



**PENGARUH ARUS DAN *ON TIME* TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PERMUKAAN PADA
PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE*
*MACHINING DIE SINKING***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi Teknik Mesin (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

Yoga Aldia Anggadipta
NIM 071910101009

**PROGRAM STUDI STRATA-1 TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2012**



**PENGARUH ARUS DAN *ON TIME* TERHADAP SIFAT
MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PERMUKAAN PADA
PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE*
*MACHINING DIE SINKING***

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Fakultas Teknik (S1)
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

Oleh

**Yoga Aldia Anggadipta
NIM 071910101009**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2012**

PERSEMBAHAN

Skripsi ini saya persembahkan untuk:

1. **Allah SWT.** Syukur alhamdulillah atas segala kemudahan yang telah diberikan, semoga ridho dan ampunan-Mu selalu mengiringi tiap langkah hamba-Mu yang lemah ini.
2. **Rasulullah SAW.** Terima kasih atas petunjuk dan keteladanan yang telah kau berikan hingga jiwa ini penuh dengan kedamaian dan keikhlasan.
3. **Ibunda tercinta, Eni Kurniawati dan Ayahanda tercinta, Bambang Purnomo.** Terima kasih atas semua hamparan cinta-kasih, doa-doa serta pengorbanan yang telah diberikan sehingga aku masih bisa tetap tersenyum sampai saat ini. Semoga Allah SWT selalu melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, selalu memberi tauwil pertobatan, mengampuni seluruh dosa-dosa serta membalas semua kebaikan yang telah dilakukan. Amien....
4. **Adik tersayang Ifra Aldia Dolarosa.** Terima kasih atas semua dukungan semangat, kekuatan, doa-doa dan cinta-kasih yang telah diberikan sehingga aku dapat menyelesaikan skripsi dengan baik dan lancar.
5. **Dyah Nurul Jannah.** Dengan pengorbanan, perhatian, semangat, kasih sayang dan cintamu yang telah menjadi motivasiku dan semangatku.
6. **Almamaterku, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin - Universitas Jember.** Yang telah mengantarkanku kejenjang pendidikan yang lebih tinggi.
7. **Teman-teman Mesin.** Alm.Rendy Destia, Adit (GM1), Yulius (Gm2), Somad (GM3), Mamang (ketua angkatan 07), Molen (Ketua touring), Agil (kor. Futsal), Fregi, Angger, Debi, Yoga Aldia, Prima, Yasin, Ardi, Dimas, Tri, Edi, Ayyub, Bastian, Eris, Intan, Ekik, Arga, Rio, Firman, Diki, Dana, Anggi, Riski, Sifak, Resa, Dias, Fatah, Disko, Very, Toni, Antok, Windu, Endika, Siget, Ardika, Wawan, Bery, Bidin, Mamang, Ari, dapong dan Aufa . ”*Keep Solidarity Forever*”. Dijogo terus bro KUMPULaNe.

MOTTO

“Shadaqah itu merupakan bukti dari iman”

(HR. Muslim)

“Barangsiapa yang berjalan untuk menuntut ilmu, maka Allah akan memudahkan baginya jalan menuju surga”

(HR. Bukhari - Muslim)

“Seorang mukmin yang sabar atas kesusahannya, maka kesabaran itu lebih baik baginya”

(HR. Muslim)

“Kebenaran membawa ketenangan sedangkan dusta menimbulkan keraguan”

(HR. At - Turmudzy)

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yoga Aldia Anggadipta

NIM : 071910101009

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya tulis yang berjudul:

“Pengaruh Arus dan On time terhadap Sifat Mekanis dan Struktur Mikro Permukaan pada Proses Electrical Discharging Machine (EDM)” adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika disebutkan sumbernya dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 03 Februari 2012

Yang menyatakan,

Yoga Aldia Anggadipta

NIM 071910101009

SKRIPSI

PENGARUH ARUS DAN *ON TIME* TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO PERMUKAAN PADA PROSES *ELECTRICAL DISCHARGE* *MACHINING DIE SINKING*

Oleh

Yoga Aldia Anggadipta.

NIM 071910101009

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Mahros Darsin, S.T., M.Sc.

Dosen Pembimbing Anggota : Sumarji, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul Pengaruh Arus dan On time terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Permukaan pada Proses *Electrical Discharge Machining Die Sinking* telah diuji dan disahkan oleh Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

hari : Jumat

tanggal : 3 Februari 2012

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Tim Penguji

Ketua,

Sekretaris,

Mahros Darsin, S.T., M.Sc.
NIP 19700322 199501 1001

Sumarji, S.T., M.T.
NIP 19680202 199702 1001

Anggota I,

Anggota II,

Hary Sutjahjono, S.T., M.T.
NIP 19681205 199702 1 0 02

Ir. Ahmad Syuhri, M.T.
NIP. 19670123 199702 1001

Mengesahkan
Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember

Ir. Widyono Hadi, MT.
NIP 19610414 198902 1 0 01

RINGKASAN

Pengaruh Arus dan On Time terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Permukaan pada Proses *Electrical Discharge Machining Die Sinking*; Yoga Aldia Anggadipita, 071910101009; 2012: 103 halaman; Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Proses pengerjaan *Electrical Discharge Machining* (EDM) digunakan untuk membuat *dies* dalam pembuatan sebuah produk. *Dies* yang dihasilkan harus memiliki ketepatan waktu dalam pembuatan dan tingkat kekasaran permukaan yang kecil. Harus juga dipertimbangkan nilai kekerasan pada sebuah *dies* yang akan dibuat. Kekerasan pada proses pembuatan *dies* dipengaruhi oleh nilai parameter yang digunakan yaitu arus dan *ontime*. Hubungan antara arus dan *ontime* permukaan pada proses *Electrical Discharge Machining* (EDM) sangat saling mempengaruhi terhadap kekerasan dan struktur mikro. Hal itu dapat dilihat bahwa semakin besar arus dan *ontime* semakin tinggi tingkat kekerasannya dan strukturnya akan mengalami perubahan. Untuk membuktikan penelitian ini perlu ada penelitian yang lebih lanjut.

Dalam penelitian ini, proses *Electrical Discharge Machining Die Sinking* dengan variasi parameter arus dan *ontime* dilakukan terhadap baja karbon sedang AISI H-13 dengan menggunakan elektroda tembaga. Hasil percobaan kemudian diolah dengan menggunakan metode *regresi* dari *software minitab* kemudian dilakukan pendekatan optimasi respon berdasarkan fungsi *Faktorial* untuk mendapatkan nilai pengaruh arus dan *ontime* terhadap kekerasan permukaan benda kerja yang optimal.

Hasil akhir penelitian ini menyimpulkan bahwa pada on time 150 μ s kekerasan mengalami kenaikan kekerasan. Hal ini disebabkan pada on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi yang lebih lama sehingga akan mengalami kenaikan temperatur yang paling tinggi sehingga ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) akan mengalami tegangan sisa yang lebih tinggi

dan struktur butir yang lebih halus. Sehingga kekerasan selalu lebih tinggi dari base metal. Sebaliknya pada on time yang lebih rendah yaitu 90 dan 120 μ s kekerasan cenderung menurun. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga Struktur lapisan ini akan berubah dengan kekerasan yang sedikit menurun dan struktur butir yang lebih kasar dari base metal. Dari hasil pengujian keduanya berpengaruh baik arus maupun on time baik secara grafis maupun statistik akan tetapi yang paling dominan adalah on time.

Dari titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 dapat disimpulkan bahwa pada arus 6, 9 dan 12 A dan on time 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Hal ini disebabkan semakin besar arus pada on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature yang lebih tinggi. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) dengan laju pendinginan yang cepat struktur semakin halus, tegangan sisa yang terjadi semakin tinggi dan terjadinya white layer.

Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 pada arus 6, 9 dan 12 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* pada bagian tersebut . Pada bagian ini hanya sedikit mengalami kenaikan temperature. Ketika dilakukan pendinginan dengan laju pendinginan yang rendah mengakibatkan strukturnya cenderung lebih kasar dari base metal.

SUMMARY

Influence of currents and on time toward Mechanical Properties and Structure of Surface of part processed by Die Sinking Electrical Discharge Machining ;
Yoga Aldia Anggadipita, 071910101009; 2012: 100 pages; Department of Mechanical Engineering Faculty of Engineering, University of Jember.

Electrical Discharge Machining Process of (EDM) is used to make dies in the manufacture of a product. Dies must have produced in the manufacture of timeliness and level of surface roughness is small. In addition to the violence must also be considered on a dies to be made. Violence in the production of dies affected by the parameter values used are current and on time. The relationship between flow and surface ontime Electrical Discharge Machining processes (EDM) is the interplay of hardness and microstructure. It can be seen that the greater the flow and ontime higher levels of violence and its structure will change. To prove this research is necessary to have further research yag.

In this study, the Electrical Discharge Machining Die Sinking with the variation of flow parameters and ontime conducted on carbon steel is AISI H-13 by using a copper electrode. The experimental results are then processed by using the regression method of Minitab software and then do the response optimization approach based on the factorial function to get the current value and the effect on time to the workpiece surface hardness is optimal.

The final results of this study concluded that the on-time 150 μ s violence increases violence. This is due in on time 150 μ s will occur the process of adding more time so that the energy will increase at high temperatures so that when performed quenching (immersed in the transformation of oil) will have higher residual stresses and finer grain structure. So that violence is always higher than the base metal. In contrast to the on time is lower at 90 and 120 μ s violence tends to

decrease. This is due to the annealing of this layer so that the structure will change with a slight decrease violence and a more coarse grain structure of the base metal. From the test results they affect both current and on time both graphically and statistically the most dominant but it is on time.

From the nearest point of the surface is at a point 5 can be concluded that the current 6, 9 and 12 A and 150 μ s on time to change the amount of ferrite and grain size. This is due to the greater flow in on time 150 μ s will occur so that the process of adding energy to rise higher temperature. When done quenching (immersed in the transformation of oil) with a fast cooling rate the more delicate structure, residual stresses which occur higher and the white layer.

In contrast to the furthest point that the surface at point 2 on the current 6, 9 and 12 micro-structural changes. This is due to annealing in that section. In this section only slightly increased temperature. When done cooling with a low cooling rate tends to result in more rough structure of the base metal.

PRAKATA

Syukur Alhamdulillah penulis panjatkan kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul Pengaruh Arus dan On time Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Permukaan Pada Proses *Electrical Discharge Machining Die Sinking*. Skripsi ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat dalam menyelesaikan studi strata satu (S1) pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember.

Penulisan skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang tiada terhingga kepada:

1. Ir. Widiono Hadi, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Sumarji, S.T., M.T. selaku ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Jember.
3. Mahros Darsin S.T., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Utama, dan Sumarji, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Anggota yang memberikan arahan dan saran-saran dalam penyelesaian skripsi ini.
4. Hary Sutjahjono, ST., M.T. selaku penguji pertama dan Ir Ahmad syuhri, M.T. selaku penguji kedua yang telah memberikan saran dan waktu.
5. Hary Arbiantara, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik
6. Ibunda Eni Kurniawati dan Ayahanda Bambang Purnomo, serta adikku Ifra Aldia Dolarosa tercinta. Terima kasih atas semua doa, semangat, motivasi dan kasih sayang kalian semua sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
7. Dyah Nurul Jannah tersayang yang sabar memberikan semangat, kasih sayang dan perhatian kamu selama ini.
8. Semua teman Teknik Mesin baik S1 maupun D3 yang telah menjadi rekan dalam kuliahku, terima kasih atas segala canda, motivasi, bantuan dan doanya.
9. Arek seven engine yang sudah memberikan semangat ,saran , masukan dan memberiku kenangan yang tidak pernah terlupakan yaitu TOURING keliling Jawa timur dan Bali udah kita lewati. Sekali lagi suwon rek.

10. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis mengucapkan terimakasih atas segala kritik dan saran dari semua pihak demi kesempurnaan skripsi ini. Akhirnya penulis berharap, semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Jember, 03 Februari 2012

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSEMBAHAN	ii
HALAMAN MOTTO	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PEMBIMBINGAN	v
HALAMAN PENGESAHAN	vi
RINGKASAN	vii
SUMMARY	ix
PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GRAFIK	xix
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Electrical Discharge Machining (EDM)	6
2.1.1 Konsep Dasar EDM	6
2.1.2 Prinsip Kerja EDM	8
2.1.3 Cairan Dielektrik	10
2.1.4 Elektroda (Pahat)	11

2.1.5 Metode <i>Flusing</i>	12
2.1.6 Parameter Proses EDM	12
2.1.7 Kondisi Elektrik EDM	13
2.2 Pengujian Mekanik	14
2.2.1 Uji Kekerasan <i>Brinell</i>	14
2.2.2 Uji Kekerasan <i>Rockwell (Rockwell Test)</i>	16
2.2.3 Uji Kekerasan <i>Vickers</i>	17
2.2.4 Uji Kekerasan <i>Knoop (Knoop Test)</i>	18
2.2.5 Uji Kekerasan <i>Meyer</i>	19
2.2.6 Pengujian <i>Microhardness</i>	19
2.3 Pengamatan Struktur Mikro	20
2.3.1 Reaksi Fasa-Padat	20
2.3.2 Pertumbuhan Butir (Bahan Fasa Tunggal)	21
2.3.3 Rekrystalisasi	22
2.3.4 Peralutan dan Pengendapan dalam Bahan Padat	23
BAB 3. METODE PENELITIAN	28
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	28
3.2 Bahan dan Alat	28
3.1.1 Bahan	28
3.1.2 Alat	29
3.3 Pelaksanaan Penelitian	32
3.4 Pengujian	33
3.4.1 Uji Kekerasan <i>brinell</i>	33
3.4.2 Pengamatan Struktur Mikro	34
3.5 Aalaisal Data	34
3.6 Alur Kerja Penelitian	40
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1 Tinjauan Umum	42
4.2 Data Hasil Percobaan	42

4.3 Analisis Data Kekerasan Permukaan	45
4.4 Pengujian Model Regresi	46
4.4.1 Analisis Faktorial	46
4.4.2 Uji kesesuaian Model	47
4.4.3 Memeriksa <i>Mean Square Residual</i>	48
4.4.4 Memeriksa Utilitas Model	48
4.4.5 Memeriksa Ukuran Kecukupan Model	49
4.4.6 Memeriksa Unusual Observation	50
4.4.7 Analisis Korelasi	50
4.4.8 Pemodelan Regresi	51
4.4.9 Uji Identik	52
4.4.10 Uji Independen	53
4.4.11 Uji Kenormalan Residual	53
4.5 Pembahasan Pengaruh Variabel Terhadap Kekerasan Permukaan	55
4.6 Analisis Grafik	56
4.6.1 Grafik Hubungan Arus dan <i>On Time</i> terhadap Kekerasan	56
4.7 Hasil Uji Mikro	59
4.7.1 Struktur Mikro Baja karbon Rendah Tipe H-13 Sebelum proses EDM	59
4.7.2 Struktur Mikro Spesimen Proses EDM pada Arus 6 A ..	60
4.7.3 Struktur Mikro Spesimen Proses EDM pada Arus 9 A ...	62
4.7.4 Struktur Mikro Spesimen Proses EDM pada Arus 12 A..	63
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN	66
5.1 Kesimpulan	66
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Pengaruh panas terhadap permukaan benda kerja	8
2.2 Diagram skema rangkaian relaksasi (<i>Relaxation</i>) untuk EDM	9
2.3 Proses pengujian kekerasan	15
2.4 Indentor dari intan	17
2.5 Indentor uji <i>Vickers</i>	18
2.6 (a) Larutan pada lewat jenuh, (b) Pengendapan batas butir, (c) Pengendapan dalam butir	26
2.7 Pembentukan <i>perlit</i>	26
3.1 Benda kerja	28
3.2 <i>Electrode</i>	29
3.3 Mesin EDM merk Jiann Sheng type NCF 304 N	30
3.4 Mesin Uji <i>Electric Brinell Hardness Tester Hauser Henry S A</i>	31
3.5 <i>Mikroskop Metalografi Olympus BX41M</i>	31
3.6 Lokasi pengujian kekerasan pada spesimen	33
3.7 Flowchart penelitian	41
4.1 Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 sebelum EDM pada perbesaran 500 X	60
4.2 Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 6 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	61
4.3 Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 6 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	61
4.4 Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 9 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	62

4.5	Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 9 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	63
4.6	Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 12 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	64
4.7	Stuktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 12 A dan <i>on time</i> 150 μ s pada perbesaran 500 X	64

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 Data pengujian kekerasan untuk spesimen sebelum proses EDM	37
3.2 Data pengujian kekerasan untuk spesimen setelah proses EDM	37
4.1 Data pengujian kekerasan untuk spesimen logam induk sebelum dimesin	43
4.2 Data hasil percobaan sesudah proses EDM	43
4.3 Output analisis regresi berganda	45
4.4 Hasil analisis desain faktorial	46
4.5 Analisis korelasi untuk variable BHN, <i>on time</i> dan arus	51

DAFTAR GRAFIK

	Halaman
2.1 Garfik laju reaksi terhadap suhu	22
2.2 Grafik rekristalisasi isothermal	23
2.3 Grafik rekristalisasi terhadap waktu pemanasan.....	23
2.4 Grafik laju larut dan pengendapan (paduan Pb – 10 Sn)	24
2.5 Grafik waktu terhadap suhu	25
4.1 Grafik plot <i>Residuals Versus the Fitted Values</i>	52
4.2 Grafik <i>Autocorrelation Function (ACF)</i> untuk <i>RESI 1</i>	53
4.3 Grafik plot <i>uji distribusi normal</i>	54
4.4 Grafik hubungan antara arus dan <i>on time</i> terhadap kekerasan pada titik1	56
4.5 Grafik hubungan antara arus dan <i>on time</i> terhadap kekerasan pada titik 2	57
4.6 Grafik hubungan antara arus dan <i>on time</i> terhadap kekerasan pada titik 3.....	57
4.7 Grafik hubungan antara arus dan <i>on time</i> terhadap kekerasan pada titik 4	58
4.8 Grafik hubungan antara arus dan <i>on time</i> terhadap kekerasan pada titik 5.....	58

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
LAMPIRAN A	70
LAMPIRAN B	76
LAMPIRAN C	77
LAMPIRAN D	79
LAMPIRAN E	84
LAMPIRAN F	90
LAMPIRAN G	99

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pemesinan EDM (*Electrical Discharge Machining*) termasuk proses pemesinan modern, dimana pahat (tool) dalam hal ini disebut elektrode tidak harus lebih keras dari pada material benda kerja yang dimesin. Proses ini ditemukan sekitar tahun 1970 an, namun berkembang pesat dalam industri dalam dua dekade berikutnya. Di Indonesia mesin EDM baru masuk industri manufaktur dengan pesat sekitar awal tahun 2000. Jenis proses EDM yang banyak dijumpai dalam industri adalah jenis Wire Cut dan Shinking EDM. Jenis Wire Cut menggunakan kawat tembaga dengan diameter 0,10 mm – 0,30 mm untuk proses pemotongannya. Sedangkan jenis sinking menggunakan elektrode yang sesuai dengan rongga cetakan yang akan dibuat (Suhardjono, 2010).

EDM merupakan proses permesinan, dimana pahatnya yang berupa elektroda akan mengikis material benda kerja sesuai dengan bentuk pahatnya (D.F. Dauw, et al., 1990). Proses EDM dilakukan dengan sebuah system yang mempunyai dua komponen pokok yaitu mesin dan power supply. Mesin mengendalikan pahat elektroda yang bergerak maju mengikis material benda kerja dan menghasilkan serangkaian loncatan bunga api listrik yang berfrekuensi tinggi (*spark*). Loncatan bunga dihasilkan dari pembangkit *pulse* antara elektroda dan material benda kerja, yang keduanya dicelupkan dalam cairan dielektrik, akan menimbulkan pengikisan material dari material benda kerja dengan erosi panas atau penguapan (D.Brink, www.edmtt.com).

Loncatan elektron akan menumbuk permukaan benda kerja dengan kecepatan tinggi. Bagian dari permukaan benda kerja yang tertumbuk akan mengalami kenaikan temperatur sekitar 8000°C–12000°C dan menyebabkan pelelehan lokal pada bagian tersebut. Kondisi semacam ini terjadi juga pada permukaan pahat.

Dalam proses permesinan dengan EDM, pelelehan dan penguapan material benda kerja mendominasi proses pengikisan material dan meninggalkan *crater* yang tipis pada permukaan benda kerja. Dalam EDM tidak ada proses kontak dan gaya pemotongan antara pahat dan material benda kerja. Hal ini mengakibatkan tidak adanya tegangan mekanis, *chatter*, dan problem getaran seperti yang pasti terjadi pada proses permesinan tradisional (Patna Partono, dkk, 2008).

Dalam proses EDM logam akan mengalami pengaruh pemanasan dan mengalami perubahan struktur mikro yang terjadi pada celah antara katoda dan anoda secara periodik dalam suatu fluida dielektrik. Bentuk struktur mikro logam yang terjadi pada celah antara katoda dan anoda bergantung pada temperatur tertinggi yang dicapai dalam proses EDM, arus dan *on time* pada daerah proses EDM. Apabila struktur mikro logam mengalami perubahan sifat mekanik logam tersebut juga akan mengalami perubahan. Daerah proses EDM yang mengalami perubahan struktur mikro akibat mengalami pemanasan karena proses pemesian EDM.

Banyak penelitian yang telah dilakukan mengenai variabel yang berpengaruh pada proses EDM dan perbaikan karakteristik prosesnya. *Atlantika* (1993) melakukan penelitian tentang analisa RMR dan surface finish pada proses EDM dengan metode *response surface*, dengan hasil RMR dan kekasaran permukaan dipengaruhi oleh arus listrik dan *on time pulse*. *Setiawan* (1996) melakukan penelitian tentang RMR benda kerja dan elektroda pada proses EDM dengan metode fraksional faktorial dan hasilnya menyatakan bahwa RMR benda kerja dan elektroda dipengaruhi oleh arus listrik, *on time pulse*, *off time pulse*, polaritas, dan interaksi antara *on time* dan arus listrik.

Sapto (2001) melakukan penelitian tentang optimasi laju keausan elektroda, kekasaran permukaan dan *overcut* pada proses EDM dengan metode *Taguchi Multi Response*, dan hasilnya menyebutkan keausan elektroda dan kekasaran permukaan dipengaruhi oleh arus listrik, *on time pulse* dan tegangan. Jadi besarnya laju pembuangan material atau *Rate of Metal Removal (RMR)* dan kekasaran permukaan (*surface roughness*) hasil pemotongan EDM *Sinking* tergantung pada beberapa

parameter, seperti arus listrik (*pulse current*), *on time*, *off time* dan tegangan. *Suhardjono* (2004) melakukan penelitian tentang pengaruh *Arc on* dan *Arc off time* terhadap kekasaran permukaan dan laju pembuangan geram hasil pemesinan sinking EDM, dan hasilnya menyebutkan untuk *off time* yang konstan dan *on time* yang semakin naik didapatkan nilai kekasaran permukaan yang semakin besar dan nilai MRR semakin naik. Sedangkan untuk *on time* yang konstan serta *off time* yang semakin naik didapatkan nilai kekasaran permukaan yang relatif konstan dan harga MRR semakin turun.

Dari penelitian sebelumnya, belum ada yang membahas tentang bagaimana pengaruh pelelehan lokal benda kerja pada proses EDM sehingga akan menghasilkan perubahan struktur mikro di daerah pelelehan logam tersebut. Dengan mengoptimalkan arus dan *on time* pada proses *electrical discharge machining die sinking*, maka perlu dilakukan penelitian “Pengaruh Arus dan On time Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro permukaan Pada Proses *Electrical Discharge Machining Die Sinking*”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

- a. Bagaimana pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan struktur mikro benda kerja pada proses *electrical discharge machining die sinking*?
- b. Belum adanya yang membahas pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan sifat mekanik dan struktur mikro suatu bahan pada proses *electrical discharge machining die sinking*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun yang menjadi batasan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Percobaan dilaksanakan pada mesin EDM Type Jiann Sheng NCF 304 N.
- b. Bahan *electrode* yang digunakan dalam penelitian ini adalah tembaga.
- c. Fluida dielektrik yang digunakan untuk percobaan ini adalah *transformator oil*.

- d. Pengukuran kekerasan permukaan menggunakan *Mesin Uji Electric Brinell Hardness Tester Hauser Henry S*.
- e. Pengamatan struktur mikro spesimen menggunakan *Mikroskop Metalografi Olympus BX41M*.
- f. Penelitian hanya pada skala laboratorium dan tidak berdasarkan pada produk suatu pabrik.
- g. Percobaan dilakukan dengan menggunakan polaritas positif, yaitu *electrode* sebagai anoda (+) dan benda kerja baja AISI H-13 sebagai katoda (-).
- h. Variabel-variabel pada EDM *die sinking* seperti *discharge time, discharge gap, off time, high voltage current, ascending speed*, dan polaritas dianggap konstan.
- i. Sifat mekanik yang diteliti adalah kekerasan. Kekerasan permukaan yaitu kekerasan yang terjadi pada suatu bahan yang telah mengalami suatu proses pemanasan sehingga daerah tersebut mengalami pengerasan.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

- a. Mengetahui pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan struktur mikro permukaan benda kerja pada proses *electrical discharge machining die sinking*;
- b. Mengetahui pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan sifat mekanik suatu bahan pada proses *electrical discharge machining die sinking*;

1.5 Manfaat

Dengan adanya penelitian mengenai pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan struktur mikro permukaan benda kerja pada proses *electrical discharge machining die sinking* dapat diambil manfaat antara lain:

- a. Memberikan informasi kepada dunia industri dalam pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan struktur mikro benda kerja

- b. Memberikan wawasan baru bagi pengguna mesin EDM tentang pengaruh arus dan *on time* terhadap perubahan struktur mikro benda kerja sehingga diketahui sifat mekaniknya.
- c. Memberikan informasi baru tentang sifat mekanik bahan setelah dilakukan proses *electrical discharge machining die sinking* (EDM).

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Electrical Discharge Machining (EDM)

2.1.1 Konsep Dasar EDM

Electrical Discharge Machine (EDM) sinking merupakan salah satu proses permesinan non konvensional yang berbasis komputer sebagai pengendali utamanya. Dimana EDM sinking digunakan untuk membuat rongga cetakan yang memiliki kontur yang kompleks dan kepresisian yang tinggi. Salah satu produk yang sering dikerjakan oleh mesin EDM adalah dies dan mould yang memiliki kekerasan yang tinggi (Suhardjono, 2000).

