

**PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP LAJU
PENDINGINAN DAN KEKUATAN IMPAK HASIL PENGELASAN BAJA QTS**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**ZHENA HARYO PRASETYAWAN
NIM. 0910620102-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2014

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP LAJU
PENDINGINAN DAN KEKUATAN IMPAK HASIL PENGELASAN BAJA QTS**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

ZHENA HARYO PRASETYAWAN

NIM. 0910620102-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng.
NIP. 19710310 199802 1 001

Sugiarto, ST., MT.
NIP. 19690417 199512 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP LAJU
PENDINGINAN DAN KEKUATAN IMPAK HASIL PENGELASAN BAJA QTS**

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

**ZHENA HARYO PRASETYAWAN
NIM. 0910620102-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus
Pada tanggal 30 Januari 2014

Dosen Penguji

Skripsi I

Skripsi II

Prof.Dr.Ir. Rudy Soenoko,M.Eng.Sc.
NIP. 19490911 198403 1 001

Dr.Eng. Widya Wijayanti, ST.,MT.
NIP. 19750802 199903 2 002

Skripsi III

Dr.Eng Yudi Surya Irawan, ST.,M.Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Mengetahui,
Sekretaris Jurusan Teknik Mesin FT-UB

Purnami, ST.,MT.
NIP. 19770707 200812 1 005

KATA PENGANTAR

Puji Syukur ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik dan benar. Sholawat serta salam semoga selalu diberikan kepada Nabi besar Muhammad SAW yang telah menyempurnakan peradaban manusia.

Penyusunan dan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

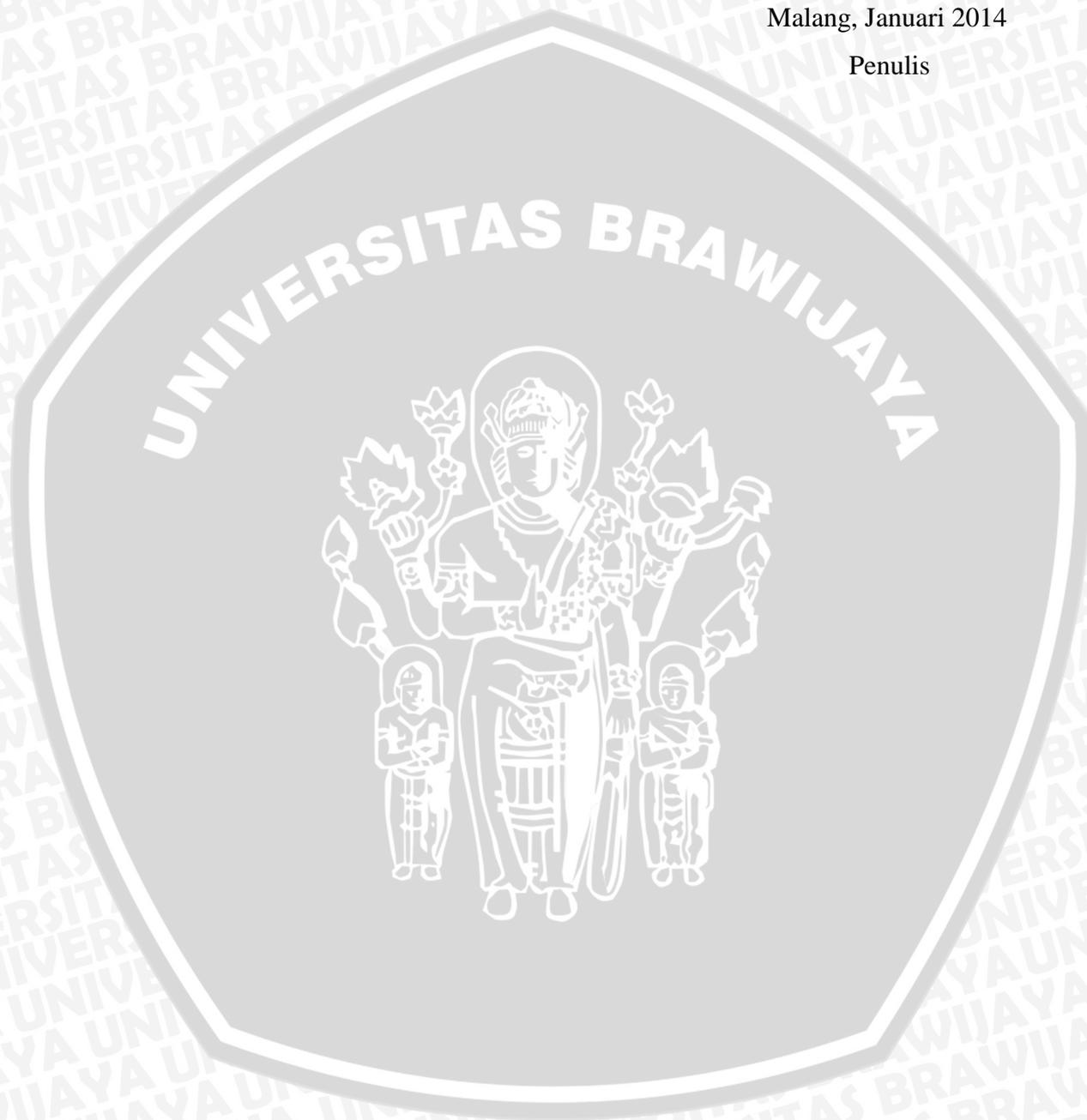
1. Ayahku Suwito dan Ibuku Sulastri yang telah mendukung seluruh hidup saya.
2. Bapak Dr.Eng Nurcholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Purnami ST., MT selaku Sekertaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Dr.Eng Anindito Purwowododo, ST, M.Eng. selaku Dosen Pembimbing I atas bimbingan, motivasi dan nasehat selama penyusunan skripsi ini.
5. Bapak Sugiarto ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II atas bimbingan dan motivasi agar penyusunan skripsi ini selesai dengan baik.
6. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya yang bersedia berbagi ilmunya.
7. Bapak Arif selaku laboran Laboratorium Proses Produksi I yang telah sangat banyak membantu proses penyelesaian penelitian ini.
8. Kakakku Diah Putri Setyawati dan adikku Rizky Fandi Nagara yang banyak memberikan dukungan moril selama pengerjaan penelitian ini.
9. Yanuar Rohmat dan Chandra Susilo Putro selaku teman seperjuangan yang banyak sekali membantu proses pengerjaan penelitian ini.
10. Seluruh Civitas Recording yang telah membantu selama kegiatan akademis maupun kelancaran selama penyusunan skripsi ini.
11. Teman-teman Asisten Laboratorium Proses Produksi I: Trendy Alfrian, Ramdha, Agung, Jono, Hafid, Momon, Yudis, dan Alim yang telah banyak membantu berlangsungnya penelitian ini dan selalu ada untuk tempat diskusi.
12. Mabes TNI beserta Pembina mahasiswa beasiswa TNI yang selalu memberi masukan dan saran untuk saya.

13. Saudara Hasan M'09 dan segenap saudara- saudara BLACK MAMBA yang yang telah banyak membantu dan selalu penuh semangat memotivasi saya.

Akhirnya semoga sekripsi ini dapat memberikan manfaat yang positif pada pembaca. Semoga memunculkan ide baru, saran dan kritik yang membangun untuk kedepannya.

Malang, Januari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
RINGKASAN	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Proses Pengelasan	5
2.2.1 Definisi dan Klasifikasi Proses Pengelasan	5
2.2.2 Pengelasan Baja Karbon	6
2.2.3 GMAW (Gas Metal Arc Welding).....	7
2.3 Baja QTS (<i>Quench Tempered Steel</i>).....	8
2.4 Konveksi Pada <i>Weld Pool</i>	8
2.5 Siklus Termal dan distribusi Panas Pengelasan	12
2.6 Laju Pendinginan	14
2.7 Medan Magnet Solenoida	16
2.8 Kekuatan Impak	18
2.8.1 Pengertian Kekuatan Impak	18
2.8.2 Pengujian Impak.....	18
2.8.3 Macam-macam Pengujian Impak.....	19
2.8.4 Macam-macam Spesimen Impak	20
2.8.5 Rumus Perhitungan	21
2.8.6 Macam-macam Patahan dan sifatnya	22

2.9 Hipotesa	23
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian	24
3.2 Tempat Dan Waktu Penelitian	24
3.3 Variabel Penelitian	24
3.4 Alat Dan Bahan Yang Digunakan.....	25
3.4.1 Peralatan Yang Digunakan	25
3.4.2 Bahan Yang Digunakan	30
3.5 Bentuk Spesimen Pengelasan	30
3.6 Instalasi Penelitian	31
3.6 Prosedur Penelitian	31
3.6.1 Prosedur Pengambilan Data Besar Induksi Magnet.....	31
3.6.2 Prosedur Pengelasan	32
3.6.2 Prosedur Pengujian dan Pengambilan Data Kekuatan Impak....	26
3.7 Rancangan Penelitian.....	33
3.8 Diagram Alir Penelitian	35
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisa Data.....	36
4.1.1 Data Hasil Pengukuran Induksi Magnet Eksternal	36
4.1.2 Data Temperatur	36
4.1.3 Data Hasil Pengujian Kekuatan Impak	36
4.1.4 Hasil Perhitungan Energi	37
4.1.5 Hasil Perhitungan Harga Impak.....	38
4.2 Pembahasan	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	46
5.2 Saran	46
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Klasifikasi Baja Karbon	7
Tabel 2.2	Komposisi baja <i>Hot Roll Quench Tempered Steel</i> produksi PT. Krakatau steel	8
Tabel 2.3	Nilai permeabilitas relatif beberapa material	17
Tabel 3.1	Komposisi unsur Baja QTS	28
Tabel 3.2	Rancangan Data Hasil Pengujian Besar Induksi Magnet Rata-rata	33
Tabel 3.3	Rancangan Data hasil pengukuran suhu pengelasan pada jarak 10 mm dari pusat lasan.	34
Tabel 3.4	Rancangan data besar energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen.	34
Tabel 4.1	Hasil Pengukuran Besar Induksi Magnet	36
Tabel 4.2	Data Kekuatan Impak	37



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi Cara Pengelasan	6
Gambar 2.2	(a) Arah gaya pada kolam las karena gaya angkat permukaan dan (b) Aliran pada kolam las karena gaya angkat permukaan.	9
Gambar 2.3	(e) Arah gaya pada kolam las karena gaya tegangan permukaan dan (f) Aliran pada kolam las karena gaya tegangan permukaan	10
Gambar 2.4	(g) Arah gaya pada kolam las karena gaya akibat tegangan geser busur dan (h) Aliran pada kolam las gaya akibat tegangan geser busur plasma	10
Gambar 2.5	(c) Arah gaya pada kolam las karena gaya elektromagnetik (d) Aliran pada kolam las gaya elektromagnetik	11
Gambar 2.6	Pengaruh peningkatan konveksi terhadap nilai efektif konduktifitas termal logam las cair.	12
Gambar 2.7	Siklus termal sebagai fungsi jarak dari pusat lasan	14
Gambar 2.8	Siklus termal dengan macam-macam waktu pendinginan	15
Gambar 2.9	Arah garis medan magnet dalam solenoida	17
Gambar 2.10	Kerja alat uji impak	19
Gambar 2.11	Penempatan spesimen : a) pada uji <i>charpy</i> , b) pada uji izod	20
Gambar 2.12	Macam – macam specimen uji Impak	21
Gambar 2.13	Skema <i>charpy</i> Impak test	22
Gambar 3.1	Mesin Las MIG	25
Gambar 3.2	Data Logger	26
Gambar 3.3	Kabel termokopel tipe K	26
Gambar 3.4	Kamera	26
Gambar 3.5	<i>Scanning Electron Microscope</i>	27
Gambar 3.6	Adaptor	27
Gambar 3.7	Solenoida	27

Gambar 3.8	Jangka Sorong	28
Gambar 3.9	Teslameter	28
Gambar 3.10	Alat Uji Impak Charpy	28
Gambar 3.11	Power Hack Saw	29
Gambar 3.12	Mesin Milling	29
Gambar 3.13	<i>Wire Cut Machine</i>	29
Gambar 3.14	Bentuk dan Ukuran Spesimen Pengelasan	30
Gambar 3.15	Instalasi Penelitian	31
Gambar 3.16	Spesimen Uji Impak	33
Gambar 3.17	Diagram Alir Penelitian	35
Gambar 4.1	Grafik Siklus Termal Pada Jarak 10 mm dari Pusat Las	39
Gambar 4.2	Laju Pendinginan pada Jarak 10 mm Dari Pusat Las	40
Gambar 4.3	Struktur Butir Logam Las Pada Perbesaran 400 x	41
Gambar 4.4	Grafik Kekuatan Impak Hasil Lasan	42
Gambar 4.5	Permukaan Patahan Pengujian Impak	43
Gambar 4.6	Permukaan patahan hasil SEM	44



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Foto Mikrostruktur <i>Base Metal</i>
Lampiran 2	Tabel Data Temperatur
Lampiran 3	Tabel Data waktu Pendinginan
Lampiran 4	Grafik siklus termal pada jarak 15 dan 20 mm dari pusat las
Lampiran 5	Foto Hasil Pengelasan
Lampiran 6	Foto Spesimen Uji Impak
Lampiran 7	Hasil uji <i>hot rolled steels</i>
Lampiran 8	Surat Keterangan Penelitian VEDC
Lampiran 9	Surat Keterangan Penelitian Laboratorium Pengujian Bahan
Lampiran 10	Foto Kegiatan Penelitian
1.	Pemotongan Spesimen
2.	Pembuatan Kampuh Las
3.	Instalasi Penelitian
4.	Pemasangan Benda Kerja
5.	Proses Pengelasan
6.	Pengujian Kekuatan Impak

DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Kerapatan fluks magnet	Tesla atau T	T
Rapat arus listrik	Ampere atau A	I
Temperatur dalam celcius	Derajat celcius atau °C	T
Massa	Kilogram atau kg	m
Panjang	Meter atau m	l
Energi	Joule atau J	E
Gaya	Newton atau N	F



RINGKASAN

Zhena Haryo Prasetyawan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, Pengaruh Induksi Magnet Eksternal Terhadap Laju Pendinginan dan Kekuatan Impak Hasil Pengelasan Baja QTS, Dosen Pembimbing: Anindito Purnowidodo dan Sugiarto.

Baja *hot roll quenched* merupakan baja karbon rendah yang memiliki kadar karbon 0,29%. Baja ini diproduksi dengan proses rol panas yang kemudian disemprot dengan air. Untuk meningkatkan ketangguhan baja tersebut dilakukan proses finishing berupa perlakuan panas tempering sehingga produk plat ini dinamai *hot roll Quench Tempered Steel* (QTS). Baja ini umumnya digunakan sebagai bahan di industri pertahanan terutama untuk pembuatan kendaraan tempur yang biasa disebut baja armor. Namun baja QTS ini masih memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya (*weldability*). Indikasinya adalah hasil konstruksi las dari baja QTS dalam beberapa waktu mengalami retak-retak atau mengalami *delay cracking*. Retak yang merambat pada baja QTS diduga disebabkan oleh struktur yang didominasi oleh martensit. Pada umumnya pengelasan baja martensit perlu dilakukan proses PWHT yang bertujuan untuk menurunkan laju pendinginan pasca pengelasan dan memperbaiki sifat mekanik. Metode alternatif yang dapat menurunkan laju pendinginan pasca pengelasan dan dapat memperbaiki sifat mekanik hasil lasan adalah dengan menambahkan induksi magnet eksternal.

Dalam penelitian ini dilakukan proses pengelasan pada pelat QTS dengan tebal 10 mm menggunakan las MIG. Arus pengelasan yang digunakan adalah 140 A dengan kecepatan pengelasan 15 cm/menit. Kawat elektroda yang digunakan adalah tipe AWS ER 70-S6 dengan diameter 1 mm. Gas pelindung yang digunakan adalah CO₂. Induksi magnet eksternal diberikan selama pengelasan dengan variasi arus yang dialirkan ke solenoida yang memiliki dimensi 100 x 100 x 10 mm dan jumlah lilitan 150 dengan diameter kawat 0,7 mm yaitu sebesar 0, 3, 6, 9, 12 dan 15 A. Variasi arus tersebut menghasilkan induksi magnet sebesar 0 mT; 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT dan 9,03 mT. Solenoida diposisikan sejajar di belakang masing-masing spesimen yang akan dilas. Dengan kata lain kedua solenoida yang digunakan menjepit kedua spesimen yang dilas.

Hasil penelitian ini dari siklus termal yang didapatkan temperatur puncak yang semakin turun yaitu 658.3; 536.2; 503.8; 465.4; 453.8; 406.7 °C. Dan dengan mengambil range temperatur antara 400 °C hingga 200 °C didapatkan bahwa tanpa induksi magnetik mengalami pendinginan cepat dan pada penambahan induksi 9,03 mT mengalami pendinginan lambat. Kekuatan impak yang didapatkan 1,2;1,32;1,45;1,49;1,62;1,95 J/mm² menunjukkan bahwa semakin besar induksi magnet yang ditambahkan akan menurunkan temperatur puncak sehingga menurunkan laju pendinginan yang menyebabkan kekuatan impaknya semakin tinggi.

Kata kunci : induksi magnet, laju pendinginan, kekuatan impak, pengelasan baja QTS

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi pengelasan merupakan salah satu jenis teknologi penyambungan logam yang telah digunakan secara luas dalam konstruksi permesinan. Selain itu luasnya penggunaan penyambungan dengan las dikarenakan faktor biaya yang relatif murah dan dapat memberikan fleksibilitas yang tinggi dalam desain. Untuk memperoleh sambungan logam hasil pengelasan yang memiliki sifat mekanik sesuai dengan konstruksi yang direncanakan terdapat beberapa parameter yang perlu diperhatikan dalam proses pengelasan.

Baja *hot roll quenched* merupakan baja karbon rendah yang memiliki kadar karbon 0,29%. Baja ini diproduksi dengan proses rol panas yang kemudian disemprot dengan air. Untuk meningkatkan ketangguhan baja tersebut dilakukan proses finishing berupa perlakuan panas tempering sehingga produk plat ini dinamai *hot roll Quench Tempered Steel* (QTS). Baja ini umumnya digunakan sebagai bahan di industri pertahanan terutama untuk pembuatan kendaraan tempur yang biasa disebut baja armor. Namun baja QTS ini masih memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya (*weldability*). Indikasinya adalah hasil konstruksi las dari baja QTS dalam beberapa waktu mengalami retak atau mengalami *delay cracking*. Retak yang merambat pada baja QTS diduga disebabkan oleh struktur yang didominasi oleh martensit.

Pada umumnya struktur mikro dari baja tergantung dari laju pendinginannya pasca pengelasan dari suhu austenit ke suhu kamar. Karena perubahan struktur ini maka dengan sendirinya sifat-sifat mekanik yang dimilikinya juga berubah (Wirjosumatro,2008). Jika kecepatan pendinginan naik yang berarti waktu pendinginan dari suhu austenite turun, struktur akhir yang terjadi berturut-turut dari kecepatan yang rendah adalah berubah dari campuran ferit-perlit ke campuran ferit –perlit-bainit-martensit, ferit-bainit-martensit, kemudian bainit-martensit dan akhirnya pada kecepatan yang tinggi sekali strukturnya adalah martensit.

Davis Joseph R. (1994:351) dalam tulisannya menyatakan bahwa pada pengelasan baja martensit daerah sambungan dan sebagian daerah HAZ yang dipanaskan melewati suhu austenit berubah menjadi rapuh. Konsekuensinya adalah dengan melakukan PWHT (*Post Weld Heat Treatment*) yang bertujuan untuk menurunkan laju pendinginan dan menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah

proses pengelasan. Sehingga memiliki ketangguhan terhadap retak. Dari tulisan Davis Joseph R. diketahui bahwa pada pengelasan baja martensit akan berdampak pada kerapuhan akibat pendinginan yang cepat, oleh karenanya dilakukan proses PWHT agar dapat menurunkan laju pendinginan dan menghilangkan tegangan sisa.

Sebenarnya ada cara selain proses PWHT yang bertujuan untuk menurunkan laju pendinginan, misalnya dengan meningkatkan gaya elektromagnetik. Gaya elektromagnetik dapat ditingkatkan dengan cara meningkatkan arus listrik yang digunakan dalam pengelasan sehingga rapat arus (J) dan rapat fluks magnet meningkat atau dengan cara meningkatkan fluks magnetik (B) dengan menambahkan medan magnet eksternal. Peningkatan gaya elektromagnetik dengan memperbesar arus pengelasan akan memperbesar masukan panas dan menimbulkan masalah baru seperti tegangan sisa, distorsi, dan perubahan struktur mikro (Messler, 1999:306), sehingga kurang menguntungkan.

Metode alternatif yang dapat digunakan guna meningkatkan gaya elektromagnetik adalah dengan cara menambahkan medan magnet eksternal dari luar yang dapat berupa solenoida yang menghasilkan induksi magnet yang kemudian berakumulasi dengan induksi magnet yang dihasilkan arus pengelasan, sehingga rapat fluks magnet akan semakin besar. Dengan semakin meningkatnya gaya elektromagnetik, maka laju konveksi logam cair semakin besar. Hal ini ternyata merubah nilai efektif konduktifitas termal dari logam las cair (k_L) menjadi lebih besar dikarenakan proses transfer panas pada kolam las menjadi lebih efektif, sehingga temperatur puncak kolam las menjadi lebih rendah (Kou Sindo, 1987:49). Jika temperatur puncak kolam las semakin rendah (T_p turun) maka laju pendinginan pasca pengelasan juga akan turun. Dampaknya adalah struktur butiran yang terbentuk akan semakin besar sehingga mempengaruhi sifat mekanik suatu baja.

Berdasarkan uraian diatas maka diperlukan suatu penelitian dengan melakukan penambahan induksi magnet eksternal pada pengelasan baja *Hot Roll Quench Tempered Steel*. Diharapkan dengan penelitian ini dapat dihasilkan hasil lasan yang berkualitas baik.

