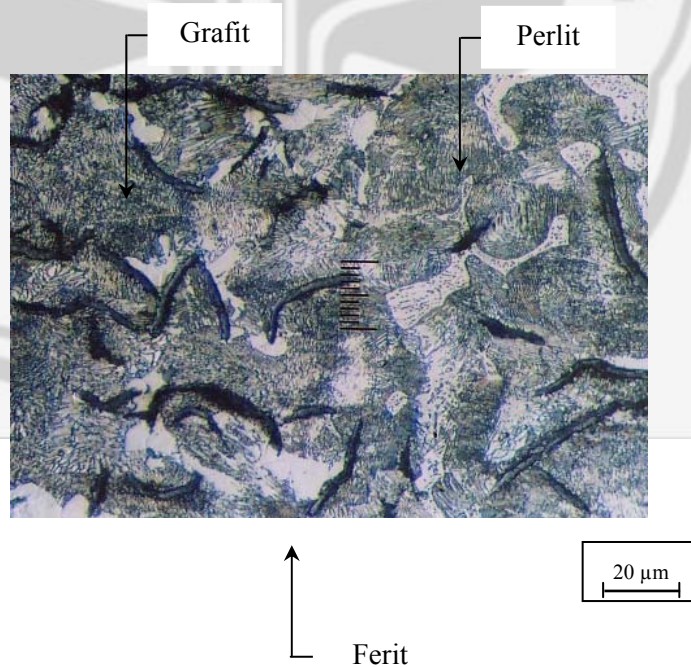
Spesimen yang digunakan dalam penelitian sebelum diuji kekerasan, dilakukan foto mikro. Foto mikro digunakan untuk menganalisa struktur mikro logam yang berhubungan dengan sifat-sifat mekanik material logam yang diteliti.



Gambar 22.02

Mikro foto dari besi tuang biasa. Bagian yang putih adalah ferit, bagian yang hitam adalah grafit dan bagian yang kehitam-hitaman adalah perlit $V = 100 \times$ (diperbesar)

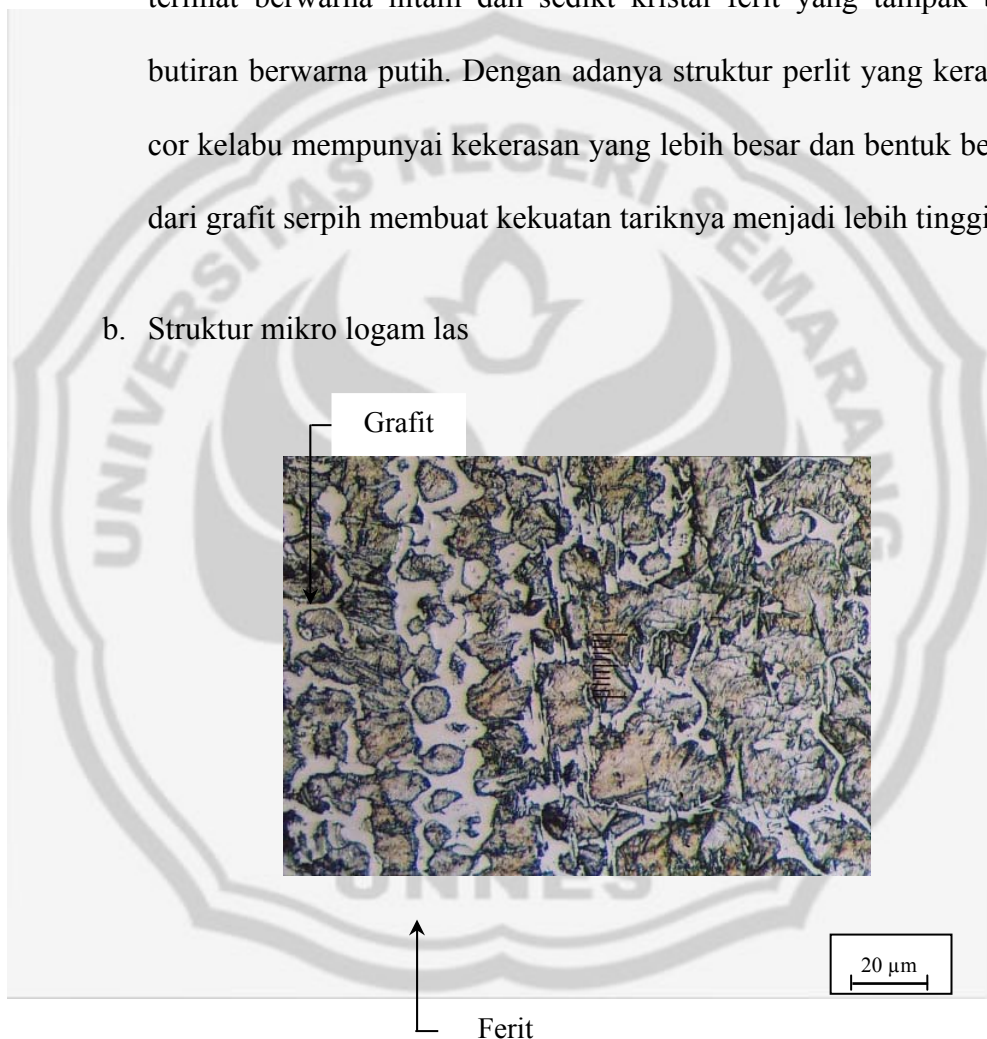
Gambar 25. Mikro foto dari besi tuang biasa (Beumer, 1980: 107)
a. Struktur mikro *raw material*



Gambar 26. Struktur mikro *raw material*

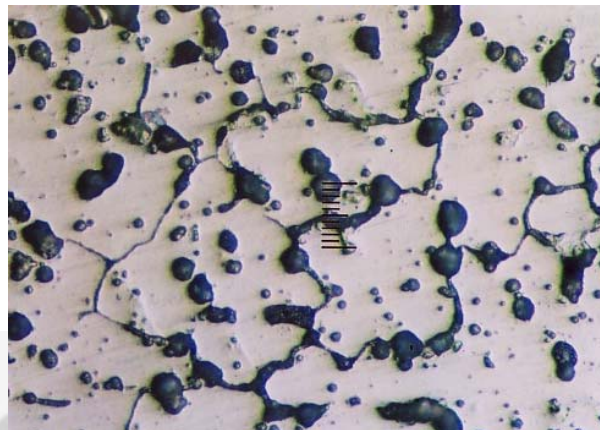
Foto mikro yang ditunjukkan pada gambar 26 adalah foto struktur mikro *raw material* dengan perbesaran 500X. Struktur mikro pada gambar diatas didominasi oleh struktur perlit yang nampak berwarna kelabu, potongan-potongan grafit berbentuk serpih bengkok terlihat berwarna hitam dan sedikit kristal ferit yang tampak berupa butiran berwarna putih. Dengan adanya struktur perlit yang keras, besi cor kelabu mempunyai kekerasan yang lebih besar dan bentuk bengkok dari grafit serpih membuat kekuatan tariknya menjadi lebih tinggi.

b. Struktur mikro logam las



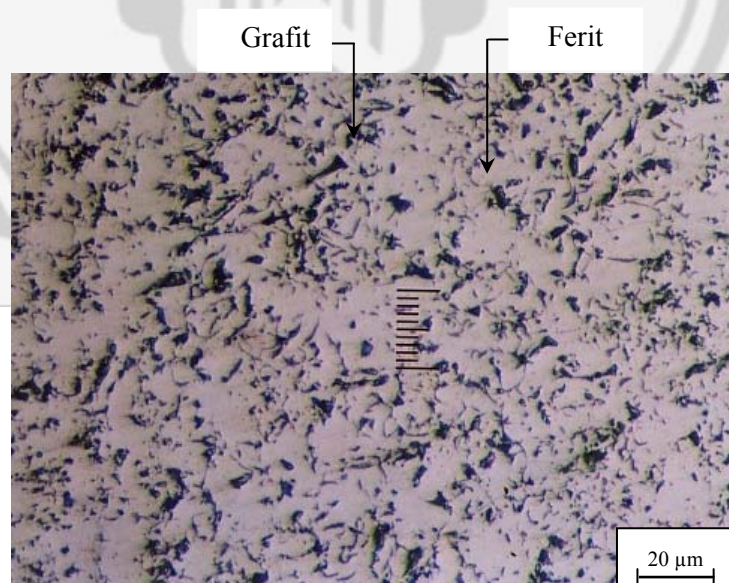
Gambar 27. Struktur mikro logam las pengelasan *non* PWHT

Gambar 27 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam las pada pengelasan tanpa perlakuan PWHT, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam las mempunyai struktur ferit dan grafit halus. Struktur ferit berwarna putih cukup dominan disekitar grafit yang berbentuk serpih halus berwarna hitam. Penggunaan logam tambahan dari nikel atau paduan nikel dapat menghasilkan grafit halus, tingkat porositas rendah dan mudah dimesin



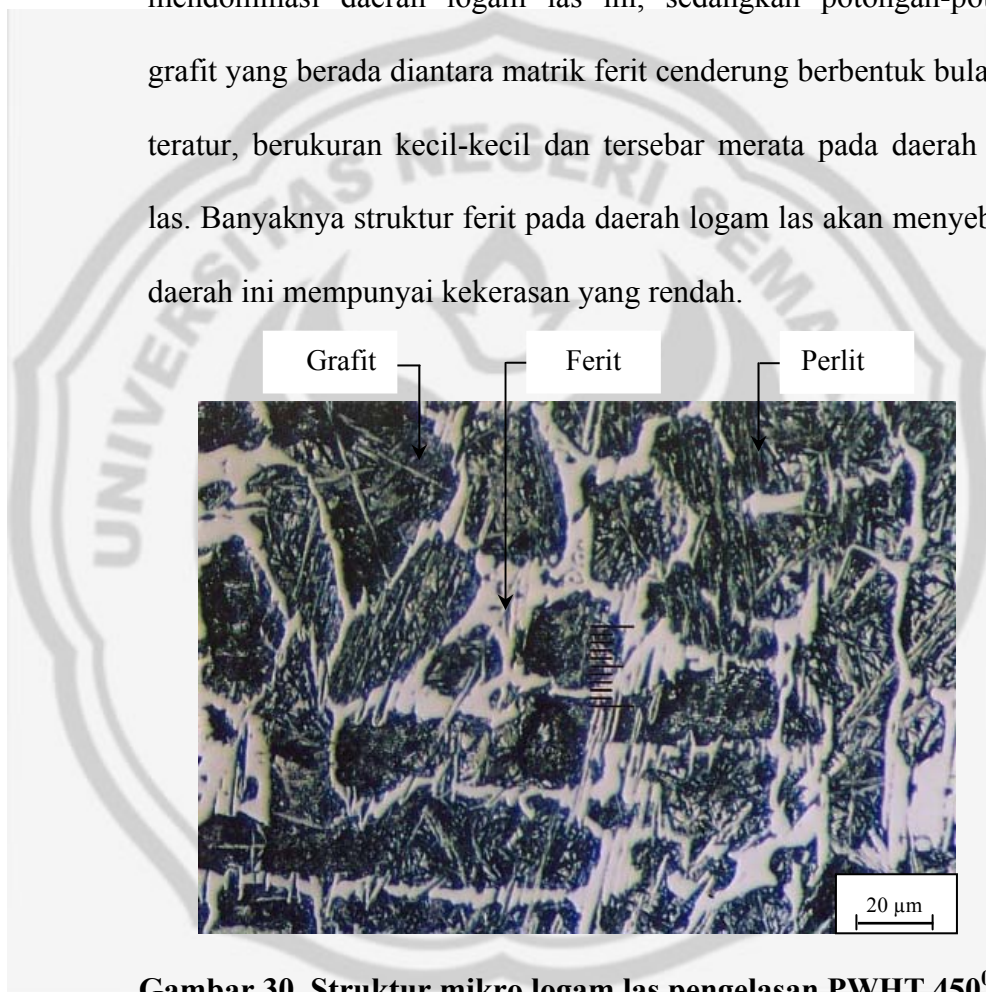
Gambar 28. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 150⁰C

Gambar 28 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam las pada pengelasan dengan PWHT 150⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam las mempunyai struktur ferit yang begitu dominan dan grafit yang berbentuk bulat tidak teratur. Bentuk grafit yang cenderung berbentuk bulat akan membuat daerah ini mempunyai keuletan yang lebih baik.