EDM mampu mengerjakan logam atau paduan dengan kekerasan tinggi yang tidak mampu dilaksanakan dengan pembuatan secara konvensional biasa, sehingga proses ini perannya sangat penting bagi pembuangan material dengan kekerasan yang tinggi, misalnya seperti cetakan dan perkakas pahat. Anoda dan katoda yang berupa pahat atau benda kerja yang keduanya dapat diset. Dengan anoda yang berpolaritas (+) sebagai pahatnya sedang katodanya yang berpolaritas (-) berupa benda kerja. Sebaliknya jika polaritasnya (-) berarti anoda berupa benda kerja, sedang katodanya berupa pahat. Jenis polaritas dapat di setting pada EDM.

Untuk memungkinkan terjadinya loncatan bunga api, maka beda potensial antara katoda dan anoda harus melampaui syarat terjadinya *breakdown voltage* celah yaitu ambang batas tegangan saat terjadinya loncatan bunga api. Adapun besarnya nilai *breakdown voltage* celah ini tergantung kepada:

1. jarak antara benda kerja dan elektroda pahat;
2. sifat media isolator (*dielectric fluid*);
3. tingkat polusi yang terjadi pada celah dielektrikum.

Mekanisme loncatan bunga api listrik dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pengaruh medan listrik yang ada di antara pahat dengan benda kerja akan menyebabkan terjadinya ion positif. Sebaliknya elektron akan mengalir menuju ke

kutub yang berlawanan. Dengan demikian terbentuklah suatu saluran ion yang bersifat positif konduktif.

2. Pada kondisi ini, maka arus listrik bisa mengalir melalui saluran ion, sehingga terjadilah loncatan bunga api.

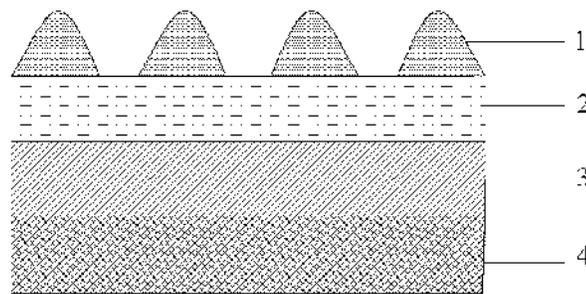
Proses terbentuknya saluran ion tersebut dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Adanya medan listrik antara anoda dengan katoda akan menyebabkan elektron-elektron bebas yang terdapat pada permukaan pahat tertarik menuju anoda. Dalam pergerakannya menuju anoda, elektron-elektron yang memiliki energi kinetis ini bertubrukan dengan molekul-molekul dielektrik.
2. Dalam proses terjadinya tubrukan antara elektron bebas dengan molekul dielektrik, terjadi dua macam keadaan.

Mekanisme pembuangan material benda kerja dengan EDM sebagai berikut:

1. Loncatan elektron akan menumbuk permukaan benda kerja dengan kecepatan tinggi.
2. Bagian dari permukaan benda kerja yang tertumbuk akan mengalami kenaikan temperatur sekitar 8000°C – 12000°C dan menyebabkan pelelehan lokal pada bagian tersebut. Kondisi semacam ini terjadi juga pada permukaan pahat.
3. Pada saat terjadi kenaikan temperatur maka akan terjadi penguapan pada benda kerja, pahat dan fluida dielektrik.
4. Setelah terjadi loncatan bunga api listrik, maka aliran listrik terhenti sehingga menyebabkan penurunan temperatur secara mendadak dan akan mengakibatkan terjadinya gelembung uap yang mengkerutkan bagian material yang meleleh. Lelehan ini akan terpecah dari permukaannya sehingga akan meninggalkan bekas yang berupa kawah-kawah halus.

Bagian-bagian yang terpecah tersebut secara cepat akan membeku dan membentuk partikel halus yang terbawa oleh aliran fluida dielektrik. Pengaruh panas yang terjadi terhadap permukaan benda kerja dapat dilihat pada Gambar 2.1 dibawah ini.



Gambar 2.1 Pengaruh panas terhadap permukaan benda kerja.

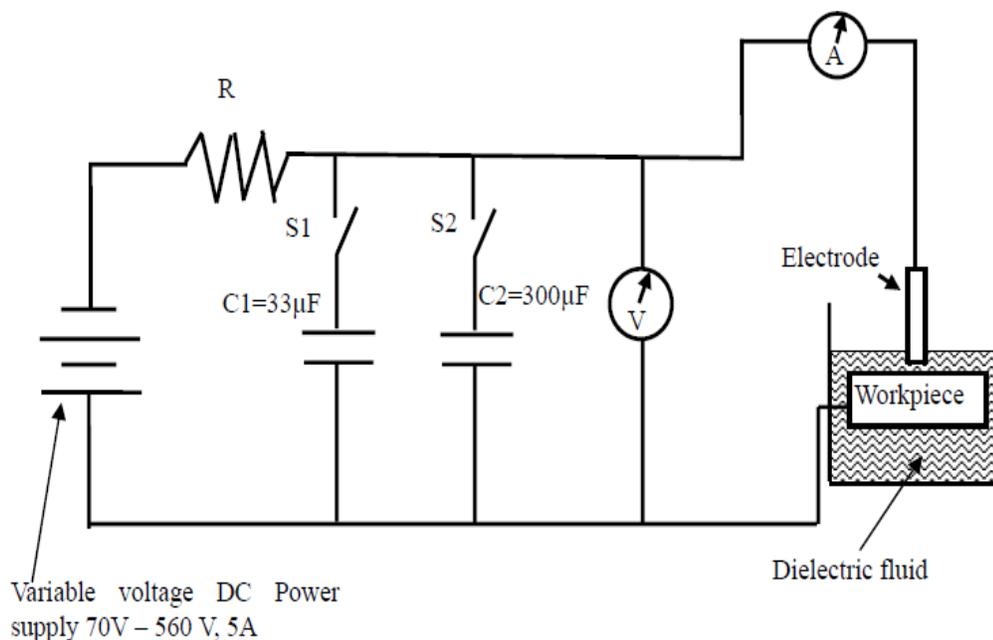
Keterangan Gambar

1. Lapisan yang meleleh dan membeku dengan siklus yang cepat. Sebagian dari lapisan ini terlempar ke luar karena susutnya gelembung uap. Sisanya masih melekat pada material.
2. Lapisan yang mengalami pengerasan
Pengerasan terjadi karena adanya:
 - Efek *quenching*
 - Kandungan karbon yang tinggi pada lapisan ini.
3. Lapisan Lunak
Struktur lapisan ini akan berubah dengan kekerasan yang sedikit menurun dari material induk akibat *annealing* selama proses berlangsung.
4. Lapisan yang tidak mengalami perubahan struktur
Proses erosi bukan hanya terjadi di permukaan benda kerja tetapi juga di permukaan pahat. Proses erosi pada permukaan benda kerja merupakan proses pembuangan material, sedang yang terjadi pada permukaan pahat menyebabkan keausan pahat.

2.1.2 Prinsip Kerja EDM

Prinsip kerja proses EDM *Shinking* adalah rangkaian elektronik yang digunakan untuk membangkitkan percikan bunga api listrik (*spark*) untuk EDM

Shinking adalah rangkaian relaksasi (*Relaxation circuit*) yang terdiri dari tahanan R dan kapasitor C seperti terlihat pada gambar 2.2 dibawah ini dapat dijelaskan sesuai dengan prinsip rangkaian listrik relaksasi tersebut. Arus listrik dari satu daya (*power supply*) DC mengalir melalui tahanan R untuk mengisi muatan yang ada pada kapasitor hingga mencapai *breakdown voltage*, yaitu tegangan yang dibutuhkan untuk membangkitkan bunga api listrik pada celah (gap) antara elektrode pahat dan benda kerja (*workpiece*) melalui cairan dielektik. Peran dari fluida dielektrik adalah sebagai isolator pada tegangan rendah dan saat tegangan melewati *breakdown voltage* fluida ini akan berubah sifat menjadi konduktor listrik yang baik, sehingga arus listrik dapat mengalir dari polaritas positif (+) ke polaritas negatif (-) dan pada saat itulah timbul percikan bunga api listrik atau *spark* Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Diagram skema rangkaian relaksasi (*Relaxation*) untuk EDM Shinking.

Lamanya nyala bunga api listrik ini sangat tergantung pada besarnya muatan yang mengisi kapasitor. Jika muatan pada kapasitor besar, maka *spark* yang terjadi lebih lama, sehingga lebih banyak material dari benda kerja yang mampu dilelehkan dan diupkan. Dengan demikian untuk setiap percikan bunga api listrik yang lebih

lama nyalanya akan terjadi kawah (*crater*) yang lebih dalam dan lebih lebar. Periode waktu nyala bunga api listrik ini kemudian lebih dikenal dengan *Arc On time*, sedangkan periode waktu saat pengisian kapasitor hingga mencapai *breakdown voltage* disebut sebagai *charging time* dan saat ini tidak timbul bunga api listrik sehingga dikenal sebagai *Arc Off time*.

Besar kecilnya percikan bunga api listrik ini dapat diatur dengan memvariasikan tegangan dari satu daya (*power supply*). Semakin tinggi tegangan yang diberikan, maka semakin besar juga spark gap yang digunakan untuk mencapai *breakdown voltage* yang lebih besar akibatnya percikan bunga api listrik yang terjadi juga lebih besar. Konsekuensinya adalah kawah yang lebar dan dalam akan terbentuk dan berakibat kekasaran permukaan hasil pemesinan menjadi kasar, namun produktivitas menjadi semakin besar, sehingga cocok untuk proses pengkasaran (Suhardjono, Bambang Pramujati, Winarto, 2010).

2.1.3 Cairan Dielektrik

Cairan dielektrik adalah cairan yang digunakan pada proses EDM memiliki fungsi sebagai berikut (Komang Bagiasna, 1987):

1. Membawa geram-geram yang terbentuk pada proses tersebut.
2. Dalam keadaan terionisasi, cairan dielektrik akan menjadi semacam konduktor sehingga memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik.
3. Sebagai media pendingin antara pahat dan benda kerja.

Syarat dari cairan dielektrik agar dapat berfungsi pada proses EDM yaitu (Komang Bagiasna, 1987):

1. Tidak mudah terbakar.
2. Sebagai media isolator sampai kebutuhan *break down voltage* tercapai.
3. Tidak menghasilkan gelembung-gelembung uap atau gas yang berbahaya bagi operator.
4. Mempunyai viskositas yang optimum.
5. Harus memiliki sifat penghantar arus listrik yang baik.

Fluida yang sering digunakan untuk proses ini antara lain air, minyak mineral, kerosin dan lain-lain. Pada penelitian ini menggunakan campuran solar dan minyak tanah sebagai cairan dielektriknya.

2.1.4 Elektroda (Pahat)

Secara teoritis setiap material yang bersifat konduktif dapat digunakan sebagai elektroda pahat. Dalam hal ini elektroda yang terbaik adalah material yang memiliki titik leleh yang tinggi dan tahanan listrik yang rendah. Untuk itu perlu hal-hal dibawah ini sebagai pertimbangan yaitu (Komang Bagiasna, 1987):

1. Kemudahan material tersebut untuk dikerjakan.
2. Laju keausan dari material tersebut.
3. Laju pengerjaan material sebesar mungkin.
4. Pertimbangan ekonomis seperti harga dan ketersediaannya dipasaran.

Material pahat yang dapat digunakan pada proses EDM dapat dikategorikan dalam tiga kelompok yaitu (Komang Bagiasna, 1987):

1. Material pahat dari logam
 - a. Tembaga.
 - b. Paduan tembaga : *Teliurium-copper, chromium-copper, Zinc-copper, dan wolfram-copper.*
 - c. Paduan aluminium, silium.
 - d. Kuningan.
 - e. *Tungsten.*
 - f. Baja.
2. Elektrode non logam
 - a. Grafit.
3. Kombinasi logam - non logam
 - a. Tembaga-grafit.

2.1.5 Metode *Flushing*

Metode *flushing* adalah sirkulasi yang tepat dari fluida dielektrik yang mengalir pada celah antara elektrode dan benda kerja. Fungsi dari metode *flushing* adalah membawa geram yang dihasilkan keluar dari gap agar dapat mempertinggi efisiensi proses pengerjaan material. Akibat yang ditimbulkan apabila pada proses EDM tidak menggunakan *flushing* adalah (Komang Bagiasna, 1987):

1. Terjadinya hubungan singkat antara pahat (elektrode) dan benda kerja.
2. Terjadinya busur api listrik yang dapat merusak benda kerja dan pahat.
3. Loncatan bunga api listrik yang terjadi menjadi tidak teratur atau tidak normal.

Berbagai metode *flushing* yang sering digunakan pada proses EDM antara lain (Mikel P, 1996):

1. *Injection flushing*.
2. *Side flushing*.
3. *Suction flushing*.
4. *Combination flushing*.

2.1.6 Parameter Proses EDM

a. Intensitas Arus

Di sini intensitas arus dimaksudkan sebagai batas arus maksimum yang ditetapkan dalam proses pengerjaan dengan EDM.

b. Waktu pelepasan (*on time*)

Waktu pelepasan adalah waktu pelepasan arus listrik melalui celah. Satuan dari waktu pelepasan adalah mikro detik dan mempunyai interval antara 1-1200. Waktu pelepasan berhubungan erat dengan *interval time* saat keduanya saling berhubungan.

c. *Interval Time (off time)*

Interval time adalah waktu selang antara dua pelepasan muatan listrik saat terjadi pendinginan. Fungsi dari off time itu sendiri sebagai pendinginan material atau benda kerja.