1.2 Rumusan Masalah

Berasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan diteliti adalah “Bagaimana pengaruh induksi magnet eksternal terhadap laju pendinginan dan kekuatan impak hasil pengelasan baja QTS?”

1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tidak meluas dan terfokus, maka perlu dilakukan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Spesifikasi bahan yang digunakan adalah baja *Hot roll Quench-Tempered Steel*
2. Variasi besar arus yang diberikan pada medan magnet 3A, 6A,9A, 12A, dan 15 A.
3. Jenis mesin las yang digunakan adalah mesin las MIG (Metal Inert Gas).
4. Jenis sambungan las yang digunakan adalah Butt joint dengan single V groove posisi pengelasan yang digunakan *flat position*.
5. Dimensi material dan variabel pengelasan dijaga konstan.
6. Pada penelitian ini hanya membahas mengenai laju pendinginan dan kekuatan impak hasil lasan baja QTS dan tidak membahas mengenai cacat pengelasan yang terbentuk.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh induksi magnet eksternal terhadap laju pendinginan dan kekuatan impak hasil pengelasan baja QTS.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Mampu menerapkan teori yang didapatkan selama perkuliahan terutama berkenaan dengan teknologi pengelasan.
2. Dapat digunakan sebagai dasar dalam meningkatkan kualitas sambungan las pada proses pengelasan, terutama proses pengelasan baja QTS (*quench-tempered steel*) atau biasa disebut dengan baja armor.

3. Memberikan masukan yang bermanfaat bagi industri untuk memecahkan masalah-masalah dalam pengelasan baja armor.
4. Dapat digunakan sebagai tambahan referensi untuk pengembangan penelitian dalam penelitian lebih lanjut dalam bidang teknologi pengelasan logam.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Sugiarto dan Denny W (2007) dalam tulisannya berjudul pengaruh penambahan magnet eksternal terhadap perubahan siklus thermal dan struktur butiran HAZ. Penelitian tersebut menggunakan baja JIS G 3131 SPHC yang dilas SMAW dengan variasi kuat medan magnet yang ditambahkan sebesar 0,864 Mt; 1,529 mt; 1,871 mt; 2,093 mt. hasilnya adalah penambahan induksi magnet dari luar berpengaruh pada siklus termal, temperatur puncak las dan struktur butiran las. Semakin besar induksi magnet yang ditambahkan menghasilkan temperatur puncak dan laju pendinginan pada grafik siklus thermal semakin menurun. Temperatur puncak dan laju pendinginan yang semakin rendah menghasilkan struktur butiran las yang semakin besar.

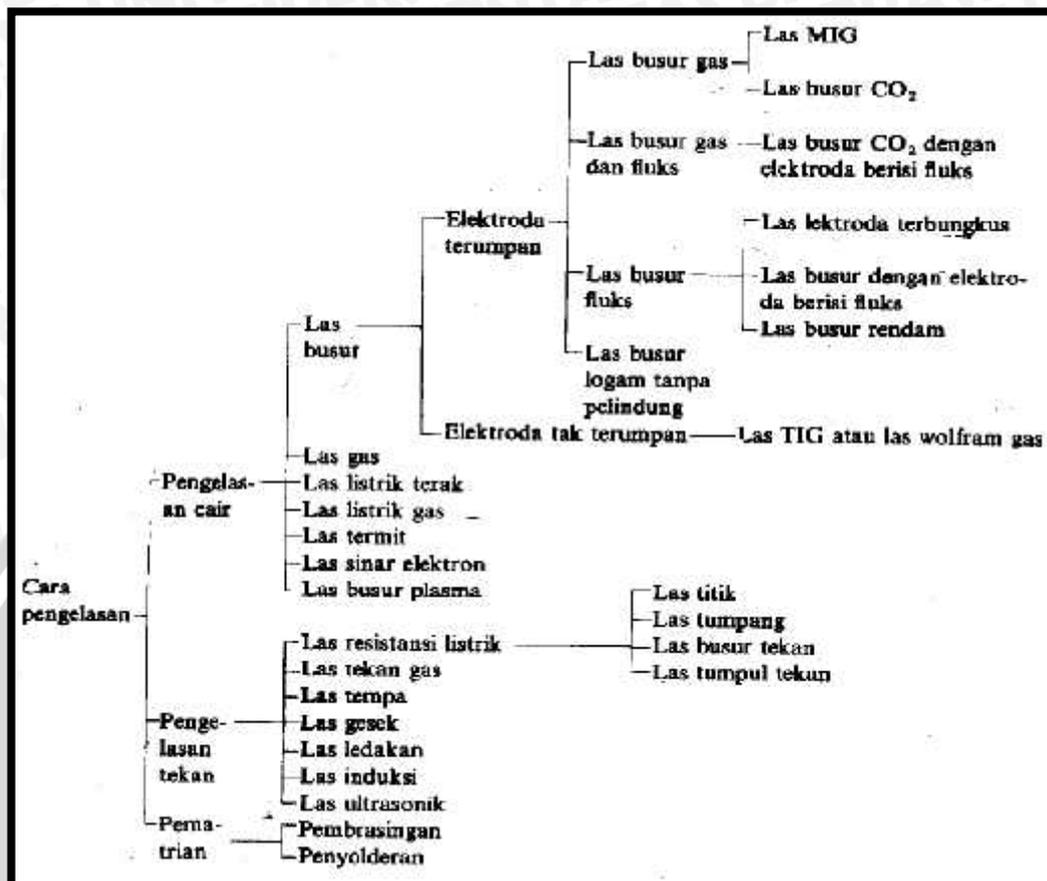
Hambali (2007) dalam tulisannya berjudul pengaruh pola pembangkitan medan magnet solenoid terhadap kekerasan dan kekuatan impak pada pengelasan baja ST 37 dengan EMS 45. Penelitian tersebut menggunakan baja ST 37 dan EMS 45 yang dilas MIG dengan variasi pola 1 (hanya bahan EMS45 yang dialiri medan magnet), pola II (hanya bahan ST37 yang dialiri medan magnet), pola III (kedua medan magnet dialiri medan magnet secara bersamaan), pola IV (kedua bahan dialiri magnet secara bergantian). Hasilnya adalah dengan adanya penambahan induksi magnet pada pengelasan dapat meningkatkan kekuatan impak sambungan las dikarenakan terjadinya pendinginan yang lambat akibat laju konveksi yang semakin meningkat.

2.2 Proses Pengelasan (*Welding process*)

2.2.1 Definisi dan klasifikasi cara pengelasan

Berdasarkan dari *Deutsche Industri Normen* (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dengan kata lain las adalah sambungan setempat dari beberapa logam dengan menggunakan energi panas. Sedangkan Berdasarkan *American Welding Society* (AWS), proses pengelasan adalah proses penyambungan material dengan menggunakan kampuh las, sedangkan kampuh las didefinisikan sebagai logam yang membeku dari logam yang sebelumnya berada dalam keadaan cair akibat pemanasan pada temperatur tertentu dengan atau tanpa penekanan.

Lebih lanjut klasifikasi cara pengelasan dapat dirinci sesuai ketiga kelas utama tersebut diatas. Secara lengkap perinciannya dapat dilihat pada skema dibawah ini :



Gambar 2.1 Klasifikasi Cara Pengelasan

Sumber : Wiryosumarto, Harsono 1994 : 8

2.2.2 Pengelasan Baja Karbon Rendah

Baja karbon adalah paduan antara besi dan karbon dengan sedikit Si, Mn, P, S, dan Cu (Wiryosumarto, 1994:89). Sifat baja karbon sangat tergantung pada kadar karbon, karena itu baja ini dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya sesuai dengan tabel 2.1. Secara umum, baja karbon rendah adalah baja dengan kadar karbon kurang dari 0,30 %; Baja karbon sedang memiliki kadar karbon 0,30 sampai 0,45 % karbon dan baja karbon tinggi berisi karbon 0,45 sampai 1,70 %. Semakin tinggi kadar karbon, maka kekuatan dan kekerasannya akan semakin bertambah, akan tetapi perpanjangannya (*elongation*) semakin menurun.

Tabel 2.1 Klasifikasi Baja Karbon

Jenis dan Kelas	Kadar karbon (%)	Kekuatan luluh (kg/mm ²)	Kekuatan tarik (kg/mm ²)	Perpanjangan (%)	Kekerasan Brinell	Penggunaan	
Baja karbon rendah	Baja lunak khusus	0,08	18-28	32-36	40-30	95-100	pelat tipis
	Baja sangat lunak	0,08-0,12	20-29	36-42	40-30	80-120	batang, kawat
	Baja lunak	0,12-0,20	22-30	38-48	36-24	100-130	Konstruksi umum.
	Baja setengah lunak	0,20-0,30	24-36	44-55	32-22	112-145	
Baja karbon sedang	Baja setengah keras	0,30-0,40	30-40	50-60	30-17	140-170	Alat-alat mesin.
	Baja Karbon tinggi	0,04-0,50	34-46	58-70	26-14	160-200	Perkakas Rel, pegas, dan kawat piano
	Baja sangat keras	0,50-0,80	36-47	65-100	20-11	180-235	

Sumber : Wiryosumarto (1994 : 90)

Baja karbon rendah memiliki kepekaan retak las yang rendah bila dibandingkan dengan baja karbon lainnya atau dengan baja karbon paduan. Dimana baja karbon rendah umumnya memiliki harga C_{ek} yang rendah. Semakin rendah harga C_{ek} maka kepekaan retak pada logam las juga turun. Tetapi retak las pada baja ini dapat terjadi dengan mudah pada pengelasan pelat tebal atau bila di dalam baja tersebut terdapat belerang bebas yang cukup tinggi.

Baja karbon rendah dapat dilas dengan semua cara pengelasan yang ada di dalam praktek dan hasilnya akan baik bila persiapannya sempurna dan persyaratannya dipenuhi. Pada kenyataannya baja karbon rendah adalah baja yang mudah dilas. Retak las yang mungkin terjadi pada pengelasan pelat tebal dapat dihindari dengan pemanasan mula atau dengan menggunakan elektroda hidrogen rendah.

2.2.3 GMAW (*Gas Metal Arc Welding*)

GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) adalah jenis las listrik yang menggunakan bahan kawat las sebagai elektroda terumpannya. Busur listrik terjadi antara kawat pengisi dan logam induk. Untuk mencegah terjadinya oksidasi selama pengelasan digunakan gas pelindung berupa gas mulia seperti helium, argon atau campuran keduanya. Untuk memantapkan busur kadang kadang ditambahkan gas O_2 antara 2 sampai 5 % atau CO_2 antara 5 sampai 20%. Dalam banyak hal penggunaan las GMAW sangat menguntungkan. hal ini disebabkan karena sifat sifatnya yang baik, misalnya :

- Karena konsentrasi busur yang tinggi, maka busurnya sangat stabil dan percikannya sedikit sehingga memudahkan operasi pengelasan.

- Karena dapat menggunakan arus yang tinggi maka kecepatannya juga sangat tinggi, sehingga efisiensinya sangat baik
- Deposit yang terbentuk cukup banyak
- Ketangguhan dan elastisitasnya, kekedapan udara, ketidak pekaan, terhadap retak dan sifat sifatnya lainnya lebih baik dari pada yang dihasilkan dengan cara pengelasan lain.

Sedangkan kekurangannya antara lain :

- Harga gas pelindung seperti helium, argon relative lebih mahal
- Agak sukar untuk pengelasan posisi tegak dan untuk pelat pelat tipis.

2.3 Baja QTS (*Hot Roll Quench Tempered Steel*)

Baja *hot roll quenched* merupakan baja karbon rendah dengan kadar karbon 0,29342 % yang diproduksi PT. Krakatau Steel dengan proses rol panas (pada suhu 20-30° di atas A_{C3}) yang kemudian disemprot dengan air (*quench*) yang dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan baja tersebut. Setelah itu diberikan proses *finishing* berupa proses perlakuan panas *tempering* sehingga produk pelat ini dinamakan *Hot Roll Quench-Tempered Steel* (QTS). Baja ini memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya (*weldability*). Indikasinya adalah hasil las baja ini dalam beberapa waktu tertentu mengalami retak las atau *delay cracking* yang umumnya terjadi pada daerah batas las (*fusion line*) dan HAZ yang disebut *unmixed zone*. Selain itu, pengelasan baja ini dapat menghasilkan penggetasan daerah pengelasan sehingga rapuh. Untuk meningkatkan keuletannya dapat menggunakan metode tertentu.

2.4 Konveksi Pada *Weld Pool*

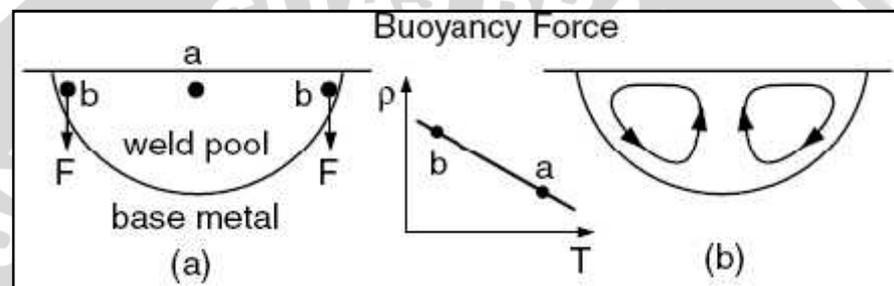
Berdasarkan definisi dari *American Heritage Dictionary*, konveksi merupakan pergerakan fluida yang disebabkan karena adanya gaya eksternal (Messler, 1999:291), dimana fluida pada *weld pool* adalah logam cair. Konveksi pada kolam las tersebut dapat ditingkatkan dengan cara memperbesar gaya-gaya yang bekerja pada kolam las tersebut. Adapun gaya-gaya pada *weld pool* antara lain :

1. Gaya angkat permukaan / gaya *Bouyancy*

Gaya *bouyancy* merupakan gaya yang diakibatkan oleh adanya perbedaan densitas pada daerah kolam las. Perbedaan densitas yang terjadi disebabkan oleh adanya perbedaan temperatur lokal atau komposisi lokal pada kolam las. Akan

tetapi perbedaan temperatur lokal lebih mendominasi dalam memunculkan gaya ini.

Gaya *bouyancy* mengakibatkan terjadinya sirkulasi cair dalam kolam las. Daerah logam cair yang dekat batas las merupakan daerah yang paling dingin. Pada daerah ini logam cair memiliki densitas yang besar, sehingga logam cair akan bergerak kebawah. Sedangkan daerah tengah kolam las merupakan daerah yang paling panas, sehingga logam cair pada daerah ini memiliki densitas yang rendah, akibatnya logam cair akan bergerak keatas. Sirkulasi yang terjadi akibat gaya *bouyancy* dan distribusi temperatur pada kolam las dapat digambarkan pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 a. Arah gaya pada kolam las karena gaya angkat permukaan.

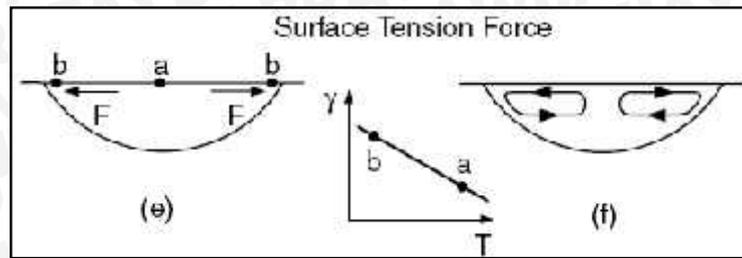
b. Aliran pada kolam las karena gaya angkat permukaan.

Sumber : Kou (2003 : 104).

Hal ini dikarenakan perbedaan massa jenis di kolam las, yang diakibatkan perbedaan temperatur pada kolam las tersebut. Tetapi konveksi karena gaya angkat permukaan dapat diabaikan jika dibandingkan akibat dari gaya elektromagnet.(Kou, 1987:92)

2. Gaya Tekan Permukaan (gaya *Marangoni*)

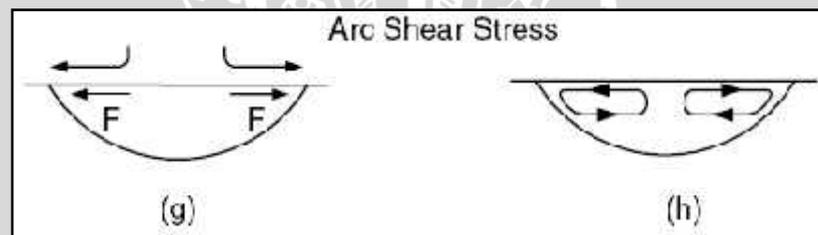
Seperti halnya sifat-sifat fluida pada umumnya, logam las cair juga mempunyai tegangan permukaan yang besarnya sangat tergantung pada temperatur, dimana tegangan permukaan akan semakin rendah pada daerah yang bertemperatur tinggi dan semakin besar pada daerah yang bertemperatur rendah. Pada kolam las terjadi perbedaan temperatur lokal sehingga memunculkan perbedaan tegangan permukaan.



Gambar 2.3 e. Arah gaya pada kolam las karena gaya tegangan permukaan
 f. Aliran pada kolam las karena gaya tegangan permukaan
 Sumber : Kou (2003 : 104).

3. Gaya akibat Tegangan Geser Plasma Busur.

Plasma mengalir keluar dari elektroda ke sepanjang permukaan kolam las dengan kecepatan tinggi dapat menekan/ mendesak tegangan geser terluar dari permukaan kolam seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Tegangan geser ini mengakibatkan logam cair mengalir dari pusat kolam ke tepi kolam dan kembali ke bawah dari permukaan kolam.



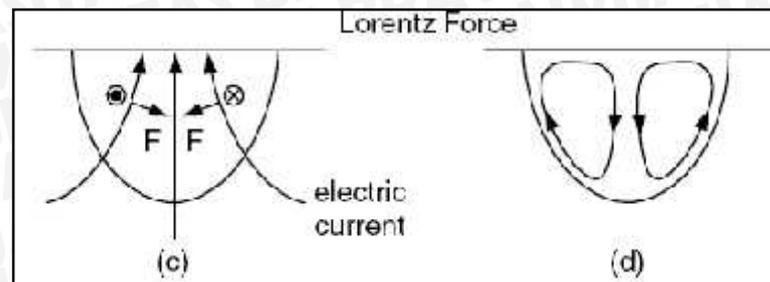
Gambar 2.4 g Arah gaya pada kolam las karena gaya akibat tegangan geser busur
 h. Aliran pada kolam las gaya akibat tegangan geser busur plasma
 Sumber : Kou (2003 : 104).

4. Gaya Elektromagnetik

Pada pengelasan listrik (*arc welding*) menimbulkan medan magnet dan medan listrik. Interaksi kedua medan ini akan menimbulkan gaya elektromagnetik (gaya *lorentz*) yang besarnya dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$F = J \times \quad (\text{Messler, 1999; 297}) \quad (2- 1)$$

Dimana J merupakan vektor rapat arus listrik dan merupakan vektor fluks magnetik. Gaya elektromagnetik yang terjadi mengakibatkan arus konveksi logam las cair yang berlawanan dengan arus konveksi yang ditimbulkan oleh pengaruh gaya *bouyancy* (Messler, 1999 : 299), sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5 c. Arah gaya pada kolam las karena gaya elektromagnetik
 d. Aliran pada kolam las gaya elektromagnetik
 Sumber : Kou (2003 : 104).

Gaya elektromagnetik ditengah kolam las akan mendorong logam las cair yang panas ke bawah sampai ke dasar kolam, sehingga perpindahan panas yang terjadi mengakibatkan sebagian dasar kolam las mencair dan kolam las semakin dalam (Messler, 1999:300).

Gaya elektromagnetik dengan sirkulasi logam cair yang dihasilkan sangat berperan dalam proses pencampuran (*mixing*) dalam kolam las. Hal ini berpengaruh terhadap tingkat homogenitas komposisi dalam kolam las (Kou, 1987:100).

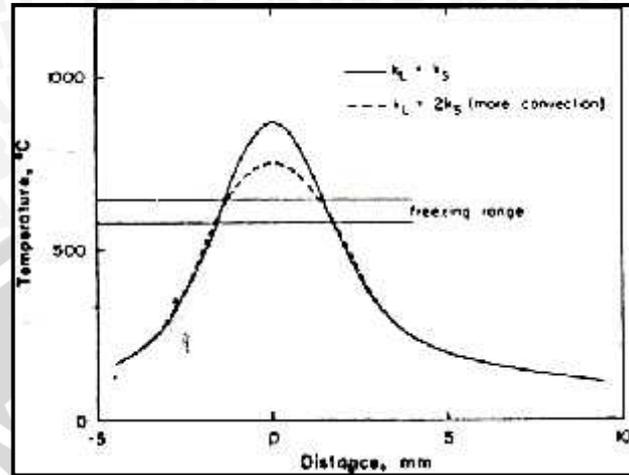
Gaya elektromagnetik dalam pengelasan listrik (*arc welding*) dapat ditingkatkan dengan 2 cara yaitu :

- meningkatkan arus listrik yang digunakan dalam pengelasan sehingga rapat arus (J) dan rapat fluks magnet meningkat.
- meningkatkan fluks magnetik (B) dengan menambahkan medan magnet eksternal.

Peningkatan gaya elektromagnetik dengan memperbesar arus pengelasan kurang disukai mengingat penambahan arus pengelasan akan memperbesar masukan panas dan menimbulkan masalah baru seperti tegangan sisa, distorsi, dan perubahan pada struktur mikro (Messler, 1999:306), sehingga gaya elektromagnetik dapat ditingkatkan dengan menambahkan medan magnet eksternal dari luar yang dapat berupa solenoida yang menghasilkan induksi magnet yang kemudian berakumulasi dengan induksi magnet yang dihasilkan arus pengelasan, sehingga rapat fluks magnet akan semakin besar.