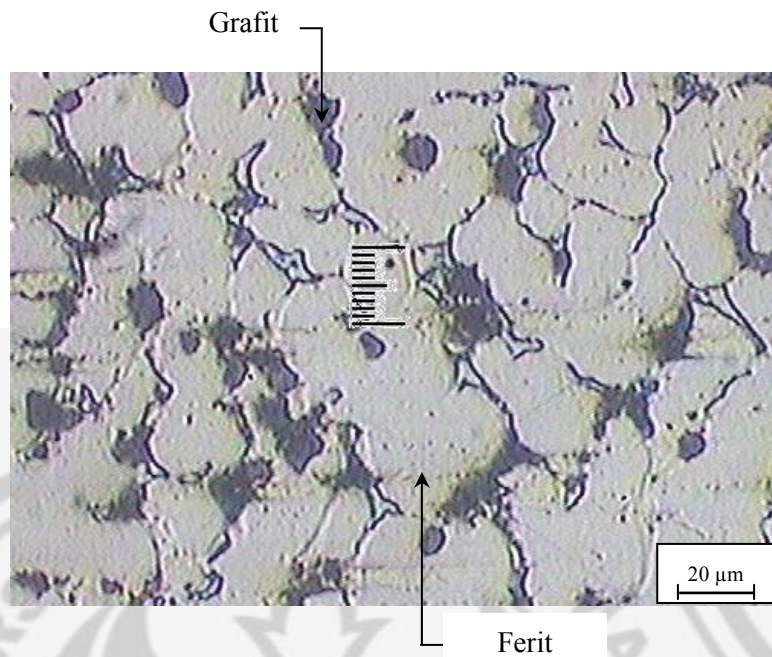
Gambar 29. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 300⁰C

Gambar 29 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam las pada pengelasan dengan PWHT 300⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam las mempunyai struktur ferit dan potongan-potongan grafit. Struktur ferit yang berwarna putih mendominasi daerah logam las ini, sedangkan potongan-potongan grafit yang berada diantara matrik ferit cenderung berbentuk bulat tidak teratur, berukuran kecil-kecil dan tersebar merata pada daerah logam las. Banyaknya struktur ferit pada daerah logam las akan menyebabkan daerah ini mempunyai kekerasan yang rendah.



Gambar 30. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 450⁰C

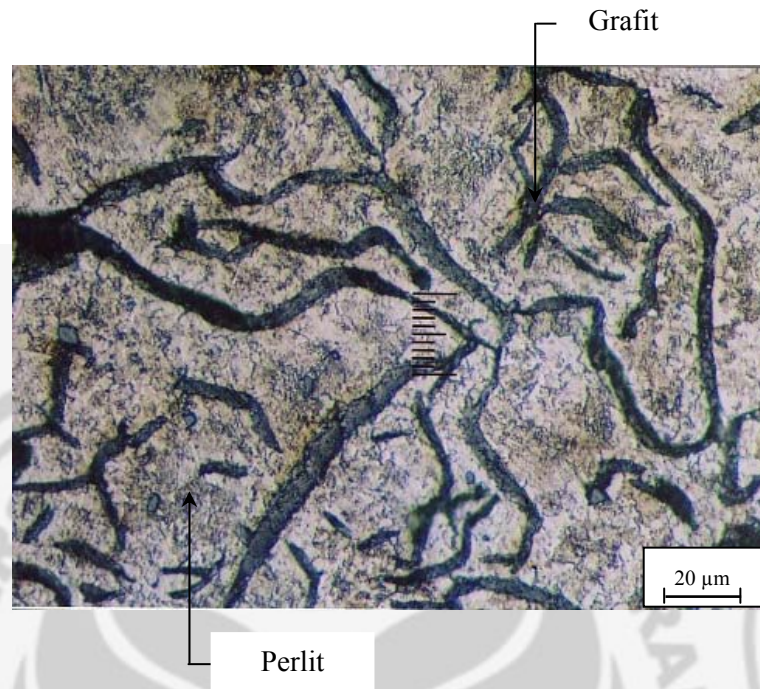
Gambar 30 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam las pada pengelasan dengan PWHT 450⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam las mempunyai struktur berupa serpihan-serpihan grafit yang halus diantara struktur perlit dan struktur ferit berwarna putih yang cukup dominan.



Gambar 31. Struktur mikro logam las pengelasan PWHT 600⁰C

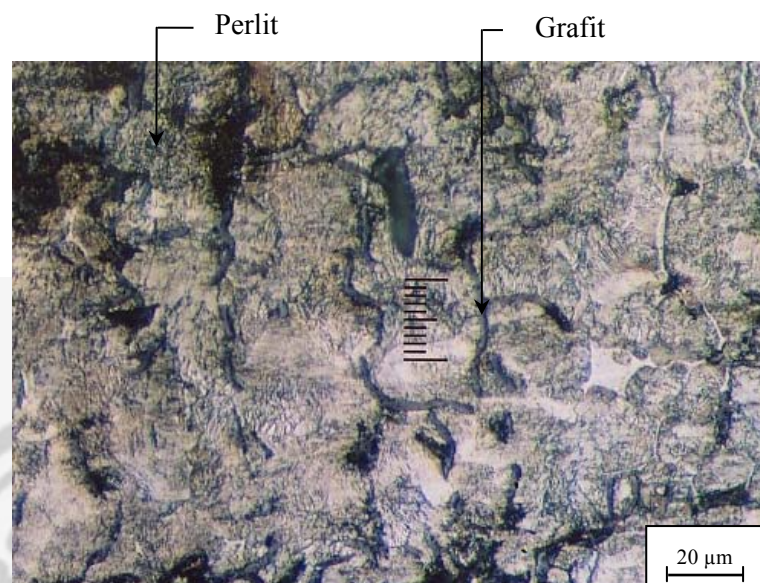
Gambar 31 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam las pada pengelasan dengan PWHT 600⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam las mempunyai struktur berupa grafit yang berwarna hitam dengan ferit sebagai matriknya. Adanya matrik ferit pada daerah logam las akan membuat daerah ini mempunyai kekerasan yang rendah.

c. Struktur mikro HAZ



Gambar 32. Struktur mikro daerah HAZ pengelasan non PWHT

Gambar 32 menunjukkan foto struktur mikro daerah HAZ pada pengelasan tanpa perlakuan PWHT, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah ini mempunyai struktur grafit berbentuk serpih berukuran besar dan struktur perlit kasar yang cukup dominan. Dengan adanya struktur perlit akan menyebabkan daerah ini mempunyai kekerasan yang lebih besar.



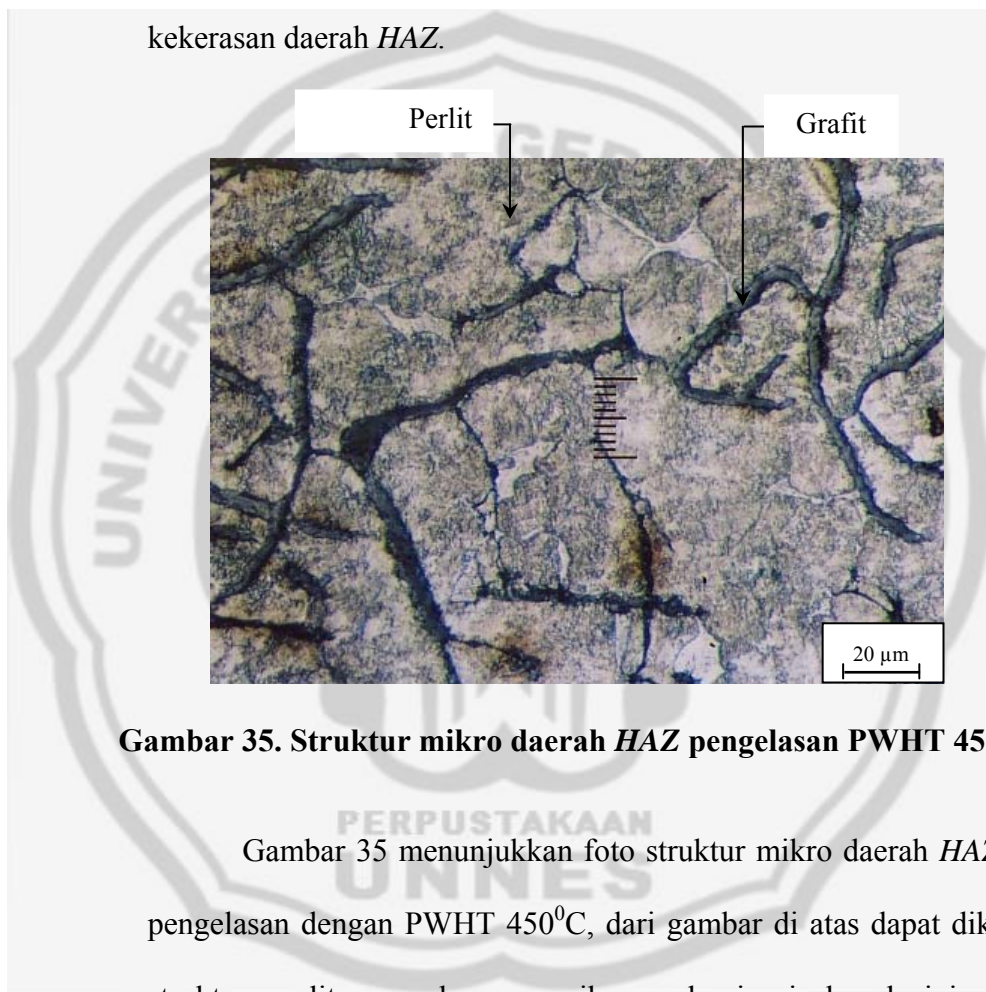
Gambar 33. Struktur mikro daerah *HAZ* pengelasan PWHT 150⁰C

Gambar 33 menunjukkan foto struktur mikro daerah *HAZ* pada pengelasan dengan PWHT 150⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah ini mempunyai struktur grafit berbentuk serpih dalam jumlah sedikit yang tersebar tidak merata diantara struktur perlit kasar.