2.1.7 Kondisi Elektrik EDM

a. Arus Listrik

Proses pengerjaan EDM dilakukan oleh sejumlah loncatan bunga api listrik yang terjadi secara periodik. Bunga api tersebut sebenarnya energi listrik yang dilepaskan dari suatu rangkaian listrik. Besarnya energi listrik yang dilepaskan dari suatu rangkaian listrik dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti arus listrik, tegangan dan waktu. Dengan demikian maka semakin besar arus yang diberikan akan memperbesar energi listrik yang dilepaskan, semakin besar energi listrik yang dilepaskan maka luas daerah benda kerja yang dilelehkan semakin luas sehingga MRR yang terjadi semakin besar dan kekasaran permukaan yang terjadi semakin kasar. Disamping ke arah longitudinal pelepasan energi listrik juga terjadi ke arah radial yang akan menyebabkan terjadinya *overcut* yang menyebabkan ketelitian dimensi berkurang.

b. *Z down*

Z down adalah lamanya waktu pahat memesis benda kerja. Pemakaian waktu yang lebih lama dapat mengakibatkan pengerjaan menjadi kasar atau dalam kondisi pembilasan yang baik waktu pemakaian yang lebih rendah akan menghasilkan benda kerja yang lebih baik.

c. *On-time Pulse*

On-time pulse adalah selang terjadinya pelepasan energi listrik atau loncatan bunga api listrik. Dengan demikian semakin lama *on-time pulse* maka energi listrik yang dilepaskan semakin besar sehingga luas daerah dari benda kerja yang dilelehkan semakin luas.

d. *Off-time Pulse*

Off-time pulse menyatakan waktu arus listrik berhenti untuk sesaat (pause) sebelum loncatan bunga api listrik terjadi kembali. Nilai *off-time* yang rendah akan meningkatkan *machining speed*.

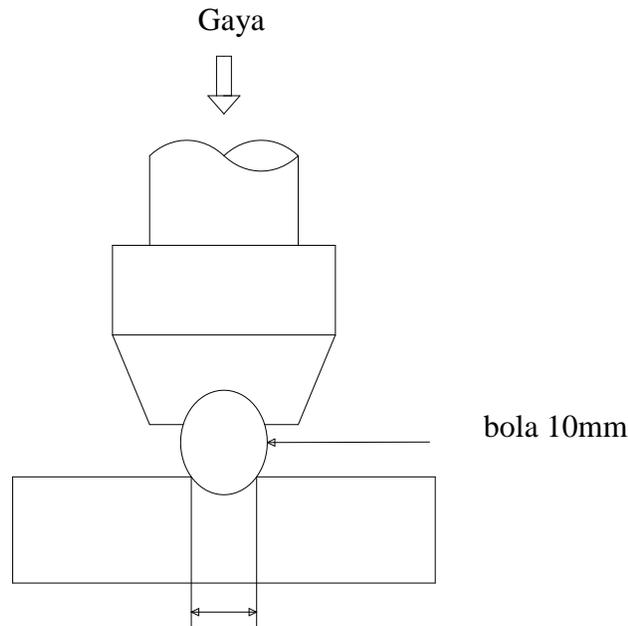
2.2 Pengujian Mekanik

Untuk mengetahui / mengukur sifat logam perlu dilakukan pengujian. Pengujian biasanya dilakukan terhadap contoh (*sample*) bahan yang dipersiapkan menjadi spesimen atau batang uji dengan bentuk dan ukuran yang standar, baru kemudian dari hasil pengukuran pada pengujian diambil kesimpulan mengenai sifat mekanik yang diuji. Berikut ini sebagian dari pengujian-pengujian mekanik yang sering dilakukan.

2.2.1 Uji Kekerasan Brinell

Uji kekerasan lekukan yang pertama kali banyak digunakan serta disusun pembakuannya adalah metode yang diajukan oleh J.A. Brinell pada tahun 1900. Uji kekerasan Brinell berupa pembentukan lekukan pada permukaan logam dengan memakai bola baja berdiameter 10 mm dan diberi beban 2000 kg. Untuk logam lunak, beban dikurangi hingga tinggal 500 kg, untuk menghindarkan jejak yang dalam dan untuk bahan yang sangat keras digunakan paduan karbida tungsten untuk memperkecil terjadinya distorsi indentor.

Beban diterapkan selama waktu tertentu, biasanya 30 detik dan diameter lekukan diukur dengan mikroskop daya rendah setelah beban tersebut dihilangkan. Kemudian dicari harga rata-rata dari 2 buah pengukuran diameter pada jejak yang berarah tegak lurus. Permukaan di mana lekukan akan dibuat harus relatif halus bebas dari debu atau kerak.



Gambar 2.3 Proses pengujian kekerasan

Angka kekerasan Brinell (BHN) dinyatakan sebagai beban P dibagi luas permukaan lekukan. Untuk lebih jelasnya dalam proses pengujian kekerasan dengan metode Brinell dapat dilihat pada rumus di bawah ini:

Kekerasan Brinell dapat kita cari dengan rumus:

$$BHN = \frac{2P}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana BHN = harga kekerasan Brinell (kg/mm^2)

P = beban yang ditetapkan (kg)

D = diameter bola (mm)

d = diameter lekukan (mm)

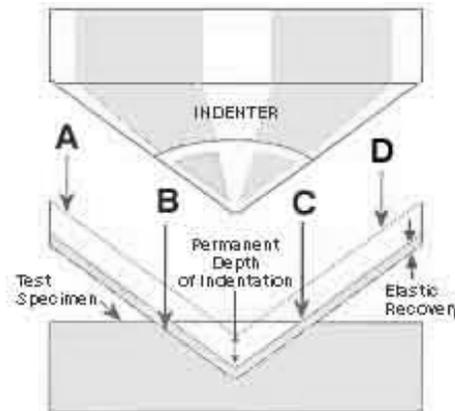
Uji Brinell biasanya banyak digunakan untuk material dengan kekerasan rendah hingga menengah. Uji Brinell tidak dipengaruhi oleh goresan dan kekasaran permukaan dibandingkan uji kekerasan yang lain. Dilain pihak, jejak Brinell yang besar ukurannya, dapat menghalangi pemakaian uji tersebut untuk benda uji yang kecil atau pada bagian yang kritis terhadap tegangan, dimana lekukan yang terjadi

dapat menyebabkan kegagalan (failure). Indentor yang sangat baik dalam pengujian ini adalah indentor tungsten karbida biasanya digunakan untuk material dengan kekerasan diatas 500 BHN yang berbentuk bulat dan mempunyai modulus elastisitas yang sangat tinggi dan sifat deformasi yang rendah bila dibandingkan dengan bahan indentor dari baja.

2.2.2 Uji Kekerasan *Rockwell (Rockwell Test)*

Uji kekerasan Rockwell diperkenalkan oleh ahli logam ST Rockwell (1922). Uji ini mengukur kedalaman bekas injakan. Indentor yang diberi beban ditekan pada material uji, dengan menggunakan beban minor, kemudian beban mayor. Selisih kedalaman penetrasi antara keduanya menunjukkan tingkat kekerasan material uji. Ada beberapa macam skala yang digunakan pada uji kekerasan Rockwell, yang mana menggunakan beban, bahan indentor dan bentuk geometris yang berbeda. Angka kekerasan Rockwell dibaca langsung dari mesin uji Rockwell. Misalnya jika kekerasan yang ditunjukkan dengan menggunakan skala C adalah 55, maka kekerasannya ditulis dengan SS HRC. Uji kekerasan Rockwell sangat luas penggunaannya untuk berbagai tingkat kekerasan.

Untuk lebih jelasnya dalam proses pengujian kekerasan dengan metode Rockwell dapat dilihat pada Gambar 2.4 dibawah ini.



Gambar 2.4 Indentor dari intan

Kelebihan uji Rockwell adalah cepat dan dapat dilakukan otomatis, mampu membedakan perbedaan kekerasan yang kecil pada baja yang diperkeras, dan ukuran lekukannya yang kecil, sehingga bagian yang mendapat perlakuan panas yang lengkap, dapat diuji kekerasannya tanpa menimbulkan kerusakan.

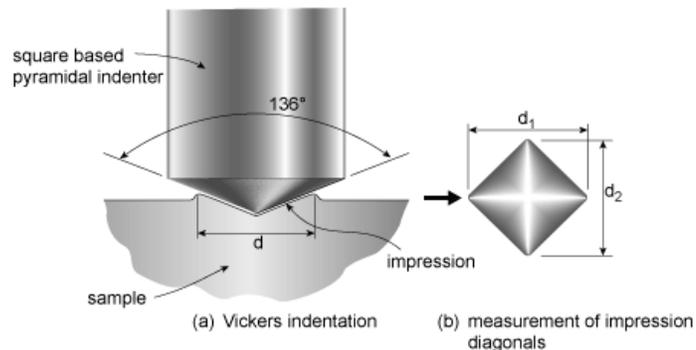
2.2.3 Uji Kekerasan Vickers

Uji kekerasan Vickers menggunakan intan sebagai indenter dengan bentuk geometris piramida, dengan beban bervariasi antara 1-120 kg. Uji vickers diperkenalkan di Inggris oleh R. Smith dan G Sandlund (1922). Angka kekerasan vickers VHN (Vickers Hardness Number) dalam formula:

$$VHN = \frac{1,854P}{L^2} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana: P= beban (Kg) L= diameter diagonal injakan

Uji Vickers banyak dilakukan pada pekerjaan penelitian, karena metode tersebut memberikan hasil berupa skala kekerasan yang kontinu, untuk suatu beban tertentu. Untuk lebih jelasnya dalam proses pengujian kekerasan dengan metode Vickers dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Indentor uji Vickers

2.2.4 Uji Kekerasan Knoop (*Knoop Test*)

Uji kekerasan Knoop diperkenalkan oleh F. Knoop (1939) menggunakan indentor mirip pada uji kekerasan Vickers, yaitu dari intan dengan ukuran piramida yang lebih besar. Beban yang digunakan berkisar antara 25g-5kg. Angka kekerasan Knoop HKN (Hardness Knoop Number) dinyatakan dalam formula rumus:

$$KHN = \frac{14,2P}{L^2} \dots\dots\dots (3)$$

dimana: l = panjang diagonal tapak tekan yang panjang (mikron)

P = gaya tekan (gr)

Uji kekerasan knoop disebut juga dengan uji kekerasan mikroherdness, karena beban yang dikenakan sangat ringan sehingga sangat sesuai untuk uji spesimen yang sangat kecil atau sangat rapuh (brittle). Uji kekerasan knoop juga sangat baik untuk mengukur kekerasan butiran logam. Bekas injakan biasanya berkisar antara 0,01-0,10 mm, sehingga permukaan yang akan diuji harus dipersiapkan secara cermat. Oleh karena itu angka kekerasan yang dihasilkan tergantung pada beban dipakai untuk pengujian.

2.2.5 Uji Kekerasan Meyer

Kekerasan menurut meyer adalah berdasarkan luas proyeksi jejak bukan luas permukaannya. Tekanan rata-rata antara luas penumbuk dan lekukan adalah sama dengan beban dibagi luas proyeksi lekukan.

$$P_m = \frac{P}{\pi r^2}$$

Bahwa tekanan rata-rata ini, dapat diambil sebagai ukuran kekerasan, dan dinamakan kekerasan Meyer (NM), dan dirumuskan sebagai berikut:

$$NM = \frac{P}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4P}{\pi d^2}$$

Dimana: d = diameter tapak tekan

P = beban

Seperti kekerasan Brinell, kekerasan Meyer mempunyai satuan $\frac{kg}{mm^2}$.

Kekerasan Meyer kurang peka terhadap beban yang diterapkan dibandingkan dengan kekerasan Brinell. Untuk bahan-bahan yang mengalami pengerjaan dingin, kekerasan Meyer pada dasarnya tetap dan tidak tergantung pada beban, sedangkan kekerasan Brinell akan mengecil bila beban bertambah secara kontinyu sejalan dengan penambahan beban, karena lekukan yang terjadi menyebabkan pengerasan regang.

Untuk kekerasan Brinell, mula-mula naik sejalan dengan kenaikan beban, dan kemudian turun untuk beban yang lebih tinggi lagi. Kekerasan Meyer merupakan pengukuran yang lebih mendasar dalam hal mengukur kekerasan lekukan, namun jarang digunakan untuk pengukuran kekerasan.

2.2.6 Pengujian *Microhardness*

Banyak persoalan metalurgi memerlukan data-data mengenai kekerasan pada daerah yang sangat kecil. Pengukuran gradien kekerasan pada permukaan yang dikerburasi, pengukuran kekerasan kandungan tunggal pada struktur mikro, atau

penentuan kekerasan roda gigi arloji, merupakan tipe persoalan dari jenis pengujian kekerasan mikro.

Pengembangan penumbuk knoop oleh biro standart nasional dan pengenalan uji tekan untuk mengontrol pemakaian beban di bawah 25 g, menyebabkan pengujian kekerasan mikro merupakan kegiatan laboratorium yang rutin.

Penumbuk knoop adalah intan kasar yang dibentuk menjadi piramida sedemikian sehingga dihasilkan lekukan bentuk intan dengan perbandingan diagonal panjang dan pendek adalah 7:1. dan angka kekerasan Knoop atau *Microhardness* dirumuskan sebagai:

$$HK = \frac{14.3P}{l^2}$$

Dimana: P = beban

L = panjang diagonal tapak tekan

Untuk uji *Microhardness* pada baja, terlebih dahulu baja dipotong dan diampelas sampai tidak ada goresan-goresan, setelah itu diberi almina sehingga kelihatan mengkilap.