Dengan semakin meningkatnya gaya elektromagnetik, maka laju konveksi logam las cair semakin besar. Hal ini ternyata merubah nilai efektif konduktifitas termal dari logam las cair (k_L) menjadi lebih besar dikarenakan proses transfer

panas pada kolam las menjadi lebih efektif, sehingga temperatur puncak las atau temperatur maksimum yang dicapai pada pusat lasan menjadi lebih rendah (Kou Sindo, 1987:49) sebagaimana gambar. Jika temperatur puncak kolam las semakin rendah (T_p turun) maka laju pendinginan pasca pengelasan juga akan turun.



Gambar 2.6 Pengaruh peningkatan konveksi terhadap nilai efektif konduktivitas termal logam las cair.

Sumber: Kou (1987 : 51).

2.5 Siklus Termal dan Distribusi Panas Pengelasan

Siklus termal las adalah proses pemanasan dan pendinginan di daerah lasan (Wirjosumarto, 1988; 58). Dengan pemberian panas pada suatu logam, logam mula-mula berada pada temperatur ruang, temperturnya akan naik hingga mencapai temperatur puncak dan kemudian turun kembali ke temperatur semula. Karena proses ini maka logam disekitar lasan mengalami siklus termal cepat yang menyebabkan terjadinya perubahan-perubahan metalurgi yang rumit, deformasi dan tegangan-tegangan termal. Hal ini sangat erat hubungannya dengan ketangguhan, cacat las, retak dan lain sebagainya yang pada umumnya mempunyai pengaruh negatif terhadap keamanan dari konstruksi las.

Persamaan 1 dan 2 digunakan untuk memprediksikan distribusi temperatur yang terjadi selama pengelasan berdasarkan posisinya dalam koordinat kartesian pada benda kerja. Jika diplot pada hubungan antara perubahan temperatur terhadap perubahan waktu maka akan dihasilkan grafik siklus termal. Untuk mengetahui siklus termal pengelasan pada koordinat tertentu, perlu diketahui temperatur puncak (temperatur tertinggi) yang dimiliki koordinat tersebut. Untuk mencari temperatur puncak pada

koordinat tertentu secara matematik untuk dua dimensi (plat tipis dimana $z = 0$) telah diturunkan melalui persamaan Adam berikut ini (Sindo Kou, 1987, hal. 42) :

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{4,13Vyg...C}{Q} + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (2-2)$$

Dengan :

T_p = Temperatur puncak

y = jarak transversal dari sumber panas

T_m = Temperatur cair benda kerja

Q = Kalor yang diterima benda kerja

V = Kecepatan pengelasan

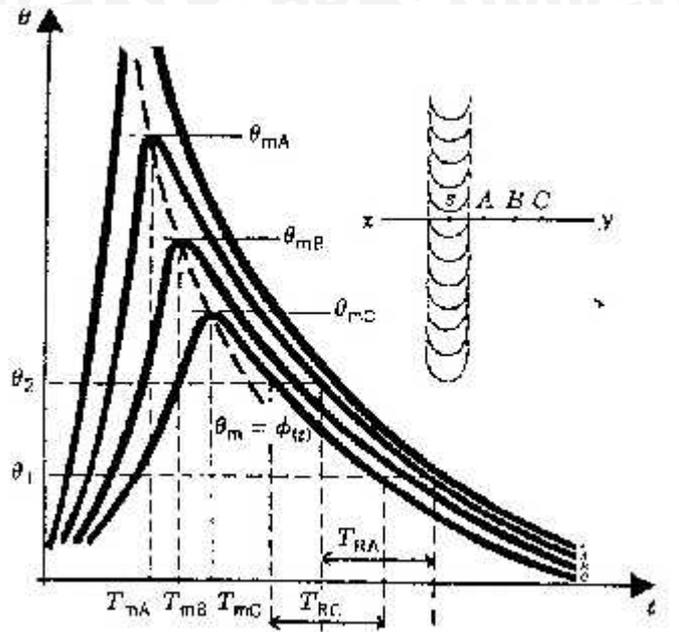
g = tebal benda kerja

T_o = Temperatur awal benda kerja

dan untuk mencari temperatur puncak pada pengelasan plat tebal dapat digunakan persamaan Adam untuk tiga dimensi sebagaimana persamaan berikut (Sindo Kou, 1987, hal. 43) :

$$\frac{1}{T_p - T_o} = \frac{5,44fkr}{QV} \left[2 + \left(\frac{V_y}{2r} \right)^2 \right] + \frac{1}{T_m - T_o} \quad (2-3)$$

Dengan menghubungkan temperatur puncak dan perubahan yang terjadi sebagai fungsi waktu maka akan didapatkan siklus termal untuk tiap-tiap koordinat sebagaimana gambar 2.7 di bawah ini.



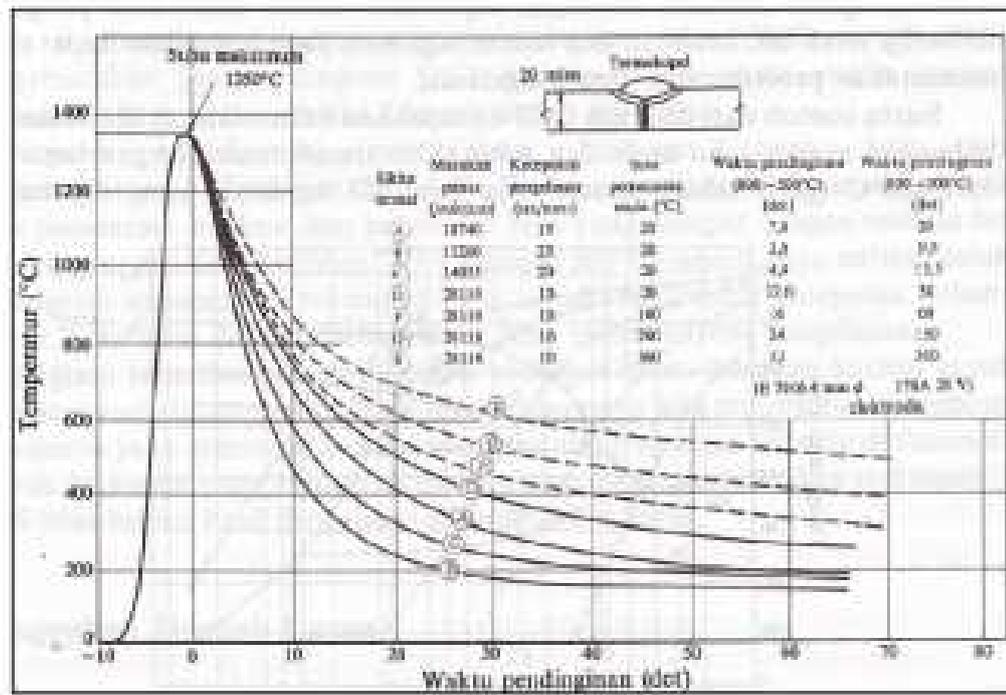
Gambar 2.7 Siklus termal sebagai fungsi jarak dari pusat lasan
Sumber : Messler, R.W (1999:157).

Dengan melihat gambar 2.3 kita dapat menyimpulkan bahwa temperatur puncak dari masing-masing siklus termal menurun sebagai fungsi jarak dari pusat lasan. Hal tersebut sesuai dengan jarak lokasi tersebut ke sumber panas yang berada di tengah lasan. Disamping itu kecepatan pemanasan dan pendinginan pada suatu siklus termal berkurang dengan makin jauhnya jarak lokasi tersebut dari pusat lasan.

Siklus termal yang terjadi pada pengelasan ini dipengaruhi oleh besar gaya elektromagnetik pada pengelasan. Dimana gaya elektromagnetik akan mempengaruhi konveksi pada logam cair. Gaya elektromagnetik pada pengelasan ditentukan oleh parameter-parameter; arus yang dialirkan, banyak lilitan dan panjang solenoida. Pemberian arus yang semakin besar atau lilitan yang semakin banyak akan menimbulkan medan magnet yang semakin besar sehingga arus konveksi semakin besar. Dengan kata lain perubahan parameter atau proses yang memperbesar gaya elektromagnetik akan cenderung memperbesar arus konveksi. Gaya elektromagnetik mempengaruhi temperatur puncak dan dapat pula memperkecil laju pendinginan. Contoh siklus thermal diatas akan digunakan sebagai dasar penentuan laju pendinginan yang terjadi pada pengelasan yang menyatakan hubungan antara temperatur terhadap waktu.

2.6 Laju Pendinginan (*Cooling Rate*)

Laju pendinginan didefinisikan sebagai fungsi temperatur terhadap waktu. Laju pendinginan menyatakan besarnya penurunan temperatur tiap detik. Pada siklus thermal dapat diketahui lamanya waktu yang dibutuhkan untuk penurunan temperatur, misal dari 800°C sampai ke 400°C. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Siklus termal dengan macam-macam waktu pendinginan

Sumber : Wiryosumarto (1994:59)

Dari gambar diatas dapat dilihat bahwa semakin landai siklus thermal maka laju pendinginan semakin kecil. Karena untuk mencapai temperatur 400°C pada siklus yang landai, waktu yang dibutuhkan semakin lama.

Untuk menentukan laju pendinginan dapat digunakan Persamaan berikut:
Untuk pelat yang tipis (memerlukan kurang dari 4 layer dalam pengelasannya), kecepatan pendinginannya sebagai berikut:

$$R = 2f \cdot k \cdot C_s \left(\frac{h}{H_{net}} \right)^2 (T_c - T_o)^3 \quad (2-4)$$

- dengan: R = kecepatan pendinginan pada garis tengah las ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)
 k = konduktifitas termal ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)
 T_o = temperatur awal pelat ($^{\circ}\text{C}$)
 T_c = Temperatur *cooling rate* yang dihitung
 h = ketebalan logam dasar (mm)
 C_s = panas spesifik volumetrik, untuk baja sebesar $0,0044 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
 H_{net} = masukan panas persatuan panjang ($\text{J} \cdot \text{mm}^{-1}$),

$$H_{net} = \frac{\eta \cdot E \cdot I}{v} \quad (2-5)$$

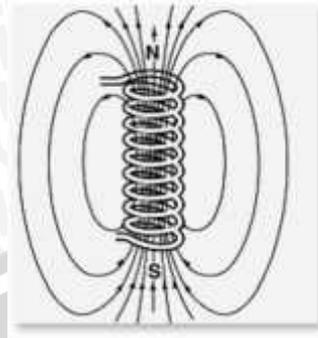
- dengan: η = efisiensi sumber panas
 E = tegangan (volt)
 I = arus listrik (ampere)
 v = kecepatan pengelasan ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Menurut penelitian Djarot (2005), kajian eksperimental siklus termal proses pengelasan diperoleh dengan menempatkan thermokopel pada titik-titik tertentu. Pada titik-titik tersebut suhu sebagai fungsi waktu dicatat untuk mendapatkan siklus termal pada titik uji. Berdasarkan hasil yang diperoleh, laju pendinginan yang lebih lambat pada gilirannya diharapkan akan memperbaiki kualitas dan sifat mekanis sambungan las.

2.7 Medan Magnet Solenoida

Medan magnet (*magnetic field*) didefinisikan sebagai area di sekitar magnet atau di sekitar penghantar yang mengangkut arus. Vektor magnet disebut dengan induksi magnet yang dinyatakan sebagai garis-garis induksi (*line of induction*). Jika medan magnet berada dalam suatu ruang maka akan terjadi perubahan energi yang menghasilkan gaya. Hal ini dapat dideteksi dengan adanya percepatan pada muatan listrik yang bergerak di dalamnya. Solenoida merupakan kumparan atau lilitan kawat yang biasanya membungkus inti logam dan dapat menghasilkan medan magnet apabila arus listrik dialirkan pada kumparan tersebut. Solenoid dapat menghasilkan medan magnet yang besarnya dapat dikontrol. Adapun arah garis medan magnet tergantung

pada arah aliran arus listrik dalam kumparan (solenoida) yang dapat dijelaskan dalam gambar 2.9 berikut:



Gambar 2.9 Arah garis medan magnet dalam solenoida
Sumber : Sartono (2006 :8)

Besarnya peningkatan medan magnet yang terjadi diukur dengan menggunakan besaran yang dinamakan permeabilitas magnetik yang merupakan perbandingan antara induksi magnet yang dihasilkan (B), dengan kuat medan magnet yang terjadi (H) atau permeabilitas magnetik adalah kemampuan magnetisasi material yang merespon medan magnet linear dari luar, dan dirumuskan sebagai berikut :

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2-6)$$

dengan :

μ = permeabilitas magnetik [N/A^2]

B = induksi magnetik [N/A.m]

H = kuat medan magnet [A/m]

Apabila dalam *solenoida* tidak terdapat inti logam maka permeabilitas magnetik merupakan permeabilitas ruang kosong (μ_0), dimana $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$. Adapun nilai permeabilitas dari beberapa material dapat ditunjukkan pada tabel 2.2. berikut:

Tabel 2.3. Nilai permeabilitas relatif beberapa material

Jenis material	Permeabilitas (μ) [N/A^2]
Aluminium	1,25666
Tembaga	1,25662
Baja Karbon Rendah	1,28016
Stainless Steel 430	1,40160

Sumber : Sartono (2006 :7).

Adapun besar induksi magnet yang dibangkitkan solenoida yang berarus listrik dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Induksi magnet ditengah panjang solenoida : } B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{l} \quad (2-7)$$

$$\text{Induksi magnet diujung panjang solenoida : } B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{2l} \quad (2-8)$$

Dengan:

B = medan magnet induksi solenoida (1 Tesla = 1 NA⁻¹m⁻¹)

μ = permeabilitas magnetik (WbA⁻¹m⁻¹)

I = arus listrik (A)

N = jumlah lilitan

L = panjang solenoida (m)

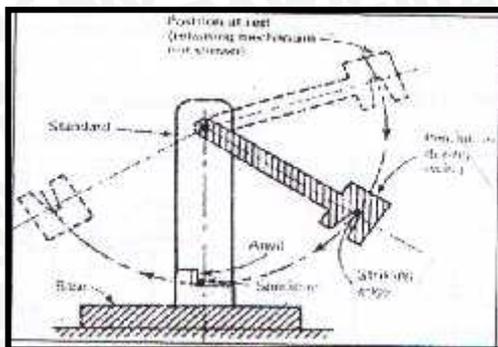
2.8 Kekuatan Impak

2.8.1 Pengertian kekuatan Impak

Kekuatan impak adalah energi yang diperlukan untuk mematahkan spesimen tiap satuan areal bagian setempat pada penampang lintang dari notch. Kekuatan impak menyatakan jumlah energi yang diserap pada percobaan impak. Perpatahan adalah pemisahan atau pemecahan suatu benda padat menjadi dua bagian akibat dikenai tegangan.

2.8.2 Pengujian Impak

Pengujian ini sering disebut juga dengan pengujian takik specimen yang bertakik menahan suatu beban kejut. Pembebanan yang digunakan yaitu dengan pembebanan *charpy* (*charpy impact test*). Pengujian impak pada konstruksi las termasuk dalam pengujian merusak (*destructive test*). Adapun definisi pengujian impak menurut ASTM adalah pengujian dinamik pada specimen tertentu, yang dimesin dan umumnya diberi takikan, kemudian specimen tersebut ditumbuk dan dipatahkan oleh sebuah pukulan tunggal pada suatu mesin uji khusus lalu diukur energi yang diserap pada proses pematahan metrial tersebut. Prinsip kerja alat uji impak dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2.10 Kerja alat uji impact

Sumber : Davis (1982 : 228)

Adapun tujuan pengujian impact ini adalah untuk mengetahui seberapa besar suatu material dengan luas penampang tertentu mampu menerima beban kejut, atau dengan kata lain seberapa besar energi yang mampu diserap oleh material tersebut ketika menerima beban kejut.

2.8.3 Macam macam pengujian Impact

Macam – macam pengujian impact digunakan untuk menguji suatu material adalah sebagai berikut :

1. Tension Impact test

Spesimen yang digunakan tidak menggunakan notch (takik) akan tetapi specimen tersebut dijepit pada kedua ujungnya dimana salah satunya adalah jepitan tetap. Sedangkan pada ujung yang lain diberi beban takik secara kejut.

2. Pengujian pukul takik (*beam impact test*)

Pada pengujian ini menggunakan specimen yang bertakik. Ada dua macam pembebanan yaitu :

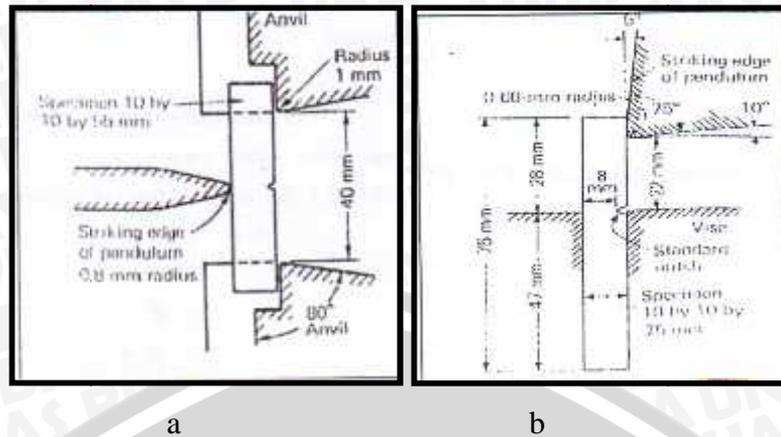
a. *Charpy impact test*

Pengujian ini menggunakan specimen berbentuk balok segiempat dengan takikan (notch) di tengahnya. Beban pemukul terletak pada posisi vertical dari specimen sehingga tepat mengenai punggung *notch*.

b. *Izod impact test*

Pengujian ini dilakukan dengan jalan menjepit specimen pada salah satu ujungnya secara vertical dan dan tepat pada batas bibir *notch*, sedangkan beban impact bekerja secara horizontal pada bagian atas specimen.

Pada posisi penempatan specimen pada uji impact *charpy* dan *izod* dapat dilihat pada gambar 2.11:



Gambar 2.11 penempatan spesimen : a) pada uji *charpy*, b) pada uji izod

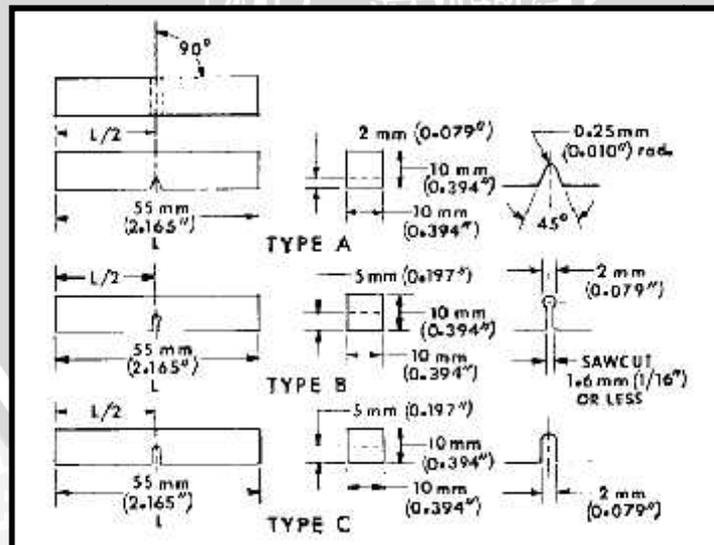
Sumber: Davis (1982 : 223)

3. Torsion Impact test

Prinsip kerjanya sama dengan tension impact test, adapun perbedaannya terletak pada pembebanannya, pada torsion impact test beban kejut berupa torsi yang dikenakan salah satu ujungnya.

2.8.4 Macam macam Spesimen Impak

Spesimen uji impak berdasarkan untuk notchnya dapat dibagi menjadi tiga bagian. Gambar 2.12 menunjukkan specimen uji uji impak menurut standar ASTM.



Gambar 2.12 Macam – macam specimen uji Impak

Sumber : ASTM-E23

2.8.5 Rumus Perhitungan

Energi atau usaha untuk mematahkan spesimen dapat dicari dari persamaan sebagai berikut (Verma, ER. CL, 1976 : 86) :

$$\begin{aligned}
 E' &= WH_1 - WH_2 \\
 &= W (H_1 - H_2) \\
 &= W (BC) \\
 &= W (AC - AB) \\
 &= W (R \cos \alpha - R \cos \beta) \\
 &= WR (\cos \alpha - \cos \beta)
 \end{aligned}
 \tag{2-9}$$

Dengan :

E' = Energi untuk mematahkan Spesimen [J]

m = Massa dari Pendulum [Kg]

W = Berat Pendulum [N]

g = Percepatan Gravitasi = $9,806 \text{ [ms}^2\text{]}$

H_1 = Tinggi Kedudukan awal Pendulum [m]

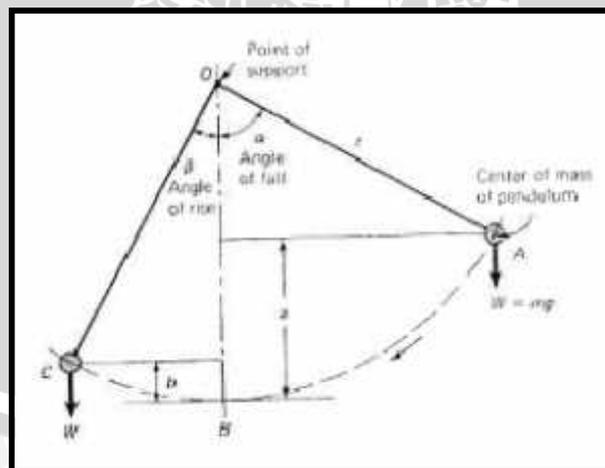
H_2 = Tinggi pendulum setelah mematahkan [m]

R = Panjang lengan pendulum [m]

= Sudut Simpangan awal [$^\circ$]

= Sudut simpangan akhir dengan beban [$^\circ$]

Skema *charpy impact test* dapat dilihat pada gambar 2.13 sebagai berikut:



Gambar 2.13 Skema charpy Impak test

Sumber : Davis (1982:235)

Kerugian energi dapat disebabkan karena gesekan dalam poros bantalan (herman E, Davis, 1982 : 236). Energi gesekan dapat kita hitung melalui besarnya energi ayunan sebelum specimen diletakkan di dudukan.

$$f = WR (\cos \theta_0 - \cos \theta) \quad (2-10)$$

Dengan :

f = Energi gesekan [J]

θ_0 = Sudut simpangan akhir tanpa beban [$^{\circ}$]

sehingga energi yang digunakan secara aktual adalah :

$$E = E' - f \quad (2-11)$$

Bila energi ini kita bagi dengan luas penampang melintang dari patahan dibawah takikan maka kita akan dapatkan besarnya kekuatan impak atau disebut juga nilai pukul takik.

$$A_k = \frac{E}{A_0} \quad (2-12)$$

Dengan :

A_k = Kekuatan impak atau nilai pukul takik [$J \cdot mm^{-2}$]

E = Energi patahan secara actual [J]

A_0 = Luas penampang batang lintang dibawah takikan [mm^2]

2.8.6 Macam – macam patahan dan sifatnya

Dengan mempelajari sifat permukaan patahan dapat membantu dalam menentukan hubungan sifat patahan terhadap harga impak strength suatu material.