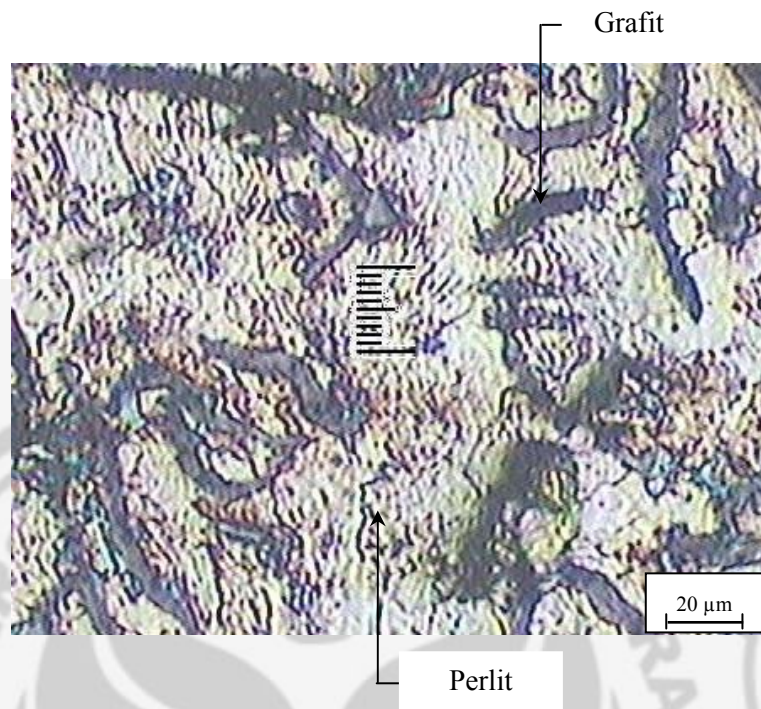


Gambar 34. Struktur mikro daerah HAZ pengelasan PWHT 300⁰C

Gambar 34 menunjukkan foto struktur mikro daerah HAZ pada pengelasan dengan PWHT 300⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah ini mempunyai struktur grafit berbentuk serpih diantara struktur perlit. Adanya struktur perlit akan meningkatkan nilai kekerasan daerah HAZ.

**Gambar 35. Struktur mikro daerah HAZ pengelasan PWHT 450⁰C**

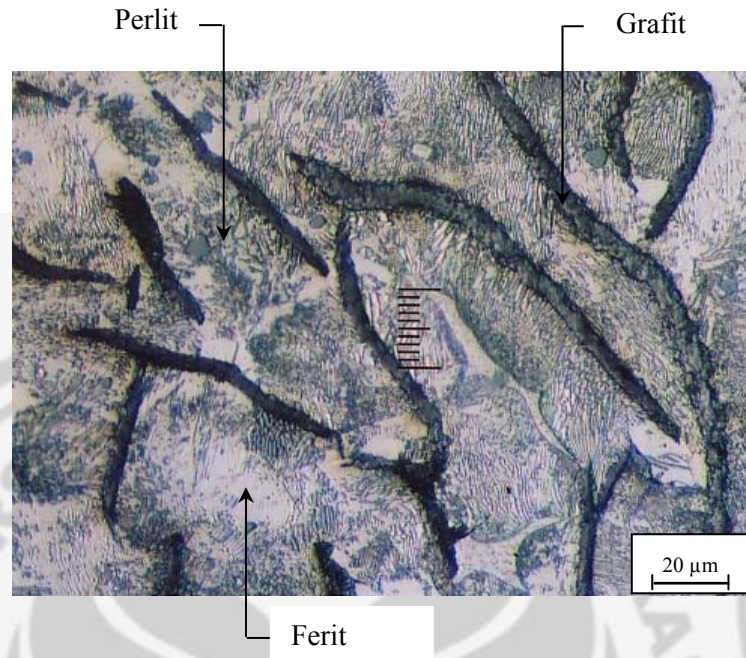
Gambar 35 menunjukkan foto struktur mikro daerah HAZ pada pengelasan dengan PWHT 450⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui struktur perlit yang kasar masih mendominasi daerah ini dengan serpihan grafit berukuran besar berada didalamnya.



Gambar 36. Struktur mikro daerah *HAZ* pengelasan PWHT 600⁰C

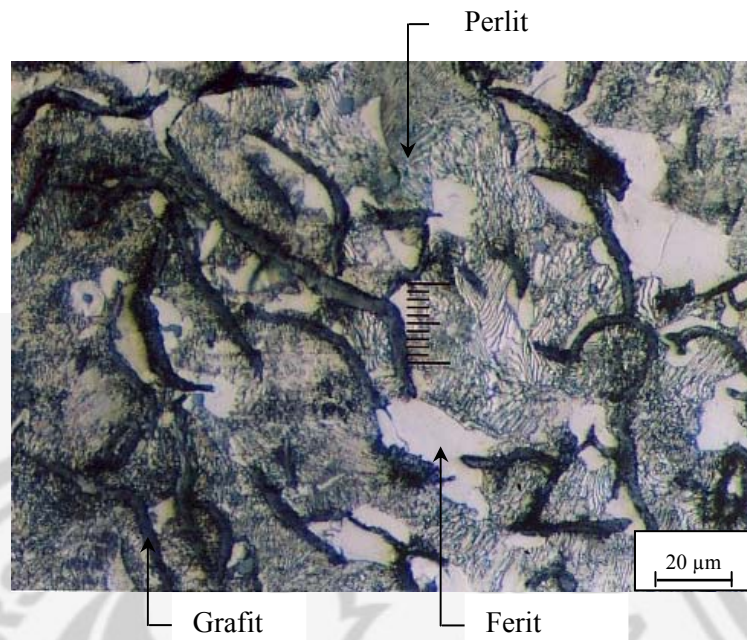
Gambar 36 menunjukkan foto struktur mikro daerah *HAZ* pada pengelasan dengan PWHT 600⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah ini mempunyai struktur grafit berbentuk serpih berukuran besar dan struktur perlit kasar sebagai matriknya.

d. Struktur mikro logam induk



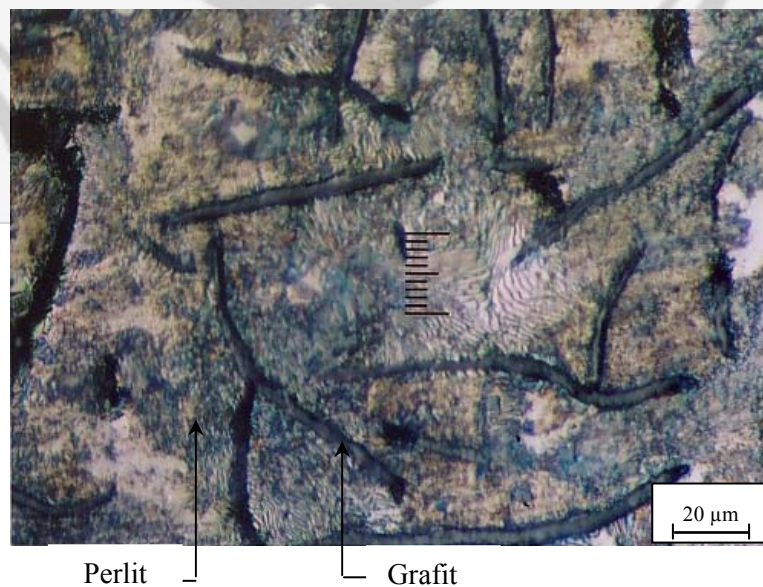
Gambar 37. Struktur mikro logam induk pengelasan *non* PWHT

Gambar 37 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam induk pada pengelasan tanpa perlakuan PWHT, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam induk mempunyai struktur yang sama dengan *raw material* yaitu grafit memanjang berukuran besar berwarna hitam, struktur ferit berwarna putih dan struktur perlit yang tampak berwarna kelabu.



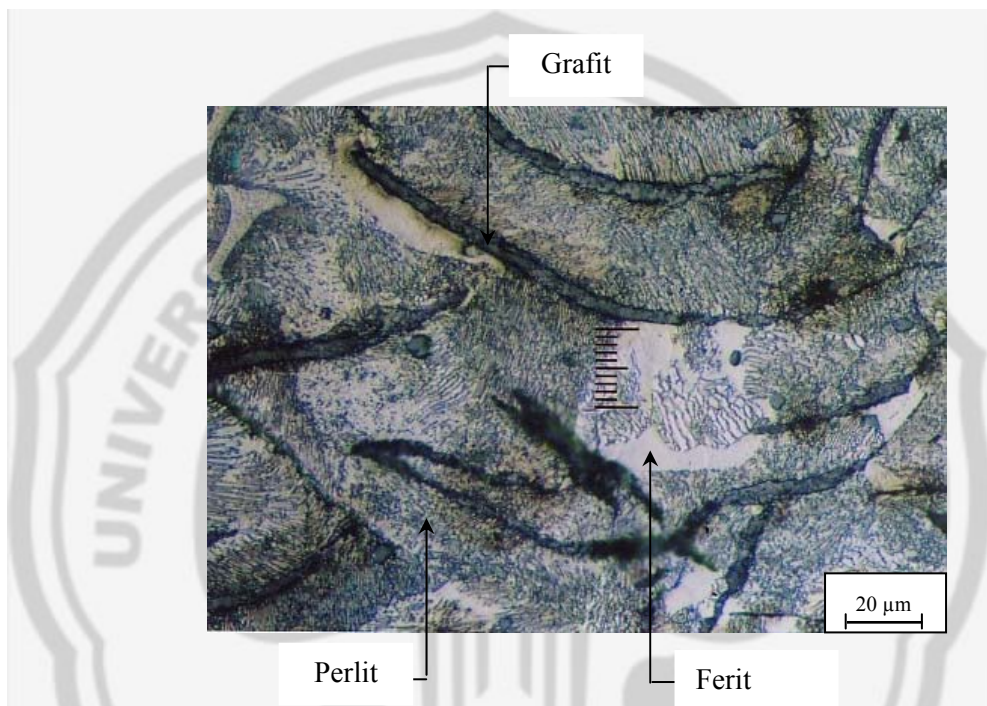
Gambar 38. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 150⁰C

Gambar 38 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam induk pada pengelasan PWHT 150⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam induk mempunyai struktur serpih grafit yang tersebar dan struktur ferit dibawah struktur perlit yang dominan.



Gambar 39. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 300⁰C

Gambar 39 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam induk pada pengelasan PWHT 300⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam induk mempunyai struktur serpih grafit dengan sedikit sekali ferit dan terdapat struktur perlit yang dominan.



Gambar 40. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 450⁰C

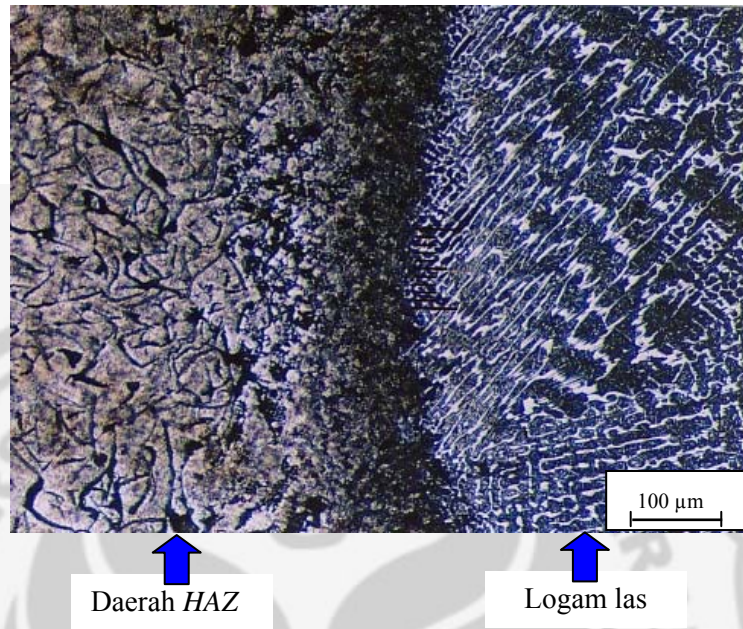
Gambar 40 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam induk pada pengelasan PWHT 450⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam induk mempunyai struktur perlit yang dominan berwarna kelabu, ferit putih dan serpih grafit disekelilingnya.