2.3 Pengamatan Struktur Mikro

2.3.1 Reaksi Fasa-Padat

Semua perubahan struktur mikro berkaitan dengan pengaturan kembali atom-atom.. Kita pertama kali membahas perubahan struktur mikro dalam rekristalisasi. Reaksi fasa padat ini sangat sederhana oleh karena tidak ada perubahan komposisi. Struktur kristal tetap sama, setiap atom mempunyai bilangan koordinasi sama, yaitu 12 pada struktur kps. Bedanya, atom-atom diatur kembali membentuk kristal yang lebih sempurna dari butir yang semula yang telah mengalami deformasi. Proses ini tidak terjadi sekaligus, waktu yang diperlukan tergantung dari suhu dan beberapa variabel lainnya.

Reaksi fasa padat dapat dikelompokkan menurut beberapa cara, cara yang kita ikuti di sini adalah sebagai berikut:

1. **Pertumbuhan butir**

Atom bergerak melintasi Batas butir ($\ll 1$ nm); tidak ada perubahan komposisi; tidak ada perubahan bentuk kristal, tidak ada butir baru.

2. **Rekristalisasi**

Terbentuk butir baru yang lebih sempurna, hanya ada pengaturan kembali atom secara lokal ($\ll 1$ nm), tidak ada perubahan komposisi dan tidak ada perubahan struktur kristal.

3. **Perubahan polimorfi**

Terbentuk fasa baru, oleh karena itu koordinasi atom baru melalui pengaturan kembali secara lokal ($\ll 1$ nm), tidak ada perubahan komposisi.

4. **a. Pelarutan**

Menghilangnya fasa semula secara pelarutan dalam fasa utama difusi atom secara besar-besaran ($\gg 1$ nm).

b. Pengendapan

Pemisahan dan pembentukan fasa baru dari larutan padat lewat jenuh difusi atom secara besar-besaran ($\gg 1$ nm).

5. **Reaksi Eutektoid**

Dekomposisi dari satu fasa (pada waktu pendinginan) menjadi dua fasa baru difusi atom secara besar-besaran ($\gg 1$ nm).

6. **Transformasi martensit**

Perubahan polimorfi melalui pergeseran sebuah atau lebih bidang atom terhadap bidang yang berdekatan tidak ada difusi ($\ll 1$ nm).

Ciri-ciri terpenting dari daftar di atas adalah (1) terbentuk tidaknya suatu fasa baru, dan (2) apakah pergerakan atom hanya meliputi pengaturan kembali lokal ($\ll 1$ nm) atau meliputi difusi jangkau-jauh melalui beberapa jarak sel satuan ($\gg 1$ nm).

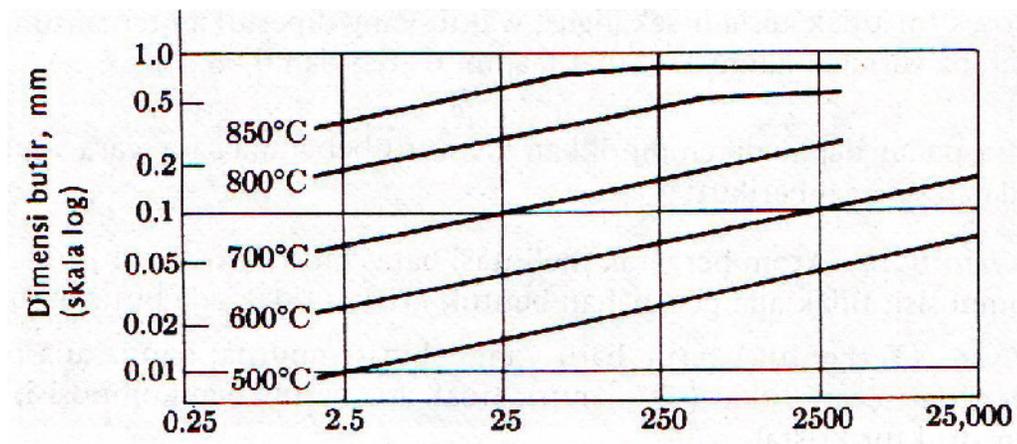
2.3.2 **Pertumbuhan Butir (Bahan Fasa Tunggal)**

Reaksi ini tidak memerlukan waktu nukleasi karena atom-atom hanya berpindah melintasi batas butir antara butiran-butiran yang telah ada. Laju reaksi

tergantung dari suhu (Gambar 2.7) karena diperlukan adanya energi termal untuk aktivasi Ion catan atom. Reaksi ini juga tergantung pada lengkungan batas oleh karena itu laju reaksi berkurang dengan pertumbuhan butir.

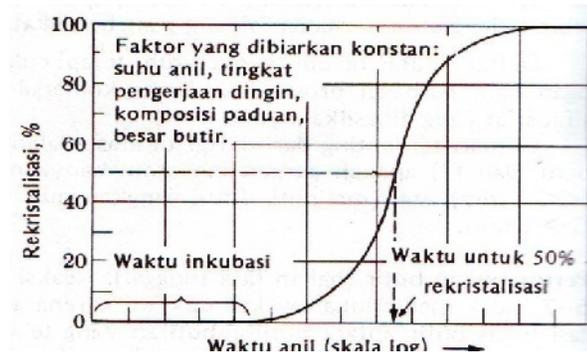
2.3.3 Rekristalisasi

Meskipun reaksi ini tidak menghasilkan fasa baru, terjadi suatu tunda waktu karena ada nukliasi butir-butir baru. Butir baru ini biasanya mulai tumbuh sepanjang daerah slip butiran yang terdeformasi.



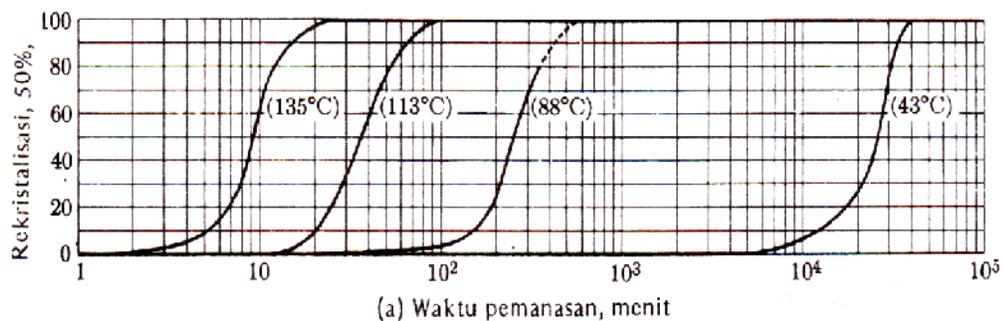
Grafik 2.1 Laju reaksi terhadap suhu

Kemajuan reaksi rekristalisasi biasanya mengikuti kurva berbentuk S atau *Kurva Sigmoidal* (Gambar 2.7). Sebagai contoh, aluminium (komersil murni dengan PD 5%) selama 50 jam pertama pada 310°C hampir-hampir tidak berekristalisasi, tetapi terrekristalir 50% setelah 70 jam. Rekristalisasi sempurna memerlukan waktu sekitar 100 jam.



Grafik 2.2 Rekrystalisasi isothermal

Kemajuan rekrystalisasi mengikuti pola yang lama pada berbagai suhu dengan skala waktu berbeda, (Gambar 2.7) pada gambar ini tampak rekrystalisasi tembaga murni (99,999%) yang telah mengalami pengerjaan dingin 98%. Waktu rekrystalisasi 50% mudah diamati, karena reaksi pada titik itu berjalan sangat cepat. Hal ini memang dapat diduga sebelumnya, karena pergerakan atom mengandalkan reaksi ini, sedangkan pergerakan tersebut tergantung pada energi aktivasi.

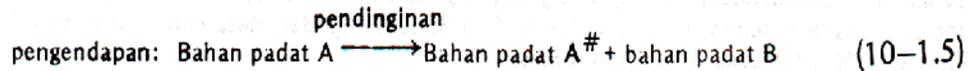


Grafik 2.3 Rekrystalisasi terhadap waktu pemanasan

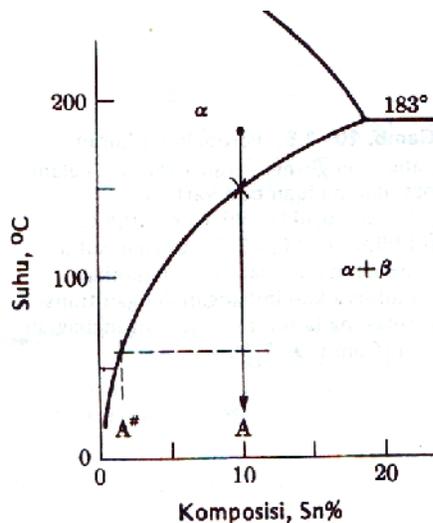
2.3.4 Pelarutan dan Pengendapan dalam Bahan Padat

Kedua reaksi ini saling bertolakan dan dapat digambarkan dalam Gambar 2.10. Pada suhu di bawah 150°C , paduan 90% Pb - 10% Sn terdiri dari dua fase, α dan Q . Di atas 150°C seluruh timah putih larut dalam α kps; oleh karena itu sewaktu pemanasan, Q (padat) larut dalam α (padat). Pengendapan padat terjadi bila logam didinginkan sampai daerah suhu dua fasa setelah laku larut di atas 150°C . Persamaan

berikut ini berlaku untuk kedua reaksi dalam paduan biner. Reaksi ini melibatkan dua fasa komposisi larutan berubah dari A menjadi A[#] bila batas daya larut dilampaui (Gambar 2.5).

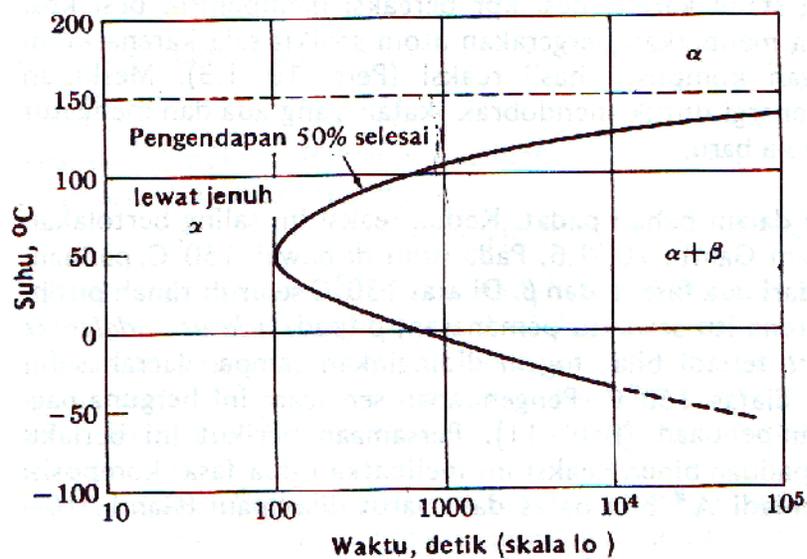


Kedua reaksi tersebut diatas memerlukan difusi.



Grafik 2.4 Laku larut dan pengendapan (paduan 90Pb-10Sn) Sn larut semua dalam pada suhu tinggi. Pendinginan menyebabkan terjadinya reaksi pengendapan padat.

Pada paduan 90 Pb - 10 Sn. Pada Gambar 2.10 untuk membahas waktu yang diperlukan suatu reaksi pengendapan. (kaya akan Pb) stabil di atas 50°C; di bawah 150°C, (kaya akan Sn) akan terpisah dari yang lewat jenuh bila ada kesempatan (waktu) untuk itu.



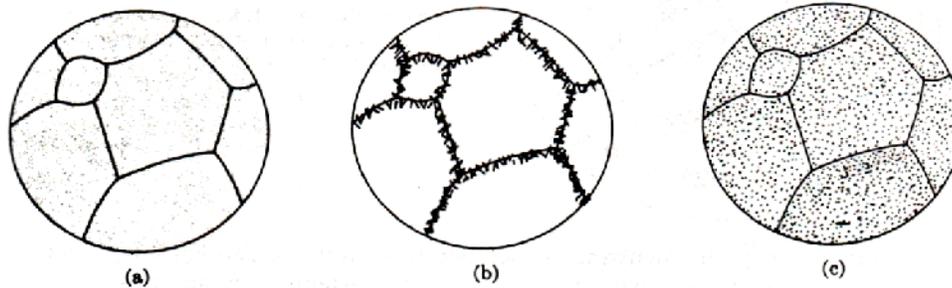
Grafik 2.5 Waktu terhadap Suhu

Pada Gambar 2.10 terlihat berapa waktu yang diperlukan untuk *presipitasi isothermal* (50% selesai) bila paduan didinginkan dengan cepat sampai suhu yang diperlukan dan didiamkan pada suhu tersebut sampai terjadi pengendapan. Akan kita lihat bahwa waktu yang diperlukan turun dengan naiknya suhu dari -50°C sampai suhu ruang. Di daerah suhu ini, laju pengendapan dibatasi oleh difusi. Sekitar 50°C , pola terbalik, dan waktu akan meningkat terus sampai mencapai daya larut pada 150°C . Gejala ini menarik perhatian dan kita jumpai kurva ini pada reaksi-reaksi yang lain.

Diatas bridging kurva presipitasi isothermal, laju reaksi tidak dibatasi oleh difusi karena atom-atom dapat berdifusi dengan cepat ($50^{\circ}\text{C} \sim 0,6 T_m$). Waktu yang diperlukan untuk nuklasi fasa yang baru yang sekarang merupakan pembatas utama. Nuklasi lebih mudah terjadi pada batas butir (Gambar 2.12b). Atom timah putih bergerak dari jarak (atom) yang cukup jauh ke lokasi pada batas butir.