Patahan dapat terjadi dalam tiga bentuk, yaitu :

1. Patahan getas

Patahan ini mempunyai permukaan yang rata dan mengkilap, bila disambung kembali maka sambungannya akan baik dan rapat. Hal ini menunjukkan patahan tidak diikuti deformasi dari bahan tersebut sehingga harga kekuatan impaknya rendah.

2. Patahan liat

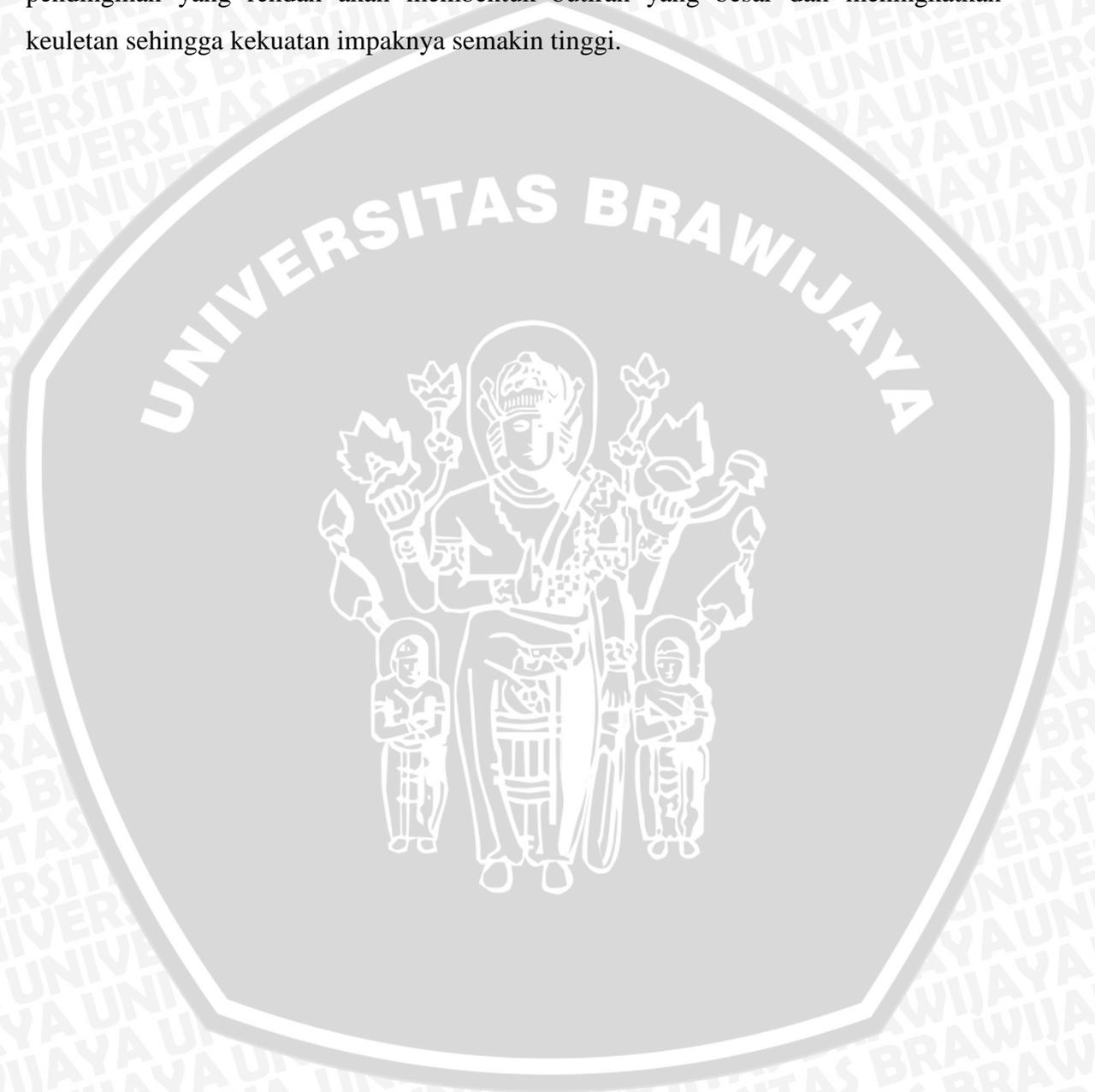
Patahan ini mempunyai permukaan yang tidak rata, Nampak seperti beludru, buram dan berserat. Spesimen yang mempunyai tipe seperti ini harga kekuatan impaknya tinggi karena sebelum patah mengalami deformasi terlebih dahulu.

3. Patahan campuran

Mempunyai patahan yang bervariasi (sebagian getas dan sebagian liat) dan justru patahan ini paling banyak terjadi.

2.9 Hipotesa

Berdasarkan studi literatur yang telah dilakukan maka dapat diambil Hipotesa sebagai berikut: Semakin besar induksi magnet yang ditambahkan maka laju konveksi logam las cair akan semakin tinggi. Laju konveksi logam las cair yang semakin tinggi akan menurunkan temperatur puncak las serta menurunkan laju pendinginan. Laju pendinginan yang rendah akan membentuk butiran yang besar dan meningkatkan keuletan sehingga kekuatan impaknya semakin tinggi.





BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini adalah penelitian eksperimental sejati (*true experimental research*) yang bertujuan untuk mengkaji efektifitas penambahan induksi magnet eksternal terhadap penurunan laju pendinginan dan meningkatnya kekuatan impact baja QTS dengan menggunakan las MIG. Kajian literatur dari buku, jurnal yang ada di perpustakaan dilakukan untuk menambah informasi yang diperlukan.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Desember 2013. Tempat yang digunakan untuk penelitian yaitu:

- a. Laboratorium Proses Produksi I, Jurusan Teknik Mesin, Universitas Brawijaya tempat dilakukannya pemotongan specimen.
- b. Departemen Teknologi Pengerjaan Logam VEDC Malang tempat dilakukannya proses pengelasan.
- c. Laboratorium Fisika Gelombang FMIPA Universitas Negeri Malang tempat dilakukannya pengukuran besar induksi magnet.
- d. Laboratorium Pengujian Bahan Teknik Mesin Universitas Merdeka Malang tempat dilakukannya pengujian kekuatan impact.
- e. Laboratorium Uji Fatik Teknik Mesin Universitas Brawijaya tempat dilakukannya pengambilan foto mikro.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Variabel bebas

Variabel bebas adalah variabel yang besarnya ditentukan sebelum penelitian.

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kuat medan magnet solenoida dengan 150 lilitan yang dibangkitkan oleh arus sebesar 3, 6, 9, 12 dan 15 A.

b. Variabel terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya bergantung dari variabel bebas.

Adapun variabel terikat yang diamati pada penelitian ini yaitu laju pendinginan dan kekuatan impak.

c. Parameter terkontrol

Parameter yang dijaga konstan selama pengelasan adalah:

1. Las yang digunakan adalah las MIG (*Metal Inert Gas*)
2. Arus pengelasan 140 A
3. Tegangan las 20 V
4. Kecepatan pengelasan 15 cm/ 24
5. Laju aliran CO₂ 12 L/menit
6. Laju pengumpanan kawat las 2,5 m/menit
7. Tebal benda kerja 10 mm
8. Jumlah lilitan pada solenoid 150 lilitan
9. Temperatur lingkungan dianggap konstan selama pengelasan berlangsung.

3.4 Alat dan Bahan yang Digunakan

3.4.1 Peralatan yang digunakan

1. Mesin las MIG

Mesin las MIG digunakan untuk pengelasan benda kerja.



Gambar 3.1 Mesin Las MIG

2. Data Logger

Data logger digunakan untuk mencatat perubahan suhu selama pengelasan.



Gambar 3.2 Data Logger

3. Kabel termokopel tipe K

Kawat termokopel tipe K dengan *range* suhu yang dapat diukur -200°C hingga 1100°C digunakan untuk sensor suhu pada saat pengelasan



Gambar 3.3 Kabel termokopel tipe K

4. Kamera

Digunakan untuk mengambil gambar spesimen pada saat penelitian.



Gambar 3.4 Kamera

5. SEM (*Scanning Electron Microscope*)

SEM digunakan untuk membesarkan penampakan struktur mikro spesimen pada titik tertentu.



Gambar 3.5 Scanning Elektron Microscope

6. Adaptor/ Stavolt

Digunakan untuk mengubah arus AC menjadi DC. Untuk penelitian ini voltase yang dihasilkan 35 Volt.



Gambar 3.6 Adaptor

7. Solenoida

Digunakan untuk membangkitkan medan magnet. Solenoida yang digunakan adalah yang mempunyai 150 lilitan kawat tembaga dengan diameter sebesar 0.5 mm. Bahan yang digunakan sebagai inti adalah ST 37 dengan dimensi 100 mm × 93,5 mm × 8 mm.



Gambar 3.7 Solenoida

8. Jangka sorong

Jangka sorong digunakan untuk mengukur dimensi spesimen uji impact



Gambar 3.8 Jangka sorong

9. Teslameter

Digunakan untuk mengukur besar induksi magnet pada daerah kampuh las untuk tiap-tiap arus yang dialirkan pada solenoida.



Gambar 3.9 Teslameter

10. Alat uji kekuatan impact

Digunakan untuk menguji kekuatan impact material.



Gambar 3.10 Alat Uji Impact Charpy

11. Power hack saw

Power hack saw digunakan untuk memotong spesimen las.



Gambar 3.11 Power Hack Saw

12. Mesin Milling

Mesin milling digunakan untuk membuat kampuh las



Gambar 3.12 Mesin Milling

13. Wire Cut Machine

Wire Cut Machine digunakan untuk membuat specimen impak.



Gambar 3.13 Wire Cut Machine

3.4.2 Bahan yang digunakan

Bahan yang digunakan adalah baja *Hot Roll Quench Tempered Steel* (QTS) dengan komposisi sebagai berikut:

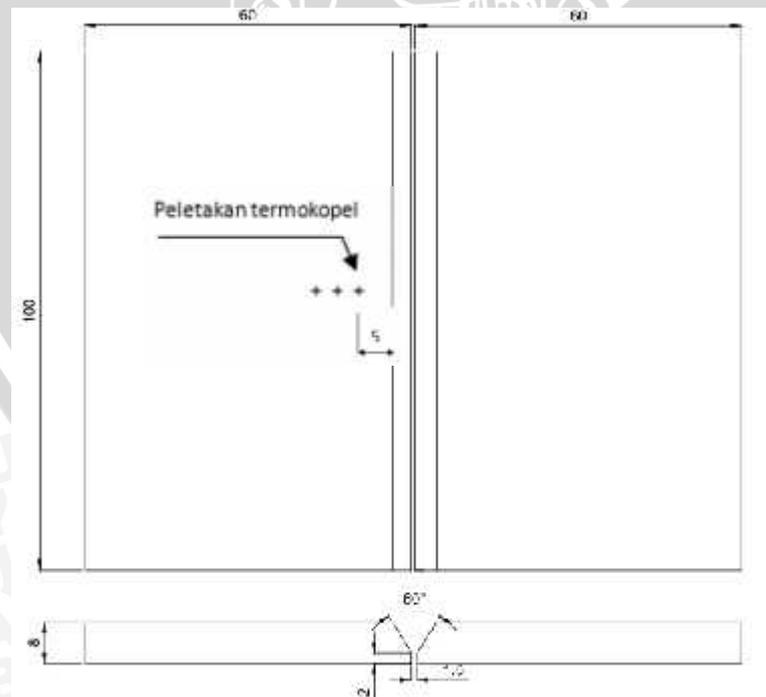
Tabel 3.1 Komposisi baja QTS

Unsur	Komposisi %	Unsur	Komposisi %
Fe	96,7625	V	0,01475
C	0,29342	Cu	0,08337
Si	0,32585	W	0,00251
S	0,00810	Ti	0,00439
P	0,01475	Sn	0,00339
Mn	1,141218	Al	0,03782
Ni	0,27877	Pb	0,00825
Cr	0,55029	Zr	0,00116
Mo	0,19305	Zn	0,00378

Sumber: Laboratorium SEM FMIPA ITB

3.5 Bentuk spesimen pengelasan

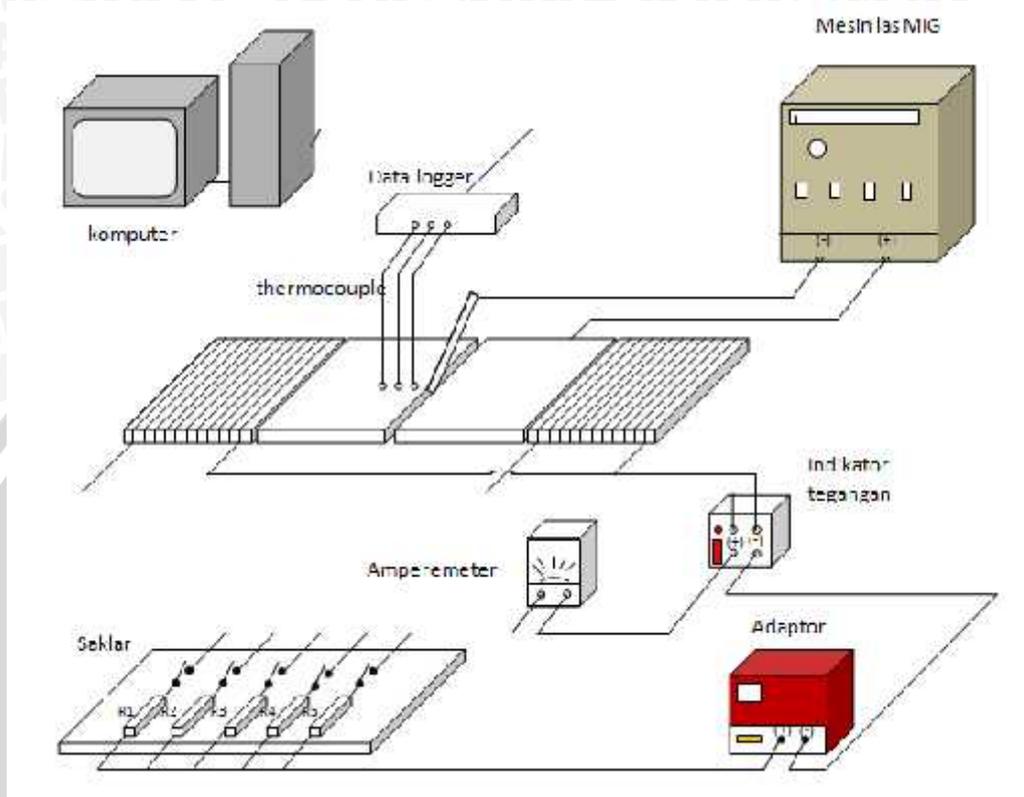
Adapun bentuk dan dimensi spesimen yang akan digunakan dalam pengelasan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.14 Bentuk dan spesimen pengelasan

3.6 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian proses pengelasan dengan penambahan medan magnet eksternal dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 3.15 Instalasi Penelitian

3.6 Prosedur Penelitian

3.6.1 Prosedur Pengambilan Data Besar Induksi Magnet

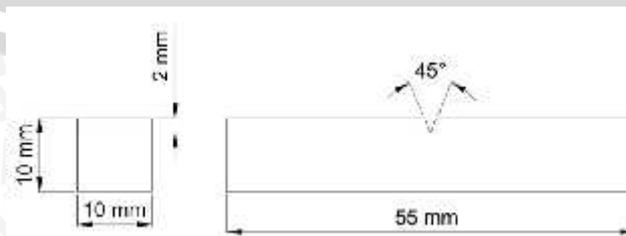
1. Benda kerja dibuat sesuai dengan bentuk dan dimensi yang direncanakan
2. Benda kerja dibersihkan dari terak dan kotoran
3. Solenoida dengan jumlah 150 lilitan dipasang pada instalasi penelitian
4. Benda kerja dipasang pada landasan yang tersedia pada instalasi penelitian
5. Mengatur besar arus listrik yang akan dialirkan ke solenoida, variasi arus yang diberikan yaitu 3A, 6A, 9A, 12A dan 15A
6. Sumber tegangan dihidupkan dengan menekan tombol "on"
7. Dilakukan pengukuran besar induksi magnet pada daerah las dengan menggunakan teslameter
8. Benda kerja dilepaskan dari instalasi penelitian

3.6.2 Prosedur pengelasan

1. Mempersiapkan benda kerja untuk spesimen las sesuai dengan ukuran yang dibutuhkan.
2. Memasang kabel termokopel pada titik-titik yang telah ditentukan, kabel termokopel tersebut dihubungkan pada data logger.
3. Mempersiapkan mesin las serta alat-alat lainnya yang dibutuhkan.
4. Mengatur parameter-parameter pengelasan yaitu: Arus, Tegangan, Kecepatan pengelasan, Laju aliran CO₂, Laju pengumpanan kawat las.
5. Mengatur besar medan magnet.
6. Proses pengelasan dengan variasi besar medan magnet eksternal.
7. Pengambilan data temperatur material.
8. Data temperatur material pada tiap-tiap titik diplot dalam bentuk grafik.

3.6.4 Prosedur pengujian dan pengambilan data pengujian impak

1. Permukaan benda kerja yang telah dilas dibersihkan dari terak dan kotoran.
2. Pembuatan spesimen untuk pengujian impak dengan dimensi yang telah ditentukan.
3. Dilakukan dry run test untuk mengetahui kerugian energi pada alat.
4. Spesimen diletakkan pada landasan yang tersedia sehingga bagian pendukung takik tepat pada posisi jatuhnya pendulum.
5. Dilakukan pengujian impak dengan sudut awal 120 °
6. Dilakukan pencatatan sudut yang ditunjuk oleh jarum pada mesin uji impak
7. Data yang diperoleh dalam pengujian impak berupa sudut penyimpangan pendulum dimasukkan dalam rumusan yang ada untuk mendapatkan besar energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen.
8. Data hasil perhitungan diplot dalam bentuk grafik dan dianalisis.
9. Pengambilan kesimpulan.



Gambar 3.16 Spesimen uji impak

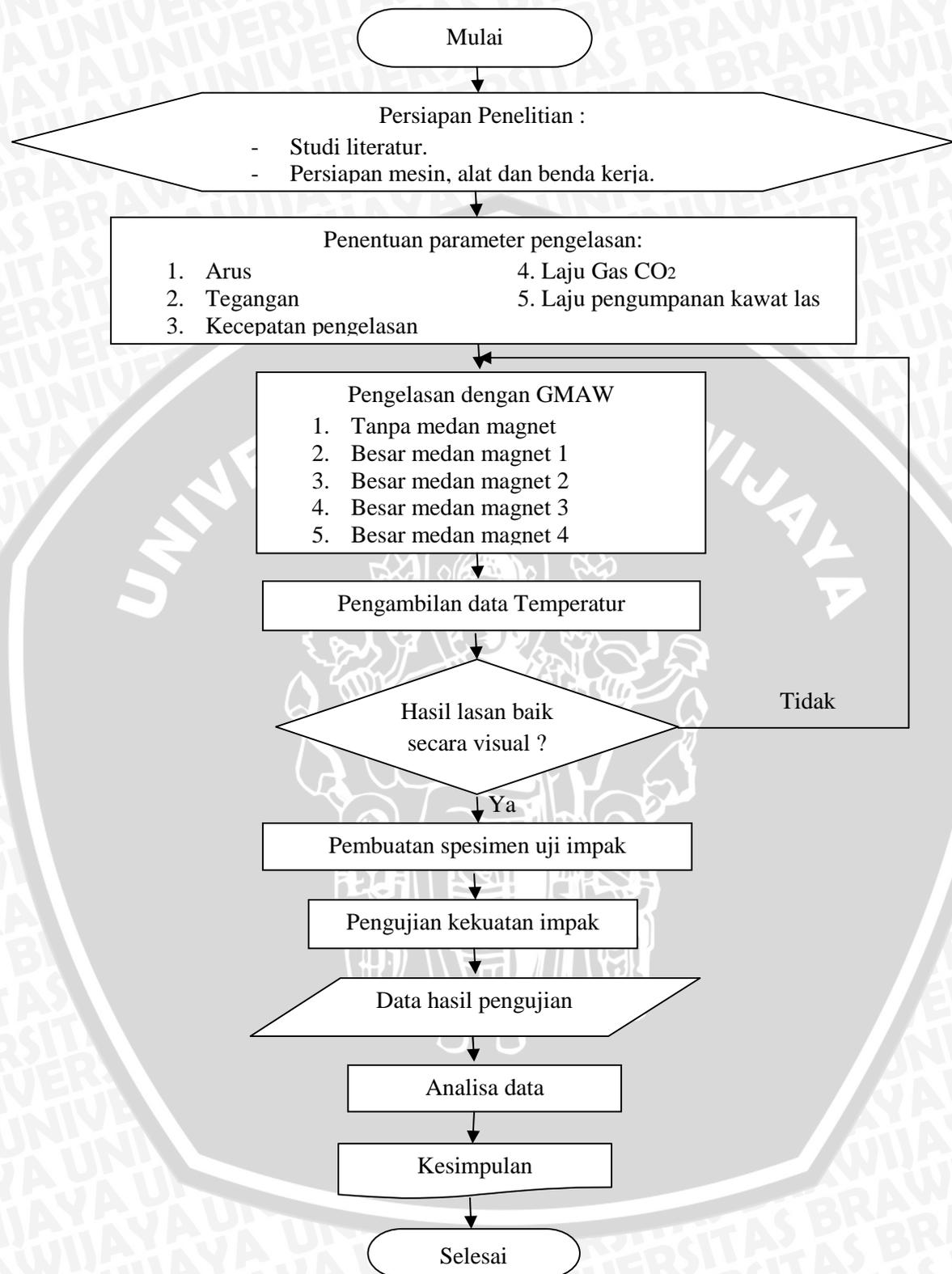
Sumber: ASTM-E23

Pada pengambilan data pengujian impak, data yang didapatkan berupa data sudut simpangan pendulum yaitu sudut awal () dan sudut akhir (). Data tersebut dimasukkan ke dalam rumusan yang ada dan dilakukan perhitungan untuk mendapatkan data besar energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen. Hasil perhitungan data besar energi yang dibutuhkan untuk mematahkan specimen. Hasil perhitungan tersebut kemudian dimasukkan dalam Tabel 3.4 berikut:

Tabel 3.4 Rancangan data besar energi yang dibutuhkan untuk mematahkan spesimen.