Gambar 41. Struktur mikro logam induk pengelasan PWHT 600⁰C

Gambar 41 menunjukkan foto struktur mikro daerah logam induk pada pengelasan PWHT 600⁰C, dari gambar di atas dapat diketahui pada daerah logam induk mempunyai struktur serpih grafit diantara struktur perlit yang dominan dan sedikit struktur ferit.

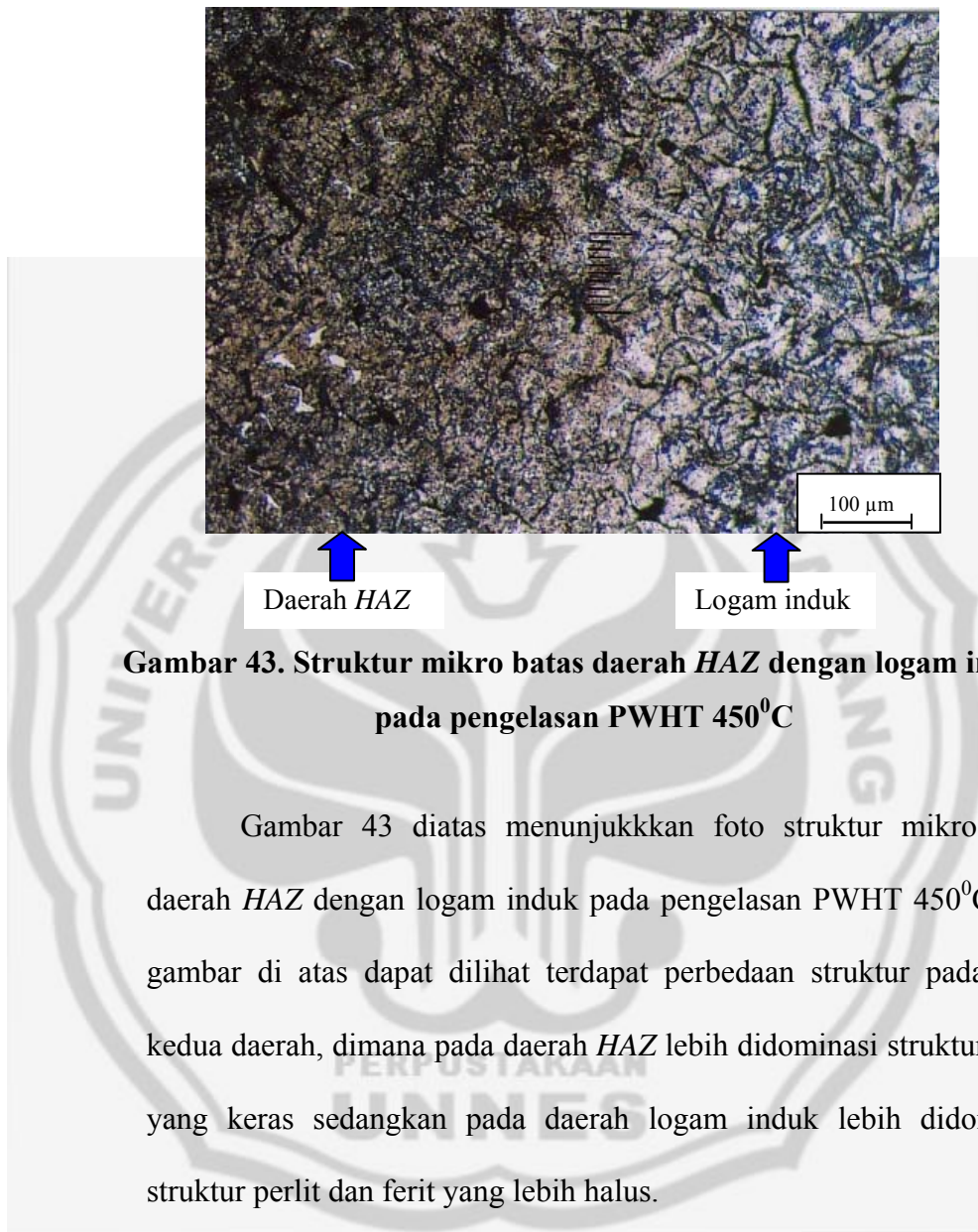
e. Struktur mikro batas antara logam las dengan *HAZ*



Gambar 42. Struktur mikro batas logam las dengan daerah *HAZ* pada pengelasan PWHT 450⁰C

Gambar 42 menunjukkan foto struktur mikro batas logam las dengan daerah *HAZ* pada pengelasan PWHT 450⁰C, dari gambar di atas dapat dilihat terdapat perbedaan struktur pada kedua daerah, dimana pada logam las struktur yang ada berupa grafit yang halus diantara matrik ferit sedangkan pada daerah *HAZ* struktur yang ada berupa grafit serpih panjang diantara matrik perlit yang kasar. Struktur yang lebih halus membuat daerah logam las mempunyai sifat mekanis yang lebih baik dibandingkan daerah *HAZ*.

f. Struktur mikro batas antara *HAZ* dengan logam induk

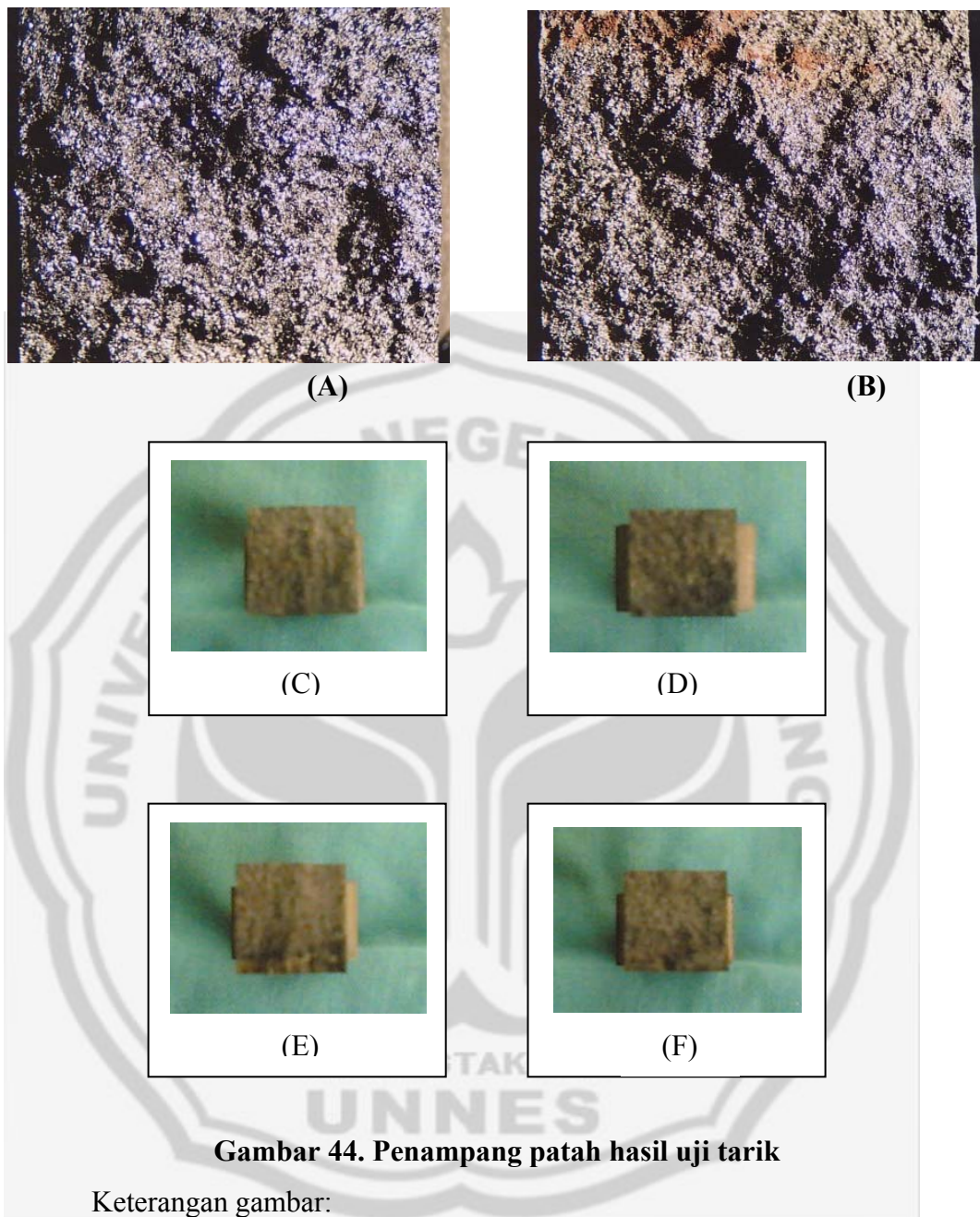


Gambar 43. Struktur mikro batas daerah *HAZ* dengan logam induk pada pengelasan PWHT 450⁰C

Gambar 43 diatas menunjukkan foto struktur mikro batas daerah *HAZ* dengan logam induk pada pengelasan PWHT 450⁰C, dari gambar di atas dapat dilihat terdapat perbedaan struktur pada kedua daerah, dimana pada daerah *HAZ* lebih didominasi struktur perlit yang keras sedangkan pada daerah logam induk lebih didominasi struktur perlit dan ferit yang lebih halus.

5. Hasil Pengamatan Penampang Patah Uji Tarik

Penampang patah yang terjadi dapat digunakan untuk memprediksi kekuatan material, sebab bentuk patahan cenderung identik dari sifat bahan atau merupakan identitas dari bahan itu sendiri.



- (A) = Foto makro penampang patah *raw material*
- (B) = Foto makro penampang patah spesimen pengelasan PWHT 450⁰C
- (C) = Foto makro penampang patah spesimen pengelasan *non* PWHT
- (D) = Foto makro penampang patah spesimen pengelasan PWHT 150⁰C
- (E) = Foto makro penampang patah spesimen pengelasan PWHT 300⁰C
- (F) = Foto makro penampang patah spesimen pengelasan PWHT 600⁰C

Pada gambar 44 bentuk penampang pada spesimen *raw material*, spesimen pengelasan non PWHT dan spesimen pengelasan PWHT mempunyai bentuk penampang patahnya adalah *granular*, hal ini menandakan bahwa material besi cor kelabu memiliki sifat getas. Sifat getas atau rendahnya keuletan besi cor kelabu diakibatkan oleh hadirnya grafit serpih.

PEMBAHASAN

Data-data yang diperoleh dari hasil pengujian kelompok *raw material* merupakan kelompok spesimen yang mempunyai nilai kekuatan tarik, nilai kekerasan yang paling tinggi dibandingkan kelompok yang mendapat perlakuan pengelasan non PWHT, PWHT 150⁰C, PWHT 300⁰C, PWHT 450⁰C dan PWHT 600⁰C yaitu sebesar 22,57 kg/mm² untuk kekuatannya. Hal ini terjadi karena struktur mikro *raw material* berupa matrik perlit yang keras, ferit dan sedikit grafit bengkok dengan ukuran yang pendek. Spesimen *raw material* mempunyai nilai perpanjangan 0,047%, nilai ini merupakan yang paling rendah dibanding nilai perpanjangan kelompok spesimen yang mendapat perlakuan pengelasan.