Di bawah hidung kurva presipitasi isothermal, laju presipitasi dibatasi oleh difusi atom timah putih. Atom-atom ini tidak dapat berdifusi dengan mudah; selain itu tingkat lewat jenuh besar. Oleh karenanya, partikel yang baru akan bermuklasi

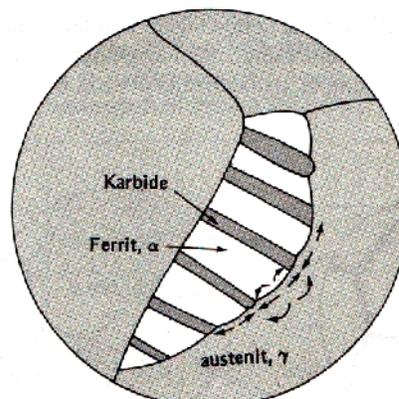
dimana ada kemungkinan yaitu pada cacat titik seperti kekosongan, sisipan, sepanjang garis dislokasi dan dekat ketidak-murnian (atom asing). Kemungkinan ini tersebar pada butir-butir. Sehingga kita akan menjumpai struktur mikro yang berbeda (Gambar 2.12c dan 2.12b)



Gambar 2.6 (a) Larutan padat lewat jenuh, (b). Pengendapan batas butir, (c) Pengendapan dalam butir.

Reaksi eutektoid berlangsung pada satu suhu tertentu - suhu eutektoid. Pada pendinginan, reaksi bermula dari satu fasa dengan komposisi antara menjadi dua fasa sebelah titik eutektoid.

Bila bahan padat 2 menyimpang dari komposisi eutektoid, salah satu dari dua garis daya larut terlampaui lebih dahulu, sehingga salah satu fasa mulai memisahkan diri. Contoh, pada paduan 0,4 C-99,6 Fe, *ferit* memisahkan diri lebih dini daripada karbida; pada paduan 1 C-99 Fe, karbida memisahkan diri terlebih dahulu.



Gambar 2.7 Pembentukan perlit

Pertumbuhan *perlit* menyangkut pembentukan *ferit* dan karbida sekaligus. Pertumbuhan dimulai pada batas-batas butir *austenit*, dan lapisan kedua fasa tersebut tumbuh kearah dalam. Pada saat ini terjadi, karbon memisah, seperti terlihat pada Gambar 2.12. Bila laju pendingin perlahan, karbon dapat berdifusi lebih lama dan menempuh jarak lebih jauh dan terjadilah *perlit* yang kasar (lapisan tebal). Bila laju pendinginan dipercepat, difusi terbatas pada jarak dekat. Hasilnya adalah *perlit* halus dengan lapisan tipis yang lebih banyak.

Jumlah *perlit* dapat berkisar dari 0 sampai 100%, bila kadar karbon meningkat dari 0 sampai komposisi eutektoid (0,8% dalam baja karbon). Sejalan dengan itu, terdapat pula pengurangan dalam jumlah *ferit* pra-eutektoid. Jumlah *perlit* turun dalam baja hiper eutektoid karena karbida pra eutektoid membentuk jaringan disekitar butiran *austenit*.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di tiga tempat yaitu Laboraturium EDM Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang, Laboratorium Uji Bahan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya. Laboraturium Uji Bahan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember, Penelitian ini dilakukan kurang lebih selama 2 bulan yaitu bulan Juli sampai September 2011

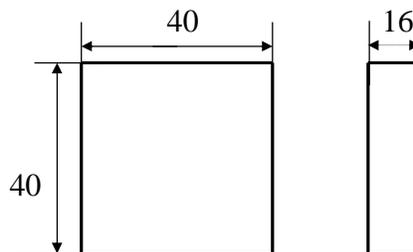
3.1 Bahan dan Alat

3.1.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

a. Material atau benda kerja yang digunakan adalah baja AISI H-13. Komposisi paduannya sebagai berikut (*Hang Hock Hardware inspection certificate*):

- 1) C = 0,38 %
- 2) Si = 1,00 %
- 3) Mn = 0,40 %
- 4) Cr = 5,20 %
- 5) Kekerasan = 160 HB
- 6) Konduktivitas thermal = 7,8 g/cm³

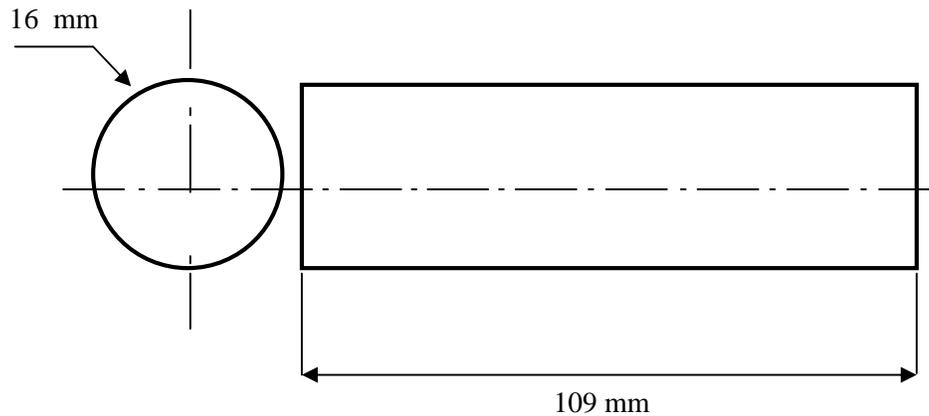


Gambar 3.1 Benda kerja

b. *Electrode* Tembaga (Gambar 3.2)

Spesifikasinya adalah:

1. Nilai konduktivitas listriknya : $6,0 \times 10^7 \text{ (ohm}^{-1} \cdot \text{m}^1)$
2. Titik lebur : 1085°C



Gambar 3.2 Elektrode

- c. Cairan dielektrik menggunakan *transformator oil*. Spesifikasinya adalah sebagai berikut:
 - 1) Titik didih : 140°C
 - 2) Titik beku : -6°C
 - 3) Kekuatan dielektrik : $12 - 24 \text{ MV/m (RMS)}$
 - 4) Massa jenis : $0,8 \text{ g/cm}^3$
 - 5) Viskositas : 25 cSt
- d. Pasta pembersih (autosol).
- e. Cairan etsa ($2\% \text{ HNO}_3$).
- f. Kertas amplas nomor 100, 120, 180, 240, 320, 400, 500, 600, 800, dan 1000 .
- g. Kain gosok halus.

3.1.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

- a. Mesin EDM merk Jiann Sheng tipe NCF 304 N (Gambar 3.3) dan mempunyai spesifikasi sebagai berikut:

- 1) Dimensi : 2860 x 1800 x 2510 mm
- 2) Arah pergerakan : X – 600 mm
Y – 350 mm
Z – 600 mm
- 3) Tegangan maksimum : 300 V
- 4) Arus maksimum : 60 A
- 5) *On time* maksimum : 2000 μ s
- 6) *Off time* maksimum : 900 μ s



Gambar 3.3 Mesin EDM merk Jiann Sheng tipe NCF 304 N

- b. Gergaji potong
Digunakan untuk memotong benda kerja dan *electrode*.
- c. Gerinda
Digunakan untuk menghaluskan permukaan benda kerja.
- d. Mesin Bubut
Digunakan untuk membuat bentuk pahat.

- e. Mikroskop metalurgi BX41M – Olympus, kamera digital, dan komputer.



Gambar 3.4 Mesin Uji Electric Brinell Hardness Tester Hauser Henry S A

- f. Mesin uji kekerasan *Electric Brinell Hardness Tester* (Merk Hauser Henry S)



Gambar 3.5 Mikroskop Metalografi Olympus BX41M

3.3 Pelaksanaan Penelitian

Langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan benda kerja dan *electrode*, memotong benda kerja dan *electrode* menggunakan gerinda potong.
- b. Meratakan dan menghaluskan benda kerja dan *electrode* menggunakan mesin bubut dan kertas gosok.
- c. Memasang *electrode* pada *holder* mesin EDM dan dikencangkan.
- d. Memasang benda kerja dan dikencangkan dengan klem agar posisinya tidak berubah.
- e. Mengatur posisi pemakanan benda kerja (koordinat x, y) dengan cara mengatur meja.
- f. Menyentuhkan *electrode* pada benda kerja sampai ada tanda alarm berbunyi.
- g. Mengatur kerataan permukaan benda kerja dengan permukaan *electrode*.
- h. Mengatur parameter-parameter mesin yaitu arus dan *on time* EDM .
- i. Menghidupkan pompa cairan dielektrik dan mengatur bukaan katub dengan tujuan menyesuaikan laju cairan dielektrik.
- j. Memulai pengerjaan dengan menekan tombol *start* sampai kedalaman 0,3 mm. Apabila pemakanan sudah mencapai kedalaman 0,3 mm, maka mesin akan otomatis berhenti dan alarm akan berbunyi.
- k. Mengangkat *electrode*, dan mengeluarkan benda kerja.
- l. Membersihkan benda kerja dari kotoran dan mengeringkannya.
- m. Percobaan diulang dengan memvariasikan arus dan *on time*.
- n. Setelah semua proses *Electrical Discharge Machining (EDM)*, kemudian dilakukan pengujian kekerasan dan pengamatan struktur mikro.
- o. Setelah selesai pengujian kemudian dilakukan pengambilan data dan pembuatan pembahasan pada spesimen yang telah diuji.
- p. Kemudian dari pembahasan tersebut diambil kesimpulan dari hasil penelitian.

3.4 Pengujian

3.4.1 Uji Kekerasan Brinell

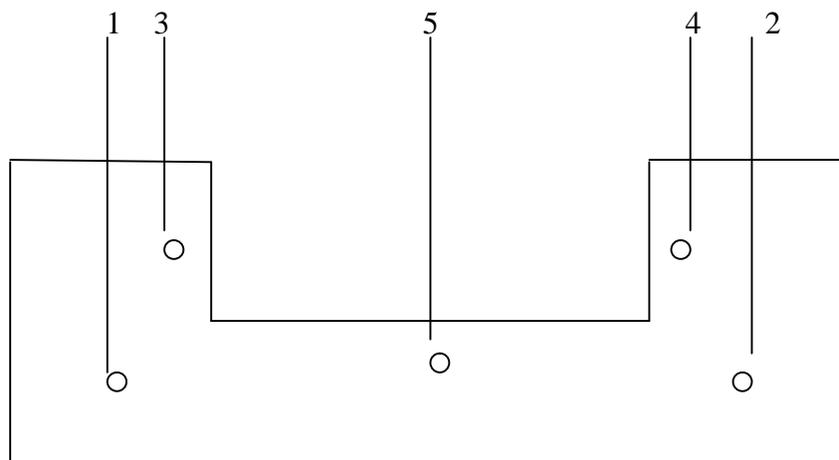
Uji Brinell diperkenalkan oleh ahli logam Swedia J.A Brinell (1900). Uji ini menggunakan tungsten karbida berbentuk bola dengan diameter 1,20 mm yang ditusukan pada permukaan logam yang diuji. Beban yang digunakan adalah 43,200 kg. Uji kekerasan permukaan dilakukan pada sebelum proses dan setelah proses. Sebelum proses dilakukan pengujian pada permukaan. Pada setelah proses pengujian dilakukan pada daerah yang terpengaruh sehingga proses uji kekerasan dilakukan dari sisi samping (sub layer) dengan Brinell dengan diameter 1,2 mm, dari proses EDM yaitu pada titik 5. Lapisan sub layer yang dimaksud daerah proses ke titik 5 dengan posisi dari permukaan yang terkena EDM min 3 mm dan max 5 mm.

Langkah-langkah dalam melakukan pengujian kekerasan:

- Menghaluskan spesimen dengan kertas amplas sampai rata dan halus.
- Memasang spesimen pada mesin uji.
- Melakukan penetrasi dengan beban 43,200 kg. Kemudian ditahan pada beban tersebut selama 30 detik, lalu beban tersebut dilepas.

Lokasi pengujian Brinell dapat dilihat pada gambar di bawah:

Pengujian dilakukan pada 5 lokasi, seperti pada gambar 3.4



Gambar 3.6 Lokasi Pengujian Kekerasan Pada Spesimen

3.4.2 Pengamatan Struktur Mikro

Pengamatan struktur mikro adalah pengamatan pada daerah *Electrical Discharge Machining (EDM)* menggunakan mikroskop dengan perbesaran 500X. yang akan diamati dalam struktur mikro ini adalah perubahan yang terjadi pada daerah proses *Electrical Discharge Machining (EDM)*.

Untuk uji struktur mikro, langkah-langkah pengujiannya adalah sebagai berikut :

- a. Spesimen dipotong sesuai kebutuhan untuk uji mikro.
- b. Haluskan specimen yang sudah dengan kertas amplas secara bertahap dari grade yang kasar sampai yang halus.
- c. Lihat specimen apa sudah betul-betul rata, bila belum ulangi gosok dengan kertas ampelas yang halus.
- d. Spesimen kemudian dipoles dengan kain beludru yang diletakan pada mesin ampelas. Kemudian specimen bersihkan dengan air lalu alkohol.
- e. Amati struktur mikro specimen dengan mikroskop. Rekam Hasil pengamatan anda di komputer dan catat hasil perbesarannya.

