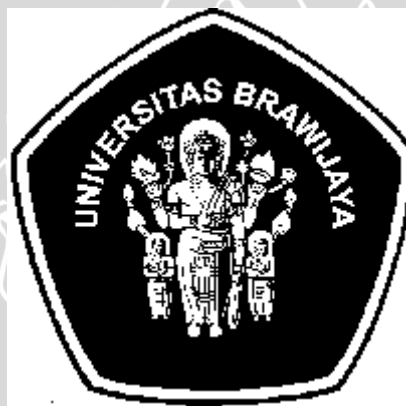


**PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP
CACAT POROSITAS HASIL PENGELASAN BAJA QTS (*QUENCH-
TEMPERED STEEL*)**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun oleh :

**YANUAR ROHMAT AJI PRADANA
NIM. 0910620100 – 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2014**

LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP CACAT POROSITAS HASIL PENGELOMAN BAJA QTS (*QUENCH- TEMPERED STEEL*)

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

YANUAR ROHMAT AJI PRADANA
NIM. 0910620100 – 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

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH INDUKSI MAGNET EKSTERNAL TERHADAP
CACAT POROSITAS HASIL PENGELASAN BAJA QTS (*QUENCH-
TEMPERED STEEL*)**

SKRIPSI

KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

YANUAR ROHMAT AJI PRADANA
NIM. 0910620100 – 62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
tanggal 29 Januari 2014

Penguji I

Penguji II

Prof. Ir. Sudjito, Ph.D.
NIP. 19470330 198002 1 001

Ir. Agustinus Ariseno, MT.
NIP. 19510822 198701 1 001

Penguji III

Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.
NIK. 820919 06 1 2 0259

Mengetahui,
Sekretaris Jurusan Teknik Mesin

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

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Induksi Magnet Eksternal terhadap Cacat Porositas Hasil Pengelasan Baja QTS (*Quench-Tempered Steel*)” dengan baik. Sholawat serta salam selalu terlimpahkan kepada junjungan Nabi Muhammad SAW.

Skripsi ini tidak akan terselesaikan dengan baik tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak, antara lain:

1. Kedua orangtua tercinta, Ibunda Titik Hidayati dan Ayahanda Wahono atas kasih sayang, doa, bimbingan, motivasi dan 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 Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, M.Sc., CSE. selaku Dosen Pembimbing Akademik dan KKDK Teknik Produksi atas bimbingannya.
5. Bapak Dr.Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng. selaku Dosen Pembimbing I atas segala ilmu, bimbingan, saran, nasihat dan semangat dalam penyusunan skripsi ini maupun dalam hal lain di luar skripsi.
6. Bapak Sugiarto, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II atas semua ide, ilmu, bantuan, kepercayaan, kesabaran dan masukan baik secara moril dan materiil sejak penulis menjadi mahasiswa hingga menyelesaikan skripsi ini.
7. Bapak Dr.Eng. Eko Siswanto, ST., MT. selaku Kepala Laboratorium Proses Produksi I FT-UB atas ijin, saran dan nasehat yang telah banyak diberikan.
8. Bapak Khairul Anam, ST., M.Sc. selaku Senior dan Dosen yang telah banyak memberikan bantuan dan saran dalam penyelesaian skripsi.
9. Bapak Arif Hadi W. dan Bapak Mudjiono selaku Laboran dan Eks-Laboran Laboratorium Proses Produksi I atas semua bantuan, wejangan, nasihat, teguran dan dukungan yang sangat membantu.
10. Saudara seperjuangan Zhena Haryo P., Chandra Susilo P. dan Trendy Alfrian atas waktu, bantuan, diskusi, evaluasi dan nasihat kalian semua.

11. Asisten Laboratorium Proses Produksi I Susi, Zhen, Trendy, Agung, Jhono, Hafiid, Ramdha, Alim, Momon dan Yudhis yang memberi motivasi dan membuat suasana jadi lebih hidup.
12. Mas-mas Asisten Laboratorium Proses Produksi I Mas Ikhlas, Mas Dio, Mas Imam, Mas Ivan, Mas Hatta, Mas Krisna dan Mas-mas yang lain yang selalu menjadi panutan.
13. Bapak Setio sekeluarga, Bapak Gunawan, Bapak Dadang, Bapak Budi dan Bapak Yuriyanto dan Bapak Taufik yang telah membantu dalam proses penelitian.
14. Saudara-saudaraku BLACKMAMBA yang menjadi segala-galanya untuk penulis.
15. Kakung Mukajan dan Uti Marjati atas nasihat dan doanya.
16. Adikku Aulia Dian Nur Rahmi yang tersayang.
17. Rizki Sari Saraswati atas semua doa, perhatian, motivasi dan waktu yang diberikan untuk menyelesaikan skripsi ini.
18. Semua pihak dan teman-teman yang telah membantu penyelesaian skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna baik dari isi maupun format penulisan. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari semua pihak agar kedepannya menjadi lebih baik. Semoga skripsi ini memberikan manfaat bagi pembaca, memunculkan ide baru dan dapat menjadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

Malang, 21 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
SUMMARY	xi
 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.....	4
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Proses Pengelasan.....	6
2.2.1 Definisi dan Klasifikasi Pengelasan.....	6
2.2.2 Pengelasan MIG (<i>Metal Inert Gas</i>).....	6
2.2.3 Pengelasan Baja Karbon Rendah	8
2.2.4 <i>Weldability</i> pada Pengelasan.....	8
2.3 Baja QTS (<i>Quench-Tempered Steel</i>).....	9
2.4 Daerah Hasil Pengelasan	10
2.5 Konveksi pada <i>Weld Pool</i>	10
2.6 Pengaruh Konveksi <i>Weld Pool</i> pada Pengelasan	14
2.7 Induksi Magnet Solenoida.....	16
2.8 Absorpsi Hidrogen Selama Pengelasan Busur	17
2.9 Cacat Porositas	19
2.10 Pengujian Sambungan Las	22
2.10.1 Pengujian Radiografi.....	22
2.10.2 Pengujian Metalografi.....	23

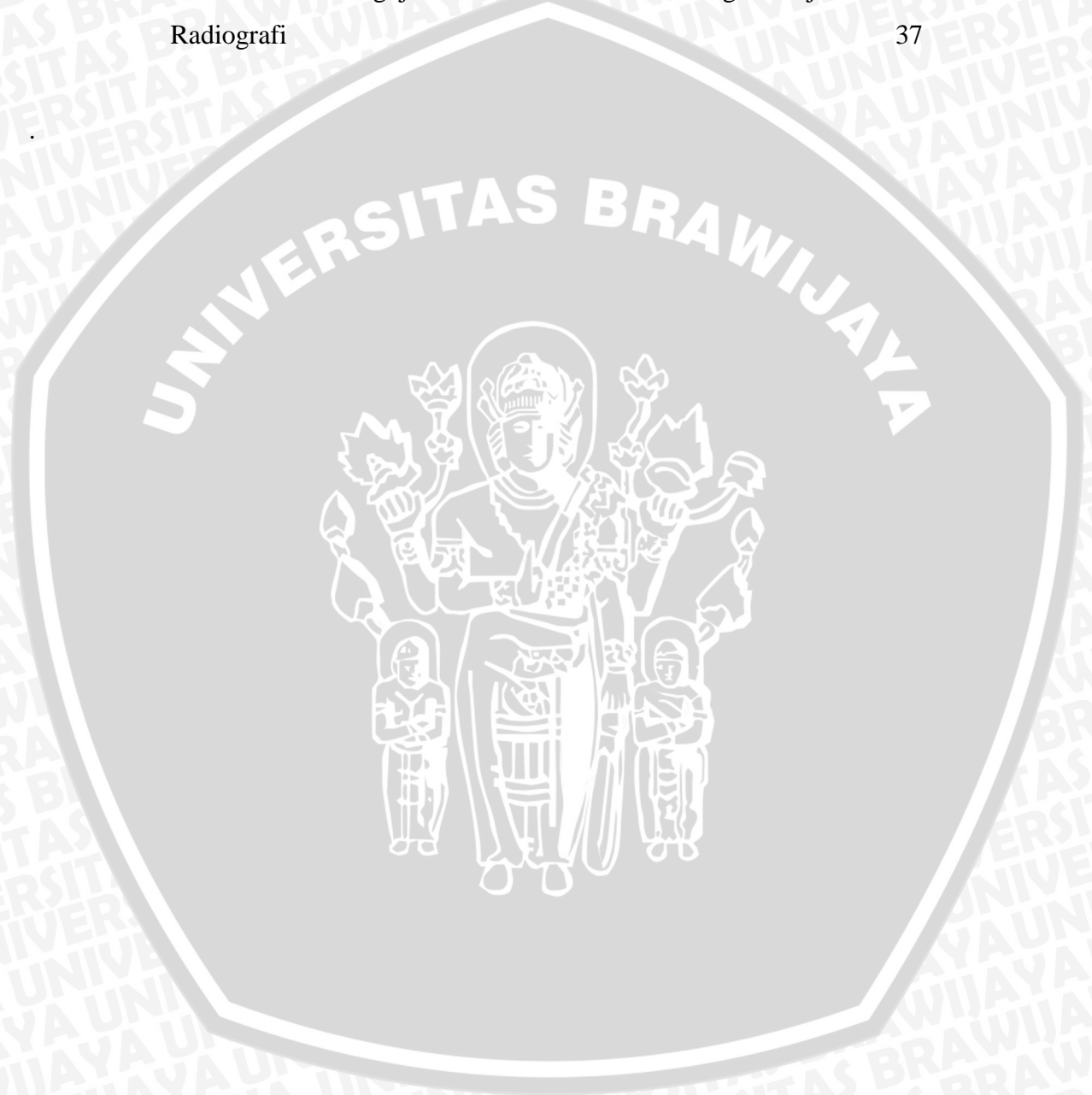


2.11 Hipotesa.....	24
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Metode Penelitian.....	25
3.2 Variabel Penelitian	25
3.3 Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.4 Alat dan Bahan yang Digunakan.....	26
3.4.1 Alat yang Digunakan.....	26
3.4.2 Bahan yang Digunakan	29
3.5 Bentuk dan Dimensi Spesimen.....	30
3.6 Instalasi Penelitian.....	30
3.7 Prosedur Penelitian.....	31
3.7.1 Prosedur Pengambilan Data Besar Induksi Magnet Eksternal.....	31
3.7.2 Prosedur Pengelasan Spesimen	32
3.7.3 Prosedur Pengambilan Data Cacat Porositas dengan Uji Radiografi	32
3.7.4 Prosedur Pengambilan Data Foto Mikro.....	33
3.8 Diagram Alir Penelitian.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Penelitian.....	35
4.1.1 Data Hasil Pengujian Besar Induksi Magnet Eksternal	35
4.1.2 Data Cacat Porositas Hasil Uji Radiografi	36
4.2 Pembahasan	40
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	42
5.2 Saran.....	42
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 3.1	Komposisi Baja QTS	30
Tabel 4.1	Data Hasil Pengujian Besar Induksi Magnet Eksternal	36
Tabel 4.2	Data Hasil Pengujian Cacat Porositas dengan Uji Radiografi	37



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Klasifikasi proses pengelasan	6
Gambar 2.2	Pengelasan MIG (a) Proses keseluruhan dan (b) pembesaran daerah pengelasan	7
Gambar 2.3	Pembagian daerah lasan	10
Gambar 2.4	(a) Arah gaya pada kolam las karena gaya angkat permukaan dan (b) aliran pada kolam las karena gaya angkat permukaan	11
Gambar 2.5	(a) Arah gaya pada kolam las karena gaya tegangan permukaan dan (b) aliran pada kolam las karena gaya tegangan permukaan	12
Gambar 2.6	(a) Arah gaya pada kolam las karena gaya akibat tegangan geser busur plasma dan (b) aliran pada kolam las gaya akibat tegangan geser busur plasma	12
Gambar 2.7	(a) Arah gaya pada kolam las karena gaya elektromagnetik dan (b) aliran pada kolam las gaya elektromagnetik.	13
Gambar 2.8	(a) Pola aliran karena gaya tegangan permukaan serta efeknya dan (b) pola aliran karena gaya elektromagnetik serta efeknya	16
Gambar 2.9	Arah garis medan magnet solenoida	17
Gambar 2.10	Pengaruh porositas terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan aluminium	20
Gambar 2.11	Perubahan kadar hidrogen sebelum dan sesudah pembentukan inti dari pori	21
Gambar 2.12	Prinsip pengujian radiografi	23
Gambar 3.1	Mesin las MIG	27
Gambar 3.2	<i>Scanning Electron Microscope (SEM)</i>	28
Gambar 3.3	Solenoida	29
Gambar 3.4	Bentuk dan dimensi spesimen pengelasan	30
Gambar 3.5	Instalasi penelitian	31

Gambar 3.6	Arah aliran arus listrik pada solenoida	31
Gambar 3.7	Diagram alir penelitian	34
Gambar 4.1	Instalasi pengujian besar induksi magnet eksternal	35
Gambar 4.2	Foto sambungan las pada film negatif hasil uji radiografi	36
Gambar 4.3	Pengolahan data luasan cacat porositas menggunakan <i>Autodesk Inventor 2012</i>	37
Gambar 4.4	Grafik hubungan antara induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas	38
Gambar 4.5	Porositas mikro pada penampang melintang <i>weld pool</i> masing-masing variasi besar induksi magnet eksternal dengan pembesaran 5000 x (a) 0 mT (b) 2,4 mT; (c) 3,4 mT; (d) 4,43 mT; (e) 6,43 mT dan (f) 9,03 mT	39
Gambar 4.6	Pola konveksi logam las pada <i>weld pool</i> dengan pembesaran 20 x (a) Tanpa induksi magnet eksternal, (b) dengan induksi magnet eksternal 9,03 mT	41

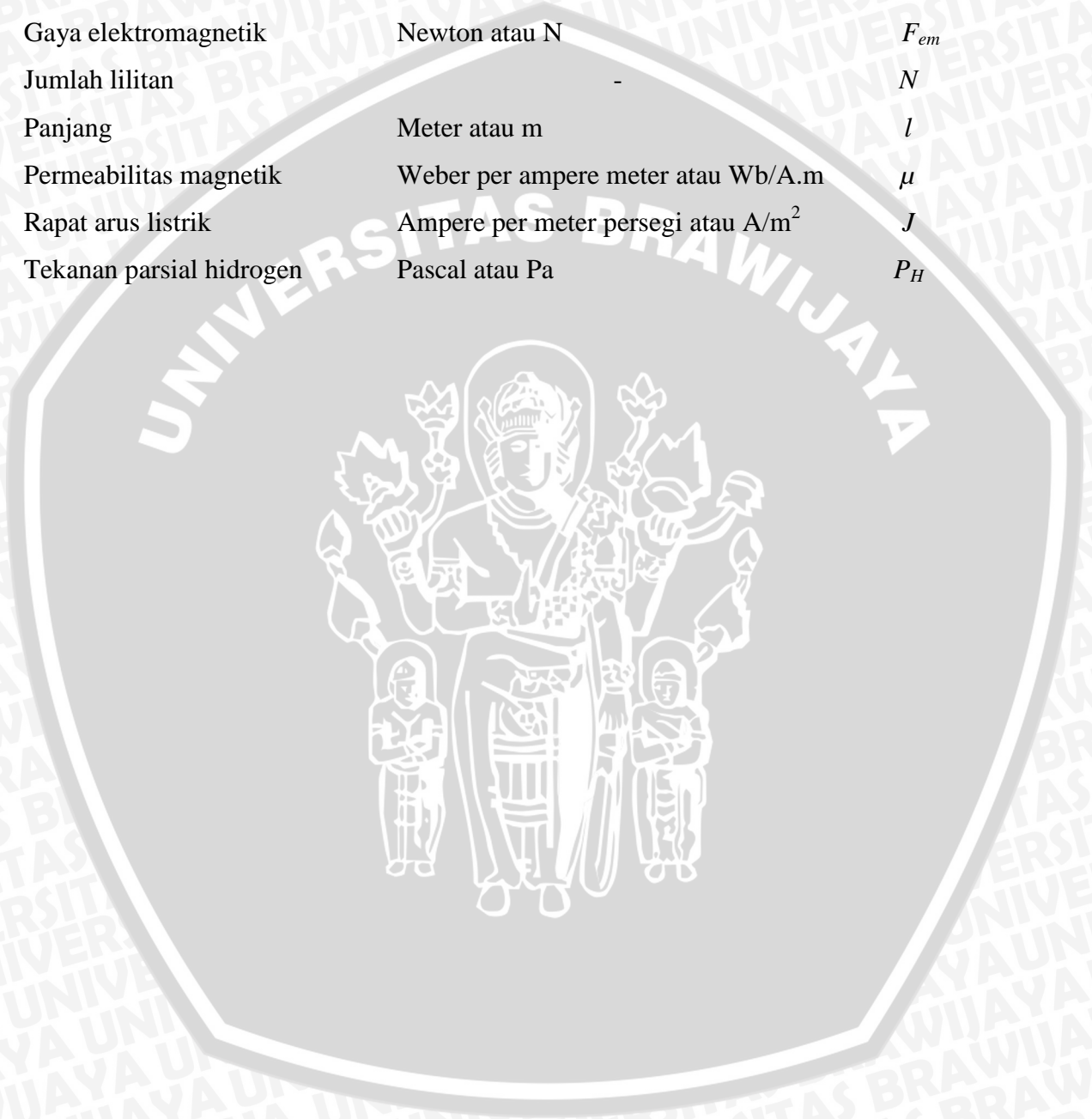


DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Foto Mikrostruktur <i>Base Metal</i>
Lampiran 2	Foto Spesimen Hasil Pengelasan
Lampiran 3	Foto Hasil Uji Radiografi
Lampiran 4	Penampang Cacat Porositas
Lampiran 5	Hasil Pengolahan Data Cacat Porositas dengan <i>Software Autodesk Inventor 2012</i>
Lampiran 6	Hasil Pengolahan Data Cacat Porositas Mikro dengan <i>Software ImageJ</i>
Lampiran 7	Foto Makro Penampang Melintang <i>Weld Pool</i>
Lampiran 8	Surat Keterangan Penelitian Laboratorium Gelombang Optik dan Elektromagnetik FMIPA-UM
Lampiran 9	Surat Keterangan Penelitian Departemen TPL VEDC
Lampiran 10	Sertifikat <i>Welder</i>
Lampiran 11	Surat Keterangan Penelitian PT. Greatways Engineering Service Gresik
Lampiran 12	Hasil Uji Komposisi Baja QTS
Lampiran 13	Dokumentasi Kegiatan Penelitian

DAFTAR SIMBOL

Besaran dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Arus listrik	Ampere atau A	I
Medan magnetik	Tesla atau T	B
Gaya elektromagnetik	Newton atau N	F_{em}
Jumlah lilitan	-	N
Panjang	Meter atau m	l
Permeabilitas magnetik	Weber per ampere meter atau Wb/A.m	μ
Rapat arus listrik	Ampere per meter persegi atau A/m ²	J
Tekanan parsial hidrogen	Pascal atau Pa	P_H



RINGKASAN

Yanuar Rohmat Aji Pradana, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh Induksi Magnet Eksternal terhadap Cacat Porositas Hasil Pengelasan Baja QTS (Quench-Tempered Steel)*, Dosen Pembimbing: Anindito Purnowidodo dan Sugiarto

Baja jenis *Hot Rolled Quench-Tempered Steel (QTS)* termasuk baja karbon rendah yang memiliki kekuatan tinggi yang sering digunakan sebagai bahan pembuatan kendaraan tempur. Karena melalui proses *quenching* dan *tempering*, struktur yang terbentuk pada baja ini adalah martensit temper, sehingga memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya. Pada daerah sambungan las dalam jangka waktu tertentu akan mengalami *delay cracking*. Selain itu, daerah sambungan las masih dapat tertembus peluru. Salah satu penyebab hal tersebut adalah cacat porositas yang rentan terbentuk di dalam sambungan. Permasalahan cacat porositas tersebut secara teoritis dapat diatasi dengan meningkatkan laju konveksi logam cair pada kolam las (*weld pool*) selama pengelasan yang dapat dilakukan dengan memperbesar gaya elektromagnetik dengan menambahkan induksi magnet eksternal di sekitar daerah las cair selama proses pengelasan.

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. Pengujian cacat las radiografi dilakukan pada daerah *weld pool*.

Dari hasil pengujian radiografi, dapat dilihat bahwa semakin besar induksi magnet, maka cacat porositas semakin menurun. Hal ini disebabkan karena semakin besar induksi magnet yang ditambahkan menyebabkan gaya elektromagnetik yang bekerja di dalam kolam las menjadi lebih besar. Sehingga kemampuan untuk meningkatkan laju konveksi logam cair dan pengangkatan gelembung-gelembung gas terlarut penyebab porositas ke permukaan *weld pool* meningkat dan cacat porositas yang terbentuk semakin berkurang. Prosentase cacat porositas pada penambahan induksi magnet eksternal 0 mT; 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT dan 9,03 mT secara berurutan adalah sebesar 2,145 %; 0,583 %; 0,236 %; 0,166 %; 0,112 % dan 0,059 %.

Kata kunci: pengelasan baja QTS, induksi magnet, cacat porositas

SUMMARY

Yanuar Rohmat Aji Pradana, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, January 2014, *Effect of External Magnetic Induction on Porosity Defect of QTS (Quench-Tempered Steel) Weld*, Academic Supervisor: Anindito Purnowidodo and Sugiarto

Hot Rolled Quench-Tempered Steel (QTS) is high-strength low carbon steel which is often used as material of combat vehicle manufacturing. Because through the quenching and tempering process, the structure formed is tempered martensite, so it has a deficiency associated to its weldability. In welded joint within a certain period will have delay cracking. In addition, the welding joint can still be impregnable bullets. One thing that cause that is porosity defects which are vulnerable formed in weld area. Problems of the porosity defects theoretically could be solved by increasing liquid metal convection rate in the weld pool during welding can be done by increasing the electromagnetic force by adding external magnetic induction around the molten weld area during welding process.

In this study, welding process on QTS 10 mm plates in thick using MIG welding are done. Welding current is used are 140 A with welding speed 15 cm/min. Electrode wire tipe used are AWS ER70-S6 with 1 mm diameter. Protective gas used is CO₂. External magnetic inductions are given during welding process with current variations that flowed to solenoids that have dimension of 100 x 100 x 10 mm and number of coil 150 of 0,7 mm in wire diameter which are 0, 3, 6, 9, 12 and 15 A. Its current variation produce magnetic induction in the amount of 0 mT; 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT and 9,03 mT. Solenoids positioned in line behind each of the specimens to be welded. In other words, both solenoids used to clamp both specimens that are welded. Radiographic test is used to find defect in weld area.

Result of radiographic test show that the greater magnetic induction, the porosity defects declined. This is because the larger of magnetic induction is added to cause electromagnetic force that works in the weld pool become larger. So, the ability to increase molten metal convection rate and removal of dissolved gas bubbles cause porosity to weld pool surface increased and porosity defects are decreased. Percentage of porosity on the addition of external magnetic induction 0 mT; 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT and 9,03 mT respectively are 2,145 %; 0,583 %; 0,236 %; 0,166 %; 0,112 % and 0,059 %.

Keywords: QTS welding, magnetic induction, porosity defect

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, perkembangan industri manufaktur semakin meningkat menuntut aplikasi yang lebih rumit yang disesuaikan dengan kebutuhan. Salah satu di dalamnya terdapat proses pengelasan yang digunakan secara luas. Luasnya penggunaan teknologi ini disebabkan karena memiliki banyak kelebihan, yaitu sambungan yang ringan, proses pembuatannya sederhana serta memberikan fleksibilitas yang tinggi bagi produsen untuk mendesain suatu produk sehingga secara keseluruhan biayanya relatif murah. Perusahaan konstruksi dan manufaktur sangat mengandalkan pengelasan sebagai teknik penyambungan yang efektif dan efisien.