No	Besarnya pada Medan magnet	Perulangan Data		
		1	2	3
1	Tanpa induksi magnet	Z_{11}	Z_{21}	Z_{31}
2	3 A	Z_{12}	Z_{22}	Z_{32}
3	6 A	Z_{13}	Z_{23}	Z_{33}
4	9 A	Z_{14}	Z_{24}	Z_{34}
5	12 A	Z_{15}	Z_{25}	Z_{35}
6	15 A	Z_{16}	Z_{26}	Z_{36}

3.7 Diagram alir penelitian



Gambar 3. 17 Diagram alir penelitian

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

Pada penelitian ini pengaruh penambahan induksi magnet eksternal terhadap laju pendinginan dan kekuatan impak hasil lasan diketahui melalui data yang telah di dapatkan yaitu pembacaan temperatur pada saat pengelasan dan kekuatan impak menggunakan alat uji impak *charpy*.

4.1.1 Data Hasil Pengukuran Induksi Magnet Eksternal

Dari hasil pengukuran induksi magnet eksternal pada kampuh las dapat dilihat pada Tabel 4.1 di bawah ini.

Tabel 4.1 Data Besar Induksi Magnet

Arus (A)	Besar Induksi Magnet (mT)			Rata-rata (mT)
0	0			0
3	2,4	2,3	2,5	2,4
6	3,4	3,4	3,4	3,4
9	4,6	4,4	4,3	4,43
12	6,5	6,5	6,3	6,43
15	9,1	9	9	9,03

4.1.2 Data Temperatur

Dari penelitian variasi penambahan medan magnet pada pengelasan baja QTS didapatkan berbagai siklus termal dan laju pendinginan yang diambil dari jarak 10 mm dari pusat las. Data temperatur yang didapat dapat dilihat pada **Lampiran 1**.

4.1.3 Data Hasil Pengujian Kekuatan Impak

Pengaruh penambahan induksi magnetik terhadap kekuatan impak hasil lasan didapatkan melalui pengujian kekuatan impak dengan metode *impact charpy test*. Dari data dibawah ini dapat dilihat nilai ketangguhan yang terdapat pada hasil pengelasan.

Spesifikasi Pendulum

- Panjang lengan pendulum : 750 mm
- Berat pendulum : 26,2 kg
- Sudut akhir tanpa beban : 117°

Tabel 4.3 Data Kekuatan Impak

MEDAN MAGNET	NO	p (mm)	l (mm)	t (mm)	h (mm)	A (mm ²)	SUDUT AWAL (α)	SUDUT AKHIR (β)	IIARGA IMPACT (JOULE/mm ²)	Kata-Kata (J/mm ²)	PERMUKAAN PATAHAN
0 mT	1	60	10	10	8	80	120	88	1.20	1.20	GETAS
2.4 mT	1	60	10	10	8	80	120	86	1.29	1.32	GETAS
	2	60	10	10	8	80	120	84.5	1.35		
3.4 mT	1	60	10	10	8	80	120	82.5	1.44	1.45	GETAS
	2	60	10	10	8	80	120	82	1.46		
4.43 mT	1	60	10	10	8	80	120	81	1.50	1.49	GETAS
	2	60	10	10	8	80	120	81.5	1.48		
6.43 mT	1	60	10	10	8	80	120	77	1.57	1.52	ULET
	2	60	10	10	8	80	120	79.5	1.56		
9.03 mT	1	60	10	10	8	80	120	73	1.83	1.95	ULET
	2	60	10	10	8	80	120	67	2.07		

4.1.4 Hasil Perhitungan Energi

- **Energi Ideal**

Energy atau usaha untuk mematahkan specimen dapat dicari dari persamaan sebagai berikut (verma, ER. CL, 1976 : 86) :

$$\begin{aligned}
 E' &= WH1-WH2 \\
 &= W (H1 - H2) \\
 &= W ((R - R \cos \alpha) - (R - R \cos \beta)) \\
 &= WR (1 - \cos \alpha) - (1 - \cos \beta) \\
 &= WR (\cos \alpha - \cos \beta)
 \end{aligned}$$

Dengan : E' = Energi untuk mematahkan Spesimen [J]

m = Massa dari Pendulum [Kg]

W = Berat Pendulum [N]

g = Percepatan Gravitasi = $9,806 \text{ [ms}^{-2}\text{]}$

$H1$ = Tinggi Kedudukan awal Pendulum [m]

$H2$ = Tinggi pendulum setelah mematahkan [m]

R = Panjang lengan pendulum [m]

= Sudut Simpangan awal [$^\circ$]

= Sudut simpangan akhir dengan beban [$^\circ$]

Perhitungan Energi untuk mematahkan Spesimen :

$$\begin{aligned}
 E' &= WH_1 - WH_2 \\
 &= W (H_1 - H_2) \\
 &= W ((R + R \cos \theta + R \sin \theta) + (R - R \cos \theta)) \\
 &= WR (\cos \theta + \sin \theta) + (1 - \cos \theta) \\
 &= WR (\cos \theta + \sin \theta + \cos \theta) \\
 &= 26,2 \cdot 0,75 \cdot 10 (\cos 90 + \sin 30 + \cos 88) \\
 &= 105,11 \text{ Joule}
 \end{aligned}$$

- **Perhitungan Kerugian Energi**

Kerugian energy dapat disebabkan karena gesekan dalam poros bantalan (herman E, Davis, 1964 : 236). Energi gesekan dapat kita hitung melalui besarnya energy ayunan sebelum specimen diletakkan di dudukan.

$$f = WR (\cos \theta_0 - \cos \theta)$$

Dengan : f = energi gesekan [J]
 θ_0 = Sudut *Dry run* [°]

$$f = WR (\cos \theta_0 - \cos \theta)$$

$$f = 26,2 \cdot 0,75 \cdot 10 (\sin 30 - \sin 27)$$

$$f = 9,04 \text{ Joule}$$

- **Perhitungan Energi Aktual**

Untuk menghitung energi aktual maka di dapatkan rumus sebagai berikut:

$$E = E' - f$$

$$E = 105,11 \text{ Joule} - 9,04 \text{ Joule}$$

$$E = 96,07 \text{ Joule}$$

4.1.5 Hasil Perhitungan Harga Impak

Bila energi ini kita bagi dengan luas penampang melintang dari patahan di bawah takikan maka kita akan dapatkan besarnya kekuatan impak .

$$A_k = \frac{E}{A_0}$$

Dengan : A_k = Kekuatan impact atau nilai pukul takik [$J \cdot mm^{-2}$]
 E = Energi patahan secara aktual [J]
 A_0 = Luas penampang batang lintang dibawah takikan [mm^2]

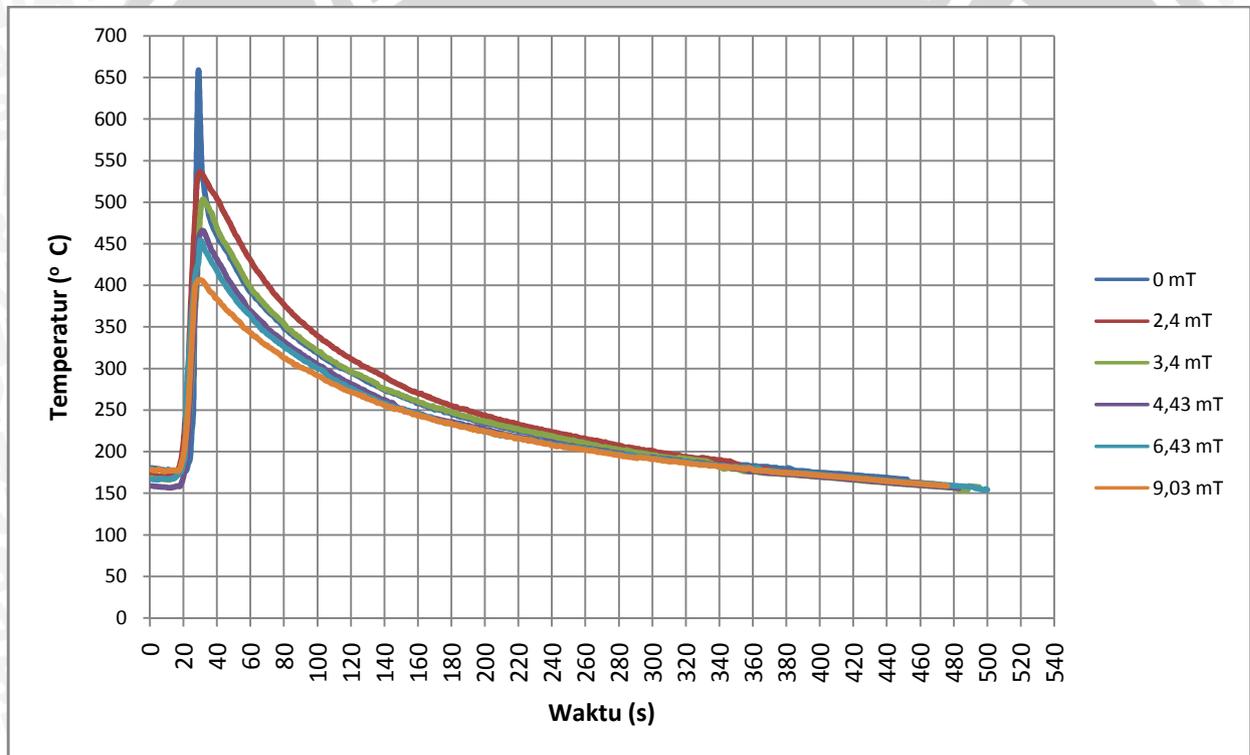
Perhitungan Harga Impak

$$A_k = \frac{E}{A_0}$$

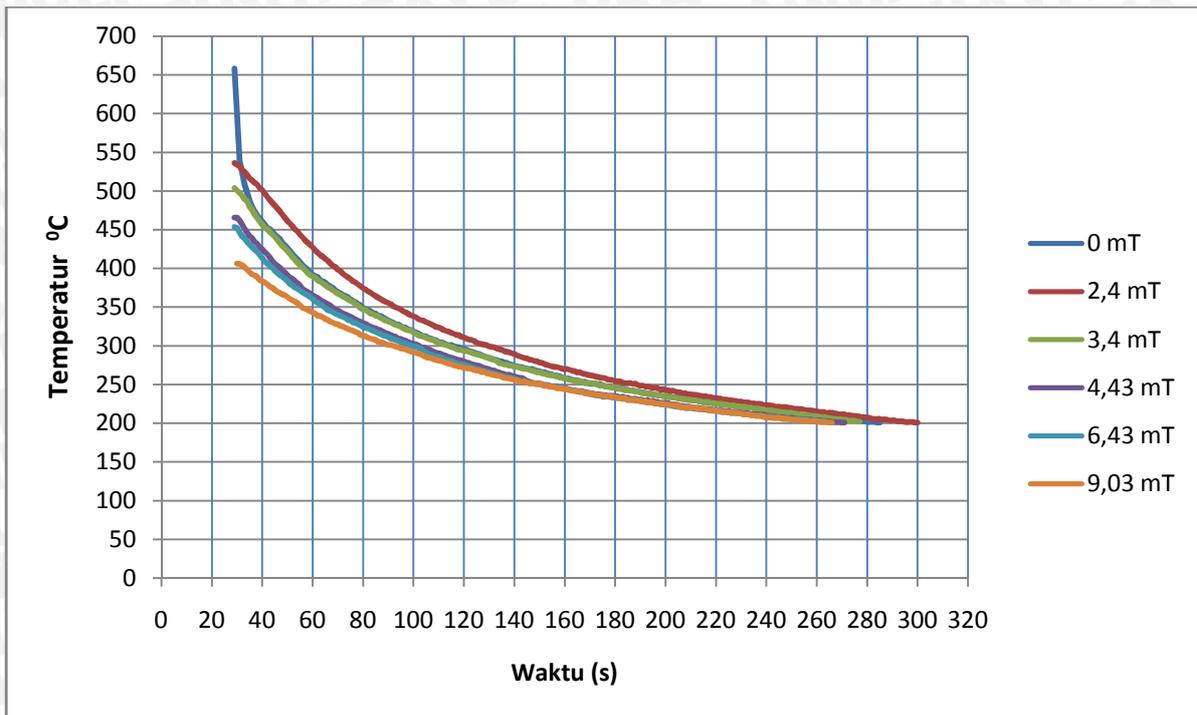
$$A_k = \frac{96.07}{80}$$

$$= 1,2 \text{ J/mm}^2$$

4.2 Pembahasan



Gambar 4.1 Grafik Siklus Termal Pada Jarak 10 mm dari Pusat Las



Gambar 4.2 Laju Pendinginan pada Jarak 10 mm Dari Pusat Las

Pada grafik 1 terlihat bahwa semakin besar induksi magnet yang diberikan maka temperatur puncak akan semakin turun. Penurunan temperatur puncak ini dikarenakan karena adanya pengaruh medan magnet yang menyebabkan sirkulasi logam cair semakin cepat selama pengelasan. Semakin cepatnya sirkulasi logam cair menyebabkan pelepasan panas secara konveksi pada logam cair semakin besar. Hal ini tentu berdampak pula pada temperatur puncak HAZ dan logam induk. Dimana pada jarak 10 mm dari pusat las, pengelasan tanpa induksi magnet menghasilkan temperatur puncak sebesar 658,7 °C, kemudian dengan penambahan induksi magnet sebesar 2,4 mT menurunkan temperatur puncak las menjadi 536 °C begitu seterusnya hingga temperatur puncak yang terkecil pada penambahan induksi magnet sebesar 9,03 mT yaitu 453 °C.

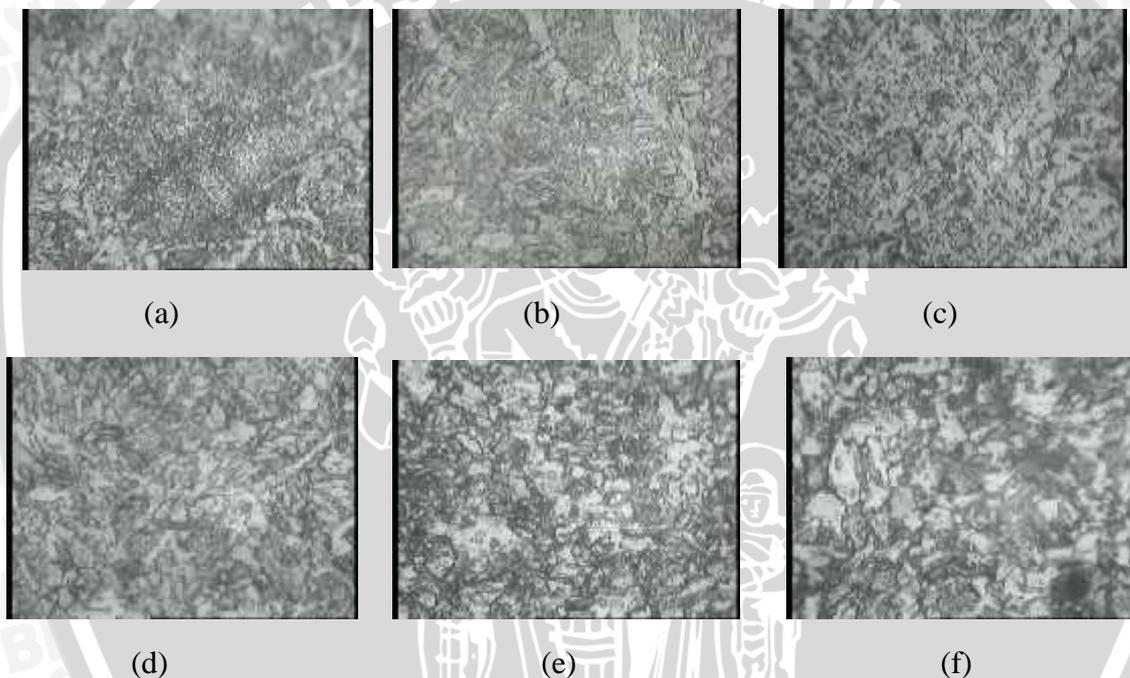
Sedangkan pada grafik 2 terlihat bahwa semakin besar induksi magnet yang ditambahkan maka temperatur puncak semakin menurun sehingga laju pendinginan akan turun. Grafik pendinginan yang curam menandakan bahwa logam mengalami pendinginan yang cepat begitu pula sebaliknya, grafik laju pendinginan yang semakin landai menandakan bahwa logam mengalami pendinginan yang lambat. Jika dibandingkan dengan penurunan temperatur dari 400° C hingga 200° C pada **Lampiran 2** terlihat bahwa pada penambahan induksi magnet sebesar 2,4 mT memiliki waktu pendinginan yang lebih cepat yaitu 225 detik jika dibandingkan dengan penambahan induksi magnet sebesar 3,4 mT dan begitu pula seterusnya hingga 9,03 mT yang

mengalami pendinginan yang lebih lambat yaitu 233 detik. Hal ini disebabkan karena penurunan temperatur puncak menyebabkan gradien temperatur semakin kecil yang berarti turunnya temperatur per satuan waktu atau laju pendinginannya semakin turun. Hal ini sesuai dengan persamaan laju pendinginan untuk pelat tipis yaitu:

$$R = 2 \cdot f \cdot k \cdot \dots \cdot Cs \left(\frac{h}{H_{nett}} \right)^2 (T_c - T_o)^3,$$

dengan R (laju pendinginan) sebanding dengan gradien temperatur.

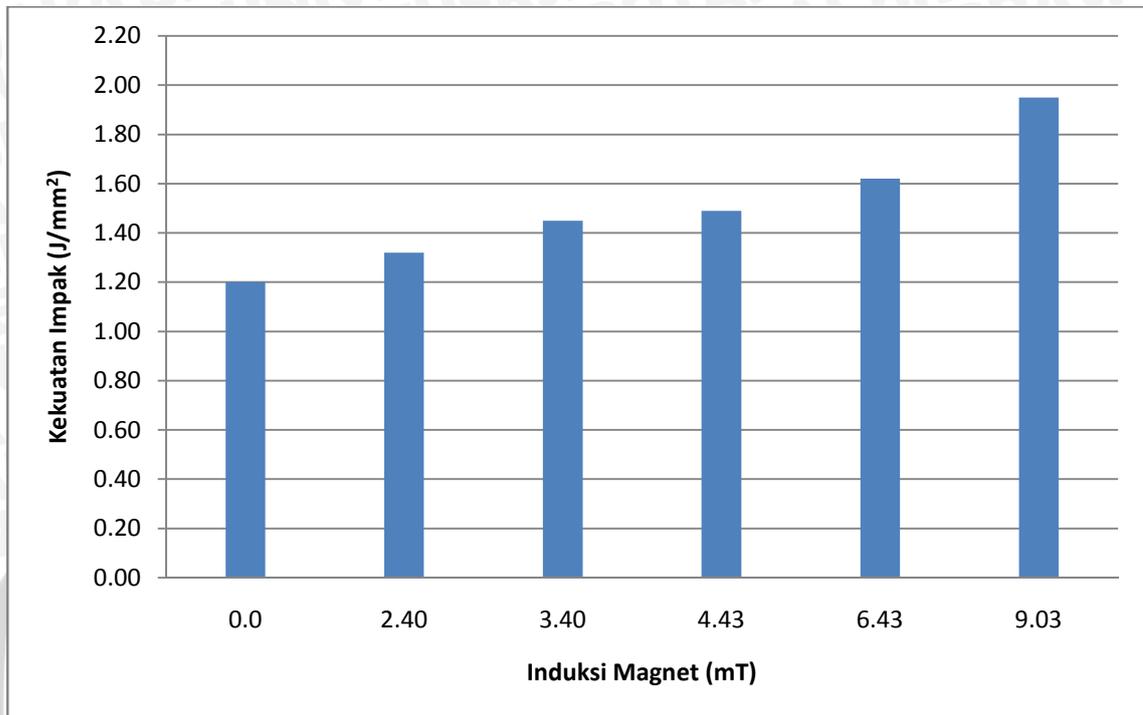
Laju pendinginan yang lambat akan memberi waktu pada butiran untuk membentuk butiran yang besar. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Struktur Butir Logam Las Pada Perbesaran 400x (a) 0 mT; (b) 2,4 mT; (c) 3,4 mT; (d) 4,43 mT; (e) 6,43 mT (f) 9,03 Mt

Dari gambar 4.3 dapat dilihat bahwa pada pendinginan cepat yang terjadi pada spesimen tanpa penambahan induksi magnet terbentuk butiran yang kecil. Dan pada penambahan induksi magnet yang semakin besar, dengan pendinginan yang lebih lambat terbentuk struktur butiran yang lebih besar. Hal tersebut tentu berdampak pada tingkat keuletan material las. Sehingga semakin kecil laju pendinginan maka akan membentuk material yang ulet, begitu juga sebaliknya, laju pendinginan yang cepat akan membentuk material yang getas sehingga berpengaruh pada kekuatan impaknya.