Eksperimen yang pertama adalah pengujian tarik pada kelompok spesimen pengelasan non PWHT, untuk nilai kekuatan tarik rata-rata merupakan yang paling rendah yaitu sebesar 9,85 kg/mm², apabila dibandingkan dengan kelompok *raw material* dan kelompok pengelasan lain yang dikenai perlakuan PWHT. Untuk nilai pertambahan panjang kelompok

spesimen *non* PWHT merupakan yang terendah dibandingkan kelompok spesimen pengelasan lain yang dikenai PWHT, yaitu sebesar 0,174%. Hal ini disebabkan karena tidak adanya perlakuan PWHT pada spesimen pengelasan, maka pada titik perpatahan yaitu pada daerah batas HAZ dengan logam induk yang merupakan daerah perbatasan antara suhu panas dan dingin, terjadi pendinginan cepat sehingga kristal-kristal yang terbentuk kasar dan getas, kondisi ini juga bisa menyebabkan tegangan yang bersifat tetap pada material yang biasa disebut tegangan sisa pengelasan, sedangkan tegangan sisa sendiri berpengaruh buruk terhadap sifat-sifat mekanis dari material.

Eksperimen yang kedua adalah pengujian tarik pada kelompok spesimen pengelasan PWHT 150⁰C. Hasil kekuatan tarik rata-rata kelompok spesimen pengelasan PWHT 150⁰C lebih rendah dibandingkan dengan *raw material* dan kelompok spesimen pengelasan PWHT yang lain yaitu sebesar 11,79 kg/mm², tetapi lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kelompok spesimen *non* PWHT. Untuk nilai pertambahan panjang kelompok spesimen pengelasan PWHT 150⁰C yaitu sebesar 0,239%.

Eksperimen yang ketiga adalah pengujian tarik pada kelompok spesimen pengelasan PWHT 300⁰C. Hasil kekuatan tarik rata-rata kelompok spesimen pengelasan PWHT 300⁰C lebih rendah dibandingkan dengan *raw material* dan kelompok spesimen pengelasan PWHT 450⁰C yaitu sebesar 12,39 kg/mm². Untuk nilai pertambahan panjang kelompok spesimen pengelasan PWHT 300⁰C yaitu sebesar 0,319%.

Eksperimen yang keempat adalah pengujian tarik pada kelompok spesimen pengelasan PWHT 450⁰C. Hasil kekuatan tarik rata-rata kelompok spesimen pengelasan PWHT 450⁰C lebih rendah dibandingkan dengan *raw material* dan kelompok spesimen pengelasan PWHT 600⁰C yaitu sebesar 14,20 kg/mm². Untuk nilai pertambahan panjang kelompok spesimen pengelasan PWHT 450⁰C yaitu sebesar 0,398%.

Eksperimen yang kelima adalah pengujian tarik pada kelompok spesimen pengelasan PWHT 600⁰C. Hasil kekuatan tarik rata-rata kelompok spesimen pengelasan PWHT 600⁰C lebih rendah dibandingkan dengan *raw material* tetapi lebih tinggi apabila dibandingkan dengan kelompok spesimen pengelasan yang lain yaitu sebesar 15,41 kg/mm², sedangkan untuk nilai pertambahan panjang kelompok spesimen pengelasan PWHT 600⁰C merupakan yang paling tinggi yaitu sebesar 0,480%.

Berdasarkan dari analisis data-data yang diperoleh di atas dapat dilihat bahwa perubahan karakteristik kekuatan tarik, pertambahan panjang dan kekerasan yang terjadi pada setiap kelompok spesimen disebabkan adanya beberapa faktor yang mempengaruhinya, diantaranya adalah adanya tegangan sisa akibat gradien temperatur yang besar, laju pendinginan pada waktu pembekuan, struktur mikro yang terbentuk pada daerah logam las, daerah *HAZ*, secara berangsur-angsur berubah dari logam induk.

Penggunaan logam tambah dengan kandungan nikel tinggi dapat menyebabkan struktur grafit yang terbentuk pada daerah logam las menjadi lebih halus. Panas masuk yang terlalu tinggi ditambah dengan laju

pendinginan yang cepat mengakibatkan terbentuknya struktur yang lebih kasar pada daerah *HAZ*. Susunan struktur mikro disetiap daerah hasil pengelasan secara langsung akan mempengaruhi sifat-sifat mekanik daerah tersebut.

PWHT telah terbukti dapat meningkatkan sifat-sifat mekanik dari material besi cor kelabu, hal ini dapat dilihat perbedaan antara nilai kekuatan tarik yang dihasilkan kelompok spesimen pengelasan dengan PWHT dengan kelompok spesimen pengelasan *non* PWHT. Kelompok spesimen dengan PWHT memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi daripada kelompok spesimen *non* PWHT. Hal ini disebabkan oleh pemberian perlakuan PWHT pada besi cor kelabu yang dapat mengurangi gradien temperatur pada waktu pembekuan. Gradien temperatur yang terlalu tinggi akan menghasilkan regangan dan tegangan termal pada daerah tertentu. Regangan dan tegangan termal ini dapat menurunkan sifat-sifat mekanis dari material besi cor kelabu, malah dapat memicu pembentukan retak baik dilogam las maupun *HAZ*.

BAB V

PENUTUP

A. Simpulan

Hasil penelitian dan analisa dalam penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

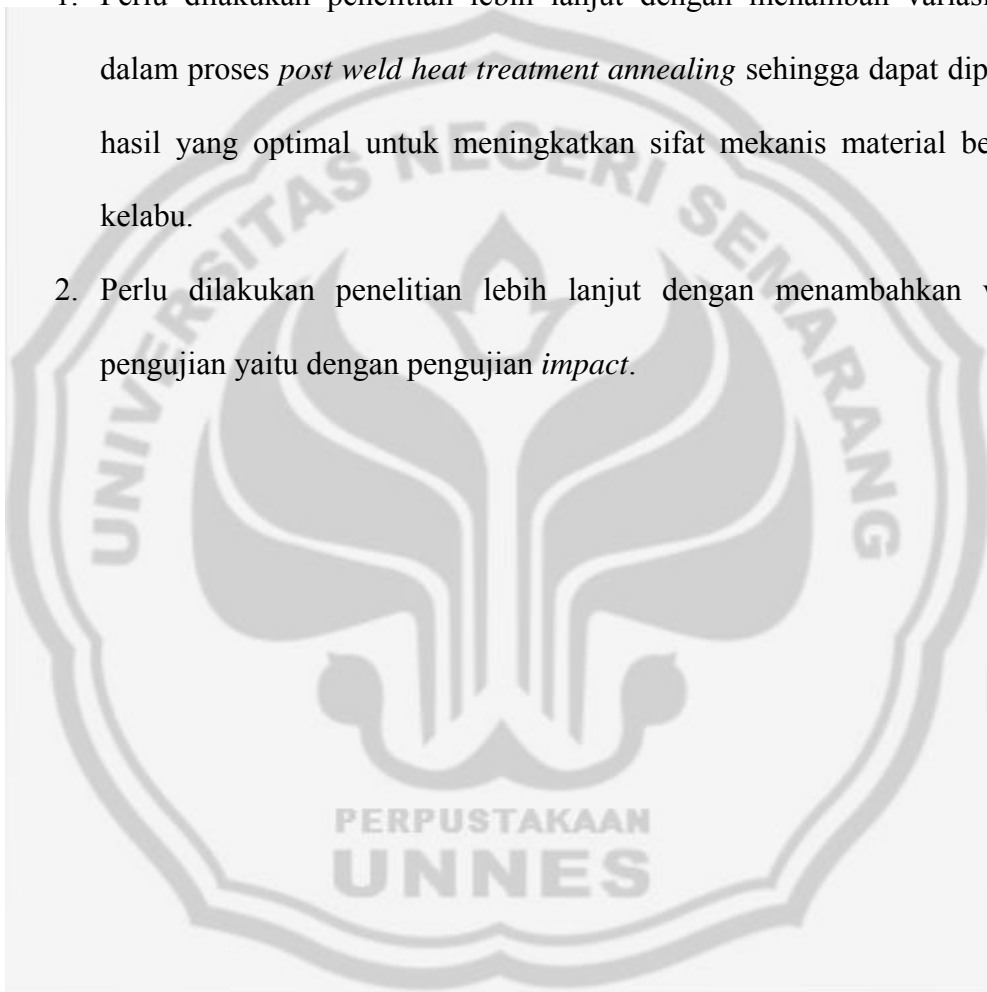
1. Kekuatan tarik material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan sebesar $22,57 \text{ kg/mm}^2$, setelah dilakukan proses pengelasan mengalami penurunan terhadap *raw material* yaitu berturut-turut untuk pengelasan *non* PWHT sebesar 56,36%, untuk pengelasan PWHT 150°C sebesar 47,6%, untuk pengelasan PWHT 300°C sebesar 45,11%, untuk pengelasan PWHT 450°C sebesar 37,08% dan untuk pengelasan PWHT 600°C sebesar 31,72%. Kekuatan tarik tertinggi setelah proses pengelasan adalah pada kelompok pengelasan dengan PWHT 600°C yaitu sebesar $15,41 \text{ kg/mm}^2$.
2. Perpanjangan material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan sebesar 0,047%, setelah dilakukan proses pengelasan mengalami kenaikan terhadap *raw material* yaitu berturut-turut untuk pengelasan *non* PWHT sebesar 270,2%, untuk pengelasan PWHT 150°C sebesar 408,5%, untuk pengelasan PWHT 300°C sebesar 578,7%, untuk pengelasan PWHT 450°C sebesar 746,8% dan untuk pengelasan PWHT 600°C sebesar 921,3%. Perpanjangan tertinggi setelah proses pengelasan adalah pada pengelasan dengan PWHT 600°C yaitu sebesar 0,480%.

3. Nilai kekerasan rata-rata material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan sebesar 220,55 VHN, setelah dilakukan proses pengelasan mengalami kenaikan terhadap *raw material* untuk nilai kekerasan tertinggi pengelasan *non* PWHT yaitu sebesar 3,08%, sedangkan untuk nilai kekerasan tertinggi setelah proses pengelasan dengan PWHT berturut-turut mengalami penurunan terhadap *raw material* yaitu untuk pengelasan PWHT 600⁰C sebesar 22,77%, untuk pengelasan PWHT 150⁰C sebesar 5,96%, untuk pengelasan PWHT 300⁰C dan 450⁰C yaitu sebesar 17,71%. Nilai kekerasan tertinggi setelah proses pengelasan terletak pada daerah *HAZ*. Pengelasan *non* PWHT memiliki nilai kekerasan paling tinggi setelah proses pengelasan yaitu sebesar 227,34 VHN.
4. Struktur mikro dari material besi cor kelabu sebelum proses pengelasan berupa grafit serpih, perlit dan ferit, setelah dilakukan proses pengelasan mempunyai struktur mikro berupa matrik ferit dan grafit pada daerah logam las, matrik perlit kasar dan grafit serpih pada daerah *HAZ* dan struktur perlit, grafit serpih dan ferit pada daerah logam induk.
5. Bentuk penampang patah yang dihasilkan dari uji tarik untuk kelompok *raw material* dan kelompok pengelasan, semua berbentuk *granular* dan rata, ini merupakan ciri dari material getas.