Permasalahan yang sering timbul pada pengelasan adalah rentannya daerah sambungan las terhadap serangan korosi, *hydrogen porosity* dan kegagalan mekanis. Permasalahan tersebut dimungkinkan terjadi karena kesalahan operator las, inhomogenitas pada kolam las (*weld pool*), *segregation*, terlarutnya gas-gas pada logam cair dan tegangan sisa yang besar. Permasalahan tersebut menyebabkan berkurangnya kekuatan mekanis dari sambungan las terutama pada daerah kolam las. Salah satunya adalah timbulnya cacat porositas pada *weld pool* yang sulit dihindari dalam proses pengelasan.

Baja jenis *hot rolled quenched coil plate steel* merupakan pelat baja karbon rendah yang diproduksi PT. Krakatau Steel dengan proses rol panas yang kemudian disemprot dengan air yang dimaksudkan untuk meningkatkan kekuatan baja tersebut. Untuk meningkatkan ketangguhannya, diberikan proses *finishing* berupa proses perlakuan panas *tempering* sehingga produk pelat ini dinamakan *Hot Rolled Quench-Tempered Steel* (QTS). Karena proses yang sedemikian rupa, struktur yang terbentuk pada baja ini adalah martensit temper, sehingga produk pelat QTS memiliki kekuatan yang tinggi. Aplikasi baja ini adalah sebagai bahan pembuatan kendaraan tempur yang menuntut ketahanan terhadap penetrasi peluru dan ketahanan aus yang tinggi. Contoh produk yang menggunakan baja QTS di dalam pembuatannya adalah bodi panser Anoa buatan PT. Pindad. Karena strukturnya martensit temper, baja QTS memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya (*weldability*). Indikasinya adalah hasil las baja ini dalam beberapa waktu tertentu mengalami retak las atau *delay cracking* yang dapat meningkatkan resiko kegagalan mekanis. Selain itu daerah sambungan las rentan

tertembus peluru. Salah satu penyebab hal tersebut adalah cacat porositas yang terbentuk di dalam sambungan. Menurut Kou (2003), struktur martensit terutama pada martensit dengan kandungan karbon tinggi yang keras dan rapuh rentan terhadap retak akibat adanya hidrogen selama pengelasan.

Pada umumnya, cacat porositas dapat dikurangi dengan menerapkan metode tertentu dalam pengelasan, antara lain meningkatkan arus pengelasan dan menurunkan kecepatan pengelasan. Akan tetapi kedua metode tersebut tentu saja meningkatkan masukan panas yang dapat memperluas daerah terpengaruh panas, sehingga sambungan justru lebih beresiko mengalami kegagalan mekanis. Salah satu hal yang menjadi perhatian dalam teknologi pengelasan logam adalah pergerakan logam cair (konveksi) dalam kolam las selama proses pengelasan berlangsung. Besarnya laju konveksi atau sirkulasi logam cair selama pengelasan dipengaruhi oleh gaya angkat permukaan, gaya tegangan permukaan, gaya akibat tegangan geser busur plasma dan gaya elektromagnetik. Dari keempat gaya yang bekerja, gaya elektromagnetik yang timbul akibat interaksi medan magnet dan medan listrik selama proses pengelasan berlangsung memberi pengaruh paling dominan terhadap sirkulasi *weld pool*.

Zhou dan Tsai (2006) telah melakukan penelitian dengan judul *Effect of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding*. Pada penelitian ini, gaya elektromagnetik dimaksudkan untuk mengatur laju sirkulasi logam cair selama proses pengikisan dinding kampuh las dengan memvariasikan besar gaya elektromagnetik yang diberikan pada saat pengelasan. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa porositas pada *pulsed laser welding* dapat dicegah dengan menerapkan gaya elektromagnetik.

Ningsih (2008) meneliti tentang pengaruh besar induksi dan pola pembangkitan medan magnet solenoida terhadap cacat dan distribusi kekerasan pengelasan *dissimilar*. Hasil penelitian didapatkan bahwa penambahan induksi magnet yang diberikan selama proses pengelasan dapat mempengaruhi prosentase cacat las yang terjadi, dimana semakin besar induksi magnet yang ditambahkan, prosentase cacat las semakin turun, serta tingkat homogenitasnya semakin tinggi dan kekerasannya semakin merata.

Messler (1999) menyatakan bahwa gaya elektromagnetik memberi peranan cukup besar dalam menentukan homogenitas struktur, *hydrogen porosity* dan terlarutnya unsur-unsur lain pada logam las yang tentunya dapat berpengaruh pada ketahanan korosi dan kekuatan mekanik daerah las. Di sisi lain gaya elektromagnetik merupakan fungsi dari kuat arus yang dicatukan pada solenoida yang digunakan.

Dalam hal ini akan diteliti mengenai pengaruh medan magnet eksternal terhadap cacat porositas hasil pengelasan baja QTS. Memperbesar gaya elektromagnetik dengan menambahkan induksi magnet eksternal di sekitar daerah las cair bertujuan untuk menaikkan laju konveksi logam cair. Logam cair akan teraduk ke daerah sekitar permukaan kolam, sehingga dapat membantu pengangkatan gas-gas hasil reaksi dengan logam cair yang sangat mungkin terbentuk. Gas-gas terlarut di dalam logam cair merupakan penyebab utama cacat porositas selama pembekuan. Sehingga, konveksi pada kolam las umumnya dapat membantu mengurangi porositas gas pada pembekuan akhir daerah lasan karena dapat mengeluarkan gas-gas tersebut dari kolam las yang bersirkulasi (Messler,1999).

Berdasarkan teori di atas, maka permasalahan yang terjadi pada hasil sambungan baja *hot roll quench-tempered steel* (QTS) yaitu timbulnya cacat porositas dapat diatasi dengan meningkatkan laju sirkulasi *weld pool* selama pengelasan yang salah satunya dapat dilakukan dengan memperbesar gaya elektromagnetik dengan menambahkan induksi magnet eksternal di sekitar daerah las cair selama proses pengelasan melalui penambahan induksi magnet eksternal.

1.2 Rumusan Masalah

Berasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan diteliti adalah “Bagaimanakah pengaruh induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas hasil pengelasan baja QTS?”

1.3 Batasan Masalah

Dalam melakukan penelitian ini, permasalahan dibatasi yaitu:

1. Pada penelitian ini akan diamati pengaruh penambahan induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas yang terdapat pada kolam las (*weld pool*).
2. Induksi magnet yang ditambahkan diatur dari kuat arus yang dialirkan pada solenoida.
3. Temperatur lingkungan dianggap konstan selama pengelasan berlangsung.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas hasil pengelasan pelat *hot rolled quench-tempered steel*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai salah satu prasyarat kelulusan pada program Sarjana Teknik Mesin di Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Mengetahui sejauh mana pengaruh penambahan medan magnet eksternal spesimen las terhadap cacat porositas hasil pengelasan pelat *hot rolled quench-tempered steel* (baja kekuatan tinggi).
3. Diharapkan dari hasil penelitian dapat memberikan suatu masukan yang bermanfaat bagi ilmu pengetahuan yang berkaitan dengan teknologi pengelasan.
4. Memberikan masukan bagi industri yang memiliki permasalahan yang sama dengan penelitian ini serta memberikan referensi tambahan bagi penelitian lebih lanjut tentang pengelasan baja kekuatan tinggi.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Zhou dan Tsai (2006) telah melakukan penelitian dengan judul *Effect of electromagnetic force on melt flow and porosity prevention in pulsed laser keyhole welding*. Pada penelitian ini, gaya elektromagnetik dimaksudkan untuk mengatur laju sirkulasi logam cair selama proses pengikisan dinding kampuh las dengan memvariasikan besar gaya elektromagnetik yang diberikan pada saat pengelasan. Model matematika digunakan untuk meneliti pengaruh gaya elektromagnetik terhadap aliran logam cair, perubahan bentuk kampuh dan formasi porositas. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa porositas pada *pulsed laser welding* dapat dicegah dengan menerapkan gaya elektromagnetik.

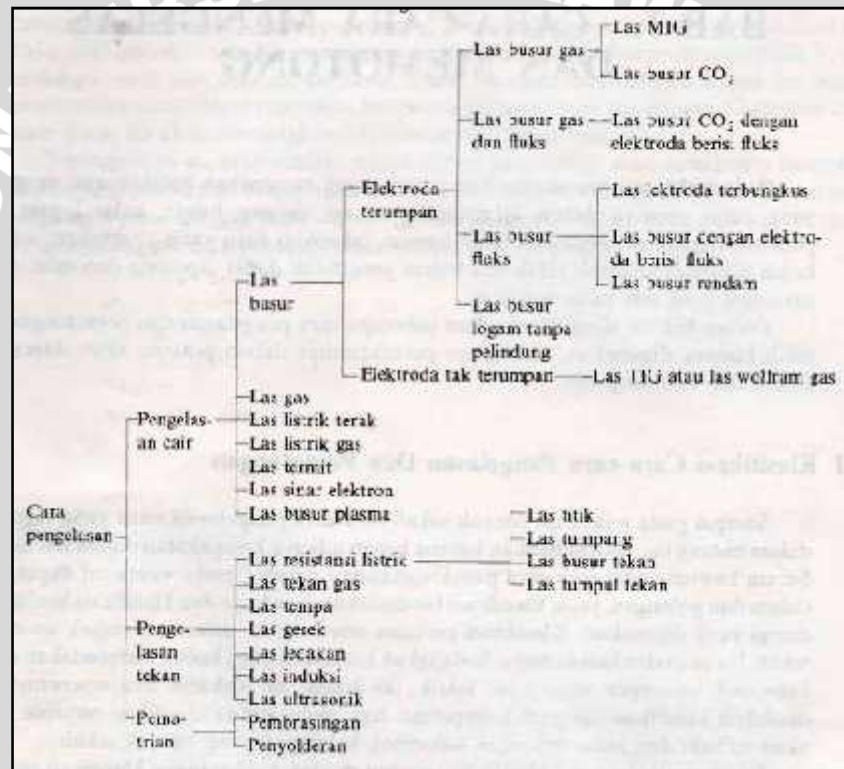
Ningsih (2008) meneliti tentang pengaruh besar induksi dan pola pembangkitan medan magnet solenoida terhadap cacat dan distribusi kekerasan pengelasan *dissimilar*. Metode yang digunakan yaitu medan magnet dibangkitkan pada benda kerja saat dilas dengan mengalirkan arus *Direct Current* (DC) yang bervariasi pada kawat tembaga 0,5 mm sebanyak 100 lilitan dengan tegangan 32 Volt, serta menggunakan 4 variasi pola pembangkitan medan magnet. Material yang digunakan adalah plat baja karbon rendah (ST 37) dan baja tahan karat ferit (SUS 430) tebal 10 mm dengan elektroda las ER-309L. Sambungan yang digunakan adalah tipe *butt joint* dan proses pengelasan *flat position* menggunakan las *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW). Uji kekerasan mikro dilakukan dengan mengambil data kekerasan tiap spesimen dari 10 titik dari *weld metal* sampai logam induk. Pemeriksaan cacat dilakukan dengan uji radiografi menggunakan sinar gamma. Hasil penelitian didapatkan bahwa penambahan induksi magnet yang diberikan selama proses pengelasan dapat mempengaruhi prosentase cacat las yang terjadi, dimana semakin besar induksi magnet yang ditambahkan, prosentase cacat las semakin turun, serta tingkat homogenitasnya semakin tinggi dan kekerasannya semakin merata. Hal ini diperkuat oleh pernyataan Messler (1999:298) dimana gaya elektromagnetik memberi peranan yang cukup besar dalam menentukan homogenitas struktur, *hydrogen porosity* dan terlarutnya unsur-unsur lain pada logam las.

2.2 Proses Pengelasan

2.2.1 Definisi dan Klasifikasi Pengelasan

Berdasarkan definisi dari *Deutsche Industrie Normen* (DIN), las adalah ikatan metalurgi pada sambungan logam atau logam paduan yang dilaksanakan dalam keadaan lumer atau cair. Dari definisi tersebut dapat dijabarkan lebih lanjut bahwa las adalah sambungan setempat dari beberapa batang logam dengan menggunakan energi panas. (Wiryosumarto, 1994:1)

Berdasarkan cara kerja, proses pengelasan dapat dibagi dalam tiga kelas utama yaitu pengelasan cair, pengelasan tekan, dan pematrian. Adapun perincian lebih lanjut mengenai klasifikasi proses pengelasan dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1 Klasifikasi proses pengelasan.

Sumber : Wiryosumarto (1994 : 8)

2.2.2 Pengelasan MIG (*Metal Inert Gas*)

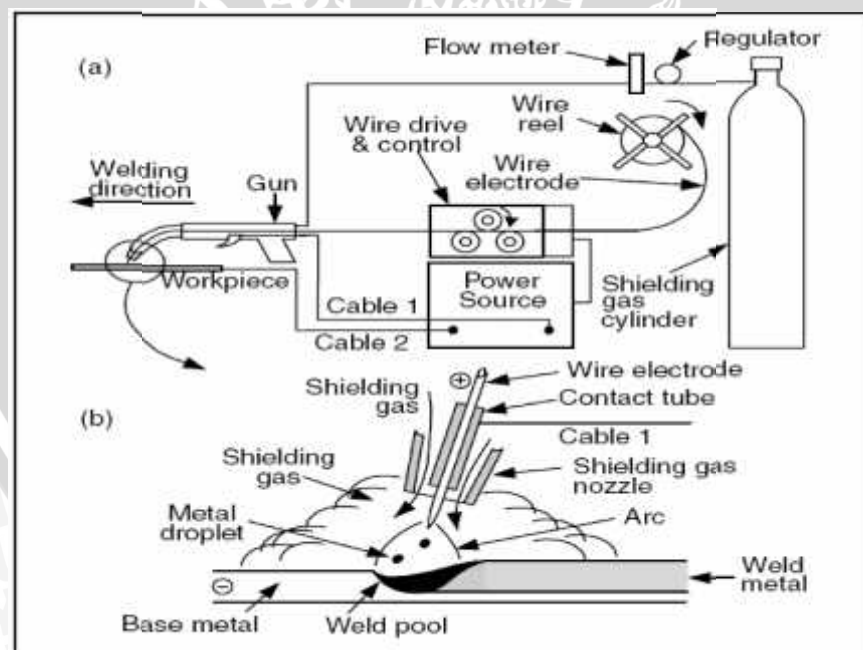
Metal Inert Gas (MIG) adalah las busur gas dengan kawat las pengisi berfungsi sebagai elektroda yang diumpankan secara terus menerus selama pengelasan. Gas pelindung digunakan untuk melindungi daerah pengelasan yang mencair (*molten metal*) dari oksidasi oleh udara atmosfer. Gas pelindung yang digunakan biasanya adalah gas argon, helium atau campuran dari keduanya. Karena kedua gas tersebut harganya relatif

mahal, maka gas CO₂ dapat menjadi alternatif. Keuntungan las MIG jika dibandingkan las jenis lain antara lain:

1. Karena konsentrasi busur yang tinggi, maka busurnya sangat mantap dan percikannya sedikit sehingga memudahkan operasi pengelasan.
2. Karena dapat menggunakan arus yang tinggi, kecepatan pengelasan yang digunakan juga tinggi, sehingga efisiensinya sangat baik.
3. Deposit yang terbentuk cukup banyak.
4. Ketangguhan dan elastisitas, kedekatan udara, ketidakpekaan terhadap retak dan sifat-sifat lainnya lebih baik daripada hasil las dengan cara pengelasan lain.

Karena hal-hal tersebut di atas, maka las MIG banyak sekali digunakan dalam praktek terutama untuk pengelasan baja-baja kualitas tinggi seperti baja tahan karat, baja kuat dan logam-logam bukan baja yang tidak dapat dilas dengan cara lain.

Kawat pengisi dalam las MIG biasanya diumpankan secara otomatis, sedangkan alat pembakarnya (*torch*) digerakkan dengan tangan. Sehingga dengan ini tercipta suatu alat las semi otomatis seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2. Kadang-kadang, las MIG juga dilaksanakan secara otomatis penuh, dimana alat pembakarnya ditempatkan pada suatuudukan pengelasan yang berjalan (Wirjosumarto, 1994:20).



Gambar 2.2 Pengelasan MIG (a) Proses keseluruhan dan (b) pembesaran daerah pengelasan.

Sumber: Kou (2003:20)

2.2.3 Pengelasan Baja Karbon Rendah

Berdasarkan *American Iron and Steel Institute* (AISI), baja dianggap baja karbon jika kandungan unsur selain Fe dan C seperti Cr, Co, Mo, Ni, Nb, Ti, V, Zr dan unsur lain yang ditambahkan untuk mendapatkan efek paduan yang dikehendaki tidak lebih dari 5 % atau ketika kandungan maksimal paduan yang ditentukan yaitu: 0,65 % Mn; 0,6 % Si; 0,6 % Cu dan unsur lain tidak lebih dari kandungan unsur-unsur tersebut. Baja karbon yang memiliki kandungan karbon di bawah 0,30 % disebut baja karbon rendah. Baja karbon dengan kandungan 0,30 sampai 0,50 % C disebut baja karbon menengah; dan baja karbon yang mengandung 0,50 sampai 1,00 % C disebut baja karbon tinggi (AWS, 1982:9). Semakin tinggi kandungan karbon, maka kekuatan dan kekerasannya akan semakin bertambah, akan tetapi perpanjangannya (*elongation*) semakin menurun.

Baja karbon rendah memiliki kepekaan retak las yang rendah bila dibandingkan dengan baja karbon lainnya atau dengan baja karbon paduan. 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 mencegah adanya *hydrogen porosity* dengan menggunakan elektroda hidrogen rendah, serta metode-metode yang lain.

2.2.4 Weldability pada Pengelasan

Pengertian *weldability* menurut *Deutsche Industrie Normen* (DIN) adalah sifat mampu las yang dimiliki oleh suatu material dan dipengaruhi oleh tiga faktor, yaitu:

1. Jenis material

Jenis material ditentukan oleh komposisi kimia, sifat metalurgi dan sifat mekanik dari material. Dimana komposisi kimia dan sifat metalurgi mempengaruhi karakteristik sifat mekanik dari material tersebut. Selain itu, unsur paduan lain juga menentukan sifat mekanik dari material tersebut.

2. Faktor keamanan perencanaan

Terdiri dari perencanaan dan tegangan yang terjadi pada benda kerja. Kedua hal tersebut sangat berpengaruh terhadap hasil pengelasan yang diinginkan. Tahap

perencanaan meliputi energi yang bekerja pada benda kerja, dimensi material, serta pengaturan sambungan. Tegangan yang terjadi pada benda kerja dipengaruhi oleh tipe dan tingkat tegangan, temperatur dan korosi.

3. Proses pengelasan

Proses pengelasan terdiri dari tiga tahapan yaitu persiapan, eksekusi, dan perlakuan setelah proses pengelasan. Tahap persiapan meliputi penentuan metode pengelasan, tipe sambungan, perlakuan panas sebelum proses dan kondisi lingkungan. Tahap eksekusi meliputi penentuan parameter pengelasan yaitu masukan panas serta kontrol panas. Tahapan *finishing* setelah proses pengelasan adalah penentuan perlakuan panas setelah proses pengelasan dan proses gerinda.

2.3 Baja QTS (*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).

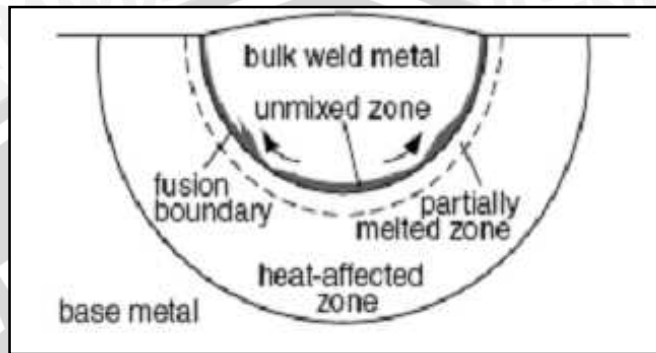
Tempering dilakukan untuk menurunkan tegangan dalam, melunakkan baja dan meningkatkan keuletan baja yang telah dikeraskan (Kamenichny, 1969:93). Baja yang telah melalui proses *quenching* dipanaskan pada suhu di bawah A_{C1} . Waktu *holding* yang digunakan tidak kurang dari 30-40 menit, dan pendinginan dilakukan di udara ruang. Martensit yang dihasilkan dari proses *quenching* sebagai fasa metastabil mengandung karbon sebagai larutan padat. Pada suhu di bawah A_{C1} dalam waktu yang cukup lama, larutan karbon yang lewat jenuh ini terus berubah menjadi bentuk ferit dan karbida (martensit temper) yang lebih stabil. Martensit temper ini lebih tangguh daripada martensit metastabil sehingga merupakan bahan yang banyak digunakan meskipun lebih lunak (Vlack, 1991:411).

Karena proses yang sedemikian rupa, baja QTS memiliki kekerasan yang tinggi, sehingga tidak dapat tertembus peluru. Akan tetapi baja ini memiliki kekurangan terkait sifat mampu lasnya (*weldability*). Indikasinya adalah hasil sambungan las baja ini dalam beberapa waktu tertentu mengalami retak las (*delay cracking*) dan rentannya daerah

sambungan tertembus peluru. Resiko retak akan meningkat akibat adanya hidrogen selama pengelasan yang menimbulkan cacat porositas (Kou, 2003:411).

2.4 Daerah Hasil Pengelasan

Daerah hasil pengelasan secara umum dapat dilihat pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2.3 Pembagian daerah lasan.
Sumber : Kou (2003 : 254)

Daerah lasan terdiri dari 5 daerah, yaitu :

- a. Logam induk (*base metal*)
Adalah logam dasar yang tidak terpengaruh, dimana panas atau suhu pengelasan tidak menyebabkan perubahan struktur dan sifat dari logam tersebut.
- b. Logam lasan (*weld metal*)
Adalah bagian dari penggabungan logam pengisi dengan logam induk yang mencair dan kemudian membeku.
- c. Daerah pengaruh panas (*heat affected zone/HAZ*)
Adalah logam dasar yang bersebelahan dengan logam las yang selama proses pengelasan mengalami siklus termal pemanasan dan pendinginan yang cepat.
- d. Daerah batas las (*fusion boundary*)
Adalah daerah batas antara daerah las (*weld metal*) dengan HAZ.
- e. *Unmixed zone*
Adalah daerah cair di antara daerah batas las (*fusion boundary*) dengan HAZ yang diam selama sirkulasi logam cair.

2.5 Konveksi pada *Weld Pool*

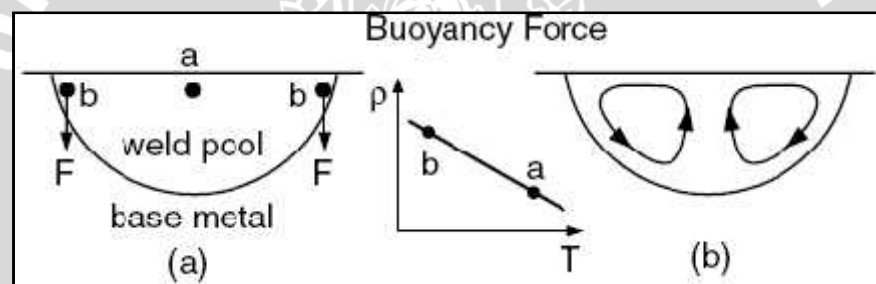
Berdasarkan definisi dari *American Heritage Dictionary*, konveksi merupakan pergerakan fluida yang disebabkan adanya gaya eksternal (Messler, 1999:291), dimana

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 (*Bouyancy Force*)

Gaya angkat permukaan 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 *weld pool*.