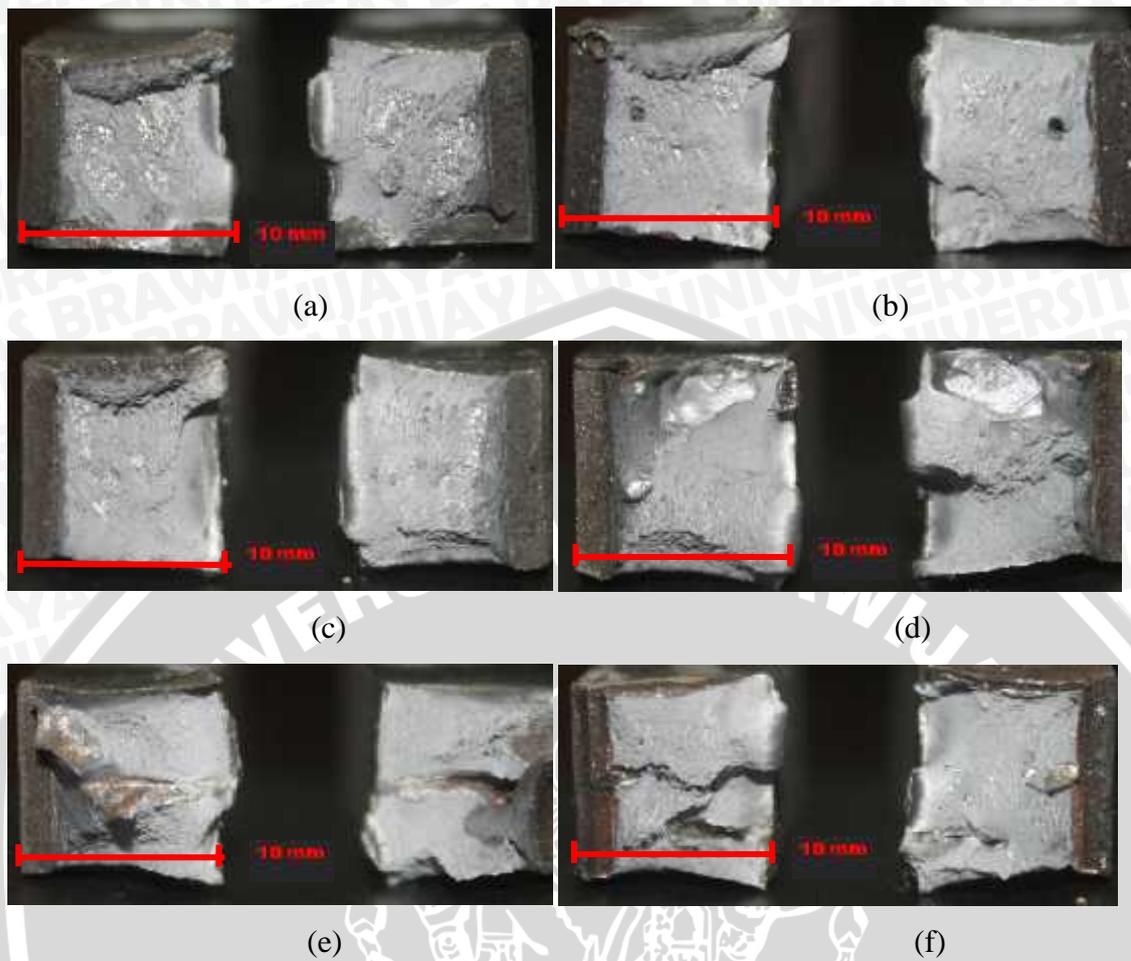
Perubahannya dapat dilihat pada grafik 4.3 dengan menggunakan metode *charpy impact test*.



Gambar 4.4 Grafik Kekuatan Impak Hasil Lasan.

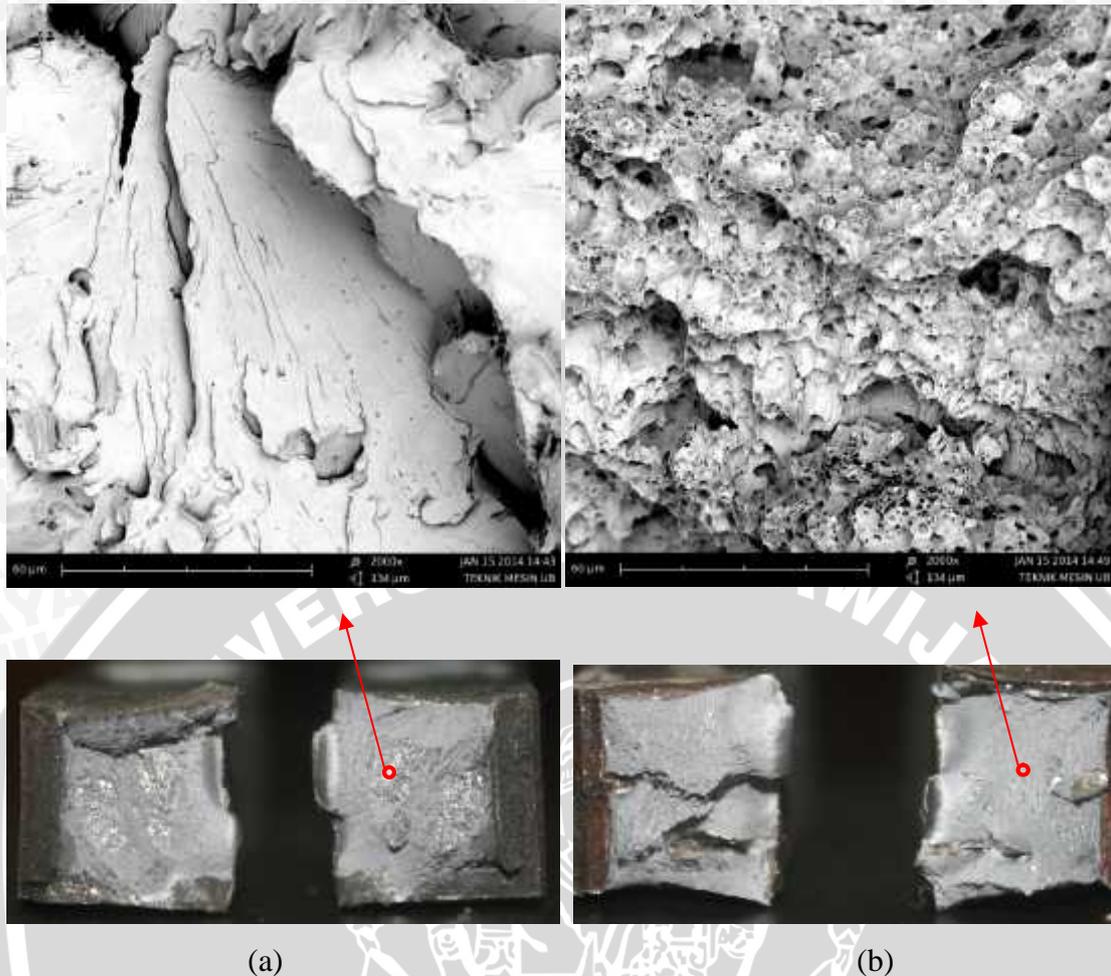
Dari grafik dapat dilihat bahwa semakin besar induksi magnet yang ditambahkan maka kekuatannya meningkat. Terlihat pada spesimen tanpa penambahan induksi magnet memiliki kekuatan impaknya yang terkecil yaitu sebesar 1,2 J/mm² kemudian semakin meningkat kekuatannya pada penambahan induksi magnet sebesar 2,4 mT yaitu 1,32 J/mm², begitu seterusnya hingga kekuatan impaknya paling besar pada penambahan induksi magnet sebesar 9,03 mT yaitu sebesar 1,95 J/mm².

Pada hasil impaknya spesimen tanpa perlakuan didapatkan jenis patahan campuran antara patahan getas dan ulet, sedangkan pada hasil impaknya spesimen dengan induksi magnet sebesar 9,03 mT didapatkan jenis patahan yang ulet. Patahan yang terjadi pada spesimen impaknya pada masing-masing penambahan induksi magnet dapat dilihat pada gambar 4.5 dibawah ini.



Gambar 4.5 Permukaan Patahan Pengujian Impak (a) 0 mT; (b) 2,4 mT; (c) 3,4 mT; (d) 4,43 mT; (e) 6,43 mT (f) 9,03 Mt

Pada perbesaran 2000x dengan menggunakan SEM (Scanning Electron Microscope) pada spesimen 0 mT dan 9,03 mT makin jelas terlihat perbedaan patahan yang terbentuk.

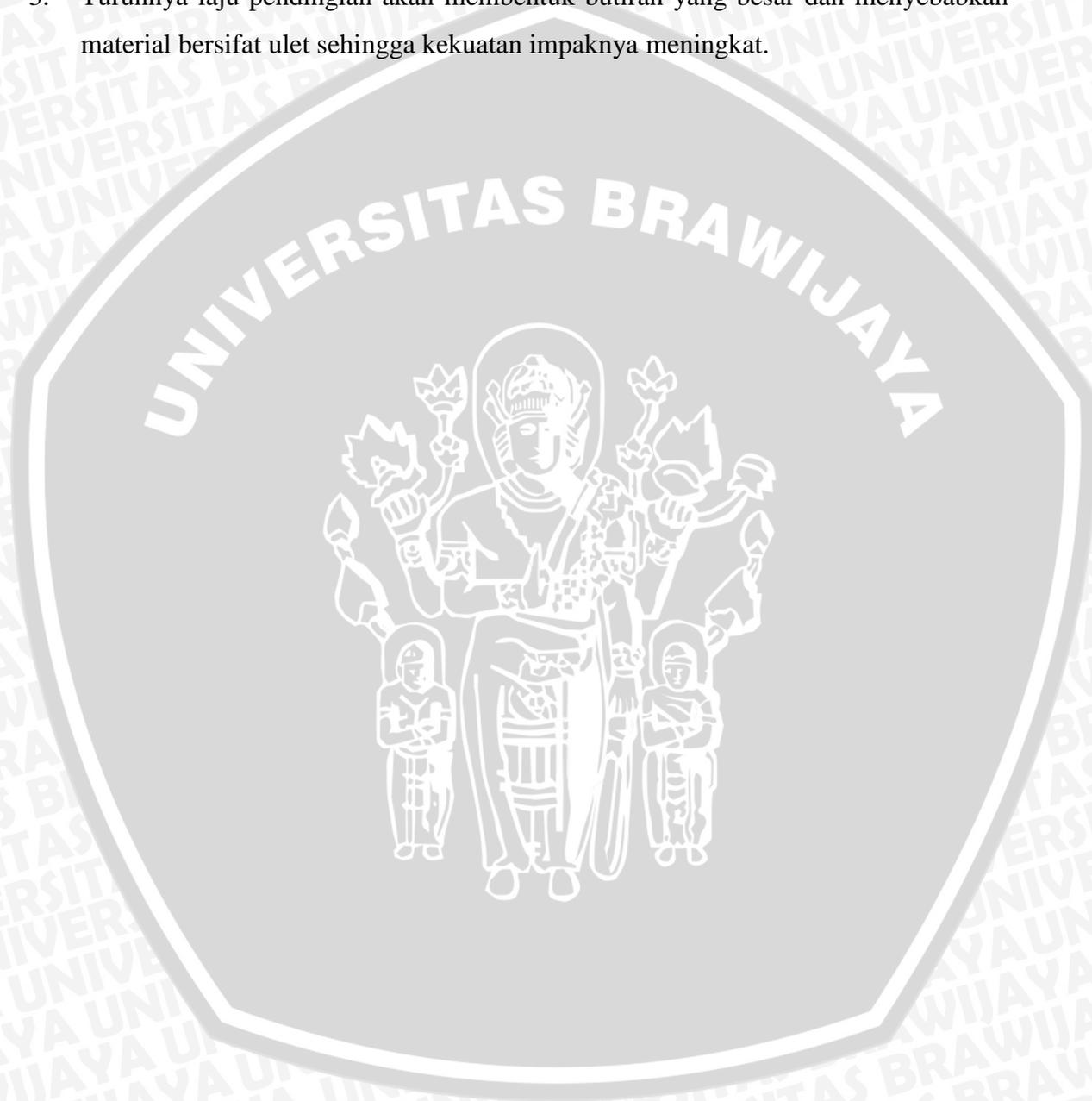


Gambar 4.6 Permukaan patahan hasil SEM a) 0 mT, b) 9,03 mT

Dari gambar 4.6 a dapat dilihat pola patahan *cleavage*. Patahan *cleavage* terjadi pada material diakibatkan Perpatahan granular/kristalin, yang dihasilkan oleh mekanisme pembelahan (*cleavage*) pada butir-butir dari bahan (logam) yang rapuh (*brittle*). Ditandai dengan permukaan patahan yang datar yang mampu memberikan daya pantul cahaya yang tinggi (mengkilat). Sedangkan pada gambar 4.6 b dapat dilihat pola patahan *dimple*. Patahan terjadi akibat beban yang overload, mengakibatkan terbentuknya kekosongan butiran yang kemudian bergabung pada struktur paduan. Kekosongan butiran yang bergabung ini mengakibatkan regangan *discontinuity*, ketika regangan meningkat menyebabkan kekosongan butiran ini tumbuh kemudian membentuk permukaan patahan yang menampilkan cekungan-cekungan yang semakin membesar. Kekosongan butiran yang bergabung dan menumpuk inilah yang disebut *dimple*. Pola patahan *dimple* sering dijumpai pada material yang ulet.

Dari pembahasan di atas maka didapatkan korelasi yaitu:

1. Semakin besar induksi magnet yang diberikan akan menurunkan temperature puncak las yang disebabkan oleh laju konveksi logam cair semakin efektif.
2. Turunnya temperatur puncak akan menyebabkan laju pendinginan turun yang disebabkan gradien temperatur yang kecil.
3. Turunnya laju pendinginan akan membentuk butiran yang besar dan menyebabkan material bersifat ulet sehingga kekuatan impaknya meningkat.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

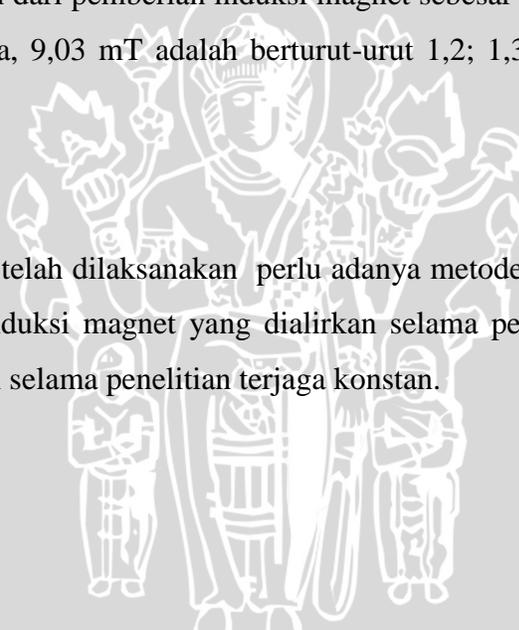
5.1 Kesimpulan

Dari pengamatan data hasil penelitian dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Induksi magnet eksternal mempengaruhi laju pendinginan pada proses pengelasan. Semakin besar induksi magnet yang diberikan maka laju pendinginannya semakin turun. Pada pemberian induksi magnet 9,03 mT mengalami laju pendinginan yang paling rendah dan berturut-turut naik seiring turunnya induksi magnet yang diberikan.
2. Laju pendinginan yang lambat akibat temperatur puncak yang turun menyebabkan butiran logam tumbuh semakin besar sehingga menaikkan kekuatan impact. Kekuatan impact yang dihasilkan dari pemberian induksi magnet sebesar 0 mT, 2,4 mT, 3,4 mT, 4,43 mT, 6,43 mT, dan 9,03 mT adalah berturut-turut 1,2; 1,32; 1,45; 1,49; 1,62; dan 1,95 J/mm².

5.2 Saran

1. Dari penelitian yang telah dilaksanakan perlu adanya metode yang dapat digunakan sebagai pengontrol induksi magnet yang dialirkan selama pengelasan, agar induksi magnet yang dialirkan selama penelitian terjaga konstan.



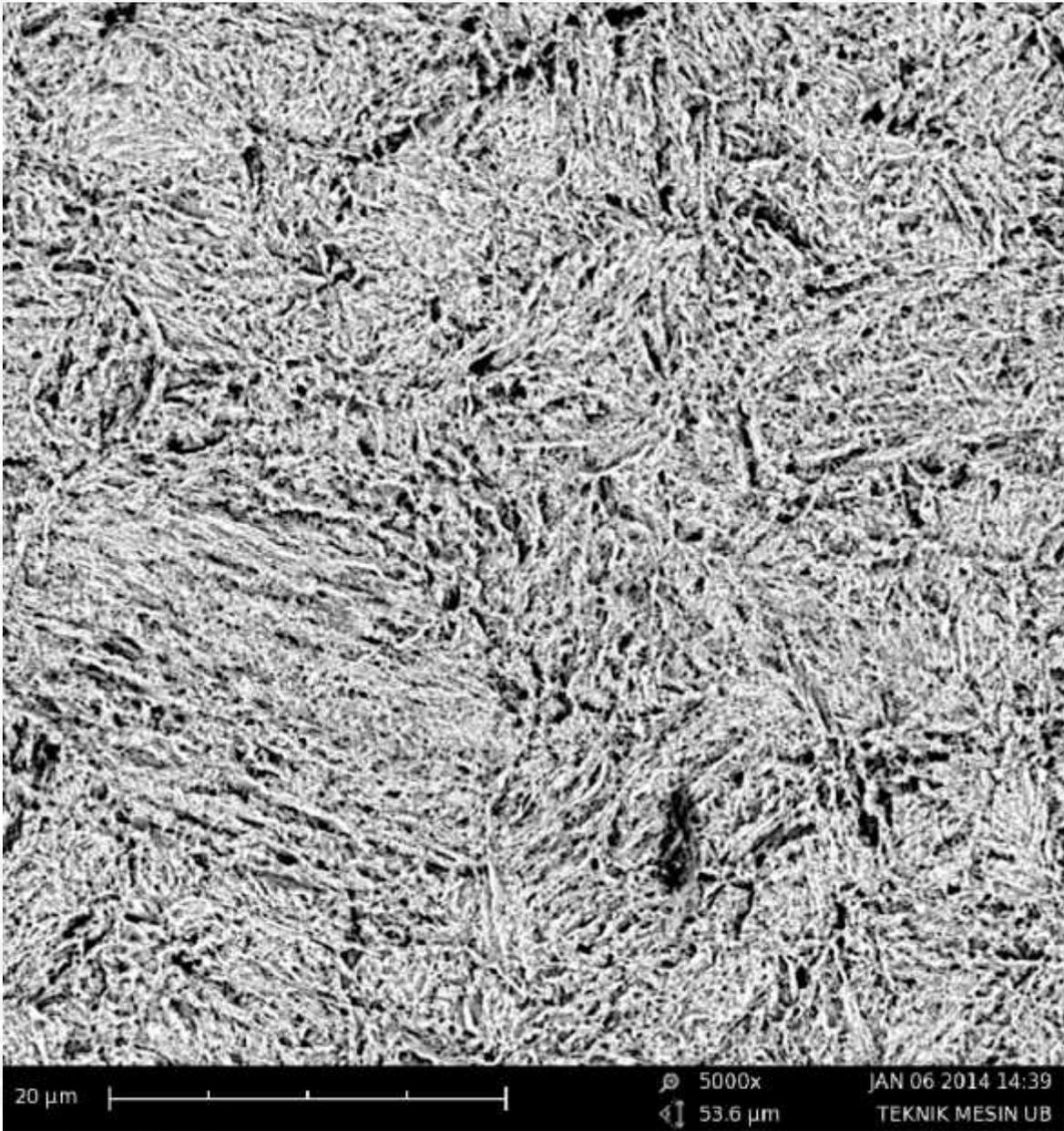
DAFTAR PUSTAKA

- ASTM. 2003. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. West Conshohocken: American Standart for Testing and Materials.
- AWS. 2000. *Welding Inspection Handbook, Third Edition*. Miami: American Welding Society.
- Davis, H.E., Troxell, G. E., & Wiskocil, C. 1955. *The Testing and Inspection of Engineering Material*. New York: Mc-Grow-Hill.
- DeHerrera, Noemi. 2003. *Computer Calculation of Fusion Zone Geometry Considering Fluid Flow and Heat Transfer During Fusion Welding*. El Paso:University of Texas.<http://forms.gradsch.psu.edu/diversity/sroppapers/2002/DeHerreraNoemi.pdf>. (diakses 21 September 2013)
- Hambali, Imam. 2007. *Pengaruh Pola Pembangkitan Medan Magnet Solenoid Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Impak pada Pengelasan Baja ST 37 dengan EMS 45*. Jurnal tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Khan, Ibrahim. 2007. *Welding Science and Technology*. New Delhi: New Age International (P) Ltd, Publisher.
- Kou, Sindo. 1987. *Welding Metalurgy*, New Jersey: Wiley-Interscience
- Kou, Sindo. 2003. *Welding Metalurgy Second Edition*, New Jersey: Wiley-Interscience
- Messler, Robert w. Jr, 1999. *Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and metallurgy*. Markono Print Media Pte Ltd, Singapore
- Sugiarto & Widhiyanuriyawan, D. 2007. *Pengaruh Penambahan Magnet Eksternal Terhadap Perubahan Siklus Termal dan Struktur Butiran HAZ*. Jurnal tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Vlack, Lawrence V.H. 1991. *Ilmu dan Teknologi Bahan*. Edisi Kelima. Terjemahan Djaprie, Sriati. Jakarta: Erlangga.
- Wiryosumarto, Harsono. Dan Okumura, Toshie. 1994. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita

LAMPIRAN



Lampiran 1 Foto Mikrostruktur *Base Metal*



Lampiran 2 Tabel data temperatur pada jarak 10 mm dari pusat las

Waktu (detik)	0 mT (°C)	2,4 Mt (°C)	3,4 mT (°C)	4,43 mT (°C)	6,43 mT (°C)	9,03 Mt (°C)
1	180.5	171.8	168.2	158.6	166.7	178.6
2	180.2	171.6	167.6	158.4	166.5	177.4
3	179.8	171.6	167.2	158.1	166.3	177.3
4	179.8	171.2	167.0	158.0	166.3	177.1
5	179.4	170.7	166.9	157.7	166.1	178.7
6	179.1	170.5	166.8	157.5	167.7	178.4
7	178.6	170.3	166.7	157.3	167.5	177.1
8	178.4	170.0	166.5	157.2	167.3	176.8
9	177.3	170.2	166.4	157.1	167.3	176.1
10	178.1	170.5	166.3	156.8	167.1	177.2
11	178.7	170.6	166.2	156.6	167.0	177.0
12	177.5	170.9	166.0	156.4	167.2	177.5
13	177.2	171.2	167.5	156.4	167.4	176.9
14	177.7	171.6	167.2	157.3	167.9	177.9
15	176.3	173.3	168.6	157.4	168.3	177.3
16	176.9	175.2	170.8	158.5	170.8	177.6
17	177.0	178.6	172.3	158.3	172.7	176.5
18	176.2	184.9	174.3	158.2	174.3	179.0
19	176.4	194.3	178.5	162.6	178.2	186.7
20	175.5	211.1	185.9	169.6	185.6	194.6
21	176.2	235.4	194.2	179.7	194.8	209.0
22	178.6	254.6	208.6	197.3	275.2	229.4
23	186.8	302.5	228.5	226.2	307.1	258.0
24	191.3	353.7	257.7	264.5	336.8	292.2
25	224.3	403.2	291.4	305.5	365.9	331.2
26	253.5	446.1	330.5	333.3	389.8	368.6
27	425.9	482.2	368.3	379.2	410.2	398.4
28	566.2	522.4	398.2	414.4	421.3	404.0
29	658.3	533.7	446.2	452.5	427.5	406.7
30	599.4	536.2	482.4	461.8	453.8	406.3
31	538.5	534.1	501.5	465.4	452.8	406.0
32	524.4	531.5	503.8	465.4	446.9	404.3
33	508.8	527.2	500.4	461.6	441.3	401.5
34	498.7	524.6	497.4	456.8	438.8	398.6
35	486.9	520.8	493.9	451.3	434.7	395.2
36	479.5	516.3	489.3	446.3	431.3	392.4
37	473.3	513.3	486.9	441.5	427.2	391.0
38	468.6	510.5	479.5	438.9	424.6	389.0
39	464.7	508.3	475.3	434.2	421.2	385.0

40	460.5	504.2	469.2	431.6	417.6	383.6
41	456.6	501.4	464.7	427.5	413.8	381.8
42	452.5	497.2	460.5	424.7	409.3	379.4
43	450.7	492.4	456.6	421.3	406.3	376.6
44	446.9	488.5	452.5	417.8	403.5	375.0
45	443.7	484.8	450.7	413.7	401.9	372.0
46	441.0	481.3	446.9	409.3	398.3	369.8
47	437.9	477.4	443.7	406.2	396.8	368.4
48	432.8	473.9	440.6	403.6	393.1	366.3
49	429.8	469.5	437.0	400.9	390.4	365.3
50	426.5	465.4	432.5	398.0	388.6	363.1
51	422.7	461.1	429.0	394.4	386.2	360.3
52	418.6	458.4	425.8	391.5	383.6	358.7
53	415.4	454.6	422.4	389.8	381.9	357.0
54	411.7	450.5	418.4	388.0	379.3	355.2
55	407.8	447.7	414.8	384.5	377.1	352.2
56	403.8	443.2	410.9	383.0	374.4	349.1
57	401.4	440.1	407.5	380.5	372.6	347.7
58	398.2	436.2	403.5	378.4	370.5	346.7
59	394.6	433.4	400.8	375.6	368.7	344.7
60	391.9	430.7	397.3	374.1	366.2	343.1
61	390.3	427.2	394.3	371.4	364.1	341.5
62	388.8	423.2	391.3	369.4	362.2	338.7
63	384.9	420.3	388.2	367.4	360.5	338.8
64	383.4	417.2	386.4	365.6	358.2	336.9
65	381.4	415.4	383.5	363.9	356.7	334.9
66	378.7	412.5	380.7	361.9	355.3	333.4
67	376.4	409.8	377.2	359.8	353.9	331.1
68	374.8	406.4	373.1	358.1	351.0	330.0
69	371.7	403.4	371.2	356.9	349.6	328.1
70	369.6	400.9	369.4	353.7	348.5	327.9
71	368.0	397.2	367.7	352.0	346.7	325.7
72	365.8	394.4	365.2	348.5	344.2	324.8
73	364.5	391.5	363.2	347.0	343.1	323.4
74	362.7	388.8	361.3	346.4	341.2	321.8
75	359.9	386.4	359.2	343.9	339.5	320.5
76	357.8	383.8	357.4	341.5	338.2	319.5
77	356.7	380.3	355.5	341.2	336.7	317.8
78	354.4	378.3	353.8	338.5	334.3	316.6
79	352.1	375.5	351.5	338.4	333.1	314.0
80	348.7	373.9	348.9	335.9	332.4	312.7
81	347.1	371.2	346.2	334.5	330.6	312.2



82	346.5	369.3	345.3	332.6	329.5	310.6
83	344.1	367.2	343.2	331.1	327.7	309.3
84	342.2	365.4	341.4	329.9	326.2	308.5
85	341.2	363.5	340.5	328.3	324.2	307.6
86	338.6	360.8	338.8	326.9	323.6	304.7
87	338.4	357.4	337.4	325.9	322.3	304.6
88	336.3	355.4	335.4	324.4	320.2	304.1
89	334.4	353.9	333.9	322.5	319.3	302.2
90	332.7	351.3	332.3	320.8	318.4	301.2
91	330.9	348.8	330.8	320.2	316.5	301.0
92	329.9	346.1	329.1	319.7	315.3	299.6
93	327.9	345.4	327.9	317.1	314.2	299.0
94	327.4	343.6	326.2	315.6	313.6	298.2
95	325.5	341.5	324.6	313.5	311.6	296.5
96	324.1	340.2	323.3	312.8	310.7	296.1
97	323.1	338.5	322.2	312.0	309.3	295.1
98	320.9	337.2	320.6	310.7	308.2	293.8
99	320.5	335.7	319.9	308.8	307.5	292.5
100	318.9	333.3	318.3	307.9	306.5	291.8
101	317.3	332.9	316.1	307.3	304.3	290.8
102	315.9	330.2	315.4	305.3	303.2	289.9
103	313.8	329.6	313.6	303.6	302.4	288.5
104	312.6	327.7	312.5	303.0	301.5	287.0
105	312.0	326.2	311.7	301.9	300.8	285.5
106	310.1	324.1	309.2	300.9	299.4	284.7
107	309.1	323.2	308.8	300.0	298.4	284.1
108	307.8	322.4	307.1	298.2	297.9	282.5
109	307.3	320.7	306.4	297.8	296.3	281.6
110	304.6	319.2	304.6	295.8	295.8	280.9
111	304.2	318.1	303.2	295.0	294.7	280.3
112	303.5	316.3	302.6	294.6	293.3	279.2
113	301.7	315.2	301.9	293.3	292.2	278.2
114	300.5	313.5	300.3	293.2	291.6	276.7
115	300.8	312.5	298.1	292.2	290.2	276.2
116	299.4	311.3	297.4	291.6	289.3	274.6
117	298.4	309.2	296.6	289.8	287.8	274.0
118	297.9	308.4	295.5	289.3	286.7	273.1
119	296.3	307.4	293.7	288.5	285.3	272.8
120	295.8	306.9	292.2	287.0	284.2	271.5
121	294.7	304.3	291.1	286.1	283.6	271.0
122	293.3	303.8	290.2	285.3	282.2	270.4
123	292.2	302.7	289.3	284.5	281.4	270.4



124	291.6	301.3	287.8	282.6	280.5	268.9
125	290.2	300.2	286.7	282.3	279.8	268.0
126	289.3	299.5	285.3	280.5	278.4	268.0
127	287.8	298.9	284.2	277.8	277.8	265.8
128	286.7	297.2	283.6	277.2	276.3	266.8
129	285.3	296.3	282.2	275.9	275.3	264.2
130	284.2	293.2	281.4	275.9	274.3	263.8
131	283.6	291.4	280.5	274.4	273.2	263.2
132	282.2	289.5	279.8	274.5	272.4	262.1
133	281.4	288.8	278.4	272.5	272.5	261.6
134	280.5	287.4	277.8	273.1	271.3	261.3
135	279.8	286.4	276.3	271.9	270.4	259.6
136	278.4	285.9	275.3	271.1	269.6	258.5
137	277.8	284.9	274.5	270.3	270.1	258.3
138	276.3	283.0	273.9	270.3	268.6	257.8
139	275.3	282.2	272.2	268.8	267.5	257.0
140	274.3	281.4	271.3	268.1	267.1	255.6
141	273.2	280.5	270.2	267.4	265.5	255.4
142	272.4	279.2	269.4	265.7	265.9	253.9
143	272.5	277.6	268.5	266.2	264.2	253.4
144	271.3	276.8	267.8	264.6	263.6	254.0
145	270.4	276.3	266.4	264.1	262.8	252.2
146	269.6	275.3	265.6	263.1	261.6	251.0
147	270.1	274.5	264.3	261.8	261.4	251.3
148	268.6	272.9	263.2	262.0	260.7	251.4
149	267.5	272.2	262.3	261.3	259.6	250.4
150	267.1	271.3	262.4	260.3	258.8	251.3
151	265.5	270.2	261.5	259.1	258.5	249.6
152	265.9	269.4	260.3	258.7	258.0	248.0
153	264.2	268.5	259.2	258.5	256.5	248.1
154	263.6	267.3	258.6	257.0	255.8	247.3
155	262.8	266.6	258.6	256.1	255.4	247.0
156	261.6	265.6	256.7	255.6	254.4	246.6
157	261.4	264.7	254.3	254.8	253.8	244.7
158	260.7	264.3	253.3	254.3	254.0	245.0
159	258.8	263.2	252.2	254.8	252.4	244.7
160	258.2	261.5	251.4	252.8	251.3	243.1
161	258.0	261.5	251.5	251.7	251.6	243.9
162	257.3	260.3	250.8	252.5	251.7	242.2
163	256.1	259.2	249.4	252.0	250.7	242.0
164	255.4	258.4	248.4	251.5	250.9	241.4
165	255.1	257.5	248.9	251.6	249.6	241.7



166	253.7	257.8	247.3	249.9	248.2	240.3
167	253.0	256.4	247.8	248.4	248.4	240.3
168	253.5	255.1	247.7	249.0	247.5	239.2
169	251.9	254.4	247.3	248.3	247.0	238.2
170	250.6	254.6	246.2	247.3	246.4	238.7
171	250.8	253.5	245.6	246.7	245.2	237.0
172	251.1	252.7	244.8	245.7	245.6	236.9
173	250.2	252.2	244.3	246.5	244.7	236.3
174	250.7	251.2	243.3	245.0	243.3	236.5
175	249.0	250.6	242.5	244.2	243.9	235.3
176	247.3	250.3	241.9	243.9	242.5	235.2
177	247.8	250.2	241.2	242.7	242.5	234.0
178	247.1	249.3	240.4	242.9	241.5	235.3
179	246.5	249.4	240.5	242.0	241.8	233.8
180	246.1	248.5	239.8	242.0	240.6	233.9
181	244.4	247.3	239.4	241.2	240.0	232.7
182	244.8	247.2	238.8	240.8	239.4	231.9
183	244.3	246.6	238.3	239.7	238.3	231.9
184	242.6	245.6	237.3	238.6	238.8	231.9
185	243.1	245.7	237.5	239.3	237.5	230.1
186	241.8	244.3	236.9	237.8	237.2	230.0
187	241.9	244.2	236.2	237.6	236.5	229.5
188	241.0	243.5	236.3	237.0	236.8	230.0
189	241.1	242.5	235.2	237.1	235.6	229.0
190	239.8	242.3	235.4	235.8	235.5	228.4
191	239.6	241.2	235.5	236.1	234.3	227.5
192	239.0	241.4	234.8	234.9	234.9	228.9
193	238.0	241.5	234.4	235.6	233.8	226.3
194	238.1	238.8	233.4	234.1	233.8	227.6
195	236.7	238.4	233.9	234.0	232.5	226.6
196	236.7	237.4	232.3	233.0	232.4	224.9
197	236.0	236.9	232.8	232.9	231.6	225.1
198	236.1	236.3	231.1	231.9	231.7	224.9
199	234.8	235.8	231.4	231.9	230.5	224.9
200	234.9	235.7	231.6	230.9	230.6	224.4
201	233.8	234.3	230.5	231.1	229.5	223.6
202	234.7	234.2	230.2	230.3	229.7	223.4
203	233.2	234.6	229.5	230.1	228.9	223.3
204	233.2	233.8	229.2	229.3	228.7	222.3
205	232.4	233.3	229.7	229.6	227.6	222.5
206	231.7	232.3	228.3	228.4	228.1	220.5
207	231.4	232.5	228.9	228.5	226.7	221.1



208	231.4	232.9	227.2	227.1	226.9	220.2
209	229.8	231.3	227.6	227.8	226.9	220.5
210	229.8	231.9	226.3	227.2	225.4	220.2
211	229.1	230.0	226.2	226.2	225.5	219.8
212	229.5	230.2	225.6	226.2	224.8	220.3
213	228.2	230.4	225.9	225.1	224.9	217.9
214	228.0	229.5	224.3	225.1	224.5	217.8
215	227.1	229.2	224.2	225.1	223.5	218.5
216	228.0	228.6	223.6	224.3	223.6	218.3
217	226.0	228.8	223.3	223.9	223.1	216.7
218	226.8	227.3	222.2	223.4	222.5	215.8
219	225.9	227.3	222.3	223.0	222.3	215.8
220	224.6	226.5	221.4	223.2	221.1	216.3
221	224.9	226.3	221.5	221.3	221.4	215.8
222	224.3	225.4	220.3	221.8	220.5	215.0
223	224.1	225.5	220.2	221.0	220.8	214.2
224	224.1	224.3	219.6	221.6	220.4	214.9
225	223.3	224.2	219.6	220.7	219.6	214.4
226	222.9	223.6	218.7	219.8	219.8	212.8
227	222.4	223.6	218.3	220.4	218.3	213.6
228	222.0	222.7	218.2	218.9	218.3	214.1
229	221.6	222.3	217.5	219.0	218.5	212.7
230	220.5	221.2	217.5	218.8	217.9	212.4
231	220.9	221.5	217.3	218.1	217.2	211.1
232	219.8	220.5	216.2	217.7	216.3	211.3
233	220.0	220.3	216.4	216.8	216.2	211.2
234	220.0	219.2	216.5	216.5	216.4	210.2
235	219.2	219.4	215.8	216.6	215.5	210.2
236	219.5	219.5	215.4	215.8	215.3	209.1
237	217.6	218.8	215.4	215.5	214.4	209.3
238	217.5	218.4	214.9	215.0	214.5	209.1
239	218.0	218.4	214.3	214.5	214.3	208.7
240	217.4	217.9	213.8	214.3	213.2	207.0
241	216.5	217.8	213.7	213.2	213.6	207.3
242	215.5	217.4	213.3	213.6	213.6	206.8
243	215.6	216.4	212.2	213.6	212.7	206.3
244	215.9	216.9	212.6	212.7	212.3	206.5
245	215.3	216.3	212.8	212.3	211.2	206.9
246	214.7	215.8	211.3	211.2	211.5	206.2
247	213.8	215.7	211.3	211.5	211.5	205.3
248	214.4	214.3	211.5	211.5	210.3	205.2
249	214.1	214.2	210.9	210.3	210.2	205.4



250	212.6	214.6	210.3	210.2	209.4	204.5
251	213.0	213.8	210.9	209.4	209.5	204.3
252	213.5	213.3	209.0	209.5	208.8	204.4
253	212.0	213.3	209.2	208.8	208.4	204.5
254	212.1	212.5	208.4	208.4	207.4	203.3
255	210.9	212.9	208.5	207.4	207.9	203.2
256	210.8	212.2	208.2	207.9	207.3	203.6
257	210.7	211.4	207.6	207.3	206.8	202.6
258	209.9	211.5	207.8	206.8	205.8	202.7
259	210.0	211.8	207.3	205.8	205.3	202.3
260	208.7	210.3	206.3	205.3	205.2	202.2
261	208.8	210.2	206.5	205.2	205.6	201.5
262	208.3	209.6	206.9	205.6	204.6	201.3
263	208.3	209.6	206.2	204.6	204.7	201.1
264	206.6	209.7	205.3	204.7	204.3	201.0
265	207.3	208.3	205.2	204.3	203.2	200.7
266	206.8	208.2	205.4	203.2	203.5	200.8
267	205.8	208.5	204.5	203.5	203.5	199.6
268	205.3	207.5	204.3	203.5	202.3	199.2
269	205.2	207.3	204.4	202.3	202.2	199.1
270	205.6	207.2	204.5	202.2	202.3	198.9
271	204.6	207.3	203.3	202.3	201.6	198.6
272	204.7	206.2	203.2	201.2	201.2	198.3
273	204.3	206.6	203.6	201.6	201.6	198.1
274	203.2	206.6	202.6	201.6	201.7	197.8
275	203.5	205.7	202.7	201.7	200.7	197.5
276	203.5	205.3	202.3	200.7	200.8	197.1
277	202.3	205.3	202.2	200.8	199.6	196.3
278	202.2	205.1	201.5	199.6	199.2	196.1
279	202.3	204.0	201.3	199.2	199.1	196.0
280	201.2	204.7	201.1	199.1	198.9	195.7
281	201.6	204.8	201.0	198.9	198.6	195.8
282	201.6	203.6	200.7	198.6	198.3	194.6
283	201.7	203.2	200.8	198.3	198.1	194.2
284	200.7	203.1	199.6	198.1	197.8	194.1
285	200.8	203.9	199.2	197.8	197.5	193.9
286	199.6	202.6	199.1	197.5	197.1	193.6
287	199.2	202.3	198.9	197.1	196.3	193.3
288	199.1	202.1	198.6	196.3	196.1	193.1
289	198.9	202.8	198.3	196.1	196.0	192.8
290	198.6	201.5	198.1	196.0	195.7	192.5
291	198.3	201.1	197.8	195.7	195.8	192.1



292	198.1	200.9	197.5	195.8	194.6	193.6
293	197.8	200.5	197.1	194.6	194.2	193.2
294	197.5	200.2	196.3	194.2	194.1	192.6
295	197.1	199.6	196.1	194.1	193.9	192.4
296	196.3	199.6	196.0	193.9	193.6	192.2
297	196.1	199.3	195.7	193.6	193.3	192.2
298	196.0	199.1	195.8	193.3	193.1	192.0
299	195.7	198.7	194.6	193.1	192.8	191.0
300	195.8	198.3	194.2	192.8	192.5	191.0



Lampiran 3 Tabel waktu pendinginan dari temperature 400 °C hingga 200 °C pada masing-masing perlakuan

Waktu	0 mT	2,4 Mt	3,4 mT	4,43 mT	6,43 mT	9,03 Mt
1	401.4	400.9	400.8	400.9	401.9	401.5
2	398.2	397.2	397.3	398	398.3	398.6
3	394.6	394.4	394.3	394.4	396.8	395.2
4	391.9	391.5	391.3	391.5	393.1	392.4
5	390.3	388.8	388.2	389.8	390.4	391
6	388.8	386.4	386.4	388	388.6	389
7	384.9	383.8	383.5	384.5	386.2	385
8	383.4	380.3	380.7	383	383.6	383.6
9	381.4	378.3	377.2	380.5	381.9	381.8
10	378.7	375.5	373.1	378.4	379.3	379.4
11	376.4	373.9	371.2	375.6	377.1	376.6
12	374.8	371.2	369.4	374.1	374.4	375
13	371.7	369.3	367.7	371.4	372.6	372
14	369.6	367.2	365.2	369.4	370.5	369.8
15	368	365.4	363.2	367.4	368.7	368.4
16	365.8	363.5	361.3	365.6	366.2	366.3
17	364.5	360.8	359.2	363.9	364.1	365.3
18	362.7	357.4	357.4	361.9	362.2	363.1
19	359.9	355.4	355.5	359.8	360.5	360.3
20	357.8	353.9	353.8	358.1	358.2	358.7
21	356.7	351.3	351.5	356.9	356.7	357
22	354.4	348.8	348.9	353.7	355.3	355.2
23	352.1	346.1	346.2	352	353.9	352.2
24	348.7	345.4	345.3	348.5	351	349.1
25	347.1	343.6	343.2	347	349.6	347.7
26	346.5	341.5	341.4	346.4	348.5	346.7
27	344.1	340.2	340.5	343.9	346.7	344.7
28	342.2	338.5	338.8	341.5	344.2	343.1
29	341.2	337.2	337.4	341.2	343.1	341.5
30	338.6	335.7	335.4	338.5	341.2	338.7
31	338.4	333.3	333.9	338.4	339.5	338.8
32	336.3	332.9	332.3	335.9	338.2	336.9
33	334.4	330.2	330.8	334.5	336.7	334.9
34	332.7	329.6	329.1	332.6	334.3	333.4
35	330.9	327.7	327.9	331.1	333.1	331.1
36	329.9	326.2	326.2	329.9	332.4	330
37	327.9	324.1	324.6	328.3	330.6	328.1
38	327.4	323.2	323.3	326.9	329.5	327.9