B. Saran

Saran yang dapat diberikan sehubungan dengan penelitian tentang pengelasan besi cor kelabu dan proses *post weld heat treatment annealing* adalah peneliti menyarankan kepada kalangan akademisi, praktisi bahwa:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambah variasi suhu dalam proses *post weld heat treatment annealing* sehingga dapat diperoleh hasil yang optimal untuk meningkatkan sifat mekanis material besi cor kelabu.
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menambahkan variasi pengujian yaitu dengan pengujian *impact*.



DAFTAR PUSTAKA

- Arifin S. 1977, *Las Listrik dan Otogen*, Jakarta: Ghalia Indonesia.
- Beumer B. J. M. 1980, *Pengetahuan Bahan jilid III*, Jakarta: Bhratara Karya Aksara.
- Bintoro G. 2000, *Dasar-dasar Pekerjaan Las*, Yogyakarta: Kanisius.
- Encarta Microsoft 2000” *Hardening Testing Machine*”,
<http://encarta.msn.Com/>,
 US, diakses tanggal 16 Juli 2006**
- Derucher K. N. 1981, *Materials For Civil And Highway Engineers*, New Jersey: Prentice Hall, Inc.**
- Van Vlack L. H. dan Djaprie S. 1992, *Ilmu dan Teknologi Bahan*, Jakarta: Erlangga.
- Smallman, 1999, *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*, Jakarta: Erlangga.
- Suharto, 1991, *Teknologi Pengelasan Logam*, Jakarta: Rineka Cipta.
- Sumanto, 1996, *Pengetahuan Bahan Untuk Mesin dan Listrik*, Yogyakarta: Andi Offset.
- Sonawan H. dan Suratman R. 2004, *Pengantar Untuk Memahami Proses Pengelasan Logam*, Bandung: CV Alfabeta.
- Surdia T. dan Chijjiwa K. 2000, *Teknik Pengecoran Logam*, Jakarta: PT Pradnya Paramitha.
- Surdia T. dan Saito S. 1985, *Pengetahuan Bahan Teknik*, Jakarta: PT Pradnya Paramitha.
- Widharto S. 2001, *Petunjuk Kerja Las*, Jakarta: PT Pradnya Paramitha.
- Wiryosumarto H. dan Okumura T. 2000, *Teknologi Pengelasan Logam*, Jakarta: PT Pradnya Paramita.

Lampiran I. Perhitungan Hasil Data Penelitian

A. Perhitungan Kekuatan Tarik (σ_u)

$$\sigma_u = \frac{F_u}{A_0}$$

dimana:

σ_u = Kekuatan tarik (kg/mm²)

F_u = Beban (kg)

A_0 = Luas penampang mula-mula (mm²)

1. Perhitungan kekuatan tarik untuk *raw material*

a. Spesimen 1

$$F_u = 10000 \times \frac{33,1}{100} = 3310 \longrightarrow \sigma_u = \frac{3310}{155,38} = 21,30 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 10000 \times \frac{35,3}{100} = 3530 \longrightarrow \sigma_u = \frac{3530}{152,88} = 23,09 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 10000 \times \frac{36,4}{100} = 3640 \longrightarrow \sigma_u = \frac{3640}{156,12} = 23,32 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{21,30 + 23,09 + 23,32}{3} = 22,57 \text{ kg/mm}^2$$

2. Perhitungan kekuatan tarik untuk pengelasan *non PWHT*

a. Spesimen 1

$$F_u = 4000 \times \frac{24,7}{100} = 988 \longrightarrow \sigma_u = \frac{988}{155,98} = 6,33 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 4000 \times \frac{46,2}{100} = 1848 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1848}{156,50} = 11,81 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 4000 \times \frac{44,8}{100} = 1792 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1792}{157} = 11,41 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{6,33 + 11,81 + 11,41}{3} = 9,85 \text{ kg/mm}^2$$

3. Perhitungan kekuatan tarik untuk pengelasan dengan PWHT 150°C

a. Spesimen 1

$$F_u = 10000 \times \frac{20}{100} = 2000 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2000}{151,38} = 13,2 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 4000 \times \frac{47,6}{100} = 1904 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1904}{151} = 12,61 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 4000 \times \frac{36,6}{100} = 1464 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1464}{153} = 9,57 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{13,2 + 12,61 + 9,57}{3} = 11,79 \text{ kg/mm}^2$$

4. Perhitungan kekuatan tarik untuk pengelasan dengan PWHT 300°C

a. Spesimen 1

$$F_u = 4000 \times \frac{47}{100} = 1880 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1880}{155,75} = 12,07 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 4000 \times \frac{50,9}{100} = 2036 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2036}{155,75} = 13,07 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 4000 \times \frac{47,3}{100} = 1892 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1892}{157,13} = 12,04 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{12,07 + 13,07 + 12,04}{3} = 12,39 \text{ kg/mm}^2$$

5. Perhitungan kekuatan tarik untuk pengelasan dengan PWHT 450°C

a. Spesimen 1

$$F_u = 10000 \times \frac{25,4}{100} = 2540 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2540}{155,61} = 16,32 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 10000 \times \frac{15,2}{100} = 1520 \longrightarrow \sigma_u = \frac{1520}{151,76} = 10,02 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 10000 \times \frac{25,7}{100} = 2570 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2570}{158,12} = 16,25 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{16,32 + 10,02 + 16,25}{3} = 14,20 \text{ kg/mm}^2$$

6. Perhitungan kekuatan tarik untuk pengelasan dengan PWHT 600°C

a. Spesimen 1

$$F_u = 4000 \times \frac{50,4}{100} = 2016 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2016}{154,88} = 13,02 \text{ kg/mm}^2$$

b. Spesimen 2

$$F_u = 4000 \times \frac{62,9}{100} = 2516 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2516}{154,87} = 16,25 \text{ kg/mm}^2$$

c. Spesimen 3

$$F_u = 4000 \times \frac{65,3}{100} = 2612 \longrightarrow \sigma_u = \frac{2612}{154,13} = 16,95 \text{ kg/mm}^2$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{13,02 + 16,25 + 16,95}{3} = 15,41 \text{ kg/mm}^2$$

B. Perhitungan Pertambahan panjang (e)

$$e = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100 \%$$

dimana:

e = *elongation* (%)

L₁ = panjang setelah ditarik (mm)

L₀ = panjang sebelum ditarik (mm)

1. Perhitungan perpanjangan untuk *raw material*

a. Spesimen 1

$$e = \frac{50,23 - 50,19}{50,19} \times 100\% = 0,080 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{50,04 - 50,02}{50,02} \times 100\% = 0,040 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{49,81 - 49,80}{49,80} \times 100\% = 0,020 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,080 + 0,040 + 0,020}{3} = 0,047\%$$

2. Perhitungan perpanjangan untuk pengelasan *non PWHT*

a. Spesimen 1

$$e = \frac{50,26 - 50,20}{50,20} \times 100\% = 0,120 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{49,75 - 49,60}{49,60} \times 100\% = 0,302 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{50,35 - 50,30}{50,30} \times 100\% = 0,099 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,120 + 0,302 + 0,099}{3} = 0,174 \%$$

3. Perhitungan perpanjangan untuk pengelasan dengan PWHT 150⁰C

a. Spesimen 1

$$e = \frac{50,14 - 50,04}{50,04} \times 100\% = 0,200 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{50,17 - 50,05}{50,05} \times 100\% = 0,240 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{50,46 - 50,32}{50,32} \times 100\% = 0,278 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,200 + 0,240 + 0,278}{3} = 0,239 \%$$

4. Perhitungan perpanjangan untuk pengelasan dengan PWHT 300⁰C

a. Spesimen 1

$$e = \frac{50,59 - 50,43}{50,43} \times 100\% = 0,317 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{49,82 - 49,64}{49,64} \times 100\% = 0,363 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{50,88 - 50,74}{50,74} \times 100\% = 0,276 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,317 + 0,363 + 0,276}{3} = 0,319 \%$$

5. Perhitungan perpanjangan untuk pengelasan dengan PWHT 450⁰C

a. Spesimen 1

$$e = \frac{50,66 - 50,49}{50,49} \times 100\% = 0,337 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{50,53 - 50,33}{50,33} \times 100\% = 0,397 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{50,31 - 50,08}{50,08} \times 100\% = 0,459 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,337 + 0,397 + 0,459}{3} = 0,398 \%$$

6. Perhitungan perpanjangan untuk pengelasan dengan PWHT 600⁰C

a. Spesimen 1

$$e = \frac{49,73 - 49,50}{49,73} \times 100\% = 0,465 \%$$

b. Spesimen 2

$$e = \frac{50,49 - 50,24}{50,24} \times 100\% = 0,498 \%$$

c. Spesimen 3

$$e = \frac{50,69 - 50,45}{50,45} \times 100\% = 0,476 \%$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{0,465 + 0,498 + 0,476}{3} = 0,480 \%$$

C. Perhitungan Nilai Kekerasan (*Vickers Hardness Number*)

$$\text{VHN} = \frac{1,854 \cdot P}{D^2}, \quad D = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

dimana:

P = 30 kg

D = Ukuran jejak diamond rata-rata

d₁ = Ukuran jejak diamond horizontal

d₂ = Ukuran jejak diamond vertikal

1 mm = 28 strip pada skala pengujian

1. Nilai kekerasan *raw material*

$$\text{a. } D = \frac{14 + 14}{2} = 14 \text{ strip} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,5^2} = 222,48 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{15 + 13}{2} = 14 \text{ strip} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,5^2} = 222,48 \text{ VHN}$$

$$c. D = \frac{14,5 + 13}{2} = 14,25 \text{ strip} = 0,509 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,509^2} = 214,74 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{14 + 14}{2} = 14 \text{ strip} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,5^2} = 222,48 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{222,48 + 222,48 + 214,74 + 222,48}{4} = 220,55 \text{ VHN}$$

2. Nilai kekerasan spesimen pengelasan *non* PWHT
Daerah logam las

$$a. D = \frac{17 + 16}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{17 + 16}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$c. D = \frac{16 + 16}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{16 + 15,5}{2} = 15,75 \text{ strip} = 0,562 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,562^2} = 175,79 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{160,17 + 160,17 + 170,34 + 175,79}{4} = 166,62 \text{ VHN}$$

Daerah batas logam las dengan HAZ

$$\text{a. } D = \frac{15+14}{2} = 14,5 \text{ strip} = 0,518 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,518^2} = 207,40 \text{ VHN}$$

Daerah HAZ

$$\text{a. } D = \frac{14+14}{2} = 14 \text{ strip} = 0,5 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,5^2} = 222,48 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{14+13,7}{2} = 13,85 \text{ strip} = 0,495 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,495^2} = 227,34 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{222,48 + 227,34}{2} = 224,91 \text{ VHN}$$

Daerah batas HAZ dengan logam induk

$$\text{a. } D = \frac{14+14,5}{2} = 14,25 \text{ strip} = 0,509 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,509^2} = 214,74 \text{ VHN}$$

Daerah logam induk

$$\text{a. } D = \frac{15+14}{2} = 14,5 \text{ strip} = 0,518 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,518^2} = 207,40 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{15+15}{2} = 15 \text{ strip} = 0,536 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,536^2} = 193,8 \text{ VHN}$$

$$\text{c. } D = \frac{14,5+15}{2} = 14,75 \text{ strip} = 0,527 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,527^2} = 200,43 \text{ VHN}$$

$$\text{d. } D = \frac{16+15}{2} = 15,5 \text{ strip} = 0,554 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,554^2} = 181,50 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{207,40 + 193,80 + 200,43 + 181,50}{4} = 195,78 \text{ VHN}$$