Gaya angkat permukaan menyebabkan logam las cair di bagian tengah kolam las yang relatif lebih panas, mengapung ke permukaan. Sementara logam yang di bagian pinggir kolam las yang temperaturnya lebih rendah tenggelam ke kolam las, arah gayanya seperti tampak pada gambar 2.4 (a) dan aliran logam cairnya seperti tampak pada gambar 2.4 (b).



Gambar 2.4 (a) Arah gaya pada kolam las karena gaya angkat permukaan dan (b) aliran pada kolam las karena gaya angkat permukaan.

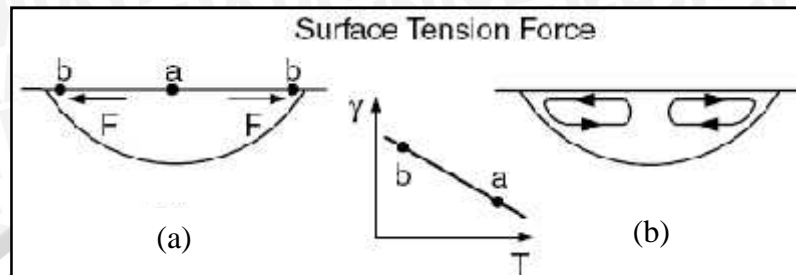
Sumber : Kou (2003 : 104)

Gaya angkat permukaan ini memberikan pengaruh yang kecil pada sirkulasi logam las cair bila dibandingkan dengan gaya elektromagnetik. Oleh karena itu, gaya ini dapat diabaikan (Kou, 1987:92).

2. Gaya Tegangan Permukaan (*Marangoni Force*)

Gaya tegangan permukaan adalah gaya yang diakibatkan oleh adanya perbedaan temperatur lokal, sehingga memunculkan perbedaan tegangan permukaan. Gaya ini menyebabkan logam cair mengalir dari pusat permukaan *weld pool* sampai tepi dan akan kembali lagi ke bawah permukaan *weld pool*, dan arah alirannya seperti tampak pada gambar 2.5 (b). Penyebabnya seperti tampak pada gambar 2.5 (a), dimana tegangan permukaan logam yang dingin cenderung lebih tinggi sehingga akan menarik cairan logam menjauh dari

tengah ke titik (b). Sedangkan cairan logam yang lebih panas, tegangan permukaannya lebih rendah berada di titik (a). Maka akan mengakibatkan aliran bergerak secara radial. Fenomena ini secara lebih jelas dapat ditunjukkan pada gambar berikut :

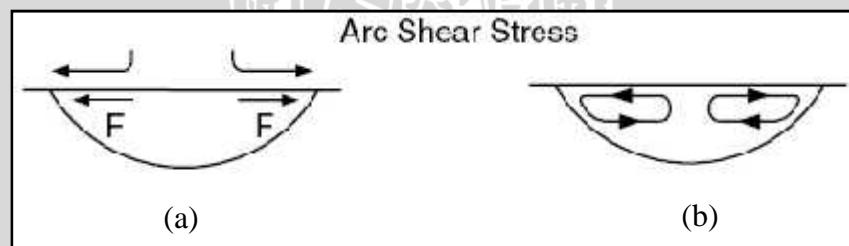


Gambar 2.5 (a) Arah gaya pada kolam las karena gaya tegangan permukaan dan (b) aliran pada kolam las karena gaya tegangan permukaan.

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 permukaan terluar kolam las seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. Tegangan geser ini mengakibatkan logam cair mengalir dari pusat kolam ke tepi kolam dan kembali ke bawah dari permukaan kolam.



Gambar 2.6 (a) Arah gaya pada kolam las karena gaya akibat tegangan geser busur plasma dan (b) aliran pada kolam las gaya akibat tegangan geser busur plasma.

Sumber : Kou (2003 : 104)

4. Gaya Elektromagnetik (*Lorentz Force*)

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

$$F_{em} = J \times B \quad (2-1)$$

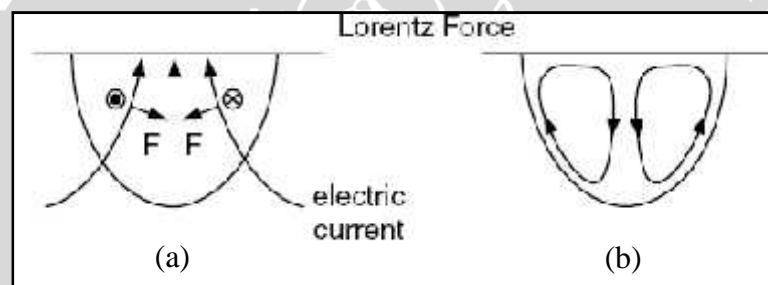
dengan:

F_{em} = gaya elektromagnetik (N)

J = rapat arus (A/m^2)

B = medan magnet (T)

Gaya elektromagnetik adalah gaya yang menyebabkan aliran fluida pada pusat *weld pool* mengarah tegak lurus ke bawah dan menuju ke samping. Hal ini dikarenakan arus yang memusat di *weld pool* memasuki medan magnet yang diinduksikan oleh arus tersebut menyebabkan gaya elektromagnetik mengarah ke dasar *weld pool*, seperti tampak pada gambar 2.7 (a), dengan demikian logam cair akan tertekan ke bawah sepanjang sumbu *weld pool* dan muncul sepanjang batas *weld pool*, seperti tampak pada gambar 2.7 (b) berikut :



Gambar 2.7 (a) Arah gaya pada kolam las karena gaya elektromagnetik dan (b) aliran pada kolam las gaya elektromagnetik.

Sumber : Kou (2003:104)

Gaya elektromagnetik di tengah 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 *weld pool* semakin dalam (Messler, 1999:300). Gaya elektromagnetik dengan sirkulasi logam cair yang dihasilkan sangat berperan dalam proses pencampuran (*mixing*) dalam *weld pool*. 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.

- b. Meningkatkan medan 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 berupa solenoida yang menghasilkan induksi magnet yang kemudian berakumulasi dengan induksi magnet yang dihasilkan arus pengelasan, sehingga rapat fluks magnet akan semakin besar.

2.6 Pengaruh Konveksi *Weld Pool* pada Pengelasan

Konveksi logam cair yang terjadi pada kolam las cair selama proses pengelasan berlangsung akan mempengaruhi aliran fluida dan akan mempengaruhi bentuk kolam las sebagai akibat pengikisan fluida yang disebabkan oleh distribusi panas, pencampuran yang akan menentukan tingkat homogenitas kimia sebagai hasil *macrosegregation* dan distribusi porositas akibat gas yang terlarut (Messler, 1999:291).

Konveksi ini akan berpengaruh pada homogenitas kimia dan solidifikasi manik las karena adanya proses sirkulasi selama konveksi berlangsung dan akan mempengaruhi hasil metalurgi dan sifat mekanik lasan. Adapun pengaruh konveksi pada pengelasan adalah :

- a. Pengaruh Konveksi terhadap Penetrasi

Aliran fluida, dalam hal ini logam cair pada *weld pool* sangat mempengaruhi penetrasi. Karakteristik bentuk dari penetrasi tergantung pada arah dan kecepatan dari logam las cair. Pada konveksi *weld pool*, pengaruh gaya marangoni dan gaya elektromagnetik mengakibatkan *weld pool* menjadi dalam dan sempit (Kou, 1987:97).

- b. Pengaruh Konveksi terhadap Pemisahan (*Segregation*)

- i. Pada pengelasan dengan menggunakan logam penambah, *macrosegregation* terjadi apabila pencampuran (*mixing*) pada *weld pool* tidak sempurna contohnya pada pengelasan *disimilar*. Pada pengelasan listrik, gaya elektromagnetik memberi pengaruh yang besar terhadap proses pencampuran pada *weld pool*. Karena adanya konveksi yang terjadi, logam cair dapat tercampur dengan

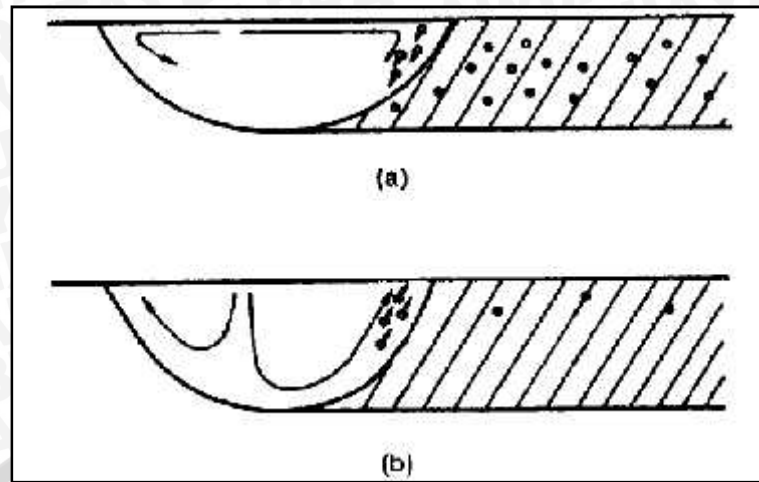
sempurna sebelum mengalami solidifikasi, sehingga homogenitas *weld pool* meningkat (Kou, 1987:100).

- ii. Pada umumnya, komposisi yang homogen pada *weld pool* tidak terjadi pada semua bagian. Adanya lapisan tipis di dekat batas las (*pool boundary*) yang memiliki kecepatan nol atau cenderung diam selama proses pencampuran berlangsung. Daerah ini memiliki komposisi yang berbeda dengan daerah lain yang mengalami sirkulasi. Daerah ini disebut *unmixed zone*. Dimana daerah ini rentan terhadap mekanisme kegagalan, terutama serangan korosi. Daerah ini tidak dapat dihilangkan, tetapi dapat dikurangi dengan cara memperbesar konveksi. Yaitu dengan cara meningkatkan gaya elektromagnetik, sehingga *unmixed zone* terbawa arus konveksi yang diakibatkan gaya ini (Kou, 1987:100).

c. Pengaruh Konveksi terhadap *Gas Porosity* dan Inklusi

Porositas terbentuk akibat adanya interaksi antar logam las cair dengan atmosfer. Gas yang terlarut pada logam cair akan bereaksi dengan logam induk dan membentuk gelembung gas pada daerah kolam las yang dingin. Gelembung gas yang tinggal akan membentuk pori (*porous*) apabila tersolidifikasi. seperti pada gambar 2.8 (a).

Sedangkan disisi lain, pada gambar 2.8 (b) pola pemindahan gas akan menimbulkan proses pembersihan gelembung gas ke atas, seperti kasus aliran yang dipengaruhi gaya elektromagnetik. Banyak gelembung gas dapat menjangkau permukaan dan keluar dari *weld pool* sebelum terperangkap saat pembekuan permukaan. Gas hidrogen yang terlarut dalam kumpuh las sering tidak dapat dihindari, dan dengan adanya induksi magnet terjadi perbedaan tekanan parsial hidrogen, dimana hidrogen yang memiliki tekanan lebih besar dibanding logam las akan terdorong keluar, hal ini menghasilkan tingkat porositas yang lebih rendah. Oleh karena itu, konveksi yang terjadi pada *weld pool* secara teoritis dapat membantu dalam melepas gelembung gas yang terbentuk ke atmosfer sebelum tersolidifikasi atau sebaliknya tergantung pada arah konveksi yang terjadi pada kolam las (Kou, 1987:102). Hal tersebut diatas dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 (a) Pola aliran karena gaya tegangan permukaan serta efeknya dan (b) pola aliran karena gaya elektromagnetik serta efeknya.

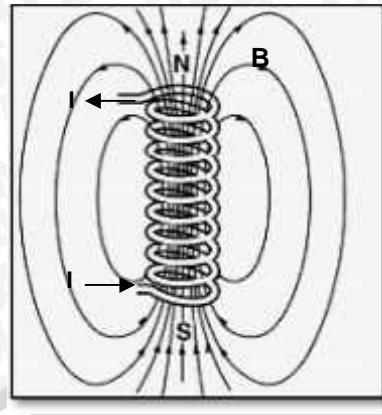
Sumber : Messler (1999:305)

2.7 Induksi Magnet Solenoida

Medan magnet adalah area di sekitar sebuah magnet atau sebuah penghantar yang dialiri arus listrik. Induksi magnet adalah medan magnet yang dihasilkan oleh kawat berarus listrik.

Solenoida merupakan kumparan atau lilitan kawat yang biasanya membungkus inti logam dan dapat menghasilkan medan magnet apabila arus listrik dialirkan pada kumparan tersebut. Solenoida 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.

Apabila ke dalam solenoida dimasukkan bahan feromagnetik seperti besi dan baja, maka medan magnet yang dihasilkan akan bertambah besar. Peningkatan medan magnet yang terjadi pada solenoida merupakan penjumlahan antara medan magnet yang dihasilkan solenoida itu sendiri dan medan magnet eksternal yang dihasilkan inti solenoida yang menjadi magnet. Peningkatan medan magnet yang terjadi tersebut dinamakan induksi magnetik atau rapat fluks magnetik. Arah garis medan magnet solenoida dapat dilihat pada gambar 2.9.



Gambar 2.9 Arah garis medan magnet solenoida.
 Sumber : Anonim (2013)

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

Induksi magnet di tengah panjang solenoida :

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{l} \tag{2-2}$$

Induksi magnet di ujung panjang solenoida :

$$B = \frac{\mu \cdot I \cdot N}{2l} \tag{2-3}$$

dengan:

B = medan magnet induksi solenoida (T)

μ = permeabilitas magnetik (Wb/A.m)

I = arus listrik (A)

N = jumlah lilitan

l = panjang solenoida (m)

2.8 Absorpsi Hidrogen Selama Proses Pengelasan Busur

Hidrogen adalah unsur yang terbanyak dari semua unsur di alam semesta. Elemen-elemen yang berat pada awalnya dibentuk dari atom hidrogen atau elemen-elemen yang mulanya terbuat dari atom-atom hidrogen. Hidrogen diperkirakan membentuk komposisi lebih dari 90% atom-atom di alam semesta (sama dengan tiga perempat massa alam semesta). Unsur ini ditemukan di bintang-bintang dan memainkan peranan yang penting dalam memberikan sumber energi jagat raya melalui reaksi proton-proton dan siklus karbon-nitrogen. Proses fusi atom-atom hidrogen menjadi helium di matahari menghasilkan jumlah energi yang sangat besar.



Hidrogen diketahui memiliki massa atom 0,00794 dan massa jenis 0.08988 g/L. Hidrogen dalam bentuk diatomik gas H_2 , memiliki karakteristik konduktivitas termal yang tinggi, sama seperti helium. Pada umumnya, hidrogen berada pada besi atau baja dengan 2 bentuk yang berbeda, yaitu sebagai molekul dan atom hidrogen. Hidrogen dalam bentuk atom adalah elemen transien, yang bergerak kontinu dalam baja pada temperatur kamar. Hidrogen dapat larut pada *weld metal* dan menyebabkan penggetasan.

Selama proses pengelasan, *weld pool* menjadi jenuh dengan adanya gas dari lingkungan, dan hal ini dapat merusak kualitas lasan termasuk dengan terbentuknya porositas pada lasan atau meningkatnya kepekaan untuk terbentuknya retak las. Sifat dari *fusion welding* adalah seperti kesetimbangan termodinamika antara cairan logam dari *weld pool* dan gas sekitar yang jarang terjadi (Lancaster, 1993:123). Ketika mengelas dengan *oxy-acetylen* biasanya memiliki kadar hidrogen yang sangat sedikit yaitu 2-3 mL/100 g, dan kadar hidrogen menjadi lebih besar dengan menggunakan proses las busur, dengan kandungan yang sebenarnya lebih dulu menonjol pada sifat komposisi dari lapisan elektroda dari gas pelindung. Di sini gas-gas berinteraksi dengan kolom busur plasma, dengan demikian akan mempengaruhi logam induk dan material *filler* yang memasuki *weld pool* yang melebur.

Kelembaban pada lingkungan sekitar, air yang terserap masuk ke lapisan elektroda dan campuran yang heterogen, menjadi bertambah seiring dengan tingginya temperatur pada busur plasma, dan cenderung memisahkan kolom las bagian atas yang siap mengurai dari uap air menjadi atom hidrogen (Legait, 2005:49) berdasarkan persamaan reaksi :



Reaksi ini kemudian menjadi kompleks dengan variasi komposisi gas pelindung yang beda-beda dan sistem formulasi penggunaan fluks. Banyaknya hidrogen yang berdifusi, H_D pada *weld metal* menjadi :

$$H_D = H - (H_R + H_E) \quad (2-4)$$

dengan :

H_D = banyaknya hidrogen yang berdifusi (ml/100g)

H = hidrogen yang terlarut (ml/100g)

H_R = hidrogen yang tersisa (ml/100g)

H_E = hidrogen yang keluar ke lingkungan (ml/100g)

Hukum Sievert's , mendefinisikan hubungan antara hidrogen yang terlarut dan hidrogen di lingkungan busur. Gas yang terlarut sebanding dengan akar pangkat dua dari tekanan gas. Keseimbangan termodinamik konstan (K_1) didefinisikan sebagai berikut :

$$K_1 = \frac{P_H}{P_{H_2}} \quad (2-5)$$

dengan :

K_1 = konstan

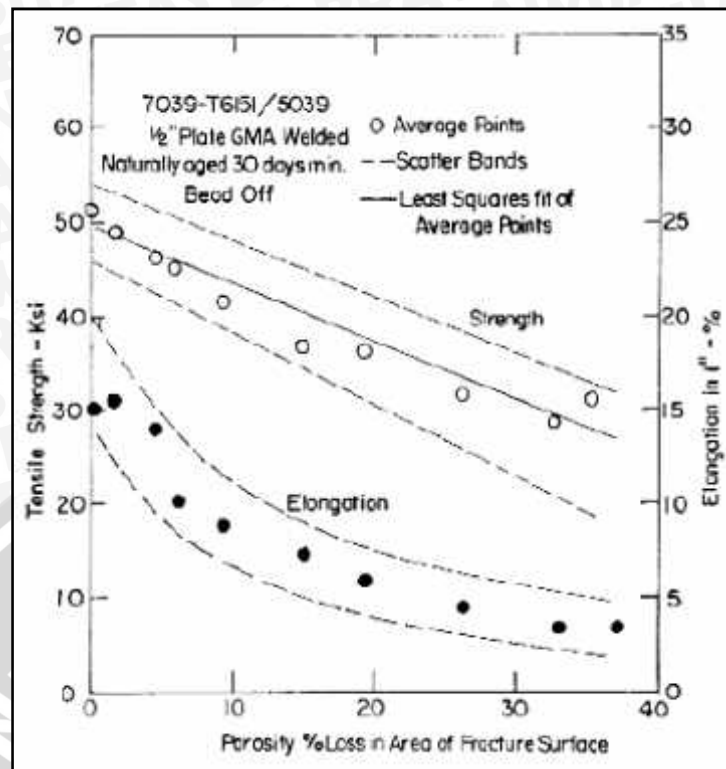
P_H = tekanan parsial dari atom hidrogen (Pa)

P_{H_2} = tekanan parsial dari molekul hidrogen (Pa)

Jadi, konsentrasi atom hidrogen sebanding dengan tekanan parsialnya, sehingga hidrogen yang terlarut diukur pada mL/100 g dari *weld metal* adalah fungsi dari tekanan parsial.

2.9 Cacat Porositas

Porositas adalah timbulnya sekelompok gas yang membentuk pori-pori di dalam lasan akibat terperangkapnya gas selama proses solidifikasi yang cepat (Khan, 2007:182). Hampir setiap proses pengelasan, porositas akan selalu terjadi dan menyebabkan masalah. Bagaimanapun, sebuah proses pengelasan yang memiliki cacat porositas tidak secara langsung mengalami kegagalan. Porositas dapat terjadi dari banyak sumber, sebagai contoh reaksi kimia di dalam kolam las yang dapat melepaskan gelembung gas.

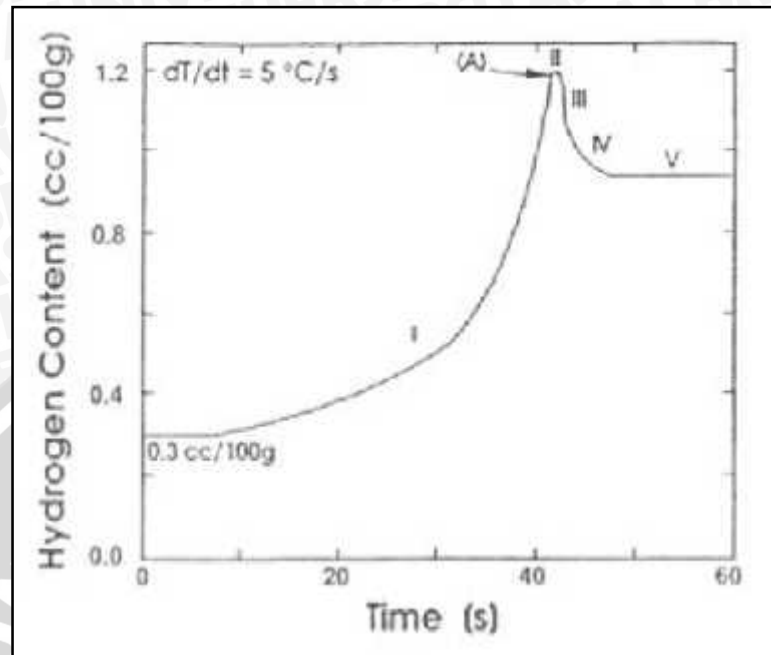


Gambar 2.10 Pengaruh porositas terhadap kekuatan tarik hasil pengelasan aluminium.
Sumber: Kou (2003:81)

Ketika daya larut keadaan padat lebih rendah daripada keadaan cair, atom hidrogen akan meninggalkan kedudukan mereka selama proses solidifikasi dan bersama-sama membentuk molekul hidrogen, dengan perbandingan dari bertambahnya bidang pemisah pada keadaan padat-cair.

Untuk lebih detail, dapat dilihat pada gambar 2.11. Selama proses solidifikasi dan banyak hidrogen yang tertolak pada bidang pemisah padat-cair, interdendrit pada keadaan cair menjadi berangsur-angsur kaya akan hidrogen sebagai akibat peningkatan fraksi dari logam padat (langkah 1). Jadi, selama solidifikasi berlangsung, kadar hidrogen dalam cairan meningkat dan akhirnya melewati batas kelarutannya. Idealnya, sebuah pori membentuk inti pada titik ini. Bagaimanapun, pertumbuhan dari pori baru membutuhkan adanya permukaan yang baru pula. Karena permukaan tersebut menjadi penghalang, konsentrasi hidrogen pada keadaan cair secara kontinyu meningkat di bawah batas kelarutannya sampai ke titik dimana sebuah pori dapat terbentuk (langkah II). Pada titik itu, pori mulai membentuk inti, dan yang paling menonjol adalah pada akar dari dendrit atau pada letak yang berbeda, seperti sebuah inklusi. Kemudian gelembung-gelembung kecil (diameter < 20 mikron) tumbuh dan kadar hidrogen dari

cairan menurun dengan cepat (langkah III dan IV) dan pori dapat bergabung satu sama lain.