39	325.5	322.4	322.2	325.9	327.7	325.7
40	324.1	320.7	320.6	324.4	326.2	324.8
41	323.1	319.2	319.9	322.5	324.2	323.4
42	320.9	318.1	318.3	320.8	323.6	321.8
43	320.5	316.3	316.1	320.2	322.3	320.5
44	318.9	315.2	315.4	319.7	320.2	319.5
45	317.3	313.5	313.6	317.1	319.3	317.8
46	315.9	312.5	312.5	315.6	318.4	316.6
47	313.8	311.3	311.7	313.5	316.5	314
48	312.6	309.2	309.2	312.8	315.3	312.7
49	312	308.4	308.8	312	314.2	312.2
50	310.1	307.4	307.1	310.7	313.6	310.6
51	309.1	306.9	306.4	308.8	311.6	309.3
52	307.8	304.3	304.6	307.9	310.7	308.5
53	307.3	303.8	303.2	307.3	309.3	307.6
54	304.6	302.7	302.6	305.3	308.2	304.7
55	304.2	301.3	301.9	303.6	307.5	304.6
56	303.5	300.2	300.3	303	306.5	304.1
57	301.7	299.5	298.1	301.9	304.3	302.2
58	300.5	298.9	297.4	300.9	303.2	301.2
59	300.8	297.2	296.6	300	302.4	301
60	299.4	296.3	295.5	298.2	301.5	299.6
61	298.4	293.2	293.7	297.8	300.8	299
62	297.9	291.4	292.2	295.8	299.4	298.2
63	296.3	289.5	291.1	295	298.4	296.5
64	295.8	288.8	290.2	294.6	297.9	296.1
65	294.7	287.4	289.3	293.3	296.3	295.1
66	293.3	286.4	287.8	293.2	295.8	293.8
67	292.2	285.9	286.7	292.2	294.7	292.5
68	291.6	284.9	285.3	291.6	293.3	291.8
69	290.2	283	284.2	289.8	292.2	290.8
70	289.3	282.2	283.6	289.3	291.6	289.9
71	287.8	281.4	282.2	288.5	290.2	288.5
72	286.7	280.5	281.4	287	289.3	287
73	285.3	279.2	280.5	286.1	287.8	285.5
74	284.2	277.6	279.8	285.3	286.7	284.7
75	283.6	276.8	278.4	284.5	285.3	284.1
76	282.2	276.3	277.8	282.6	284.2	282.5
77	281.4	275.3	276.3	282.3	283.6	281.6
78	280.5	274.5	275.3	280.5	282.2	280.9
79	279.8	272.9	274.5	277.8	281.4	280.3
80	278.4	272.2	273.9	277.2	280.5	279.2



81	277.8	271.3	272.2	275.9	279.8	278.2
82	276.3	270.2	271.3	275.9	278.4	276.7
83	275.3	269.4	270.2	274.4	277.8	276.2
84	274.3	268.5	269.4	274.5	276.3	274.6
85	273.2	267.3	268.5	272.5	275.3	274
86	272.4	266.6	267.8	273.1	274.3	273.1
87	272.5	265.6	266.4	271.9	273.2	272.8
88	271.3	264.7	265.6	271.1	272.4	271.5
89	270.4	264.3	264.3	270.3	272.5	271
90	269.6	263.2	263.2	270.3	271.3	270.4
91	270.1	261.5	262.3	268.8	270.4	270.4
92	268.6	261.5	262.4	268.1	269.6	268.9
93	267.5	260.3	261.5	267.4	270.1	268
94	267.1	259.2	260.3	265.7	268.6	268
95	265.5	258.4	259.2	266.2	267.5	265.8
96	265.9	257.5	258.6	264.6	267.1	266.8
97	264.2	257.8	258.6	264.1	265.5	264.2
98	263.6	256.4	256.7	263.1	265.9	263.8
99	262.8	255.1	254.3	261.8	264.2	263.2
100	261.6	254.4	253.3	262	263.6	262.1
101	261.4	254.6	252.2	261.3	262.8	261.6
102	260.7	253.5	251.4	260.3	261.6	261.3
103	258.8	252.7	251.5	259.1	261.4	259.6
104	258.2	252.2	250.8	258.7	260.7	258.5
105	258	251.2	249.4	258.5	259.6	258.3
106	257.3	250.6	248.4	257	258.8	257.8
107	256.1	250.3	248.9	256.1	258.5	257
108	255.4	250.2	247.3	255.6	258	255.6
109	255.1	249.3	247.8	254.8	256.5	255.4
110	253.7	249.4	247.7	254.3	255.8	253.9
111	253	248.5	247.3	254.8	255.4	253.4
112	253.5	247.3	246.2	252.8	254.4	254
113	251.9	247.2	245.6	251.7	253.8	252.2
114	250.6	246.6	244.8	252.5	254	251
115	250.8	245.6	244.3	252	252.4	251.3
116	251.1	245.7	243.3	251.5	251.3	251.4
117	250.2	244.3	242.5	251.6	251.6	250.4
118	250.7	244.2	241.9	249.9	251.7	251.3
119	249	243.5	241.2	248.4	250.7	249.6
120	247.3	242.5	240.4	249	250.9	248
121	247.8	242.3	240.5	248.3	249.6	248.1
122	247.1	241.2	239.8	247.3	248.2	247.3



123	246.5	241.4	239.4	246.7	248.4	247
124	246.1	241.5	238.8	245.7	247.5	246.6
125	244.4	238.8	238.3	246.5	247	244.7
126	244.8	238.4	237.3	245	246.4	245
127	244.3	237.4	237.5	244.2	245.2	244.7
128	242.6	236.9	236.9	243.9	245.6	243.1
129	243.1	236.3	236.2	242.7	244.7	243.9
130	241.8	235.8	236.3	242.9	243.3	242.2
131	241.9	235.7	235.2	242	243.9	242
132	241	234.3	235.4	242	242.5	241.4
133	241.1	234.2	235.5	241.2	242.5	241.7
134	239.8	234.6	234.8	240.8	241.5	240.3
135	239.6	233.8	234.4	239.7	241.8	240.3
136	239	233.3	233.4	238.6	240.6	239.2
137	238	232.3	233.9	239.3	240	238.2
138	238.1	232.5	232.3	237.8	239.4	238.7
139	236.7	232.9	232.8	237.6	238.3	237
140	236.7	231.3	231.1	237	238.8	236.9
141	236	231.9	231.4	237.1	237.5	236.3
142	236.1	230	231.6	235.8	237.2	236.5
143	234.8	230.2	230.5	236.1	236.5	235.3
144	234.9	230.4	230.2	234.9	236.8	235.2
145	233.8	229.5	229.5	235.6	235.6	234
146	234.7	229.2	229.2	234.1	235.5	235.3
147	233.2	228.6	229.7	234	234.3	233.8
148	233.2	228.8	228.3	233	234.9	233.9
149	232.4	227.3	228.9	232.9	233.8	232.7
150	231.7	227.3	227.2	231.9	233.8	231.9
151	231.4	226.5	227.6	231.9	232.5	231.9
152	231.4	226.3	226.3	230.9	232.4	231.9
153	229.8	225.4	226.2	231.1	231.6	230.1
154	229.8	225.5	225.6	230.3	231.7	230
155	229.1	224.3	225.9	230.1	230.5	229.5
156	229.5	224.2	224.3	229.3	230.6	230
157	228.2	223.6	224.2	229.6	229.5	229
158	228	223.6	223.6	228.4	229.7	228.4
159	227.1	222.7	223.3	228.5	228.9	227.5
160	228	222.3	222.2	227.1	228.7	228.9
161	226	221.2	222.3	227.8	227.6	226.3
162	226.8	221.5	221.4	227.2	228.1	227.6
163	225.9	220.5	221.5	226.2	226.7	226.6
164	224.6	220.3	220.3	226.2	226.9	224.9



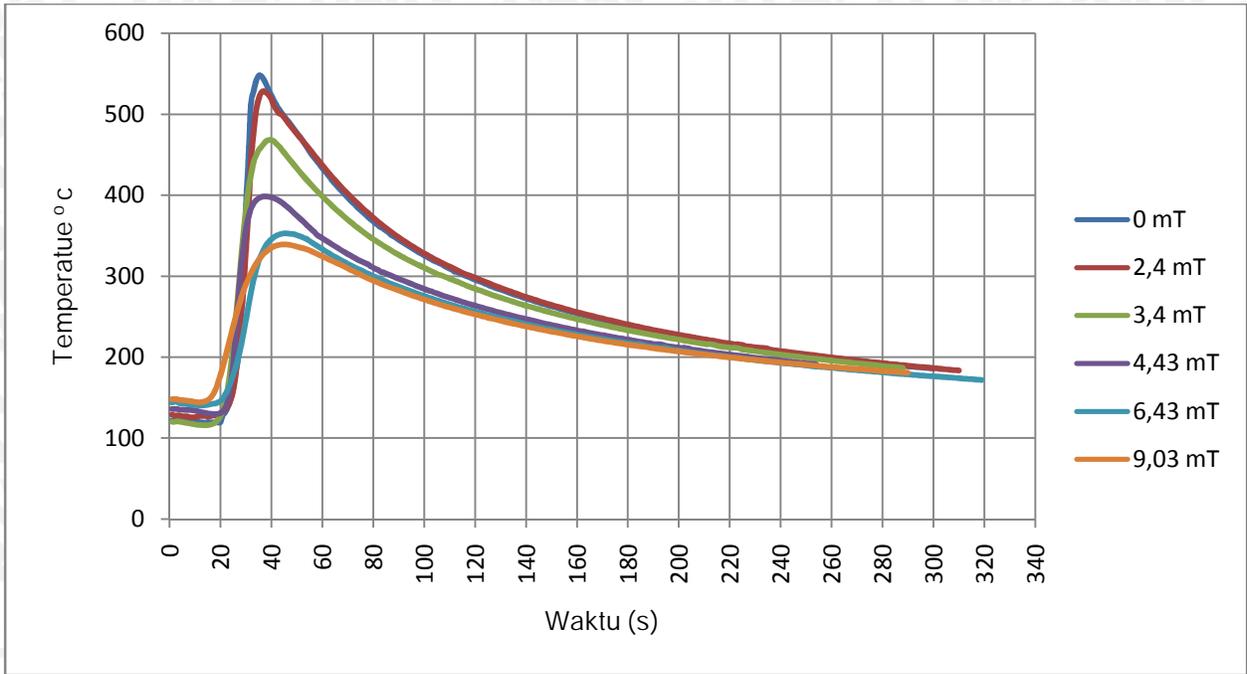
165	224.9	219.2	220.2	225.1	226.9	225.1
166	224.3	219.4	219.6	225.1	225.4	224.9
167	224.1	219.5	219.6	225.1	225.5	224.9
168	224.1	218.8	218.7	224.3	224.8	224.4
169	223.3	218.4	218.3	223.9	224.9	223.6
170	222.9	218.4	218.2	223.4	224.5	223.4
171	222.4	217.9	217.5	223	223.5	223.3
172	222	217.8	217.5	223.2	223.6	222.3
173	221.6	217.4	217.3	221.3	223.1	222.5
174	220.5	216.4	216.2	221.8	222.5	220.5
175	220.9	216.9	216.4	221	222.3	221.1
176	219.8	216.3	216.5	221.6	221.1	220.2
177	220	215.8	215.8	220.7	221.4	220.5
178	220	215.7	215.4	219.8	220.5	220.2
179	219.2	214.3	215.4	220.4	220.8	219.8
180	219.5	214.2	214.9	218.9	220.4	220.3
181	217.6	214.6	214.3	219	219.6	217.9
182	217.5	213.8	213.8	218.8	219.8	217.8
183	218	213.3	213.7	218.1	218.3	218.5
184	217.4	213.3	213.3	217.7	218.3	218.3
185	216.5	212.5	212.2	216.8	218.5	216.7
186	215.5	212.9	212.6	216.5	217.9	215.8
187	215.6	212.2	212.8	216.6	217.2	215.8
188	215.9	211.4	211.3	215.8	216.3	216.3
189	215.3	211.5	211.3	215.5	216.2	215.8
190	214.7	211.8	211.5	215	216.4	215
191	213.8	210.3	210.9	214.5	215.5	214.2
192	214.4	210.2	210.3	214.3	215.3	214.9
193	214.1	209.6	210.9	213.2	214.4	214.4
194	212.6	209.6	209.0	213.6	214.5	212.8
195	213	209.7	209.2	213.6	214.3	213.6
196	213.5	208.3	208.4	212.7	213.2	214.1
197	212	208.2	208.5	212.3	213.6	212.7
198	212.1	208.5	208.2	211.2	213.6	212.4
199	210.9	207.5	207.6	211.5	212.7	211.1
200	210.8	207.3	207.8	211.5	212.3	211.3
201	210.7	207.2	207.3	210.3	211.2	211.2
202	209.9	207.3	206.3	210.2	211.5	210.2
203	210	206.2	206.5	209.4	211.5	210.2
204	208.7	206.6	206.9	209.5	210.3	209.1
205	208.8	206.6	206.2	208.8	210.2	209.3
206	208.3	205.7	205.3	208.4	209.4	209.1



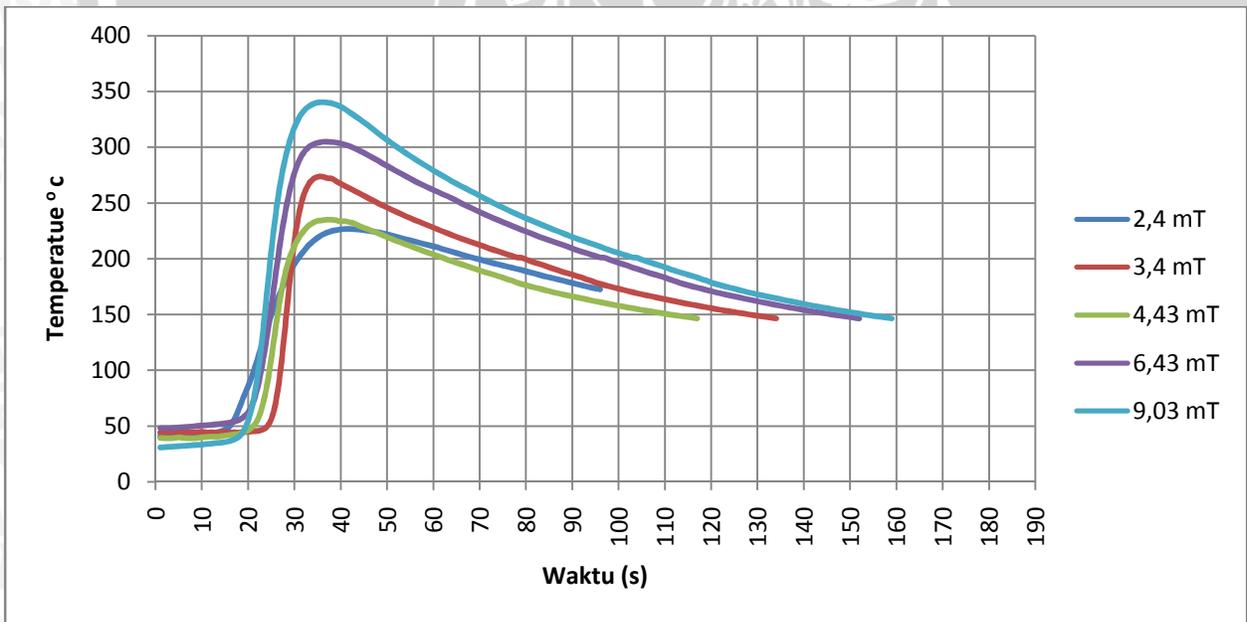
207	208.3	205.3	205.2	207.4	209.5	208.7
208	206.6	205.3	205.4	207.9	208.8	207
209	207.3	205.1	204.5	207.3	208.4	207.3
210	206.8	204	204.3	206.8	207.4	206.8
211	205.8	204.7	204.4	205.8	207.9	206.3
212	205.3	204.8	204.5	205.3	207.3	206.5
213	205.2	203.6	203.3	205.2	206.8	206.9
214	205.6	203.2	203.2	205.6	205.8	206.2
215	204.6	203.1	203.6	204.6	205.3	205.3
216	204.7	203.9	202.6	204.7	205.2	205.2
217	204.3	202.6	202.7	204.3	205.6	205.4
218	203.2	202.3	202.3	203.2	204.6	204.5
219	203.5	202.1	202.2	203.5	204.7	204.3
220	203.5	202.8	201.5	203.5	204.3	204.4
221	202.3	201.5	201.3	202.3	203.2	204.5
222	202.2	201.1	201.1	202.2	203.5	203.3
223	202.3	200.9	201.0	202.3	203.5	203.2
224	201.2	200.5	200.7	201.2	202.3	203.6
225	201.6	200.2	200.8	201.6	202.2	202.6
226	201.6		200.6	201.6	202.3	202.7
227	201.7			201.7	201.6	202.3
228	200.7			200.7	201.2	202.2
229	200.8			200.8	201.6	201.5
230					201.7	201.3
231					200.7	201.1
232						201
233						200.7
234						
WAKTU (detik)	229	225	226	227	229	233



Lampiran 4 Grafik siklus termal pada jarak 15 dan 20 mm dari pusat las



Gambar grafik siklus termal pada jarak 15 mm dari pusat las



Gambar grafik siklus termal pada jarak 20 mm dari pusat las

Lampiran 5 Foto Spesimen Hasil Pengelasan

<p>0 mT</p>	
<p>2,4 mT</p>	
<p>3,4 mT</p>	
<p>4,43 mT</p>	



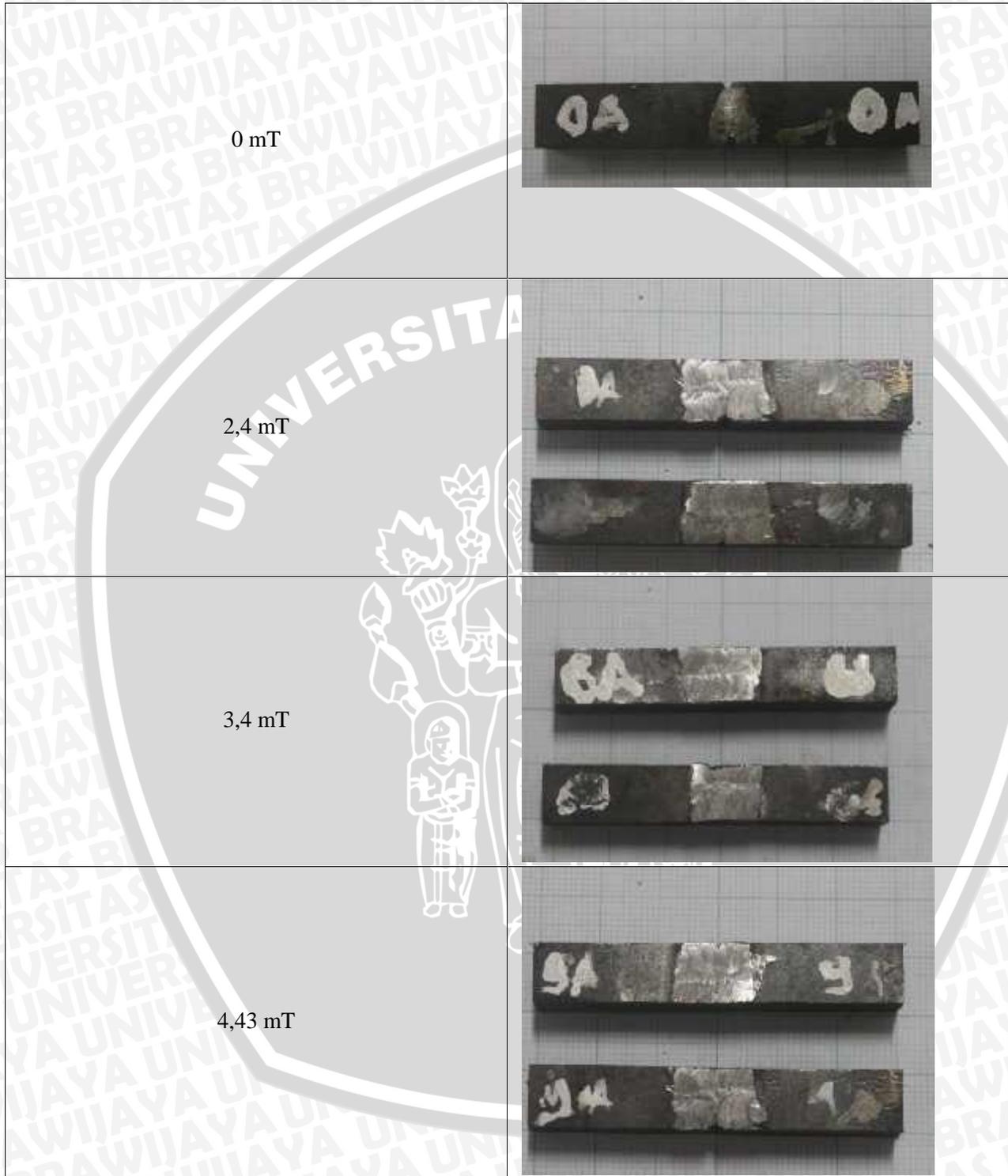
6,43 Mt



9,03 mT



Lampiran 6 Foto Spesimen Uji Impak



6,43 Mt



9,03 mT



Lampiran 10 Foto Kegiatan Penelitian

1. Pemotongan Spesimen



4. Pemasangan Benda Kerja



2. Pembuatan Kampuh Las



5. Proses Pengelasan



3. Instalasi Penelitian



6. Pengujian Impak