3. Nilai kekerasan spesimen pengelasan PWHT 150°C

Daerah logam las

$$\text{a. } D = \frac{18+18}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{18+17}{2} = 17,5 \text{ strip} = 0,625 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,625^2} = 142,39 \text{ VHN}$$

$$\text{c. } D = \frac{17,5+18}{2} = 17,75 \text{ strip} = 0,634 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,634^2} = 138,40 \text{ VHN}$$

$$\text{d. } D = \frac{17+17,5}{2} = 17,25 \text{ strip} = 0,616 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,616^2} = 146,54 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{134,59 + 142,39 + 138,40 + 146,54}{4} = 140,48 \text{ VHN}$$

Daerah batas logam las dengan HAZ

$$\text{a. } D = \frac{17+16}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

Daerah HAZ

a. $D = \frac{15 + 14,5}{2} = 14,75 \text{ strip} = 0,527 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,527^2} = 200,43 \text{ VHN}$$

b. $D = \frac{15 + 14}{2} = 14,5 \text{ strip} = 0,518 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,518^2} = 207,40 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{200,43 + 207,40}{2} = 203,92 \text{ VHN}$$

Daerah batas HAZ dengan logam induk

a. $D = \frac{15 + 14,5}{2} = 14,75 \text{ strip} = 0,527 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,527^2} = 200,43 \text{ VHN}$$

Daerah logam induk

a. $D = \frac{16 + 15}{2} = 15,5 \text{ strip} = 0,554 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,554^2} = 181,50 \text{ VHN}$$

b. $D = \frac{15 + 16,5}{2} = 15,75 \text{ strip} = 0,563 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,563^2} = 175,79 \text{ VHN}$$

c. $D = \frac{17 + 15}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{181,50 + 175,79 + 170,34 + 160,17}{4} = 171,95 \text{ VHN}$$

4. Nilai kekerasan spesimen pengelasan PWHT 300⁰C

Daerah logam las

$$a. D = \frac{18+18}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{18,5+18}{2} = 18,25 \text{ strip} = 0,652 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,652^2} = 130,92 \text{ VHN}$$

$$c. D = \frac{18+18}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{17,5+18}{2} = 17,75 \text{ strip} = 0,634 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,634^2} = 138,40 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{134,59 + 130,92 + 134,59 + 138,40}{4} = 134,63 \text{ VHN}$$

Daerah batas logam las dengan HAZ

$$a. D = \frac{17+16}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

Daerah HAZ

$$a. D = \frac{17+16}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{15+16}{2} = 15,5 \text{ strip} = 0,554 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,554^2} = 181,50 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{160,17 + 181,50}{2} = 170,84 \text{ VHN}$$

Daerah batas HAZ dengan logam induk

$$a. D = \frac{16+16}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

Daerah logam induk

$$a. D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{17,5+16}{2} = 16,75 \text{ strip} = 0,598 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,598^2} = 155,42 \text{ VHN}$$

$$c. D = \frac{17+17}{2} = 17 \text{ strip} = 0,607 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,607^2} = 150,89 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{17+17}{2} = 17 \text{ strip} = 0,607 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,607^2} = 150,89 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{160,17 + 155,42 + 150,89 + 150,89}{4} = 154,34 \text{ VHN}$$

5. Nilai kekerasan spesimen pengelasan PWHT 450°C

Daerah logam las

$$\text{a. } D = \frac{18,5 + 18}{2} = 18,25 \text{ strip} = 0,652 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,652^2} = 130,92 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{18 + 18}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$\text{c. } D = \frac{18,5 + 18}{2} = 18,25 \text{ strip} = 0,652 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,652^2} = 130,92 \text{ VHN}$$

$$\text{d. } D = \frac{17,5 + 18}{2} = 17,75 \text{ strip} = 0,634 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,634^2} = 138,40 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{130,92 + 134,59 + 130,92 + 138,40}{4} = 133,71 \text{ VHN}$$

Daerah batas logam las dengan HAZ

$$\text{a. } D = \frac{15 + 16}{2} = 15,5 \text{ strip} = 0,554 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,554^2} = 181,50 \text{ VHN}$$

Daerah HAZ

$$\text{a. } D = \frac{16 + 16}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{170,34 + 160,17}{2} = 165,26 \text{ VHN}$$

Daerah batas HAZ dengan logam induk

$$\text{a. } D = \frac{16+16}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

Daerah logam induk

$$\text{a. } D = \frac{17+17}{2} = 17 \text{ strip} = 0,607 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,607^2} = 150,84 \text{ VHN}$$

$$\text{b. } D = \frac{16,5+16}{2} = 16,25 \text{ strip} = 0,580 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,580^2} = 165,14 \text{ VHN}$$

$$\text{c. } D = \frac{16,5+16}{2} = 16,25 \text{ strip} = 0,580 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,580^2} = 165,14 \text{ VHN}$$

$$\text{d. } D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{150,84 + 165,14 + 165,14 + 160,17}{4} = 160,34 \text{ VHN}$$

6. Nilai kekerasan spesimen pengelasan PWHT 600°C
Daerah logam las

$$a. D = \frac{20+17}{2} = 18,5 \text{ strip} = 0,661 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,661^2} = 127,30 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{18+18}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$c. D = \frac{19+18,5}{2} = 18,75 \text{ strip} = 0,670 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,670^2} = 124,04 \text{ VHN}$$

$$d. D = \frac{17+19}{2} = 18 \text{ strip} = 0,643 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,643^2} = 134,59 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{127,30 + 134,59 + 124,04 + 134,59}{4} = 130,13 \text{ VHN}$$

Daerah batas logam las dengan HAZ

$$a. D = \frac{16+16}{2} = 16 \text{ strip} = 0,571 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,571^2} = 170,34 \text{ VHN}$$

Daerah HAZ

$$a. D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$b. D = \frac{16+17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{160,17 + 160,17}{2} = 160,17 \text{ VHN}$$

Daerah batas HAZ dengan logam induk

a. $D = \frac{16 + 17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

Daerah logam induk

a. $D = \frac{17,5 + 16}{2} = 16,75 \text{ strip} = 0,598 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,598^2} = 155,42 \text{ VHN}$$

b. $D = \frac{16 + 17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

c. $D = \frac{17 + 17}{2} = 17 \text{ strip} = 0,607 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,607^2} = 150,84 \text{ VHN}$$

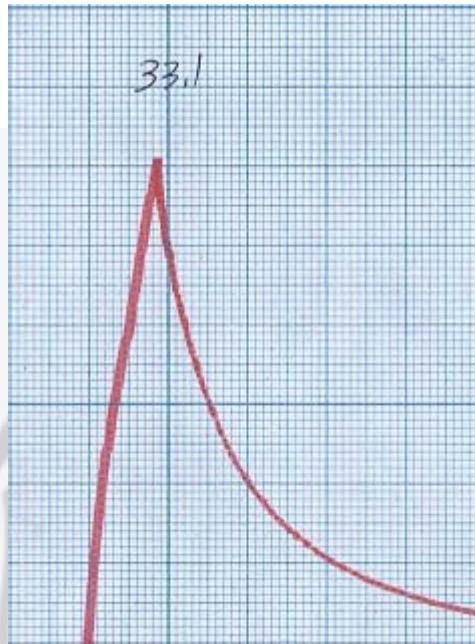
d. $D = \frac{16 + 17}{2} = 16,5 \text{ strip} = 0,589 \text{ mm}$

$$\text{Nilai kekerasan} = \frac{1,854 \times 30}{0,589^2} = 160,17 \text{ VHN}$$

$$\text{Rata-rata} = \frac{155,42 + 160,17 + 150,84 + 160,17}{4} = 156,65 \text{ VHN}$$

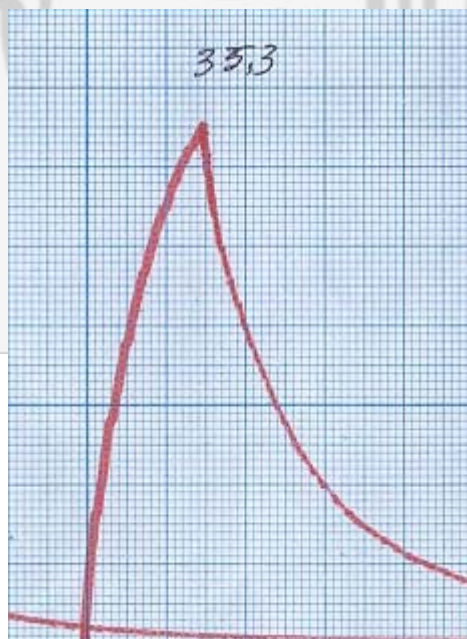
Lampiran II. Grafik Hasil Uji Tarik

A. Grafik uji tarik untuk kelompok *raw material*



Spesimen 1

F	= 10.000 kg
A _o	= 155,38 mm ²
L _o	= 50,19 mm
L ₁	= 50,23 mm
e	= 0,080%
σ _u	= 21,30 kg/mm ²



Spesimen 2

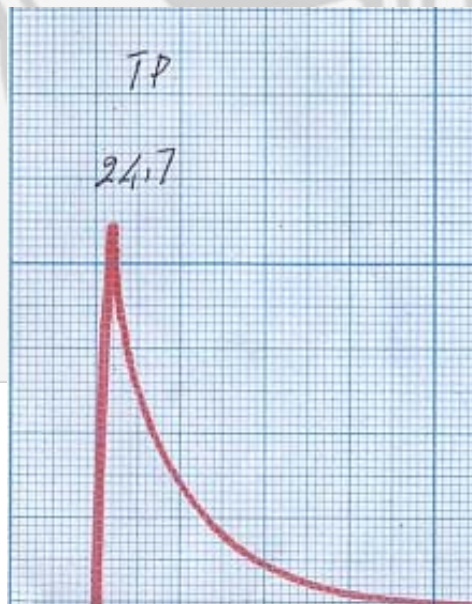
F	= 10.000 kg
A _o	= 152,88 mm ²
L _o	= 50,02 mm
L ₁	= 50,04 mm
e	= 0,040%
σ _u	= 23,09 kg/mm ²



Spesimen 3

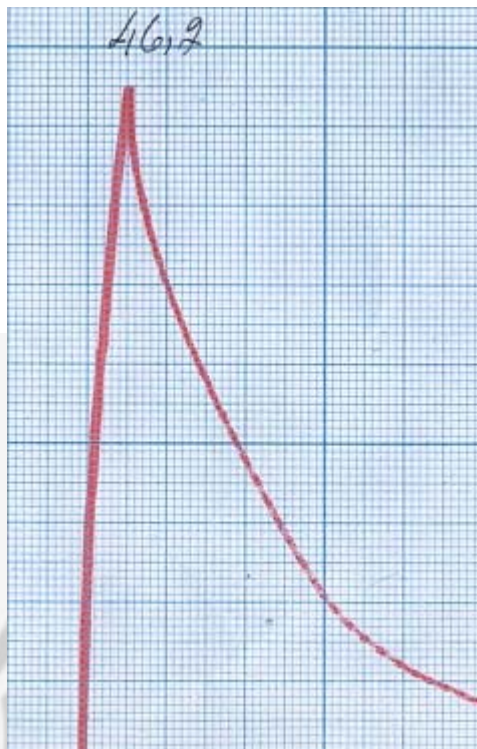
F	= 10.000 kg
A _o	= 156,12 mm ²
L _o	= 49,80mm
L ₁	= 49,81 mm
e	= 0,020%
σ _u	= 23,32 kg/mm ²