Gambar 2.11 Perubahan kadar hidrogen sebelum dan sesudah pembentukan inti dari pori.

Sumber : Legait (2005:23)

Kemudian kelarutan hidrogen dari sistem paduan menunjukkan perbedaan dengan sistem non-paduan. Sistem paduan yang memiliki daya larut lebih rendah, jika memiliki konsentrasi hidrogen dengan nilai di ambang batas terbentuknya porositas, pembentukan porositas akan menjadi lebih mudah.

Keberadaan hidrogen selama pengelasan baja kekuatan tinggi dapat menyebabkan porositas dan retak hidrogen. Porositas hidrogen pada daerah lasan dapat berasal dari beberapa sumber yang berbeda, antara lain: hasil pembakaran pada pengelasan *oxyfuel*, hasil pengelasan menggunakan elektroda dengan *fluks* jenis selulosa pada pengelasan SMAW, minyak dan kelembaban pada permukaan benda kerja atau elektroda, dan fluks, pembungkus elektroda, gas pelindung, dan lingkungan yang lembab, arus yang terlalu rendah atau busur yang terlalu panjang, serta pembekuan cepat pada lapisan lasan.

Kandungan hidrogen penyebab porositas pada hasil lasan dapat dikurangi dengan beberapa cara. Pertama, menghindari gas pelindung yang mengandung hidrogen, termasuk penggunaan gas bahan bakar hidrokarbon, pembungkus elektroda tipe selulosa dan gas mulia yang mengandung hidrogen. Kedua, mengeringkan

elektroda dan fluks untuk menghilangkan kelembaban dan membersihkan kawat pengisi dan benda kerja dari minyak. Ketiga, menggunakan elektroda dengan kandungan hidrogen rendah. Keempat, mengatur komposisi penggunaan, arus pengelasan dan panjang busur seefektif mungkin. Kelima, menggunakan pemanasan lanjut (*postweld*) untuk memudahkan difusi hidrogen keluar dari daerah lasan. Dan terakhir yaitu meningkatkan gaya elektromagnetik untuk meningkatkan laju konveksi yang terjadi pada *weld pool* yang secara teoritis dapat membantu dalam melepas gelembung gas yang terbentuk ke atmosfer sebelum tersolidifikasi atau sebaliknya tergantung pada arah konveksi yang terjadi pada kolam las.

2.10 Pengujian Sambungan Las

2.10.1 Pengujian Radiografi

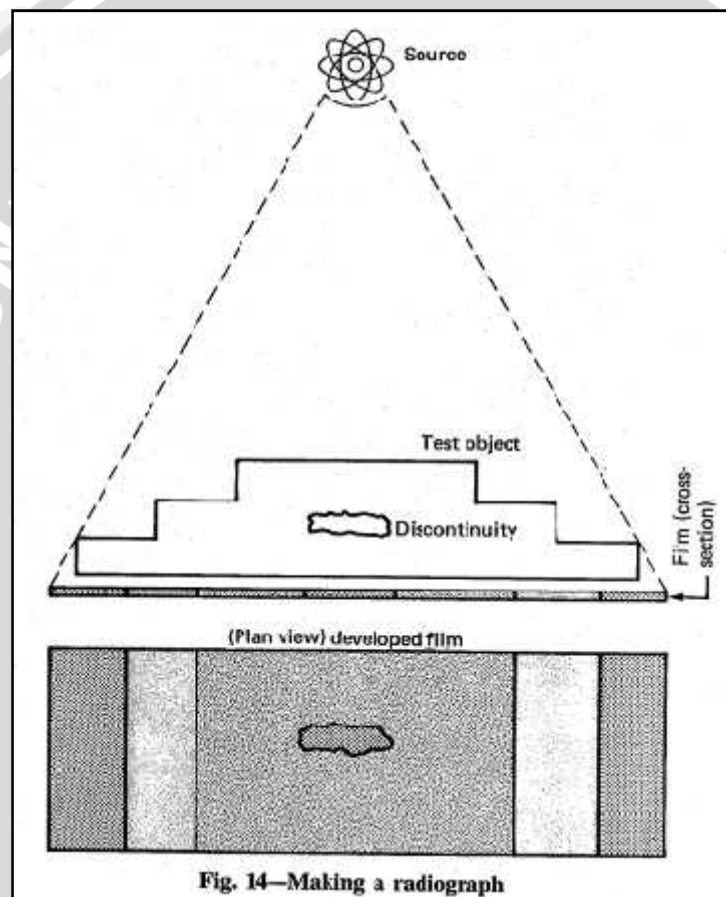
Pengujian radiografi (*radiographic examination*) adalah salah satu jenis pengujian tidak merusak (*non-destructive examination/NDE*). NDE adalah istilah umum yang digunakan untuk mengidentifikasi metode yang diizinkan untuk mengamati/memeriksa sambungan las dan material terkait tanpa menimbulkan kerusakan material tersebut. Radiografi adalah sebuah metode NDE yang menggunakan radiasi untuk menembus sebuah objek dan merekam gambar di atas sebuah peralatan rekam yang bervariasi, seperti film atau kertas *photosensitive*, dapat menampilkan di atas layar berlampu, atau dapat diamati dengan menggunakan bermacam-macam detektor radiasi elektronik dan radioaktif. Ketika sebuah objek yang diuji diekspos dengan mempenetrasikan radiasi, beberapa radiasi akan terserap, beberapa akan berhamburan dan beberapa lagi akan dipancarkan lebih dahulu oleh objek yang diuji ke atas peralatan rekam. Radiasi akan terserap dengan jumlah yang berbeda-beda pada daerah yang berbeda pada objek pengujian. Kebanyakan proses radiografi konvensional saat ini menggunakan pencahayaan untuk merekam gambar permanen di atas sebuah film fotografi. Selain itu, kebanyakan pengujian sambungan las ditampilkan dengan metode radiografi yang menggunakan radiasi elektromagnetik, seperti sinar X (*X-rays*) dan sinar gamma (*gamma rays*).

1. Sinar X

Sinar X dihasilkan dengan menumbukkan elektron yang dilepaskan oleh katoda pada anoda di dalam suatu tabung hampa udara.

2. Sinar gamma

Sinar gamma (γ) dihasilkan dari unsur – unsur radioaktif yang tidak stabil yang disebut juga dengan radioisotop. Radioisotop ini dalam proses menuju kestabilannya akan memancarkan gelombang elektromagnetik yang dinamakan sinar γ . Karena pemencaran ini, maka radioisotop makin lama makin lemah dan apabila tidak dipakai harus disimpan dalam tabung pelindung yang terbuat dari timbal dan paduan wolfram. Contoh unsur – unsur radioaktif yang biasa digunakan adalah Cobalt (Co-60), Cesium (Cs-137) dan Iridium (Ir-192). (AWS:2000:125)



Gambar 2.12 Prinsip pengujian radiografi.

Sumber: AWS (2000:135)

2.10.2 Pengujian Metalografi

Pengujian metalografi (*metallography examination*) merupakan salah satu jenis pengujian merusak (*destructive examination*) pada sambungan las. Pengujian merusak adalah teknik pengujian lasan untuk mengamati sifat material secara spesifik, seperti kimiawi, mekanik dan metalurgi serta untuk mengamati letak cacat dengan cara merusak hasil lasan. Pengujian metalografi sering diperlukan untuk menggambarkan

daerah sambungan secara spesifik. Hal ini digunakan untuk menentukan kekuatan sambungan las, distribusi inklusi non logam pada sambungan, dimensi sambungan, struktur metalurgi pada sambungan dan daerah batas las, luas dan struktur pada daerah terpengaruh panas (HAZ), serta letak dan kedalaman penetrasi pada sambungan. Pengujian metalografi terbagi menjadi dua, yaitu spesimen makro (*macro specimens*) dan spesimen mikro (*micro specimens*) (AWS, 2000:100).

2.11 Hipotesa

Gaya elektromagnetik berpengaruh terhadap laju konveksi logam cair pada kolam las (*weld pool*). Semakin besar induksi magnet eksternal yang diberikan, maka semakin besar gaya elektromagnetik yang bekerja di dalam kolam las, sehingga laju konveksi logam cair pada kolam las akan semakin meningkat. Karena semakin meningkatnya laju konveksi logam cair, maka semakin banyak gas-gas terlarut dalam logam cair akan terangkat dan meninggalkan logam cair sebelum logam cair tersolidifikasi. Hal ini akan menyebabkan cacat porositas semakin menurun.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan metode penelitian eksperimental sejati (*true experimental research*), yaitu mencari data sebab-akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga dapat diketahui pengaruh penambahan variasi induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas pada pengelasan pelat *hot rolled quench-tempered steel* menggunakan las MIG.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*)

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.

2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*)

Variabel terikat yang diamati dalam penelitian ini adalah prosentase porositas yang terjadi di daerah hasil pengelasan.

3. Variabel Terkontrol (*Controlled Variable*)

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga konstan selama penelitian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini antara lain:

1. Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja *hot rolled quench-tempered steel* (QTS) buatan PT. Krakatau Steel.
2. Tebal material yang digunakan masing-masing 10 mm.
3. Jenis pengelasan yang dilakukan adalah MIG (*Metal Inert Gas*).
4. Kuat arus pengelasan yang digunakan adalah 140 A dengan tegangan 20 V untuk 3 *layer*.
5. Kecepatan pengelasan dijaga konstan yaitu 15 cm/menit.
6. Pengelasan menggunakan arus DC dengan polaritas terbalik (DC+).
7. Kawat elektroda yang digunakan berdiameter 1 mm.
8. Kecepatan pengumpanan kawat adalah 4 m/menit.
9. Posisi pengelasan adalah *flat position*.
10. Jenis sambungan las yang digunakan adalah *butt join* dengan kampuh V.
11. Gas pelindung yang digunakan adalah CO₂ dengan laju aliran 12 L/menit.

3.3 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 10 Desember 2013 – selesai. Tempat pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut:

1. Laboratorium Proses Produksi 1 Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tempat dilakukannya proses pembuatan spesimen.
2. Laboratorium Fisika Gelombang FMIPA Universitas Negeri Malang tempat dilakukannya pengujian besar induksi magnet eksternal.
3. Departemen Teknologi Pengerjaan Logam VEDC Malang tempat pengelasan spesimen.
4. PT. Greatways Engineering Service (GES) Gresik tempat pengujian cacat las radiografi.
5. Laboratorium Uji Fatik Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya tempat dilakukannya pengambilan data foto mikro.

3.4 Alat dan Bahan yang Digunakan

3.4.1 Alat yang Digunakan

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mesin *Power Hack Saw*
Power hack saw digunakan untuk memotong spesimen sesuai dengan dimensi yang ditentukan.
2. Mesin *Milling Vertikal*
Mesin *milling* vertikal digunakan untuk membuat kampuh las.
3. Mesin Las MIG
Mesin las MIG digunakan untuk pengelasan benda kerja. Gas pelindung yang digunakan adalah CO₂. Spesifikasi mesin las MIG yang digunakan yaitu:

Merk	: Miller
Buatan	: Italia
No. Seri	: EN 60974-1
Model	: Infinity 35
Kode	: 029015365



Gambar 3.1 Mesin las MIG.

4. Kawat las MIG

Kawat las MIG digunakan sebagai elektroda dan *filler* dalam pengelasan.

Spesifikasi kawat las yang digunakan adalah:

Merk : Hercules

Diameter : 1 mm

Klasifikasi : CO₂ Shield Welding Wire AWS ER 70S-6

Komposisi : C : 0,07 %

Mn : 1,6 %

Si : 0,88 %

S : 0,012 %

P : 0,025 %

5. Landasan

Landasan digunakan sebagai penahan benda kerja dan solenoida saat pengelasan agar tidak bergeser dan mengalami distorsi.

6. Alat Uji Radiografi

7. Scanning Electron Microscope (SEM)

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



Gambar 3.2 *Scanning Electron Microscope (SEM)*.

Spesifikasi SEM yang digunakan yaitu:

Merk	: PHENOM
Seri	: G2 PRO
<i>Light optical magnification fixed</i>	: 20 - 120 x
<i>Electron optical magnification range</i>	: 80 - 45.000 x
<i>Image format</i>	: JPEG, TIFF, BMP
<i>Data storage</i>	: USB 2.0 flash drive

8. *Centrifugal Sand Paper Machine*

Digunakan untuk menghaluskan permukaan spesimen yang akan difoto mikro.

9. Adaptor

Digunakan untuk mengubah arus AC menjadi DC. Untuk penelitian ini voltase yang dihasilkan 36 Volt.

10. Resistor

Digunakan untuk mengatur arus yang dikehendaki. Pada penelitian ini dengan $V = 36$ Volt maka :

- Untuk arus 3A, resistor dengan hambatan 12
- Untuk arus 6A, resistor dengan hambatan 6
- Untuk arus 9A, resistor dengan hambatan 4
- Untuk arus 12A, resistor dengan hambatan 3
- Untuk arus 15A, resistor dengan hambatan 2,4

11. Solenoida

Digunakan untuk membangkitkan medan magnet. Solenoida yang digunakan adalah yang mempunyai 150 lilitan kawat tembaga dengan diameter sebesar 0,7

mm. Bahan yang digunakan sebagai inti adalah baja QTS dengan dimensi 100 mm × 100 mm × 10 mm.



Gambar 3.3 Solenoida.

12. Teslameter Digital

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

13. Amperemeter

Digunakan untuk mengukur arus listrik yang mengalir ke solenoida.

14. Indikator Tegangan

Digunakan untuk mengetahui arus yang mengalir ke solenoida.

15. Kertas Gosok

Digunakan untuk meratakan permukaan spesimen.

16. Autosol

Digunakan untuk menghaluskan dan mengkilatkan permukaan spesimen.

17. Kain *Flanel*

Digunakan pada langkah akhir penghalusan permukaan spesimen.

18. Etsa

Digunakan untuk memperjelas penampakan struktur mikro spesimen.

19. Kamera

Digunakan untuk mengambil gambar spesimen pada saat penelitian.

3.4.2 Bahan yang Digunakan

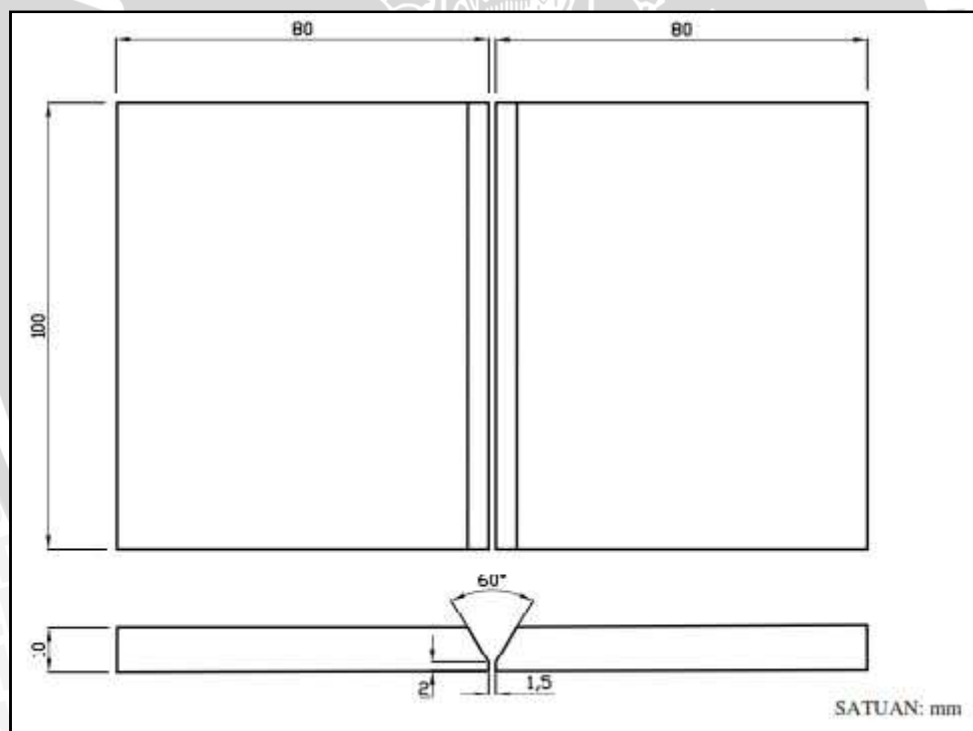
Adapun bahan yang digunakan dalam penelitian adalah *hot rolled quenched-tempered coil plate steel* buatan PT. Krakatau Steel dengan komposisi sebagai berikut:

Tabel 3.1 Komposisi Baja QTS

Unsur	Prosentase (%)	Unsur	Prosentase (%)
C	0,29342	Cu	0,08337
Si	0,32985	W	0,00951
S	0,00810	Ti	0,00439
P	0,01425	Sn	0,00339
Mn	1,41218	Al	0,03785
Ni	0,27877	Pb	0,00825
Cr	0,55029	Zr	0,00116
Mo	0,19303	Zn	0,00378
V	0,01473	Fe	96,7625

3.5 Bentuk dan Dimensi Spesimen Pengelasan

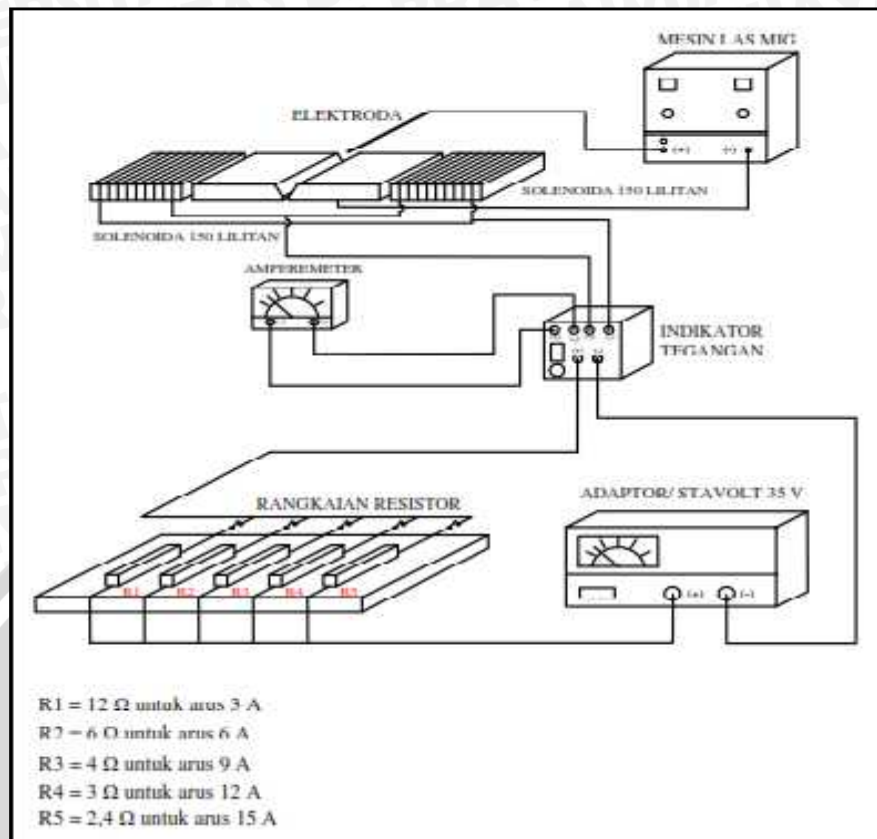
Adapun bentuk dan dimensi spesimen yang akan digunakan dalam pengelasan adalah seperti pada gambar 3.4 di bawah ini.



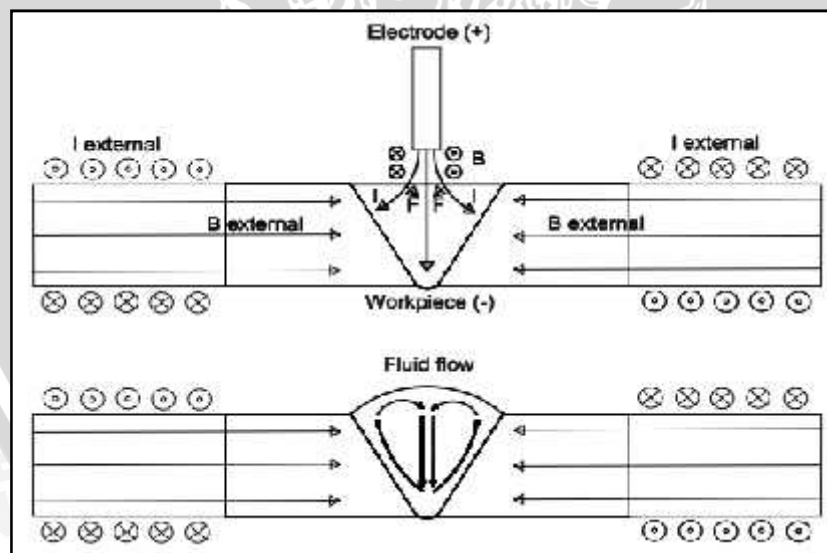
Gambar 3.4 Bentuk dan dimensi spesimen pengelasan.

3.6 Instalasi Penelitian

Susunan instalasi dan arah aliran arus listrik pada solenoida yang akan digunakan dalam penelitian dapat dilihat pada gambar 3.5 dan 3.6 berikut ini.



Gambar 3.5 Instalasi penelitian.



Gambar 3.6 Arah aliran arus listrik pada solenoida.

3.7 Prosedur Penelitian

3.7.1 Prosedur Pengambilan Data Besar Induksi Magnet Eksternal

1. Spesimen dibuat sesuai dengan bentuk dan dimensi yang direncanakan.
2. Spesimen 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, dan kedudukannya disejajarkan dengan posisi solenoida.
5. Mengatur besar arus listrik yang akan dialirkan ke solenoida, variasi arus yang diberikan untuk tiap kali pengukuran yaitu 3A, 6A, 9A, 12A dan 15A
6. Sumber tegangan dihidupkan.
7. Dilakukan pengukuran besar induksi magnet pada daerah kampuh las (3 titik) dengan menggunakan teslameter.
8. Benda kerja dilepaskan dari instalasi penelitian.

3.7.2 Prosedur Pengelasan Spesimen

1. Spesimen pengelasan dibersihkan dari terak dan kotoran.
2. Kawat las dibersihkan dari kotoran dan debu yang menempel.
3. Instalasi penelitian disiapkan.
4. Benda kerja dipasang pada landasan yang tersedia pada instalasi penelitian, dan kedudukannya disejajarkan dengan posisi solenoida.
5. Menghidupkan mesin las MIG.
6. Menentukan tegangan, arus, kecepatan pengumpanan kawat las dan kecepatan aliran gas pelindung sesuai dengan perencanaan.
7. Mengatur besar arus listrik yang akan dialirkan ke solenoida, dengan besar arus 3A.
8. Menghidupkan sumber tegangan.
9. Dilakukan pengelasan pada daerah kampuh las dengan jumlah 3 layer dan kecepatan pengelasan 15 cm/menit.
10. Setelah proses pengelasan selesai, spesimen dilepaskan dari landasan.
11. Mengulang langkah 4 sampai dengan 10 dengan mengatur variasi besar arus listrik yang dialirkan ke solenoida (langkah 7) sebesar 6, 9, 12 dan 15 A untuk proses pengelasan selanjutnya.