3.5 Analisa Data

Analisis dan pengujian data yang diperoleh pada saat penelitian akan diuji menggunakan metode analisis regresi berganda. Untuk mengetahui pengaruh antara bahan *on time*, dan arus terhadap kekerasan permukaan yang dihasilkan melalui proses *electrical discharge machining die sinking* serta untuk memudahkan penganalisaan dan menarik kesimpulan dari hasil percobaan, maka digunakan asumsi bahwa kekerasan permukaan (BHN) merupakan fungsi dari bahan *on time* (A) dan arus (I) dengan demikian dapat dituliskan fungsi sebagai berikut:

$$\text{BHN} = \beta (A, I) \dots \dots \dots (3.1)$$

Dimana:

BHN = kekerasan permukaan (rata-rata aritmatris)

β = konstanta

A = *on time*

I = arus

dari fungsi di atas dapat diubah menjadi bentuk persamaan matematis sebagai berikut:

$$BHN = \beta_0 \cdot A^{\beta_1} \cdot I^{\beta_2} \dots \dots \dots (3.2)$$

Untuk merubah ke dalam bentuk linier maka bentuk tersebut di atas perlu ditransformasikan ke dalam bentuk logaritma, sehingga menjadi:

$$\text{Log } BHN = \log \beta_0 + \beta_1 \log A + \beta_2 \log I \dots \dots (3.3)$$

Persamaan di atas masih perlu ditransformasikan menjadi bentuk/model persamaan regresi linier multiple menjadi:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 \dots \dots \dots (3.4)$$

Dengan transformasi

$$y = \log BHN, X_1 = \log A, X_2 = \log I \dots \dots \dots (3.5)$$

Langkah selanjutnya adalah menentukan hubungan atau korelasi antara y terhadap variabel X_1, X_2 dengan menentukan nilai atau harga konstanta β , harga koefisien X_1, X_2 berupa β_1, β_2 . Untuk menentukan konstanta dan koefisien-koefisien tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak atau *software* minitab 14. Dari hasil pengolahan data didapatkan persamaan regresi, analisa varians dan hubungan antara variabel bebas dan variabel respon satu per satu serta dapat pula diketahui variabel-variabel yang berpengaruh terhadap nilai penyimpangan geometri yang didapatkan melalui penelitian. Agar didapatkan kesimpulan yang akurat maka perlu dilakukan pengujian-pengujian terhadap regresi. Analisis dan pengujian data yang digunakan adalah:

Analisis korelasi

- 1) Analisis korelasi bertujuan untuk mendeteksi adanya multikolinearitas antar variabel prediktor. Untuk mengetahui adanya multikolinear digunakan hipotesis.

2) Pengujian koefisien regresi secara serentak

Untuk menguji keseluruhan pengaruh variabel x terhadap respon BHN, digunakan metode *Analisis of Varians* (ANOVA). Analisis varians ini dipergunakan untuk memecahkan jumlah kuadrat regresi/model dan jumlah kuadrat residual/error. Dalam pengujian ini terdapat tiga kemungkinan yaitu:

- a) Jika angka (p-value) = 0 maka model tersebut dapat diterima secara mutlak.
- b) Jika angkanya $0 < (p\text{-value}) \leq 0,05$ maka model ini dapat diterima karena kemungkinan benar diatas 95%.
- c) Jika angka (p-value) $> 0,05$ maka model tersebut tidak dapat diterima.

3) Pengujian koefisien regresi secara individual

Pengujian ini berguna untuk menentukan penting tidaknya variabel bebas dimasukkan ke dalam model regresi, dengan kata lain apakah koefisien dari variabel bebas berpengaruh terhadap respon/variabel tidak bebas.

4) Pengujian asumsi residual

Residual didefinisikan sebagai perbedaan antara nilai pengamatan (y) dengan nilai taksiran (\hat{y}) setelah model yang sesuai ditetapkan. Secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut $e_1 = y - \hat{y}$. Oleh karena itu di dalam pengujian suatu model, sebelum mengambil keputusan hendaknya asumsi terhadap residual harus dipenuhi terlebih dahulu, adapun asumsi residual yang harus dipenuhi terlebih dahulu, adapun asumsi residual yang harus dipenuhi adalah $\varepsilon \sim IIDN(0, \sigma^2)$.

a) Uji identik

Bertujuan untuk melihat apakah penyebaran diantara residual identik/sama yaitu tidak menunjukkan kecenderungan naik/menurun. Residual dapat dikatakan identik apabila data yang didapat menyebar secara acak disekitar titik nol dan tidak membentuk pola tertentu, maka dapat disimpulkan asumsi residual identik terpenuhi.

b) Uji *independent*

Pemeriksaan asumsi ini bertujuan untuk menjamin bahwa pengamatan dilakukan acak, sehingga antar pengamatan tidak berkorelasi (*independent*).

c) Uji kenormalan residual

Untuk menguji apakah residual terdistribusi normal atau tidak, maka dilakukan pengujian dengan menggunakan *normal probability plot* yang menyatakan probabilitas dari residual suatu respon. Plot menunjukkan residual berdistribusi normal jika membentuk garis lurus dari kiri bawah ke kanan atas.

Rancangan penelitian dapat dilihat pada Tabel 3.1

1) Tabel 3.1 Data Pengujian Kekerasan Untuk Spesimen Sebelum Proses EDM

no	Lokasi pengujian	D (mm)	Kekerasan (BHN)
1	1		
	2		
	3		
	4		
	5		

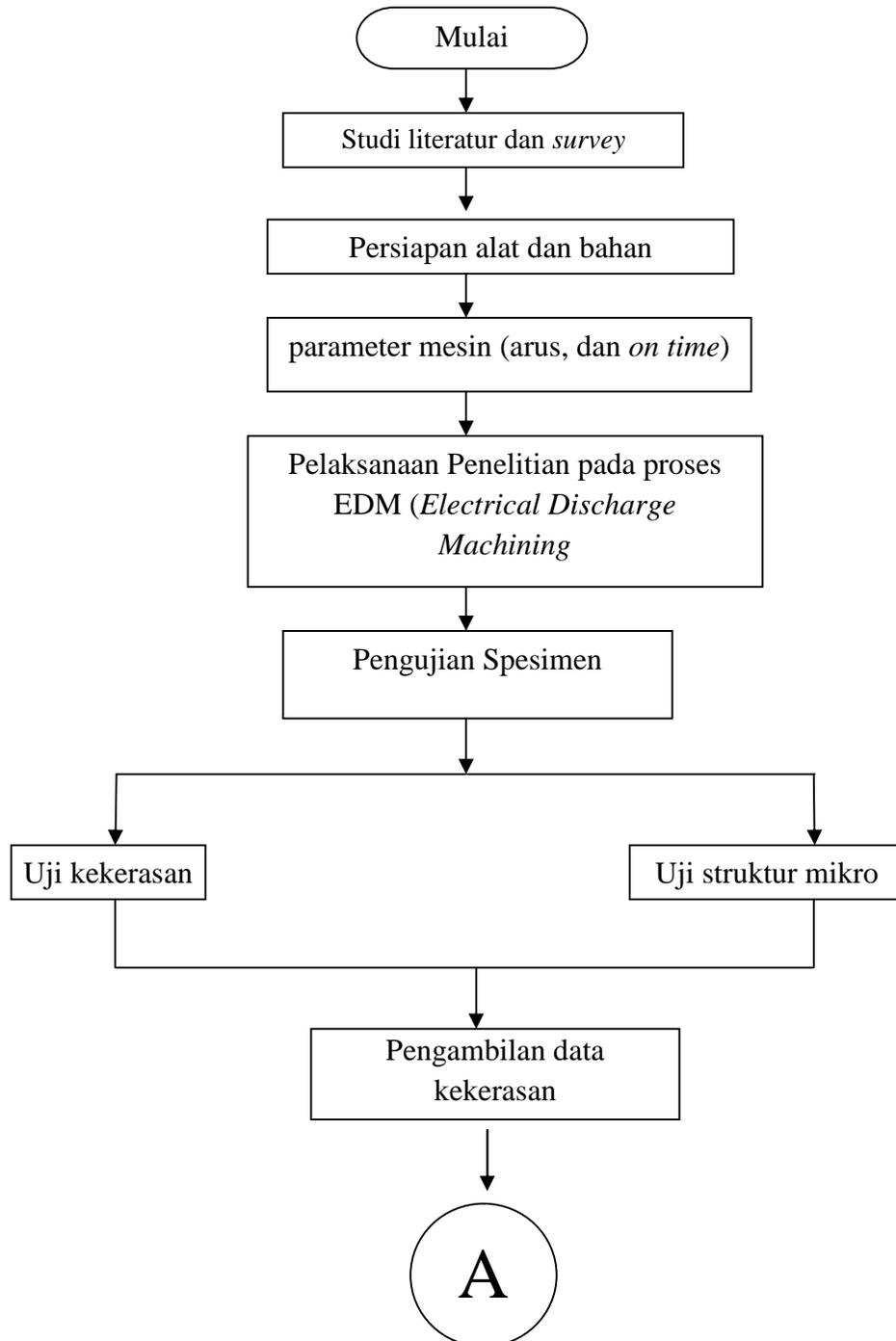
2) Tabel 3.2 Data Pengujian Kekerasan Untuk Spesimen Setelah Proses EDM

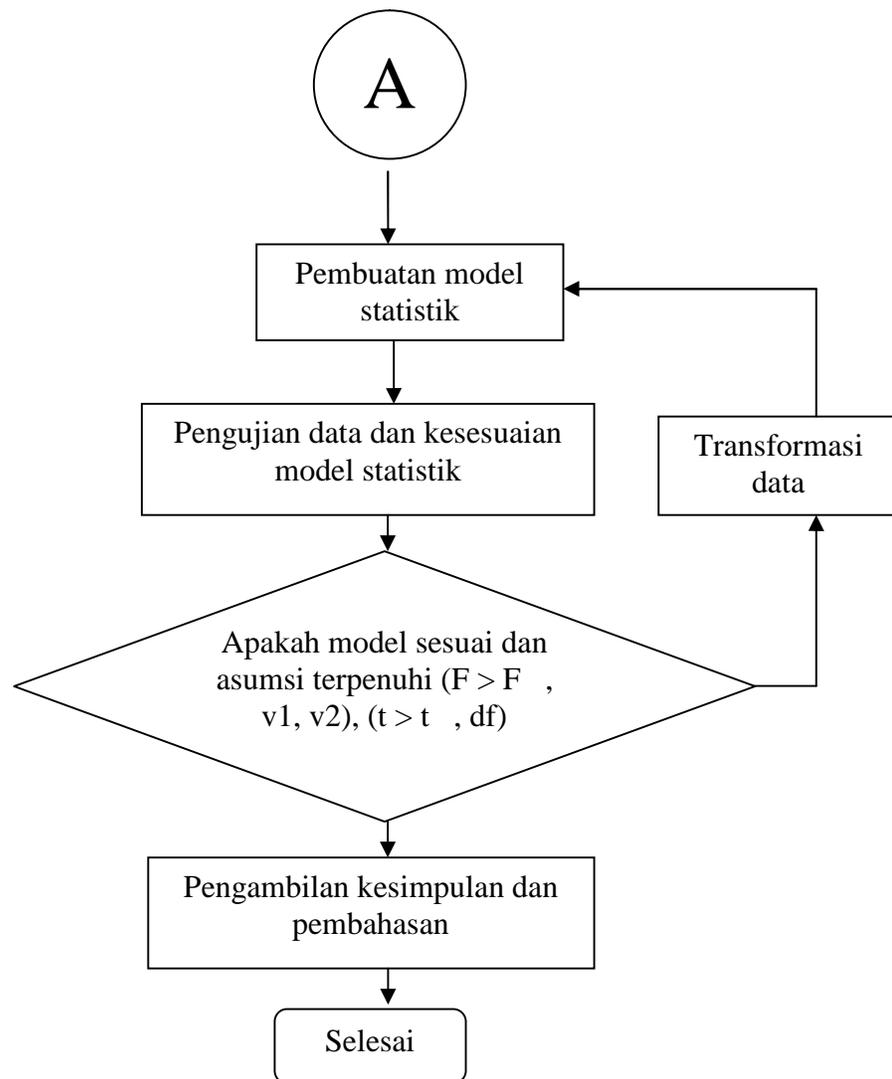
no	Parameter percobaan		Hasil percobaan	
	Arus(A)	on time (μ s)	lokasi pengujian	kekerasan (BHN)
1	6	90	1	
2			2	
3			3	
4			4	
5			5	
6	9	90	1	
7			2	
8			3	
9			4	

No	Parameter Percobaan		Hasil Percobaan	
	Arus (A)	On time	Lokasi pengujian	Kekerasan (BHN)
10	9	90	5	
11	12	90	1	
12			2	
13			3	
14			4	
15			5	
16	6	120	1	
17			2	
18			3	
19			4	
20			5	
21	9	120	1	
22			2	
23			3	
24			4	
25			5	
26	12	120	1	
27			2	
28			3	
29			4	
30			5	
31	6	150	1	
32			2	
33			3	
34			4	
35			5	
36	9	150	1	
37			2	
38			3	
39			4	
40			5	
41	12	150	1	
42			2	

no	Parameter Percobaan		Hasil Percobaan	
	Arus(A)	on time (μ s)	Lokasi pengujian	Kekerasan (BHN)
43			3	
44			4	
45			5	

3.6 Alur Kerja Penelitian





Gambar 3.7 *Flowchart* penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Tinjauan Umum

Bab pembahasan ini akan menjelaskan hubungan antara variabel respons dan variabel prediktor yang telah ditentukan sebelumnya yaitu kekerasan permukaan sebagai variabel respons, arus (I) dan *on time* (A) sebagai variabel prediktor. Variasi parameter sebagai berikut:

- a. Arus : 6, 9, dan 12 Ampere
- b. On time : 90, 120, dan 150 μ s

Untuk mencari hubungan antara kekerasan permukaan, arus, dan *on time*, maka digunakan analisis regresi berganda untuk mendapatkan persamaan. Kemudian untuk mengetahui apakah model persamaan regresi yang didapat benar-benar valid (model persamaan regresi dengan koefisien-koefisiennya sudah dapat dianggap mewakili data-data yang diperoleh melalui penelitian), maka dilakukan pengujian model regresi seperti analisis faktorial, uji kesesuaian model, memeriksa *mean square residual*, memeriksa utilitas model, memeriksa ukuran kecukupan model, memeriksa *unusual observation*, analisis korelasi, pemodelan regresi, dan uji kenormalan residual.