B. Grafik uji tarik untuk kelompok pengelasan *non* PWHT



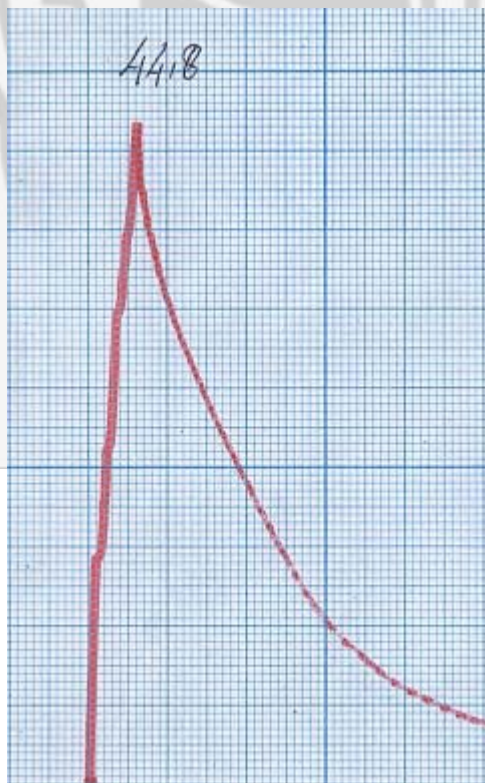
Spesimen 1

F	= 4.000 kg
A _o	= 155,98 mm ²
L _o	= 50,20 mm
L ₁	= 50,26 mm
e	= 0,120%
σ _u	= 6,33 kg/mm ²



Spesimen 2

F	= 4.000 kg
A _o	= 156,50 mm ²
L _o	= 49,60 mm
L ₁	= 49,75 mm
e	= 0,302%
σ _u	= 11,81 kg/mm ²



Spesimen 3

F	= 4.000 kg
A _o	= 157 mm ²
L _o	= 50,30 mm
L ₁	= 50,35 mm
e	= 0,099%
σ _u	= 11,41 kg/mm ²

C. Grafik uji tarik untuk kelompok pengelasan PWHT 150°C



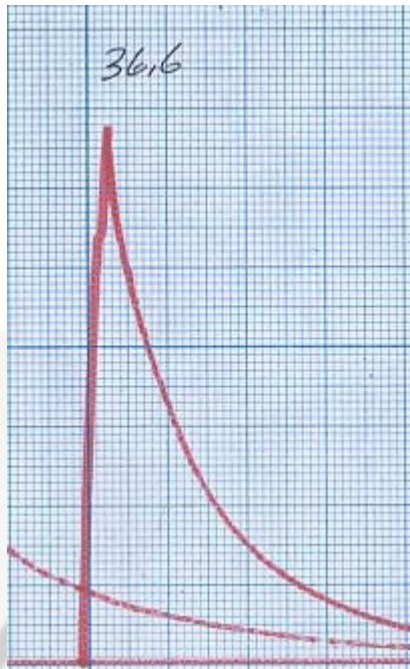
Spesimen 1

F	= 10.000 kg
A _o	= 151,38 mm ²
L _o	= 50,04 mm
L ₁	= 50,14 mm
e	= 0,200%
σ _u	= 13,20 kg/mm ²



Spesimen 2

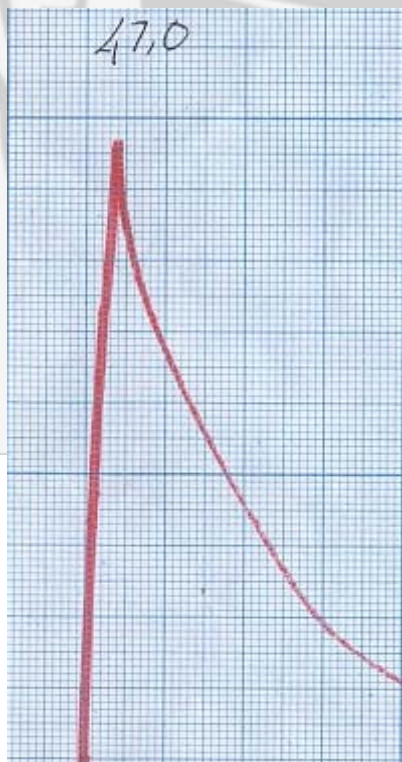
F	= 4.000 kg
A _o	= 151 mm ²
L _o	= 50,05 mm
L ₁	= 50,17 mm
e	= 0,240%
σ _u	= 12,61 kg/mm ²



Spesimen 3

F	= 4.000 kg
A _o	= 153 mm ²
L _o	= 50,32 mm
L ₁	= 50,46 mm
e	= 0,278%
σ _u	= 9,57 kg/mm ²

D. Grafik uji tarik untuk kelompok pengelasan PWHT 300°C



Spesimen 1

F	= 4.000 kg
A _o	= 155,75 mm ²
L _o	= 50,43 mm
L ₁	= 50,59 mm
e	= 0,317%
σ _u	= 12,07 kg/mm ²



Spesimen 2

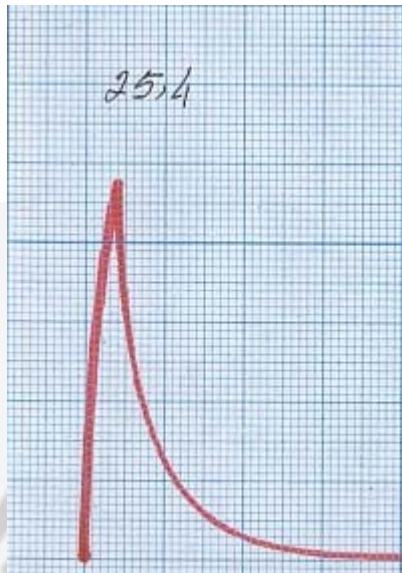
F	= 4.000 kg
A_0	= 155,75 mm ²
L_0	= 49,64 mm
L_1	= 49,82 mm
e	= 0,363%
σ_u	= 13,07 kg/mm ²



Spesimen 3

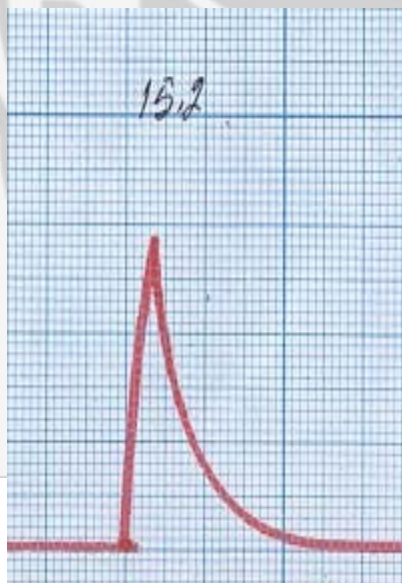
F	= 4.000 kg
A_0	= 157,13 mm ²
L_0	= 50,74 mm
L_1	= 50,88 mm
e	= 0,276%
σ_u	= 12,04 kg/mm ²

E. Grafik uji tarik untuk kelompok pengelasan PWHT 450°C



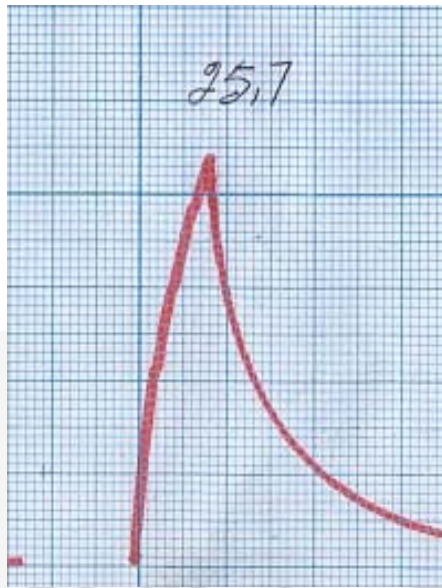
Spesimen 1

F	= 10.000 kg
A _o	= 155,61 mm ²
L _o	= 50,49 mm
L ₁	= 50,66 mm
e	= 0,337%
σ _u	= 16,32 kg/mm ²



Spesimen 2

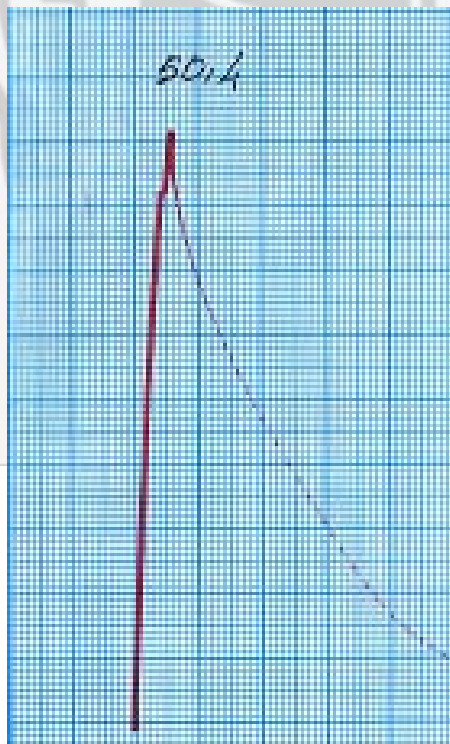
F	= 10.000 kg
A _o	= 151,76 mm ²
L _o	= 50,33 mm
L ₁	= 50,53 mm
e	= 0,397%
σ _u	= 10,02 kg/mm ²



Spesimen 3

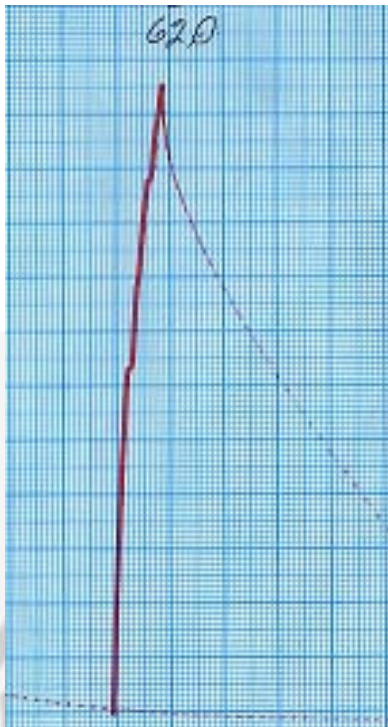
F	= 10.000 kg
A _o	= 158,12 mm ²
L _o	= 50,08 mm
L ₁	= 50,31 mm
e	= 0,459%
σ _u	= 16,25 kg/mm ²

F. Grafik uji tarik untuk kelompok pengelasan PWHT 600^oC



Spesimen 1

F	= 4000 kg
A _o	= 154,88 mm ²
L _o	= 49,50 mm
L ₁	= 49,73 mm
e	= 0,465%
σ _u	= 13,02 kg/mm ²



Spesimen 2

F	= 4000 kg
A_o	= 154,87 mm ²
L_o	= 50,24 mm
L_1	= 50,49 mm
e	= 0,498%
σ_u	= 16,25 kg/mm ²



Spesimen 3

F	= 4000 kg
A_o	= 154,13 mm ²
L_o	= 50,45 mm
L_1	= 50,69 mm
e	= 0,476%
σ_u	= 16,95 kg/mm ²