3.7.3 Prosedur Pengambilan Data Cacat Porositas dengan Uji Radiografi

Sinar gamma diperoleh dari isotop radio aktif dari sebuah reaktor nuklir. Sebagai sumber energi dipakai Iridium-192. Adapun cara pemeriksaan dengan sinar gamma adalah sebagai berikut :

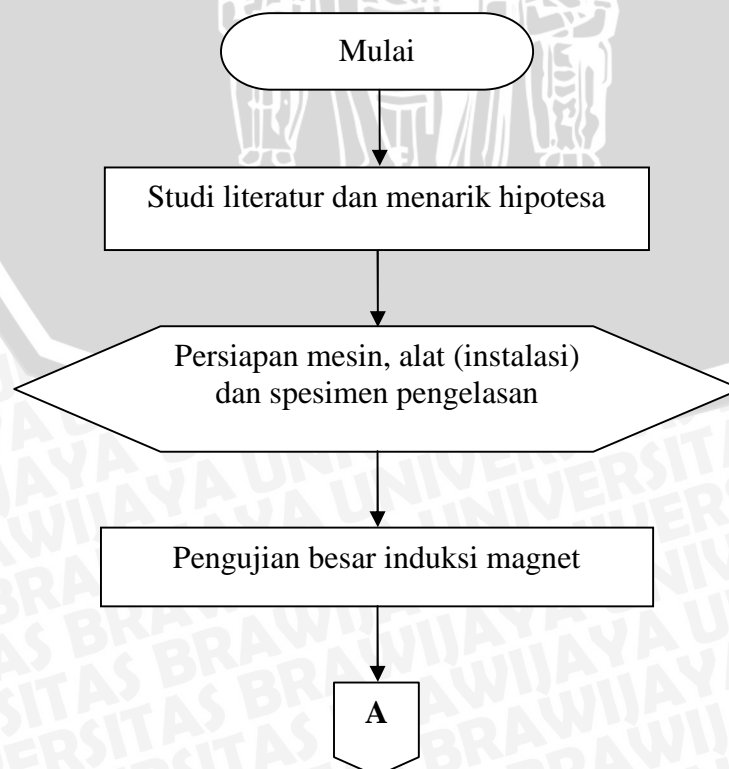
1. Menyiapkan spesimen yang akan diuji. Spesimen harus bersih dari kotoran, debu dan minyak yang melekat.

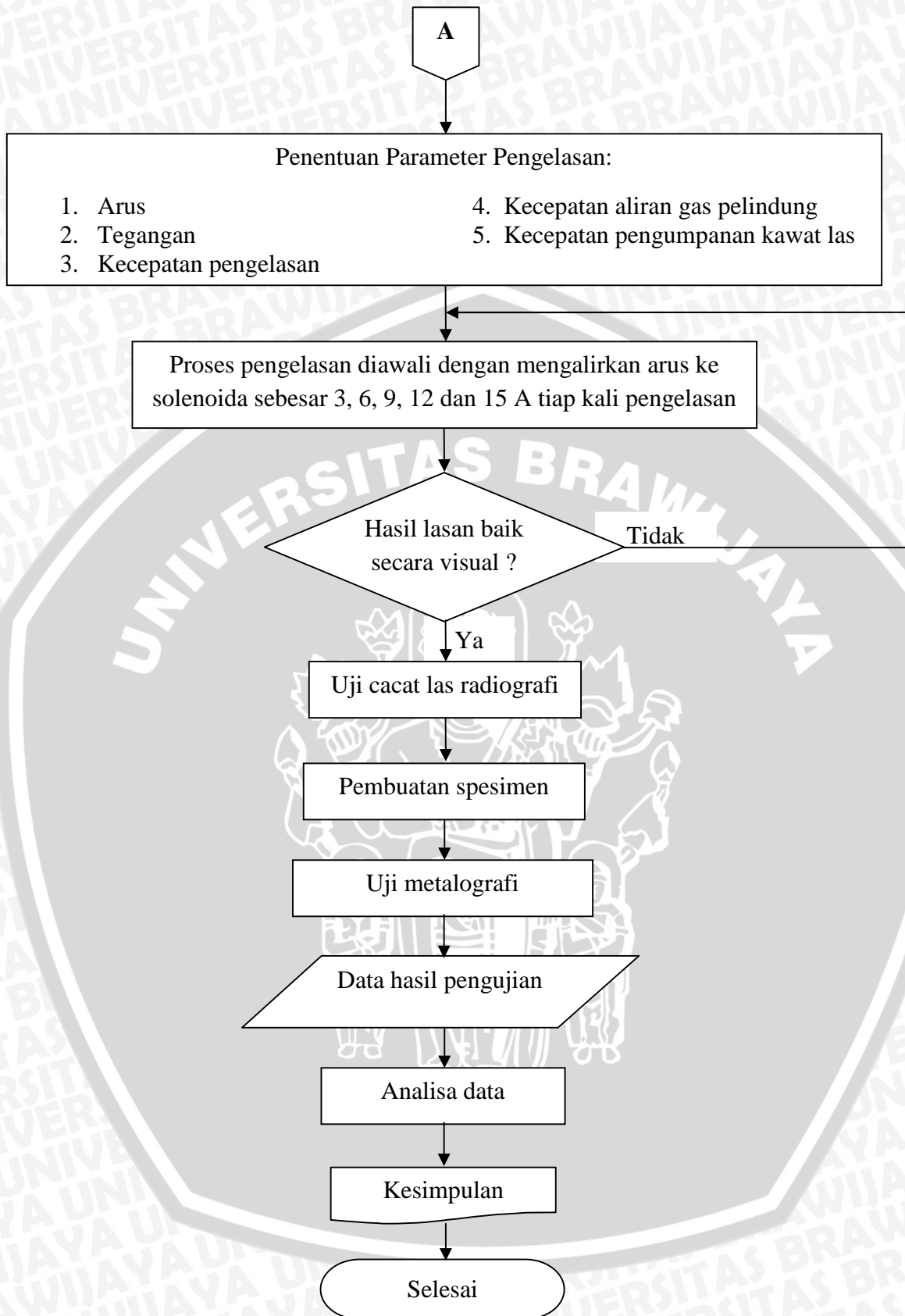
2. Memasang film pada sisi belakang benda kerja.
3. Benda kerja diletakkan di antara dua kutub sinar.
4. Mengaktifkan sinar gamma.
5. Mencuci film.
6. Memeriksa bayangan pada film dengan teliti. Jika spesimen dalam keadaan utuh tanpa cacat, film akan menerima bayangan yang merata. Jika terdapat cacat maka film akan terlihat noda hitam.

3.7.4 Prosedur Pengambilan Data Foto Mikro

1. Spesimen pengelasan yang telah melalui uji radiografi dipotong melintang.
2. Permukaan spesimen diratakan terlebih dahulu, lalu dihaluskan dengan menggunakan *centrifugal sand paper machine*.
3. Permukaan spesimen dihaluskan dengan cara digosok menggunakan autosol dengan kain flanel hingga halus dan mengkilap.
4. Permukaan spesimen dibersihkan dengan alkohol, lalu ditetesi cairan etsa.
5. Permukaan spesimen yang telah halus dan mengkilap diletakkan tepat di bawah lensa SEM, diatur fokusnya hingga didapatkan pembesaran 5000 kali dan diambil foto mikro pada daerah *weld pool*.
6. Selanjutnya foto mikro spesimen disimpan dalam bentuk file jpg.

3.8 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.7 Diagram alir penelitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Hasil Pengujian Besar Induksi Magnet Eksternal

Sebelum dilakukan proses pengelasan, terlebih dahulu dilakukan pengujian besar induksi magnet eksternal pada daerah kampuh las dengan menggunakan teslameter digital. Pengujian dilakukan pada masing-masing arus yang dialirkan pada solenoida sebanyak 3 kali pengulangan. Instalasi pengujian disusun seperti pada gambar di bawah ini.



Gambar 4.1 Instalasi pengujian besar induksi magnet eksternal.

Dari hasil pembacaan indikator pada teslameter digital untuk setiap variasi arus yang dialirkan ke solenoida, didapatkan data besar induksi magnet eksternal pada kampuh las untuk tiap-tiap arus yang dialirkan pada solenoida, seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Pengujian Besar Induksi Magnet Eksternal

ARUS (A)	BESAR INDUKSI MAGNET (mT)			RATA-RATA (mT)
Tanpa (0)	0			0
3	2,4	2,3	2,5	2,40
6	3,4	3,4	3,4	3,40
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

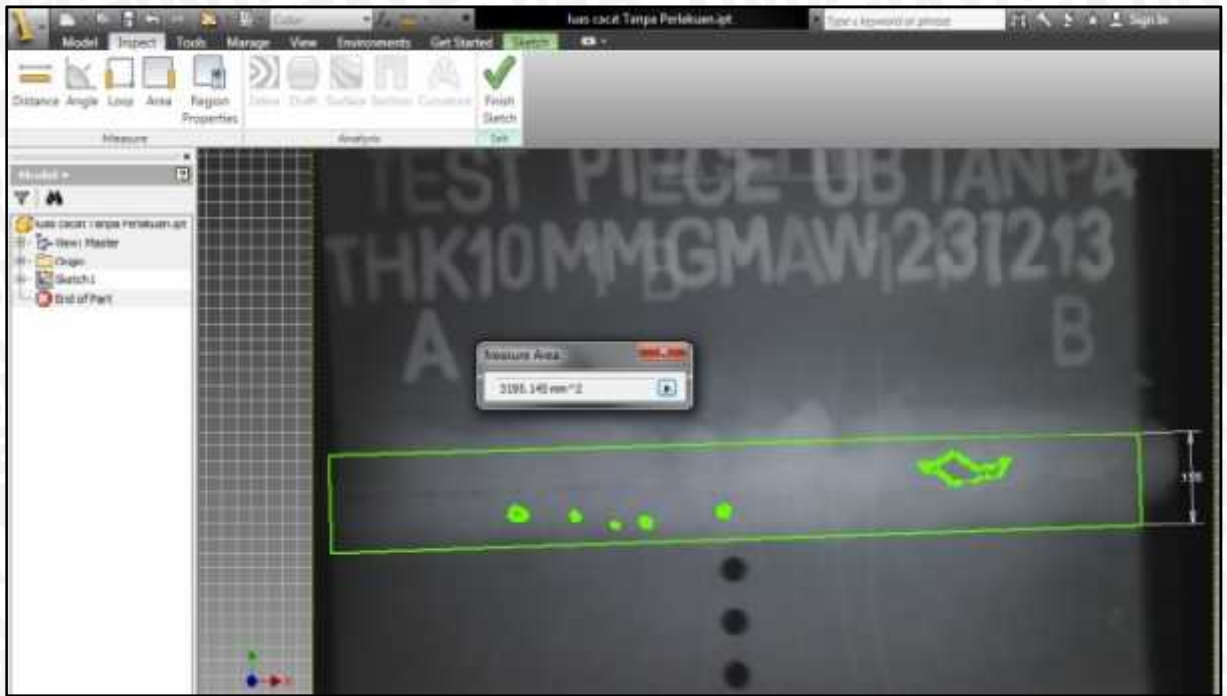
4.1.2 Data Cacat Porositas Hasil Uji Radiografi

Pengujian cacat porositas hasil pengelasan dilakukan dengan uji radiografi. Dari hasil pengamatan film negatif menggunakan *viewer* berlampu, didapatkan hasil foto daerah sambungan las seperti pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Foto sambungan las pada film negatif hasil uji radiografi.

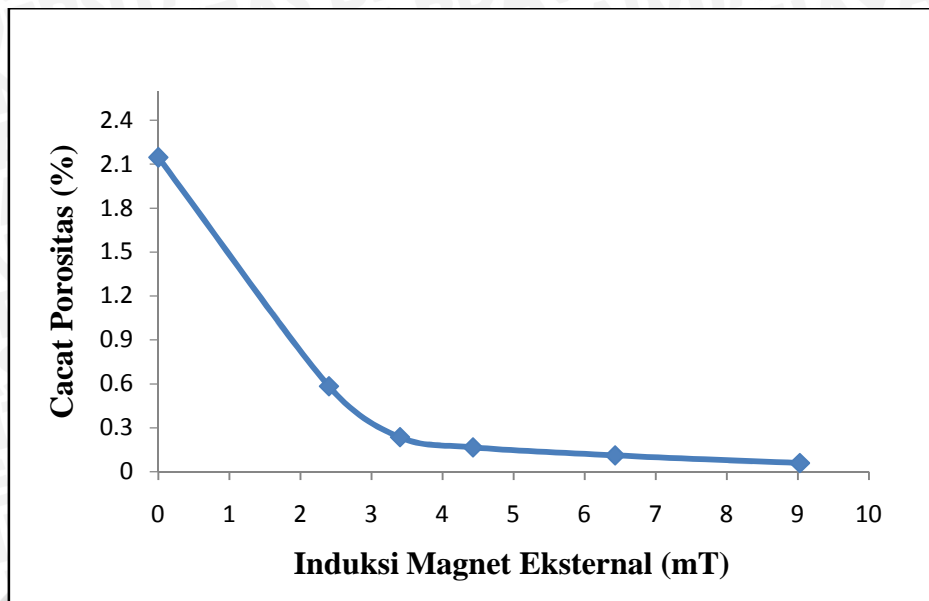
Dengan menggunakan *Software Autodesk Inventor 2012*, didapatkan data luasan cacat porositas tiap luasan sambungan las pada spesimen. Hasil pengolahan data cacat porositas seluruh spesimen dapat dilihat pada lampiran 5. Prosentase porositas didapatkan dari hasil perbandingan luasan cacat porositas dengan luasan sambungan las. Metode dan hasil pengukuran ditunjukkan pada gambar dan tabel di bawah ini.



Gambar 4.3 Pengolahan data luasan cacat porositas menggunakan *Autodesk Inventor* 2012.

Tabel 4.2 Data Hasil Pengujian Cacat Porositas Dengan Uji Radiografi

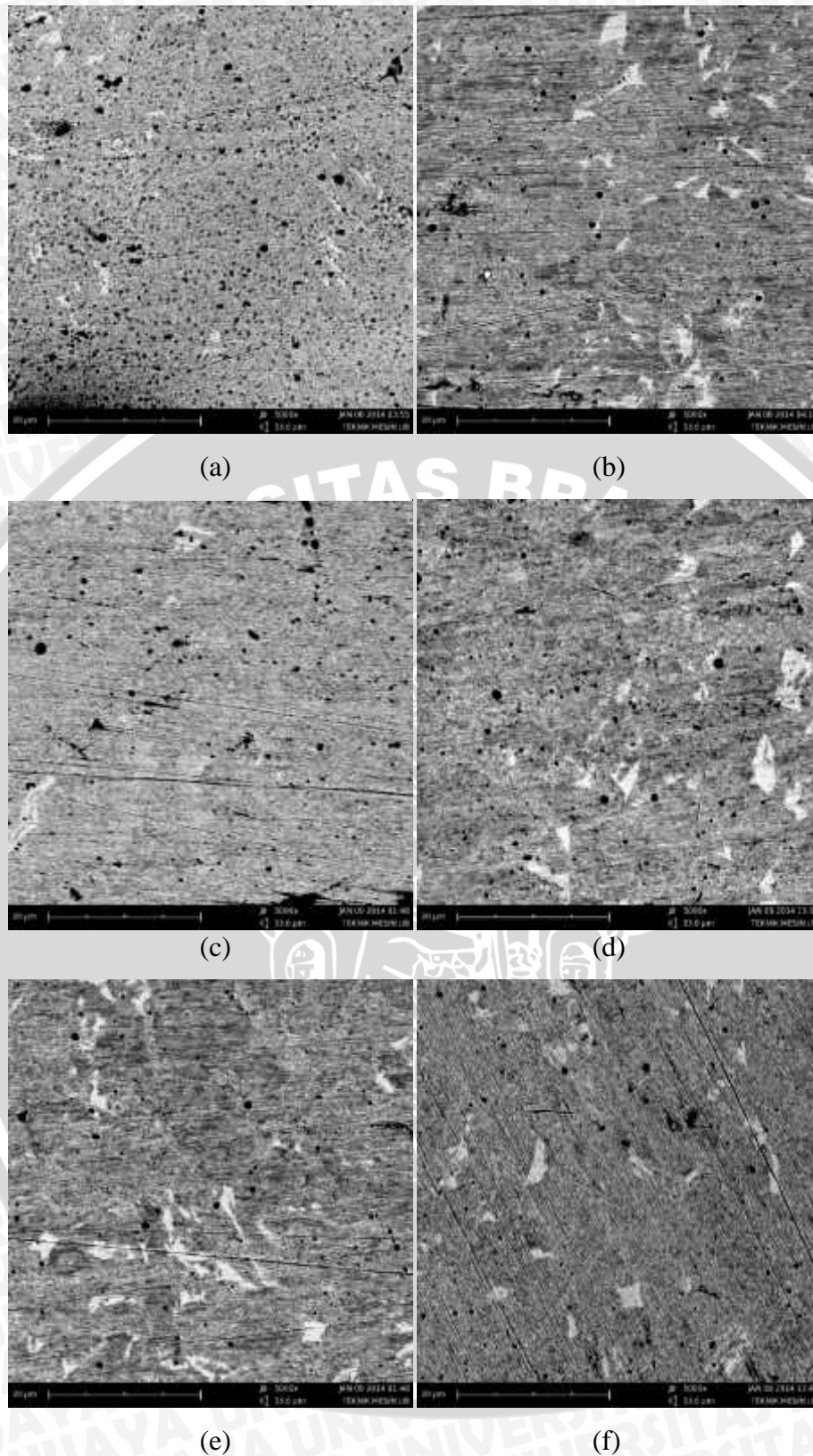
INDUKSI MAGNET (mT)	CACAT POROSITAS (%)			RATA-RATA (%)
	I	II	III	
0		2,145		2,145
2,4	1,072	0,143	0,534	0,583
3,4	0,506	0,142	0,062	0,236
4,43	0,135	0,08	0,283	0,166
6,43	0,027	0	0,309	0,112
9,03	0,049	0	0,13	0,059



Gambar 4.4 Grafik hubungan antara induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas.

Berdasarkan gambar 4.4 dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan prosentase cacat porositas untuk spesimen tanpa penambahan induksi magnet eksternal dan spesimen dengan penambahan induksi magnet eksternal pada tiap-tiap arus yang dicatukan pada solenoida selama pengelasan. Semakin besar induksi magnet eksternal yang diberikan, maka cacat porositas yang terbentuk cenderung menurun. Prosentase cacat porositas las tertinggi dihasilkan pada spesimen pengelasan tanpa penambahan induksi magnet dengan 2,145 %. Sedangkan prosentase cacat porositas las terendah dihasilkan oleh spesimen pengelasan dengan penambahan induksi magnet eksternal 9,03 mT yaitu sebesar 0,059 %.

Untuk mendukung hasil pengujian cacat porositas dengan uji radiografi, dilakukan pengamatan porositas mikro pada penampang melintang *weld pool* spesimen masing-masing variasi besar induksi magnet eksternal dengan menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) untuk melihat porositas mikro yang terdapat di dalam *weld pool*. Hasil foto mikro seperti yang terlihat pada gambar 4.5 di bawah ini.



Gambar 4.5 Porositas mikro pada penampang melintang *weld pool* masing-masing variasi besar induksi magnet eksternal dengan pembesaran 5000 x (a) 0 mT (b) 2,4 mT; (c) 3,4 mT; (d) 4,43 mT; (e) 6,43 mT dan (f) 9,03 mT.

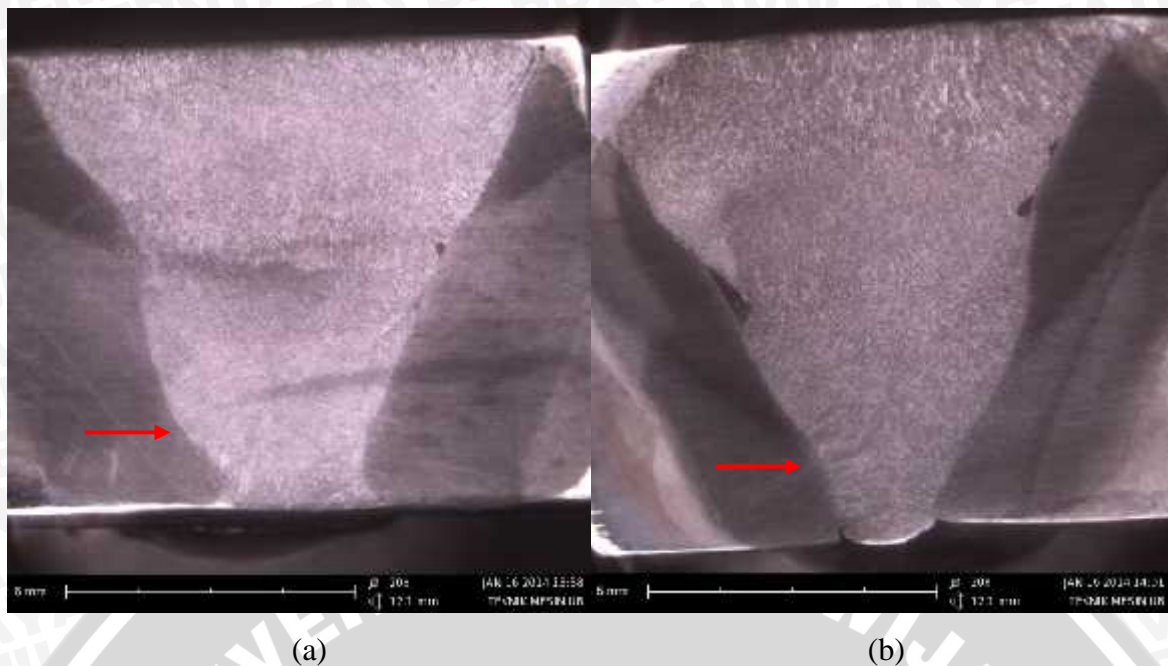
Dari pengamatan porositas mikro hasil foto SEM, dapat dilihat bahwa semakin besar induksi magnet eksternal yang diberikan, maka prosentase porositas mikro yang terkandung dalam *weld pool* berangsur-angsur menurun. Secara berurutan, sampel yang diuji adalah spesimen tanpa penambahan induksi magnet eksternal (0 mT), dengan penambahan induksi magnet eksternal 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT dan 9,03 mT. Prosentase cacat porositas mikro hasil pengukuran dengan *Software ImageJ* secara berurutan yaitu 9,656 %; 1,742 %; 1,529 %; 1,558 %; 1,337% dan 1,101 %. Metode dan hasil pengolahan data cacat porositas mikro dengan menggunakan *Software ImageJ* ditunjukkan pada lampiran 6.

4.2 Pembahasan

Spesimen tanpa penambahan induksi magnet eksternal memiliki prosentase porositas yang tinggi pada daerah kolam las (*weld pool*). Gaya elektromagnetik yang kecil menyebabkan laju konveksi yang rendah sehingga pada saat pengelasan tidak seluruh lapisan logam cair pada daerah batas las yang terbawa arus konveksi mengalami sirkulasi. Hal ini menyebabkan kepadatan sambungan yang rendah. Selain itu porositas yang tinggi disebabkan karena terjebakny gas pada *weld pool*, juga dikarenakan sirkulasi logam cair yang kurang, sehingga gas yang masuk tidak mampu keluar ke permukaan *weld pool* dengan cepat sebelum tersolidifikasi, sehingga gas terperangkap di dalam logam las yang membeku.

Pada penambahan induksi magnet eksternal sebesar 2,4 mT; 3,4 mT; 4,43 mT; 6,43 mT dan 9,03 mT, prosentase cacat porositas berangsur-angsur menurun seiring peningkatan induksi magnet eksternal yang diberikan. Induksi magnet yang ditambahkan menyebabkan gaya elektromagnetik yang bekerja di dalam *weld pool* menjadi lebih besar, sehingga laju konveksi pada kolam las dan kemampuan pengangkatan gelembung-gelembung gas terlarut penyebab porositas ke permukaan melalui kedua sisi *weld pool* meningkat. Hal ini menyebabkan gelembung-gelembung gas di dalam *weld pool* semakin mudah terlepas ke atmosfer dan cacat porositas yang terbentuk semakin berkurang.

Untuk lebih memperjelas hal tersebut, dilakukan pengamatan arah konveksi logam las dengan foto makro menggunakan SEM pada penampang melintang *weld pool*. Foto makro digunakan untuk membandingkan perubahan pola konveksi *weld pool* pada spesimen tanpa penambahan induksi magnet eksternal dan dengan penambahan induksi magnet eksternal. Hasilnya dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pola konveksi logam las pada *weld pool* dengan pembesaran 20 x (a) Tanpa induksi magnet eksternal, (b) dengan induksi magnet eksternal 9,03 mT.

Dari hasil foto makro, dapat dilihat bahwa terdapat perbedaan pola konveksi logam las pada *weld pool* antara spesimen tanpa induksi magnet eksternal dan dengan penambahan induksi magnet eksternal. Pada spesimen tanpa induksi magnet eksternal tidak terdapat pola aliran logam las saat pengelasan karena gaya elektromagnetik yang bekerja pada proses pengelasan hanya gaya internal hasil interaksi antara arus listrik dan medan magnet yang ditimbulkan arus listrik itu sendiri, sehingga gaya elektromagnetiknya sangat kecil. Gaya elektromagnetik yang kecil tersebut tidak mampu membentuk pola yang dapat mengangkat gas-gas terlarut untuk keluar dari *weld pool* sebelum solidifikasi, sehingga prosentase cacat porositas yang terbentuk tinggi. Sedangkan pada spesimen dengan penambahan induksi magnet eksternal menghasilkan pola konveksi yang berbeda. Induksi magnet eksternal yang ditambahkan menyebabkan gaya elektromagnetik yang bekerja semakin besar, sehingga laju konveksi logam cair pada *weld pool* juga meningkat. Pada saat pengelasan, gaya elektromagnetik menyebabkan aliran logam cair pada pusat *weld pool* mengarah tegak lurus ke bawah dan menuju ke samping dan muncul sepanjang batas *weld pool*. Hal inilah yang menyebabkan prosentase cacat porositas yang terbentuk semakin menurun karena semakin banyak gelembung gas yang terangkat ke atmosfer.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tentang pengaruh induksi magnet eksternal terhadap cacat porositas hasil pengelasan baja QTS yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa:

1. Penambahan induksi magnet eksternal selama pengelasan mempengaruhi cacat porositas hasil pengelasan, dimana semakin besar induksi magnet eksternal yang ditambahkan, prosentase cacat porositas yang dihasilkan semakin menurun.
2. Prosentase cacat porositas tertinggi dihasilkan pada spesimen pengelasan tanpa penambahan induksi magnet eksternal dengan 2,145 %. Sedangkan prosentase cacat porositas terendah dihasilkan pada spesimen pengelasan dengan penambahan induksi magnet eksternal 9,03 mT yaitu sebesar 0,059 %.

5.2 Saran

1. Perlu dilakukan pengujian cacat dengan metode berbeda yang memungkinkan menampilkan cacat lain yang tidak bisa dideteksi dengan uji radiografi.
2. Perlu dilakukan penelitian tentang penambahan induksi magnet eksternal pada pengelasan yang berhubungan dengan penyebaran cacat las.
3. Ditinjau dari susunan, bentuk dan dimensi alat pembangkitan induksi magnet eksternal yang telah digunakan, perlu adanya pengembangan alat sejenis yang lebih aplikatif untuk penggunaan yang lebih luas.



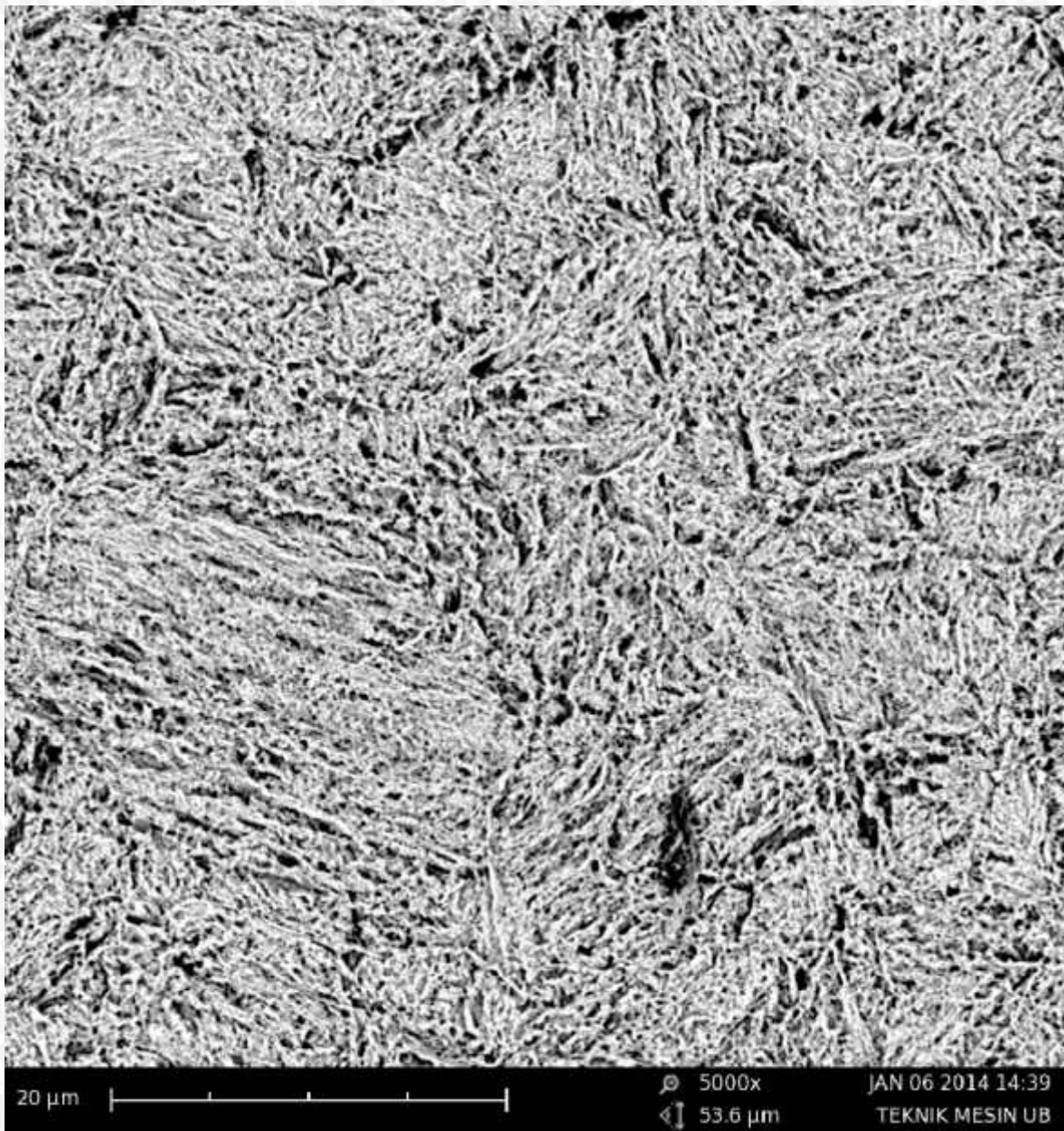
DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 2013. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/solenoid.html#c3>. (Diakses tanggal 20 Oktober 2013)
- AWS. 1982. *Welding Handbook, Seventh Edition, Vol. 4*. Miami: American Welding Society
- AWS. 2000. *Welding Inspection Handbook, Third Edition*. Miami: American Welding Society
- Kamenichny, I. 1969. *Heat Treatment A Handbook*. Moscow: Pervy Rizhsky Pereulok
- Khan, Md. Ibrahim. 2007. *Welding Science and Technology*. New Delhi: New Age International (P) Ltd.
- Kou, Sindo. 1987. *Welding Metallurgy*. New Jersey: Wiley-Interscience
- Kou, Sindo. 2003. *Welding Metallurgy, Second Edition*. New Jersey: Wiley-Interscience
- Lancaster, J. F. 1993. *Metallurgy of Welding, Fifth Edition*. Cambridge: Chapman & Hall
- Legait, Piere Alexander. 2005. *Formation and Distribution of Porosity in Al-Si Welds. Material Science and Engineering Journal*. <http://www.swan.ac.uk/mateng/DaiEurocorr.pdf>. (Diakses 9 September 2013)
- Messler Jr., Robert W. 1999. *Principles of Welding Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley & Sons.
- Ningsih, Marsetyayu. 2008. *Pengaruh Besar Induksi dan Pola Pembangkitan Medan Magnet Solenoida terhadap Cacat dan Distribusi Kekerasan Pengelasan Dissimilar*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya
- Smith, William F. 2004. *Foundation of Material Science and Engineering, Third Edition*. New York: McGraw Hill.
- Vlack, Lawrence V.H. 1991. *Ilmu dan Teknologi Bahan*. Edisi Kelima. Terjemahan Djaprie, Sriati. Jakarta: Erlangga.
- Wiryosumarto, Harsono. 1996. *Teknologi Pengelasan Logam*, Jakarta: PT. Pradya Paramita
- Zhou, Jun & Tsai, Hai-Lung. 2006. *Effects of Electromagnetic Force on Melt Flow and Porosity Prevention in Pulsed Laser Keyhole Welding. International Journal of Heat and Mass Transfer* 50 (2007) 2217–2235. University of Missouri-Rolla US. web.mst.edu/~tsai/publications/Zhou-IJHMT-2007-59.pdf. (Diakses 1 Agustus 2013)









LAMPIRAN

Lampiran 1 Foto Mikrostruktur *Base Metal*



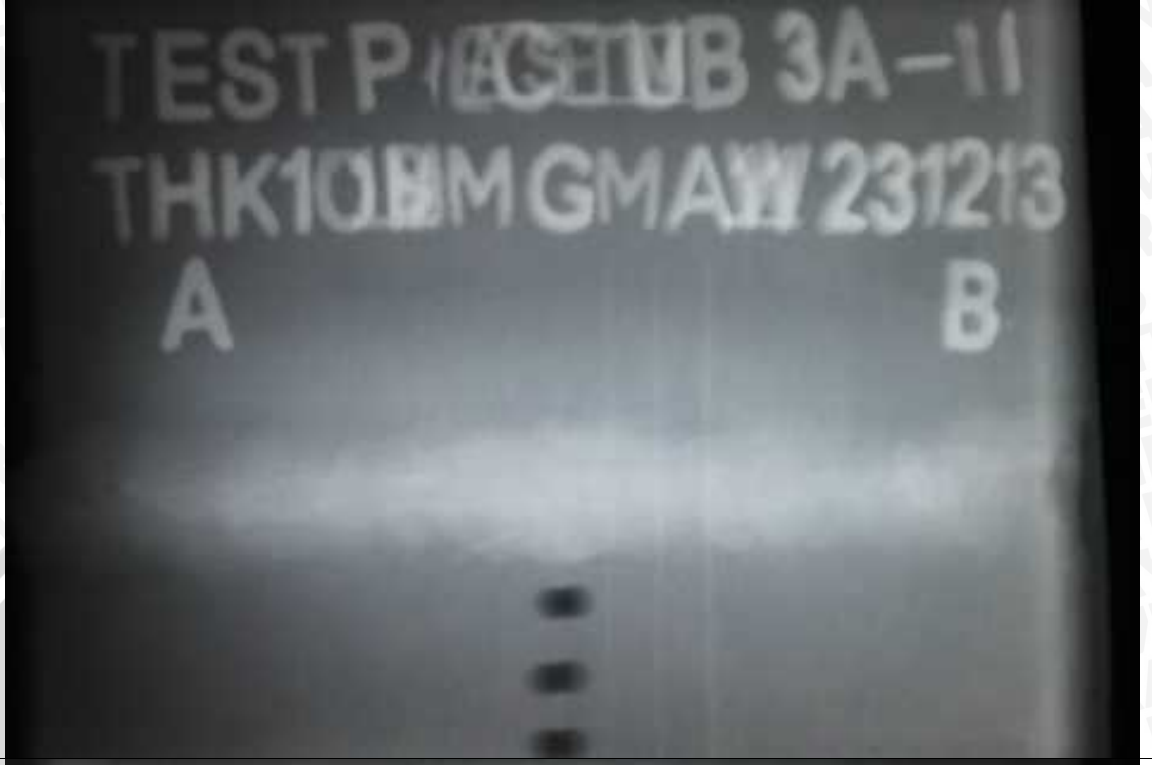
Lampiran 2 Foto Spesimen Hasil Pengelasan

0 mT	
2,4 mT	
3,4 mT	
4,43 mT	
6,43 Mt	
9,03 mT	

Lampiran 3 Foto Hasil Uji Radiografi



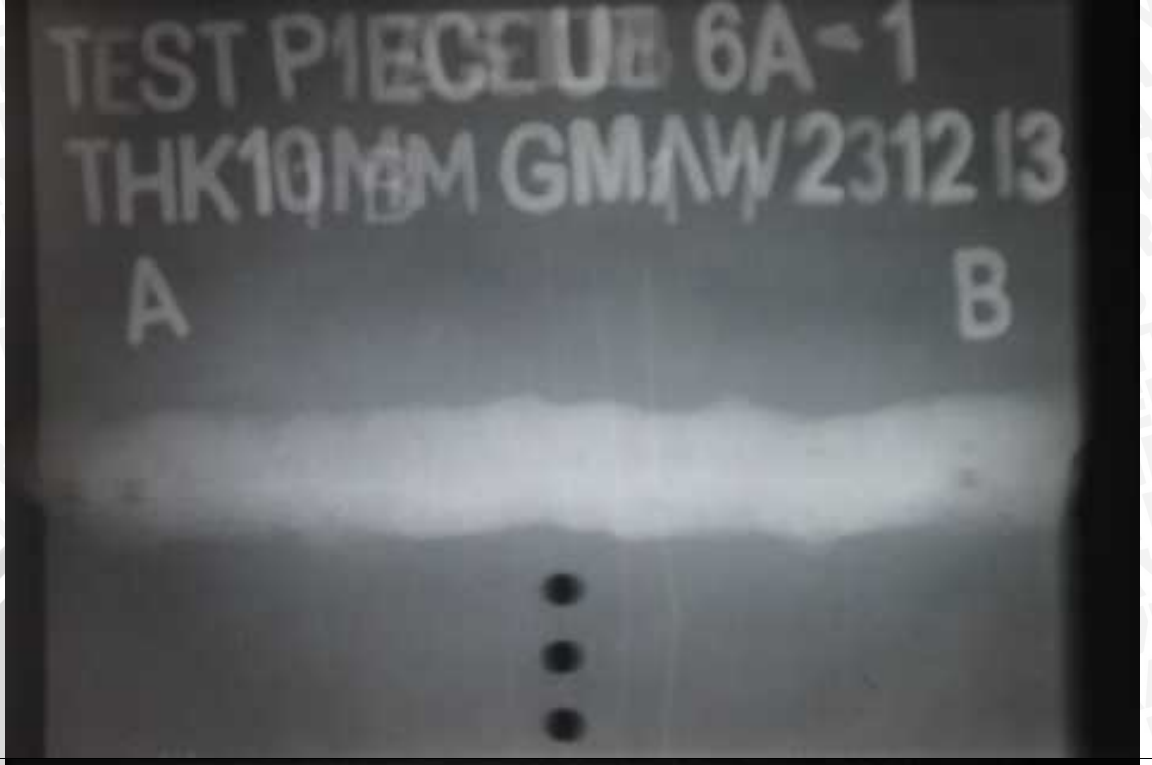
2,4 mT
(II)



2,4 mT
(III)



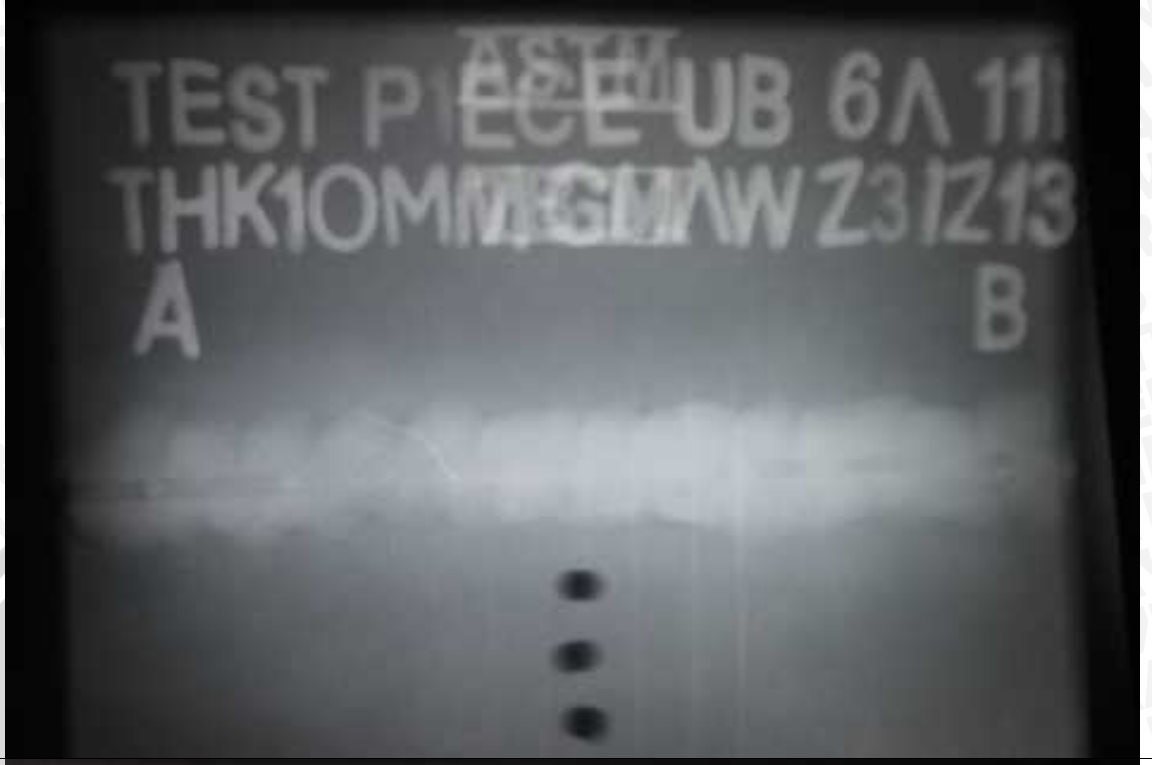
3,4 mT
(I)



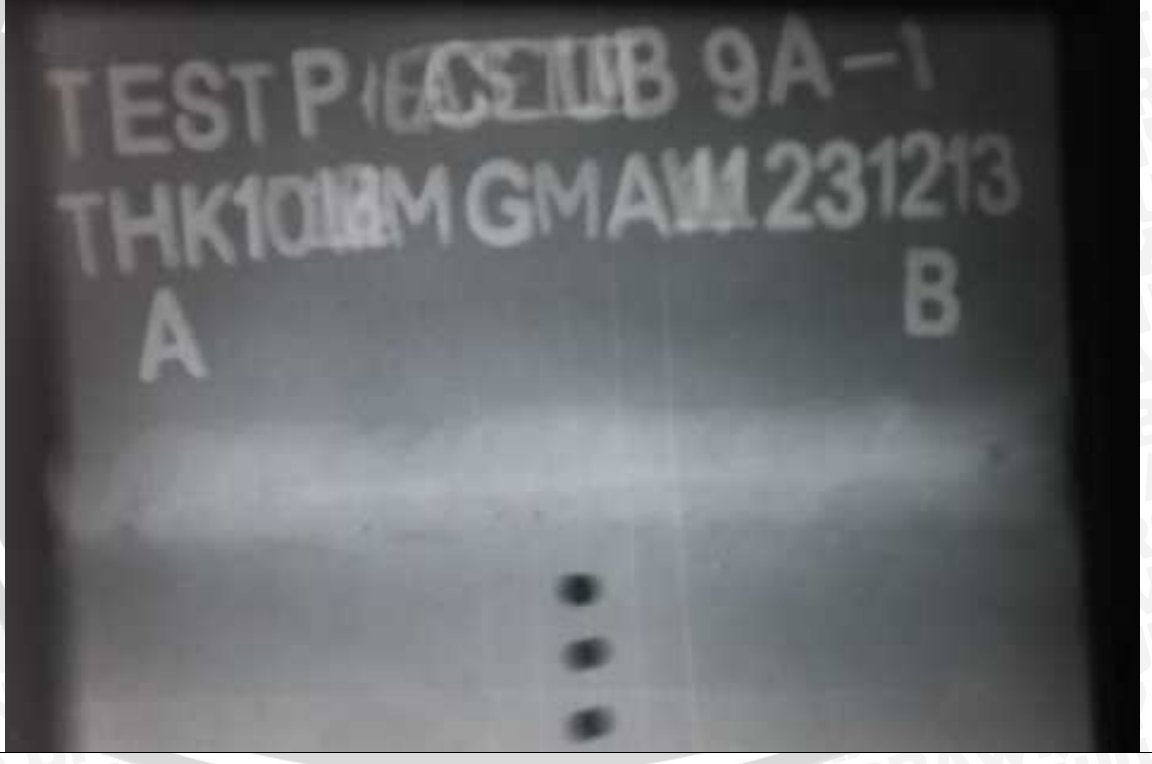
3,4 mT
(II)



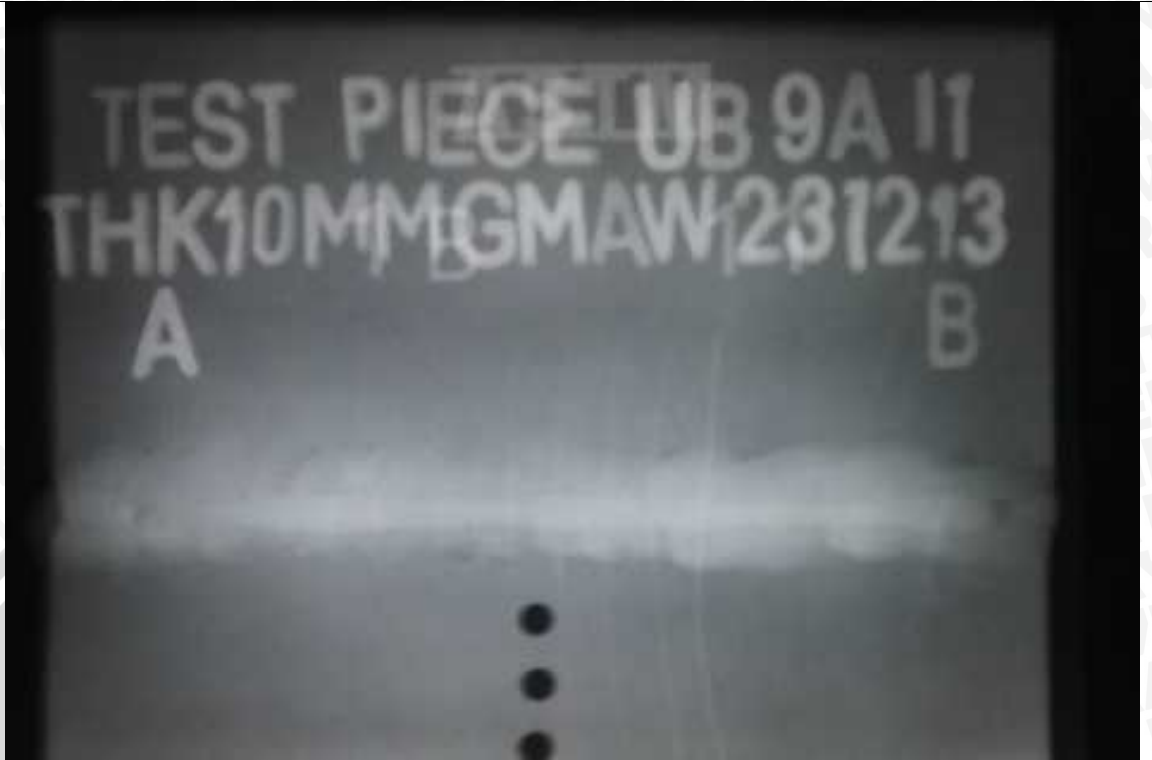
3,4 mT
(III)



4,43 mT
(I)



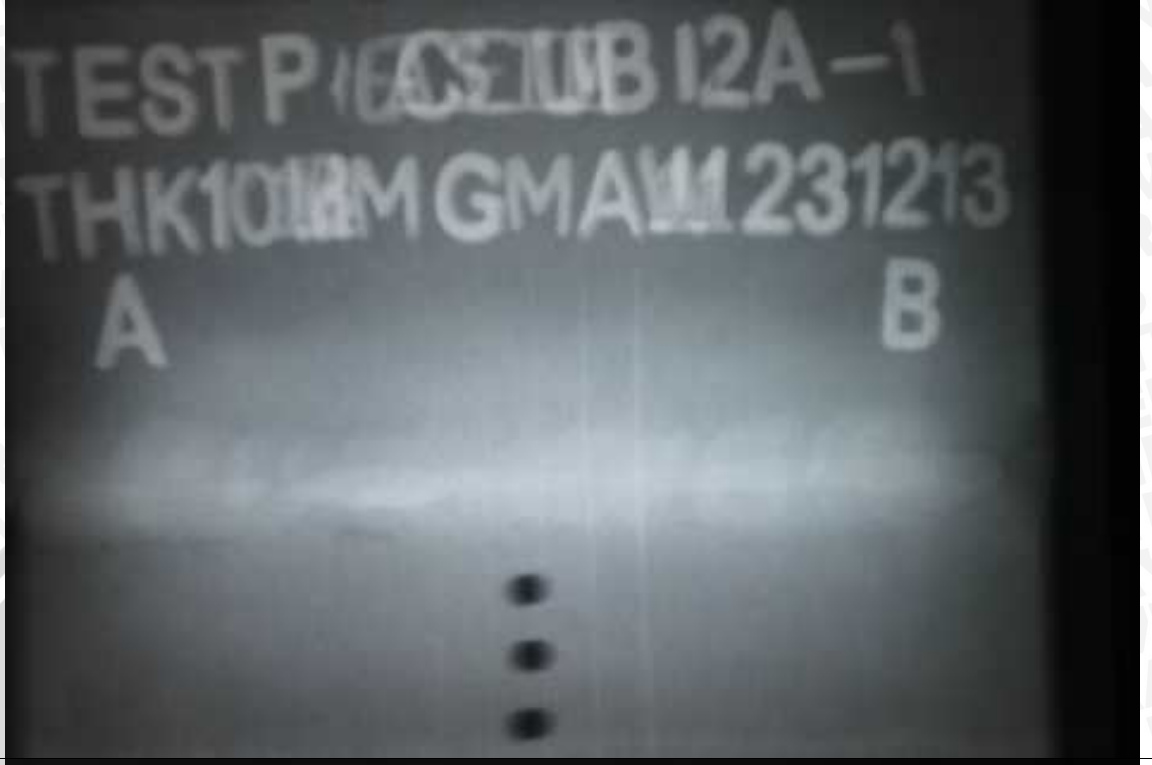
4,43 mT
(II)



4,43 mT
(III)



6,43 mT
(I)



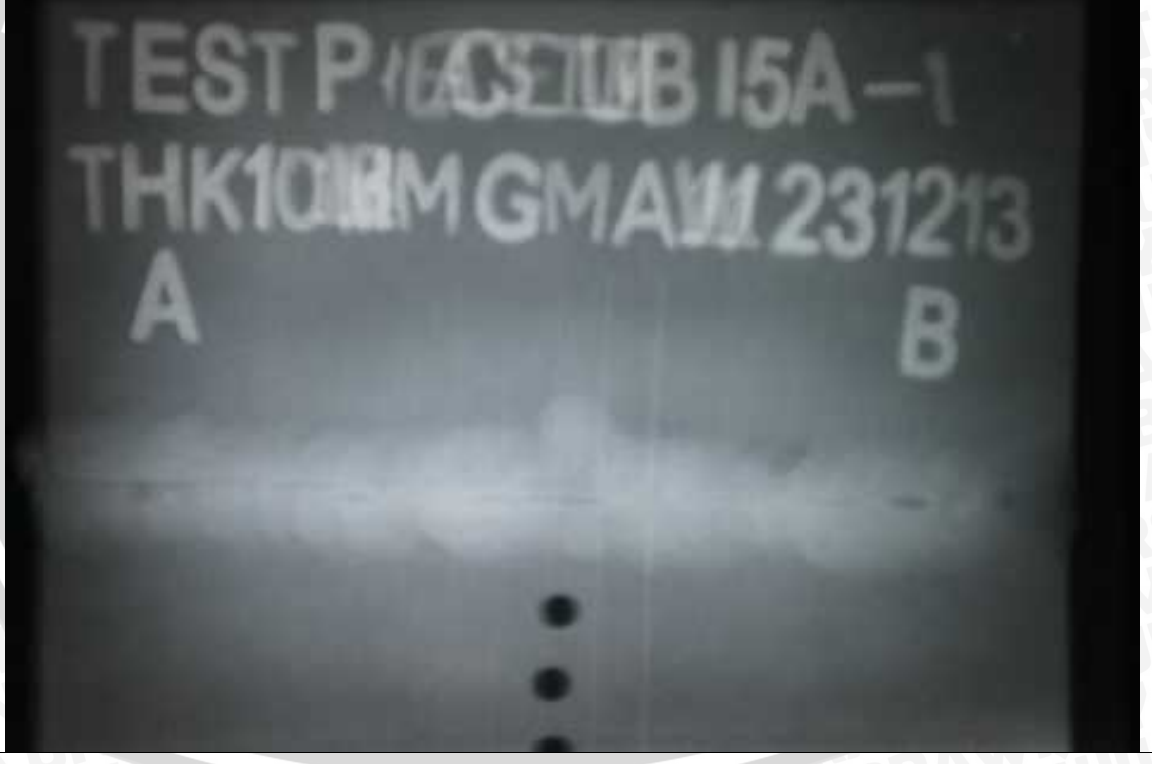
6,43 mT
(II)



6,43 mT
(III)



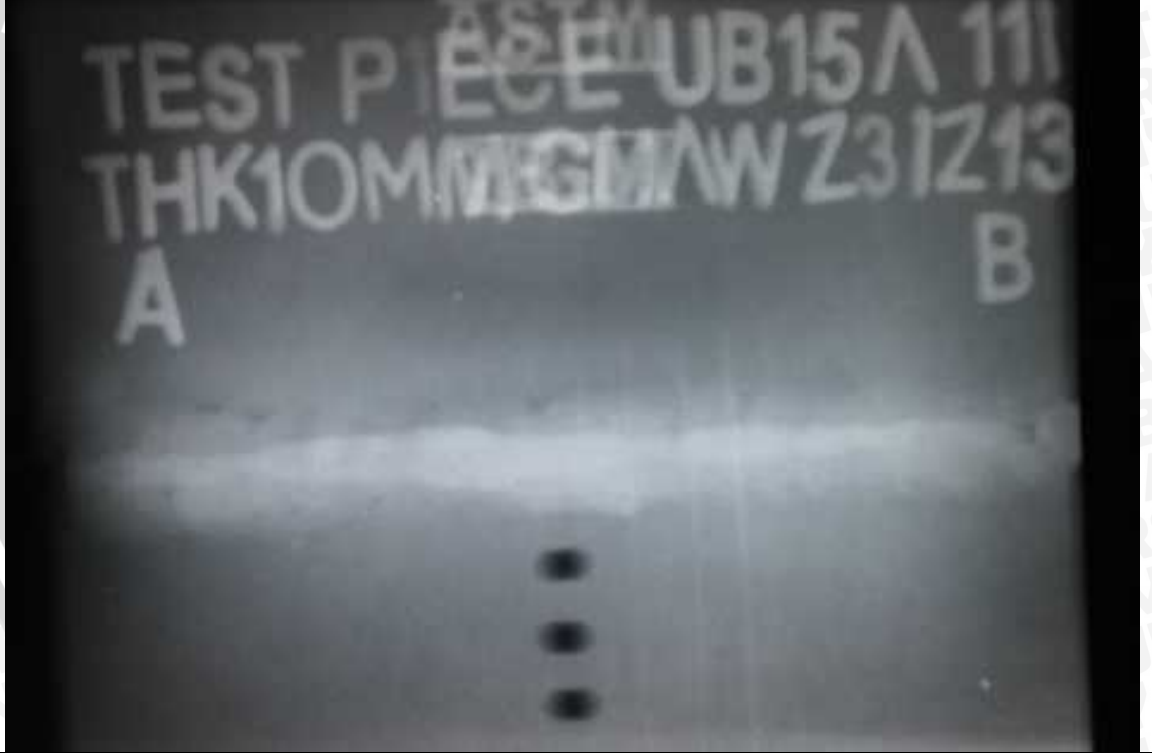
9,03 mT
(I)



9,03 mT
(II)



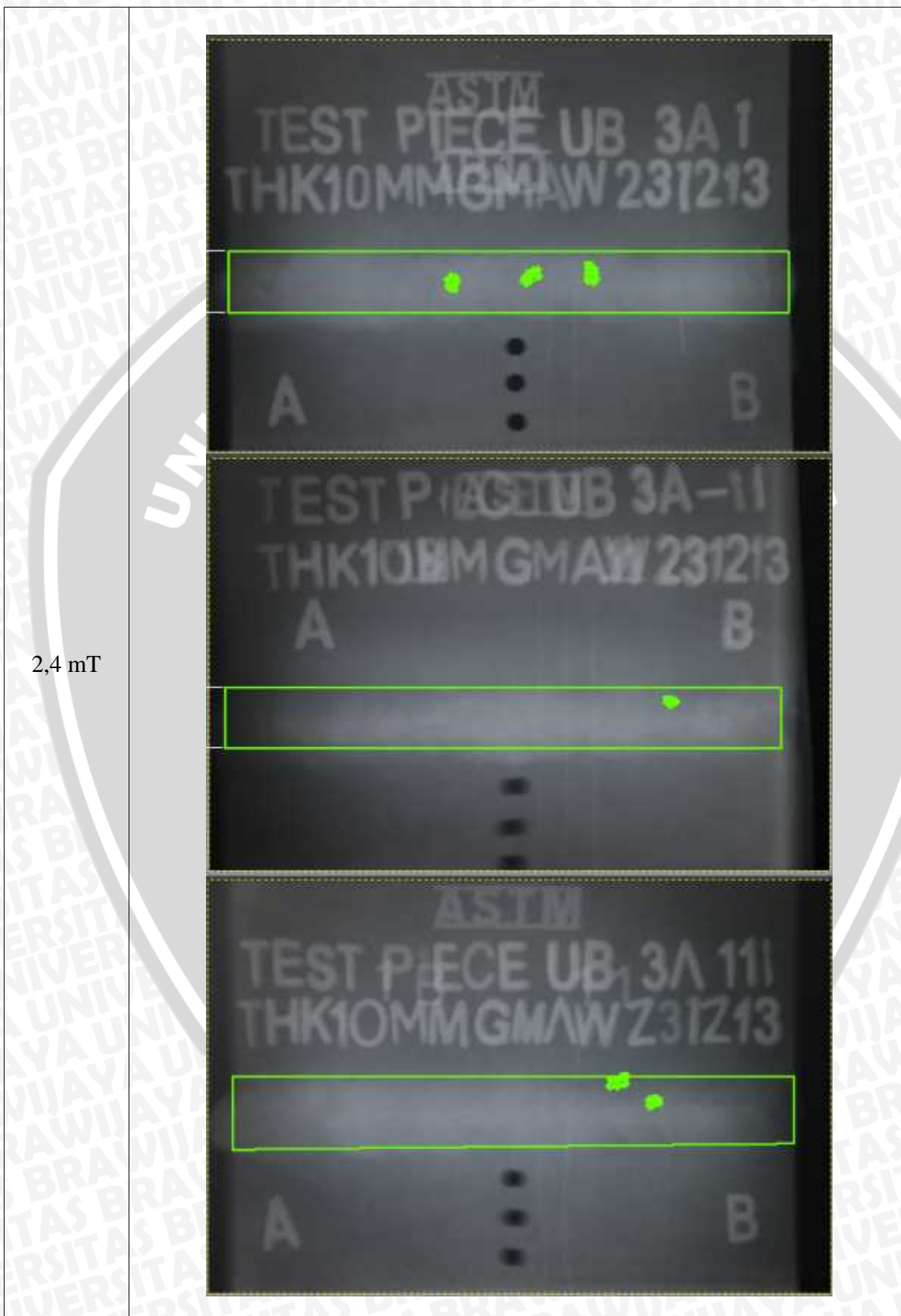
9,03 mT
(III)

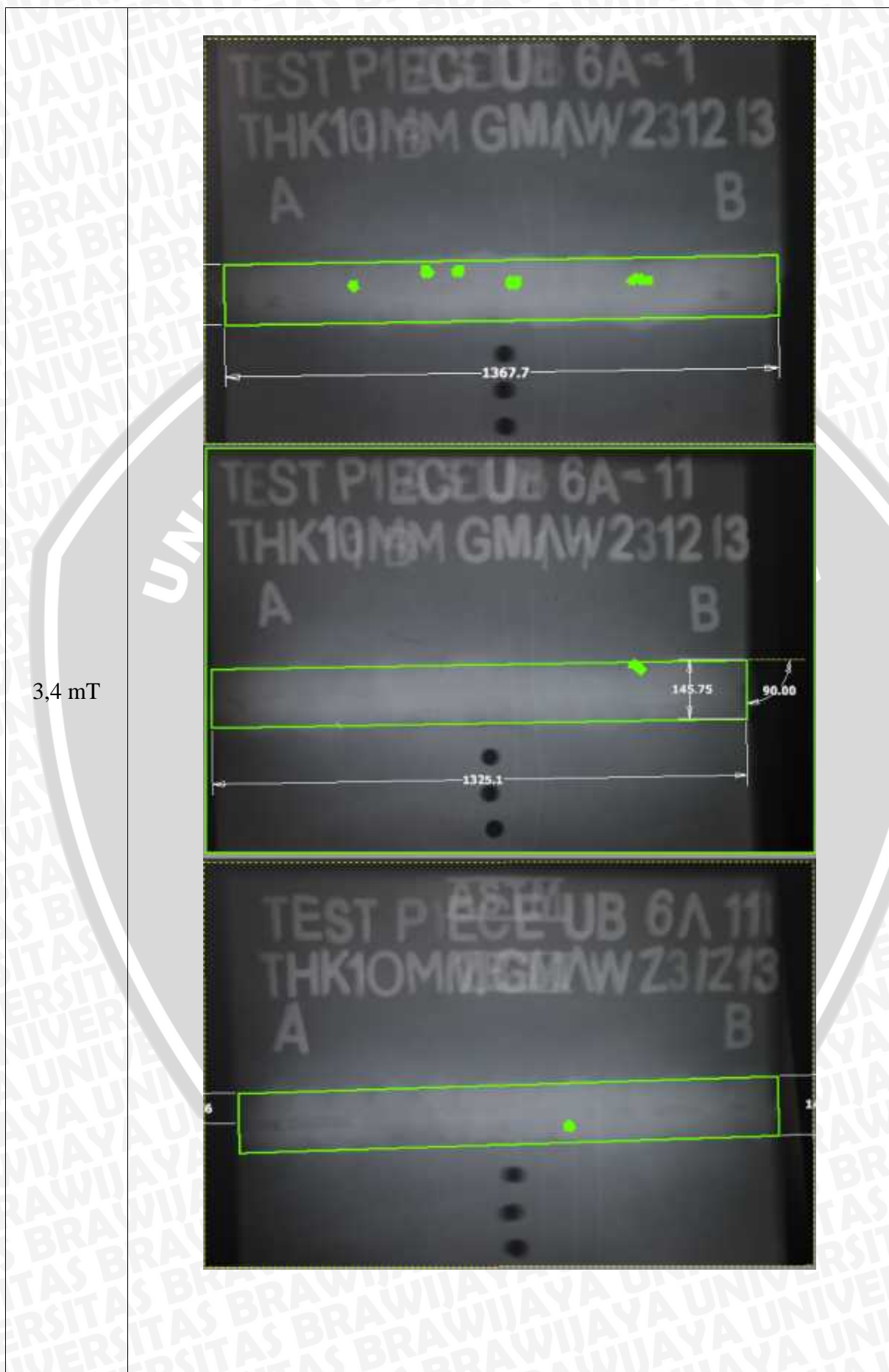


Lampiran 4 Penampang Cacat Porositas

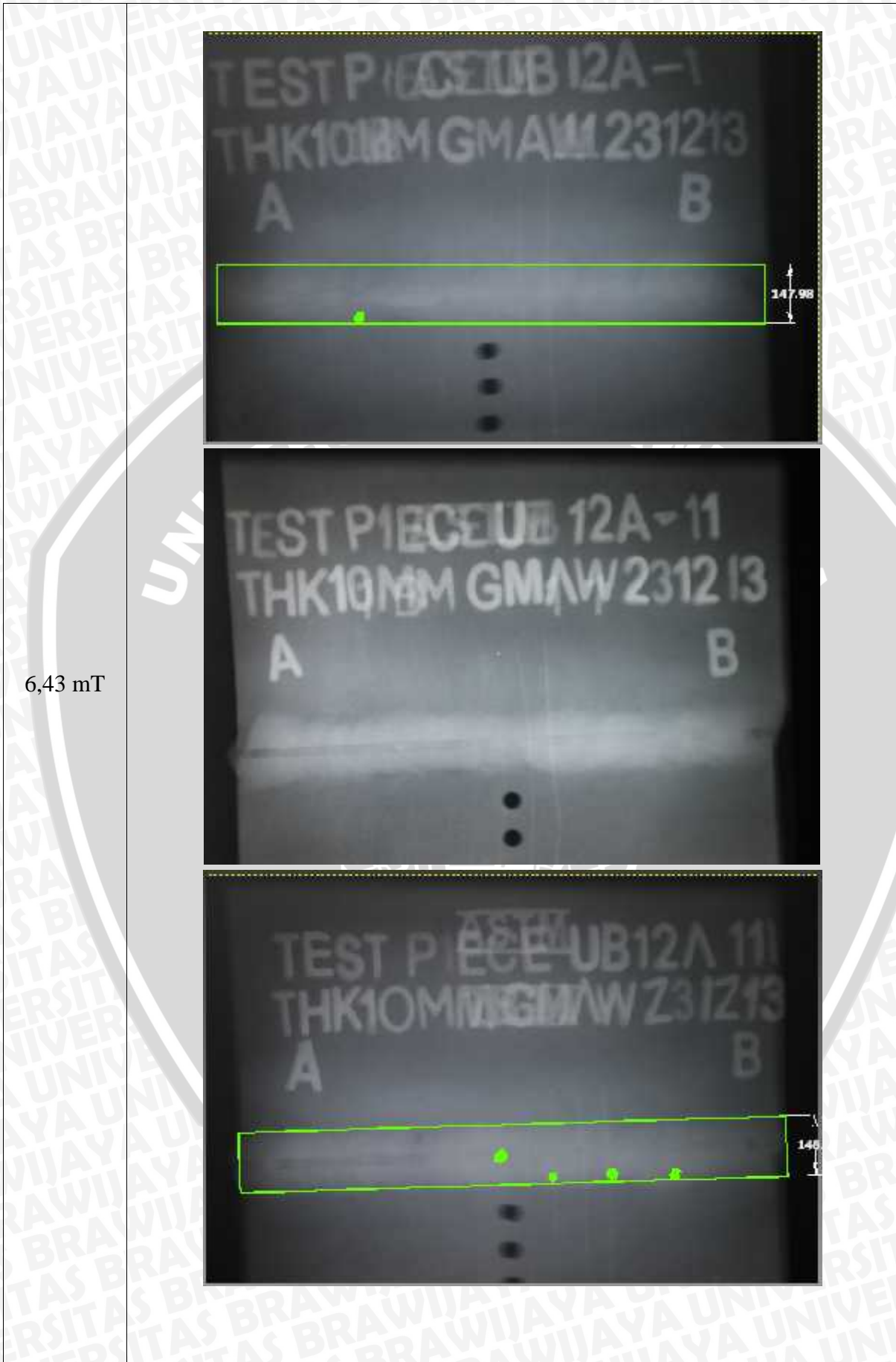


Lampiran 5 Hasil Pengolahan Data Cacat Porositas dengan *Software Autodesk Inventor 2012*

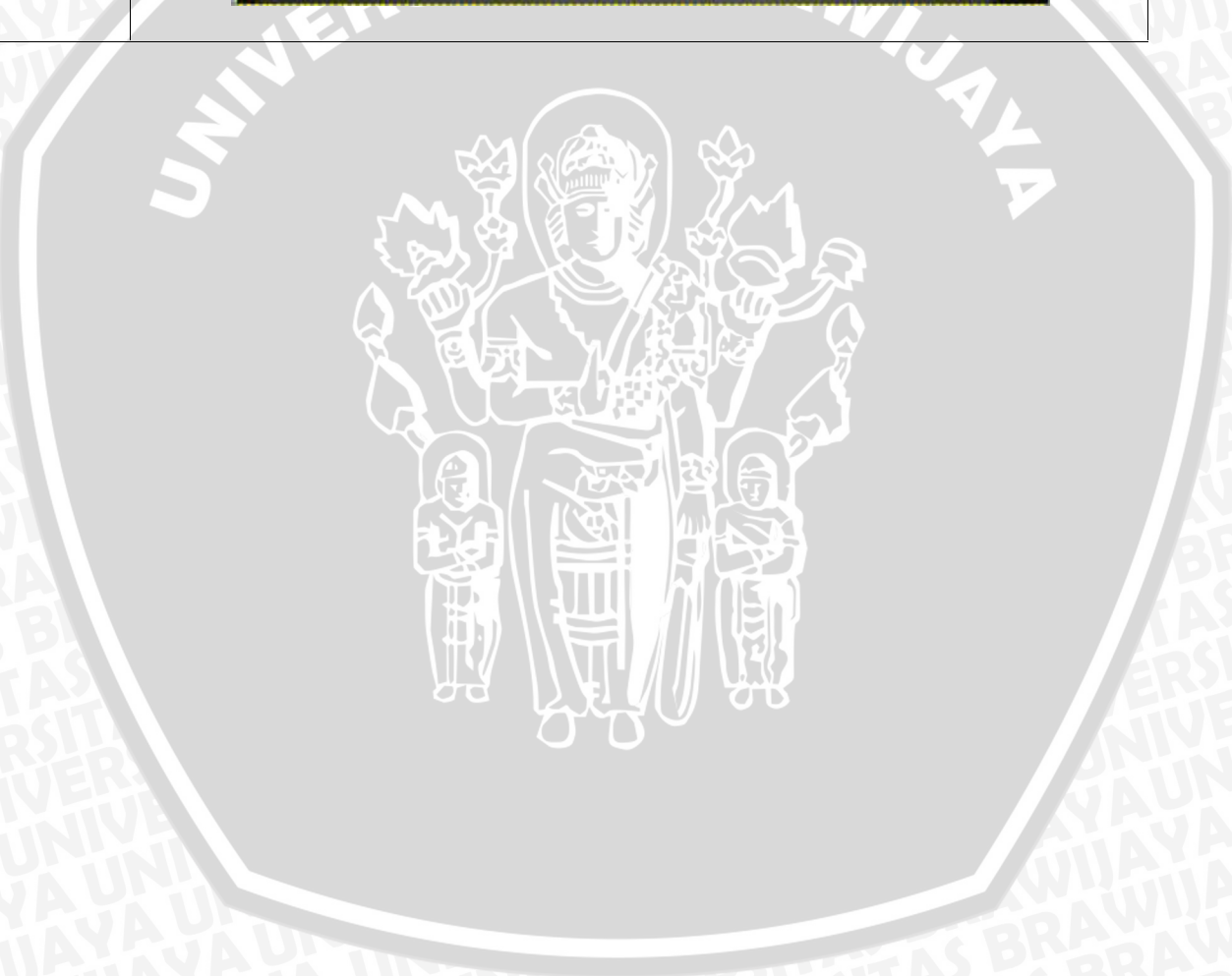
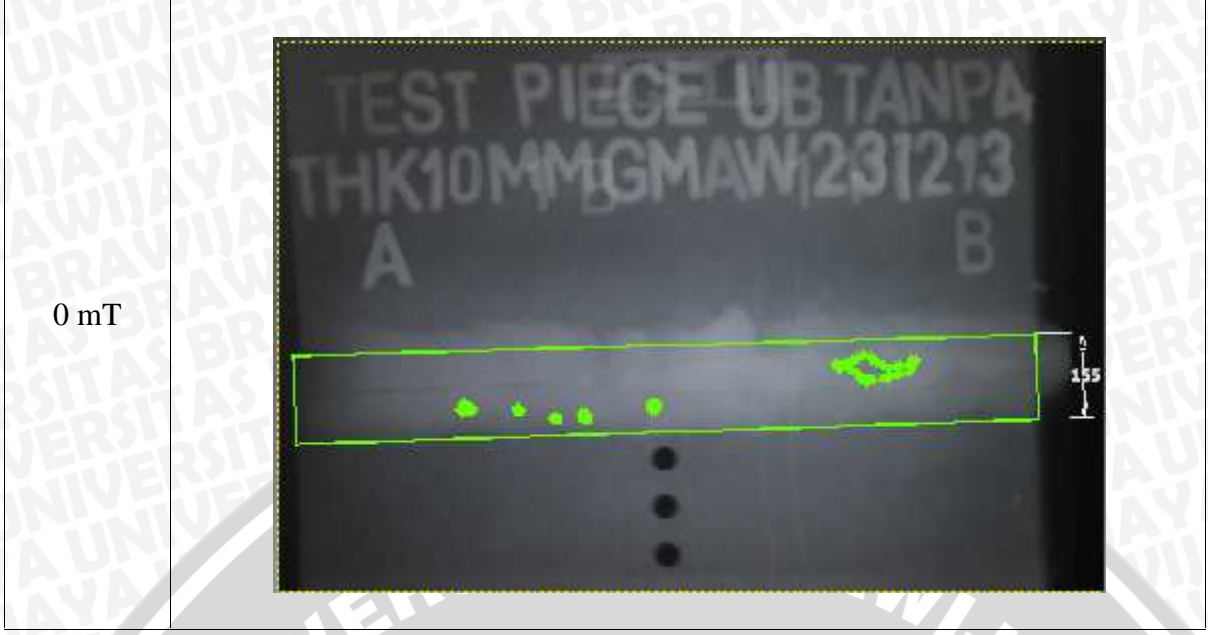




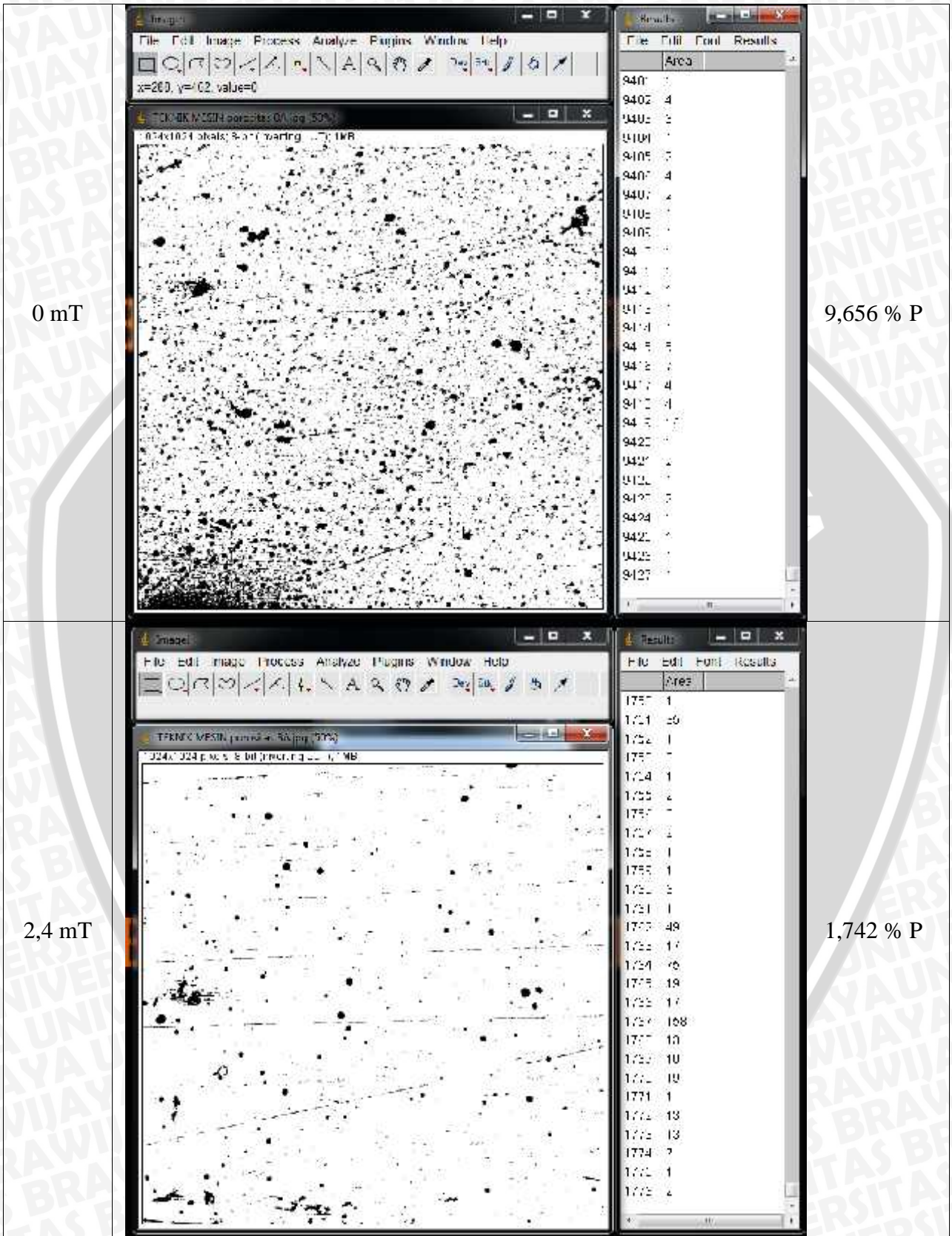




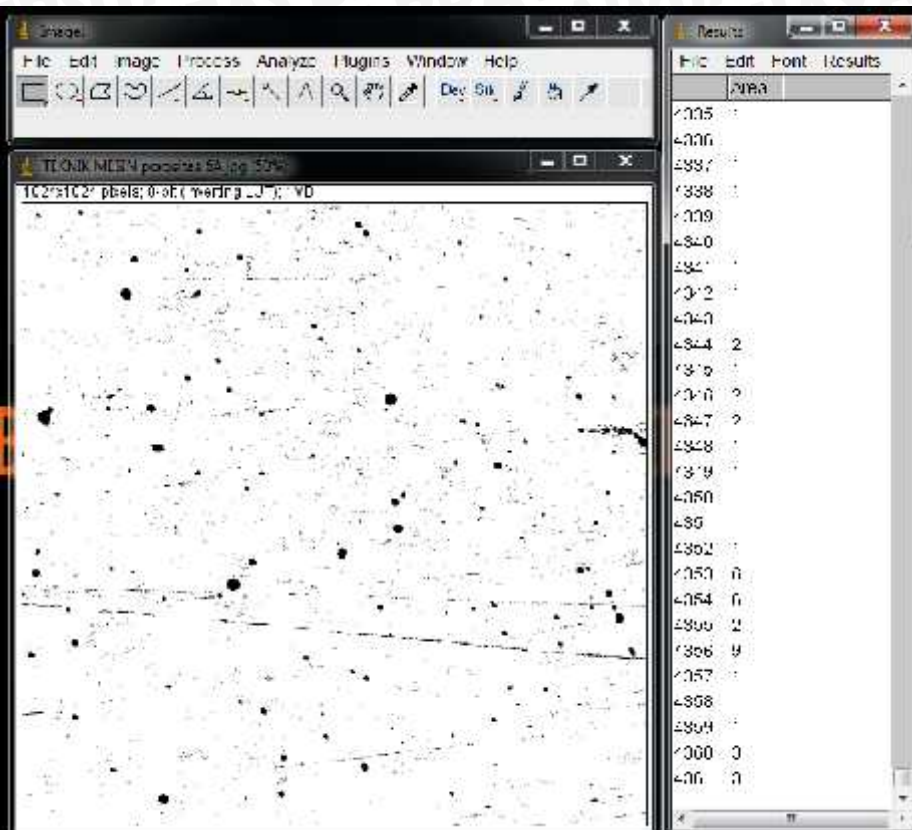




Lampiran 6 Hasil Pengolahan Data Cacat Porositas Mikro dengan *Software ImageJ*

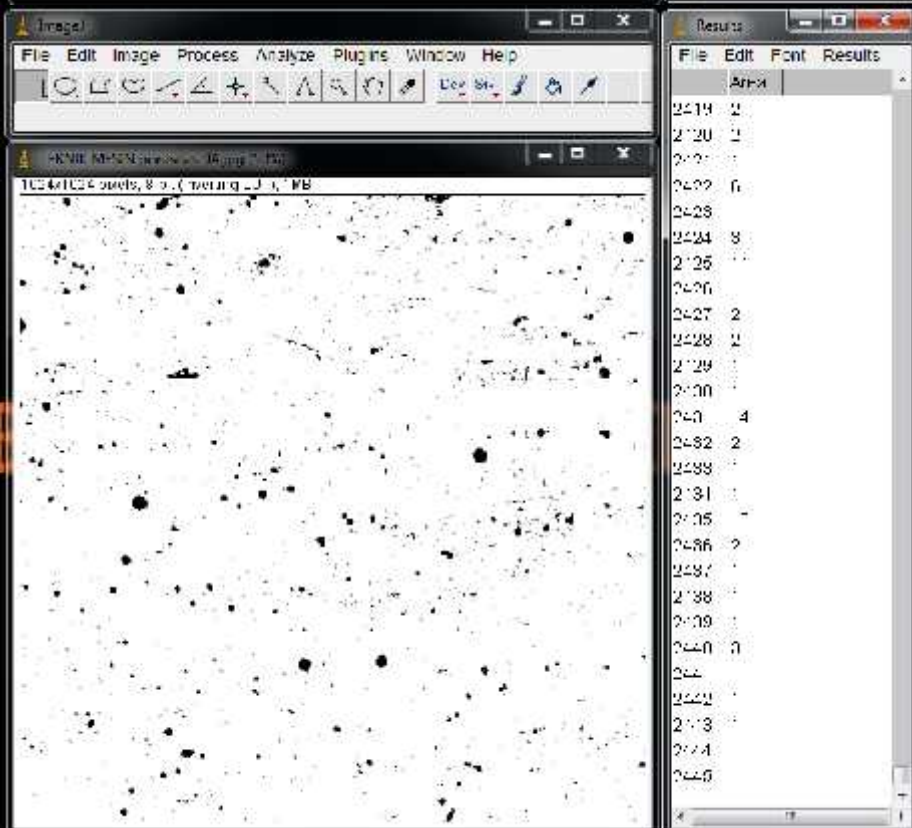


3,4 mT

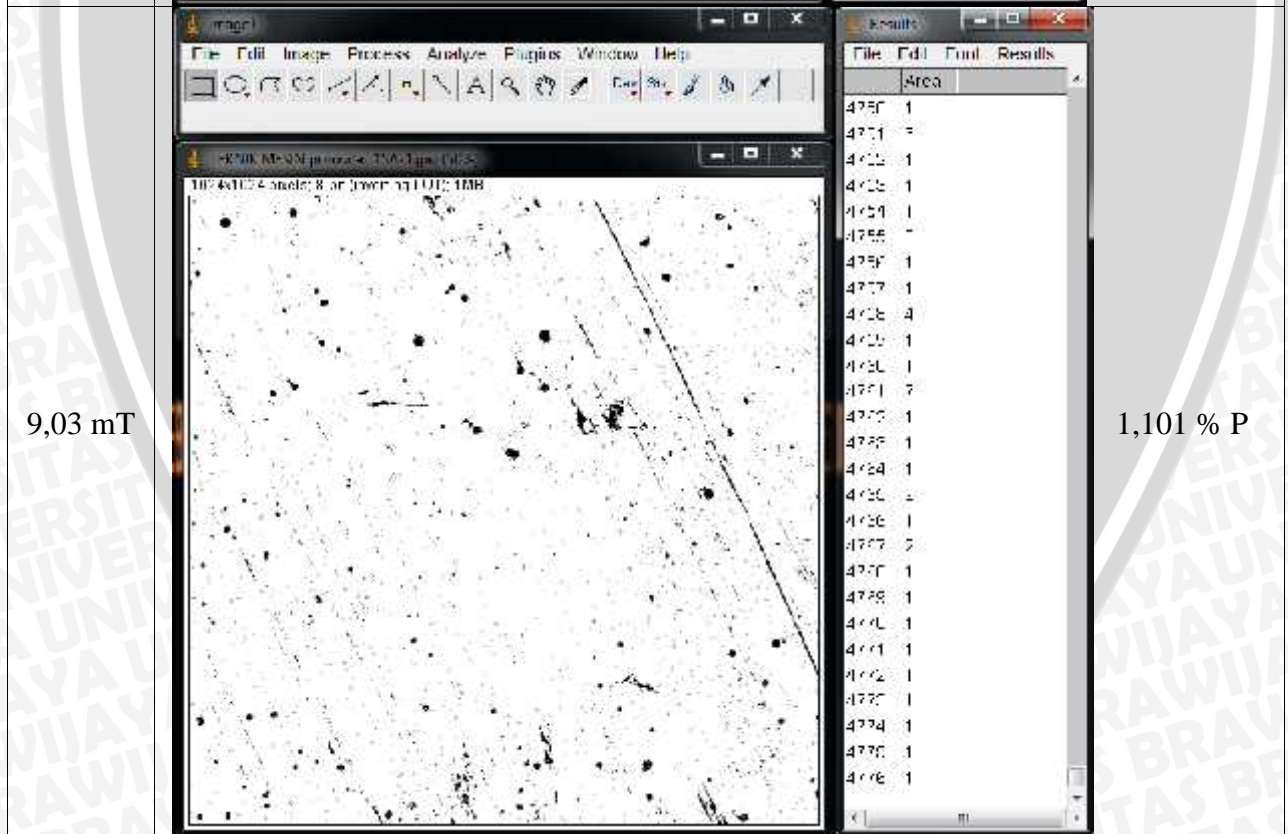
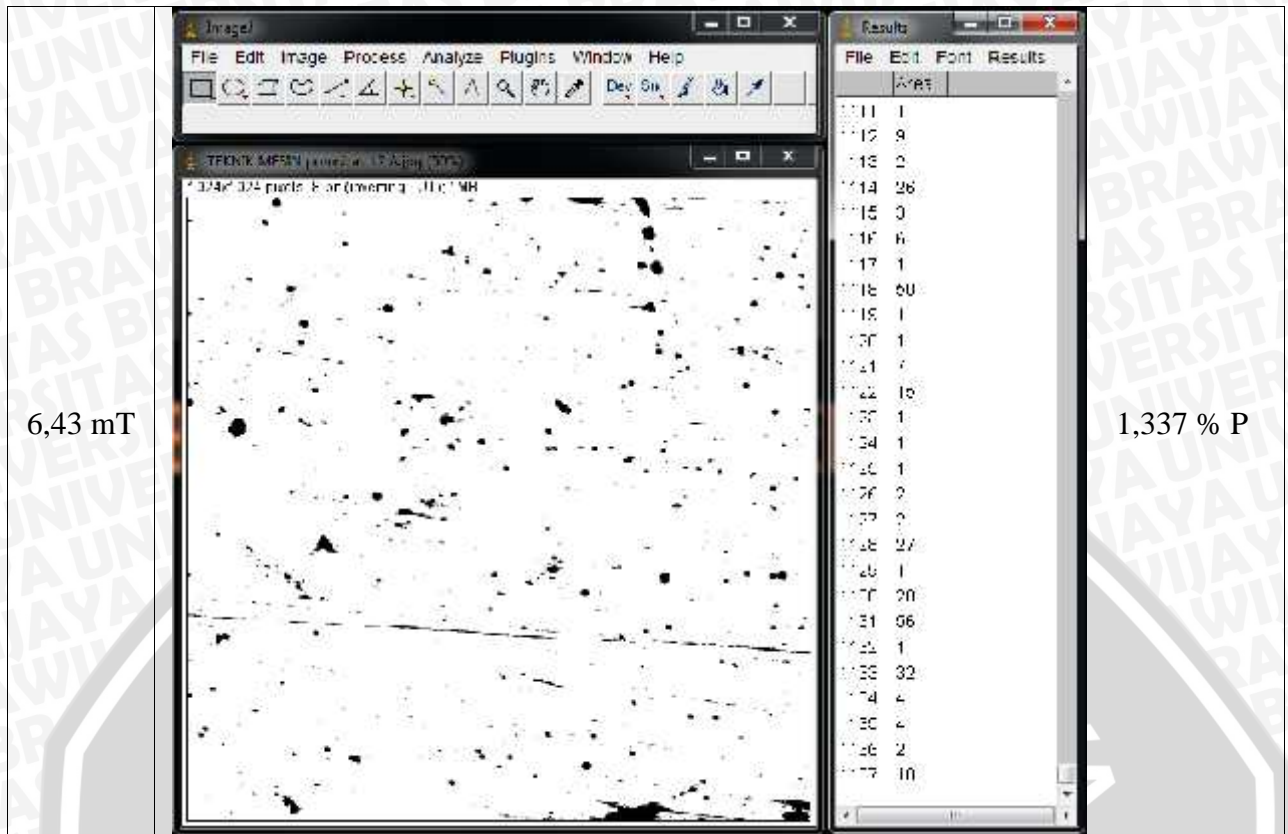


1,529 % P

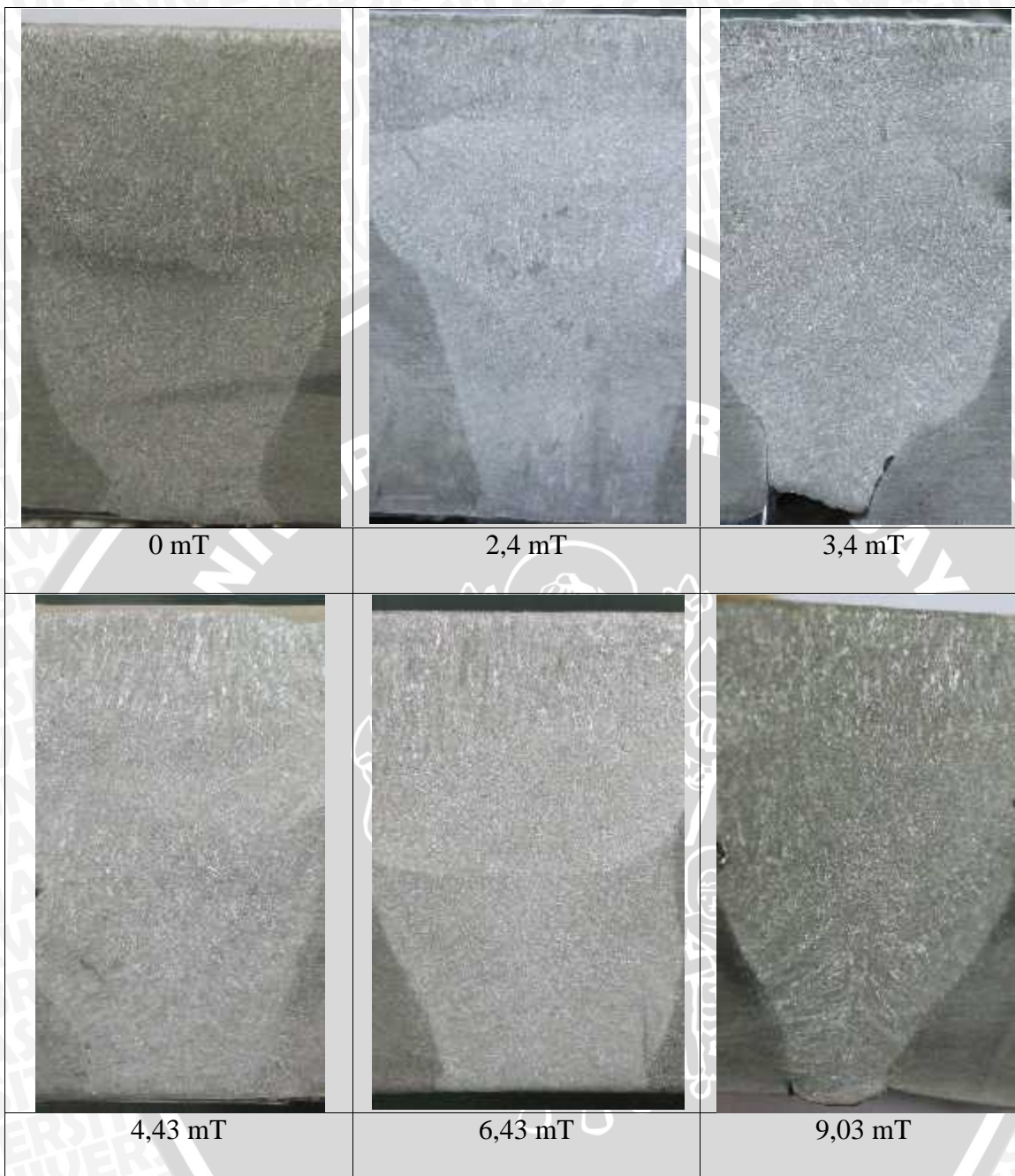
4,43 mT



1,558 % P



Lampiran 7 Foto Makro Penampang Melintang Weld Pool



Lampiran 13 Dokumentasi Kegiatan Penelitian



Pemotongan spesimen pengelasan



Pembuatan instalasi induksi magnet



Pengujian besar induksi magnet solenoida



Instalasi induksi magnet untuk pengelasan



Pengelasan spesimen



Pengamatan instalasi saat pengelasan



Pembacaan film hasil uji radiografi



Pemotongan spesimen las untuk foto mikro



Penghalusan spesimen foto mikro



Foto mikro dengan menggunakan SEM