Untuk mempermudah pencarian persamaan dan pengujian model regresi, maka digunakan *software* minitab 14, yaitu *software* khusus untuk mengolah data statistik. Dengan menggunakan perangkat lunak ini, data yang akan diperoleh pada saat penelitian akan diolah dengan cepat dan akurat.

4.2 Data Hasil Percobaan

Untuk mengetahui hubungan antara variabel respons yaitu kekerasan permukaan dan variabel prediktor yaitu arus (I), dan *on time* (A). Sebelum dilakukan proses EDM dilakukan pengujian kekerasan dengan hasil seperti disajikan pada table

4.1. Data saat penelitian atau setelah dilakukan proses EDM akan dianalisis secara statistik. Data yang diperoleh disajikan pada tabel 4.2:

Tabel 4.1. Data pengujian kekerasan untuk spesimen logam induk sebelum dimesin.

no	Lokasi pengujian	D (mm)	Kekerasan (BHN)
1	1	1,20	150
	2	1,20	145
	3	1,20	180
	4	1,20	170
	5	1,20	160

Nilai kekerasan baja AISI H-13:

$$\frac{150 + 145 + 180 + 170 + 160}{5} = \mathbf{160 \text{ BHN}}$$

Jadi harga kekerasan Brinell untuk baja adalah **160 BHN**

Tabel 4.2 Data hasil percobaan

no	Parameter percobaan		Hasil percobaan	
	Arus(A)	on time (μs)	lokasi pengujian	kekerasan rata – rata (BHN)
1	6	90	1	112.3
2	6	90	2	121.6
3	6	90	3	125.6
4	6	90	4	129.6
5	6	90	5	130.6
6	9	90	1	134.3
7	9	90	2	135.3
8	9	90	3	135.6
9	9	90	4	136.6
10	9	90	5	137.6
11	12	90	1	138.3
12	12	90	2	138.6
13	12	90	3	140.3

no	Parameter percobaan		Hasil percobaan	
	Arus(A)	on time (μs)	lokasi pengujian	kekerasan rata – rata (BHN)
14	12	90	4	140.6
15	12	90	5	143.3
16	6	120	1	145
17	6	120	2	146.6
18	6	120	3	148.3
19	6	120	4	148.6
20	6	120	5	150.3
21	9	120	1	150.6
22	9	120	2	152.3
23	9	120	3	155.3
24	9	120	4	155.6
25	9	120	5	156.6
26	12	120	1	157.3
27	12	120	2	157.6
28	12	120	3	158.3
29	12	120	4	163.3
30	12	120	5	165.3
31	6	150	1	165.6
32	6	150	2	166.3
33	6	150	3	169.5
34	6	150	4	170.3
35	6	150	5	170.6
36	9	150	1	172.3
37	9	150	2	173.3
38	9	150	3	174.3
39	9	150	4	175.6
40	9	150	5	176.3
41	12	150	1	178.3

no	Parameter percobaan		Hasil percobaan	
	Arus(A)	on time (µs)	lokasi pengujian	kekerasan rata – rata (BHN)
42	12	150	2	180.6
43	12	150	3	183.3
44	12	150	4	186.3
45	12	150	5	190.6

4.3 Analisis Data Kekerasan Permukaan

Analisis data ini bertujuan untuk mengetahui hubungan dan seberapa kuat hubungan tersebut antara kekerasan permukaan, arus (I), dan *on time* (A). Berdasarkan data yang diperoleh, maka didapatkan analisis regresi sebagaimana tersaji pada tabel 4.3 berikut:

Tabel 4.3 Output analisis regresi berganda

Regression Analysis: bhn versus a; i						
The regression equation is						
bhn = 47,8 + 2,46 a + 0,703 i						
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	VIF	
Constant	47,800	3,325	14,37	0,000		
a	2,4578	0,2188	11,23	0,000	1,000	
i	0,70333	0,02188	32,15	0,000	1,000	
S = 3,59507 R-Sq = 96,5% R-Sq(adj) = 96,3%						
Analysis of Variance						
Source	DF	SS	MS	F	P	
Regression	2	14987,3	7493,6	579,80	0,000	
Residual Error	42	542,8	12,9			
Lack of Fit	6	78,5	13,1	1,01	0,432	
Pure Error	36	464,4	12,9			
Total	44	15530,1				

Output hasil analisis regresi berganda menggunakan minitab 14 terdapat tiga bagian. Bagian pertama adalah tabel persamaan regresi, bagian kedua adalah tabel ANOVA, dan bagian ketiga berisi *unusual observation*.

4.4 Pengujian Model Regresi

4.4.1 Analisis Faktorial

Analisis faktorial yang didapatkan dari data hasil percobaan menggunakan *software* minitab 14 sebagaimana tersaji pada tabel 4.4 berikut:

Tabel 4.4 Hasil analisis desain faktorial

General Linear Model: bhn versus a; i						
Factor	Type	Levels	Values			
a	fixed	3	6; 9; 12			
i	fixed	3	90; 120; 150			
Analysis of Variance for bhn, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
a	2	1635,6	1635,6	817,8	63,40	0,000
i	2	13357,7	13357,7	6678,9	517,80	0,000
a*i	4	72,4	72,4	18,1	1,40	0,252
Error	36	464,4	464,4	12,9		
Total	44	15530,1				
S = 3,59147 R-Sq = 97,01% R-Sq(adj) = 96,35%						
Unusual Observations for bhn						
Obs	bhn	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	112,300	123,940	1,606	-11,640	-3,62	R
5	130,600	123,940	1,606	6,660	2,07	R
45	190,600	183,820	1,606	6,780	2,11	R
R denotes an observation with a large standardized residual.						

Tabel 4.4 adalah output dari hasil analisis desain faktorial menggunakan *software* minitab 14. Tabel 4.4 menunjukkan keterangan mengenai variabel prediktor, yaitu *on time* (A), dan arus (I), masing-masing mempunyai 3 level faktor. Untuk *On time* mempunyai 3 faktor yaitu 90, 120, dan 150 μ s. Dan arus mempunyai 3 faktor yaitu 6, 9, dan 12 A. Di bawah baris faktor terdapat tabel ANOVA yang digunakan untuk mengetahui pengaruh antara kekerasan permukaan dengan arus, dan *on time*. Untuk mengetahui pengaruh-pengaruhnya maka hipotesisnya adalah:

$$H_0 : F = 0 \text{ (variabel prediktor tidak berpengaruh terhadap variabel respons)}$$

$H_1 : F \neq 0$ (variabel prediktor berpengaruh terhadap variabel respons)

Dari tabel 4.4 dapat diketahui nilai F untuk masing-masing variabel prediktor adalah 63,4; 517,8. Dan p-value untuk semua variabel prediktor bernilai 0,000. Maka kesimpulannya adalah menolak hipotesis awal yang berarti arus dan *on time* tidak berpengaruh terhadap kekerasan permukaan. Sehingga menerima hipotesis alternatif yang berarti arus dan *on time* berpengaruh cukup signifikan terhadap kekerasan permukaan.

4.4.2 Uji Kesesuaian Model

Hipotesis untuk uji kesesuaian model adalah:

H_0 : Ada salah satu parameter model (β_0 , β_1 , β_2 , dan β_3) bernilai nol.

H_1 : Parameter model (β_0 , β_1 , β_2 , dan β_3) tidak ada yang bernilai nol.

Hipotesis awal berarti model yang dibuat tidak sesuai dengan data. Sebaliknya, hipotesis alternatif berarti model yang dibuat sesuai dengan data.

Pada analisis ini diperoleh persamaan kekerasan = $47,800 + 2,4578 a + 0,70333 I$ seperti yang ditunjukkan pada tabel 4.3. Hal menunjukkan bahwa tidak ada parameter model yang bernilai nol, ini berarti model menolak hipotesis awal.

Uji kesesuaian model menggunakan statistik F. Daerah penolakannya adalah:

$$F > F_{(\alpha, v_1, v_2)}$$

Level toleransi (α) dalam uji hipotesis adalah 0,05, $v_1 = 2$, $v_2 = (n - (k + 1)) = (45 - (2 + 1)) = 42$. Nilai statistik $F_{(0,05,2,42)}$ dapat dilihat pada tabel distribusi.

Berdasarkan tabel, kita dapat mengetahui $F_{(0,05,2,42)}$ sebesar 3,222. Tabel 4.3 menunjukkan statistik F pada ANOVA sebesar 579,80. Karena statistik F pengamatan lebih besar dari $F_{(0,05,2,42)}$, maka kesimpulannya adalah menolak hipotesis awal dan

menerima hipotesis alternatif. Berdasarkan kesimpulan, kita mengetahui bahwa model regresi linier yang dibuat telah mewakili data.

Selain menggunakan statistik F, uji kesesuaian model bisa pula menggunakan p-value. Daerah penolakannya adalah:

$$P\text{-value} <$$

Pada analisis regresi ini menggunakan level toleransi () sebesar 0,05. Tabel ANOVA pada Tabel 4.3 menunjukkan nilai p-value sebesar 0,000. $P\text{-value } 0,000 < 0,05$, ini berarti menunjukkan bahwa model regresi linier yang telah dibuat bisa dikatakan telah mewakili data yang ada.

4.4.3 Memeriksa *Mean Square Residual*

Pada model regresi, ada asumsi bahwa distribusi residual mengikuti distribusi normal dengan rata-rata dan standar deviasi sekecil mungkin. Semakin kecil standar deviasi residual berarti nilai taksiran model semakin mendekati nilai sebenarnya.

Dalam regresi, ada istilah *mean square error* (MSE) yang merupakan varian residual (S^2). Varian residual adalah kuadrat standar deviasi. Tabel 4.3 menunjukkan nilai MSE untuk model yang telah dibuat adalah 12,9. Jadi nilai standar deviasi model adalah:

$$s = \sqrt{12,9} = 3,59$$

4.4.4 Memeriksa Utilitas Model

Hubungan antara kekerasan permukaan dengan arus dan on time perlu diperiksa secara statistik. Oleh karena itu, parameternya perlu diuji dan dibandingkan dengan level toleransi () yang ditentukan. *Output* uji parameter model dapat dilihat kembali pada tabel 4.3.

Uji parameter model menggunakan statistik t. Tahap-tahap dalam uji hipotesis untuk melakukan uji parameter model adalah:

$$H_0 : \beta_1, \beta_2 = 0$$

$$H_1 : \beta_1, \beta_2 \neq 0$$

Dugaan awal (H_0) pada hipotesis adalah bahwa parameter β_1, β_2 , ($\beta_1, \beta_2 = 0$) tidak ada dalam model regresi dan dugaan alternatif adalah parameter β_1, β_2 ($\beta_1, \beta_2 \neq 0$) ada dalam model.

Daerah penolakannya adalah: $t > t_{(\alpha, df)}$. Dalam hal ini, df (derajat bebas) didapat dari $n - (k + 1)$. Dalam hal ini, n adalah banyaknya pengamatan dan k adalah banyaknya parameter. Tabel statistik t. Output taksiran parameter pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa statistik t untuk variabel on time dan arus adalah 14,37; 11,23; 32,15. Derajat bebas (df) pada analisis sebesar $n - (k + 1) = 45 - (2 + 1) = 42$. Dari tabel statistik t, diketahui untuk level toleransi sebesar 0,05 dan derajat bebas (df) sebesar 42 ($t_{(0,05; 42)}$) adalah 1,6827. T parameter yang masing-masing **14,37; 11,23; 32,15** $> 1,6827$.

Nilai statistik t bisa dikonversikan ke dalam p-value. Apabila menggunakan p-value, maka daerah penolakannya adalah $p\text{-value} < \text{level toleransi}$ (). Nilai p-value yang ditunjukkan oleh Tabel 4.3 bernilai 0,000; 0,000; 0,000, sedangkan nilai level toleransi sebesar 0,05. Ini berarti nilai p-value parameter yaitu 0,000; 0,000; 0,000 $< 0,05$. Kesimpulannya adalah menolak hipotesis awal. Oleh karena itu, dugaan adanya pengaruh antara kekerasan permukaan dengan arus dan *on time* bisa diterima.

4.4.5 Memeriksa Ukuran Kecukupan Model

Untuk mengukur kecukupan model regresi, dapat diketahui dengan melihat koefisien determinasi (r^2). Koefisien determinasi menjelaskan besarnya variasi respons yang dapat dijelaskan prediktor.

Pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi model adalah 96,5%. Koefisien korelasi (r) yang merupakan akar koefisien determinasi menyatakan

hubungan linier antara kekerasan permukaan dengan arus, dan *on time*. Nilai r berkisar antara 0 sampai 1, dimana semakin mendekati satu berarti hubungan antar variabel semakin kuat. Dalam model ini, koefisien korelasinya sebesar:

$$r = \sqrt{0,965} = 0,98$$

Koefisien menunjukkan bahwa ada hubungan linier yang kuat antara kekerasan permukaan yang dihasilkan dengan arus dan *on time* yang digunakan.

4.4.6 Memeriksa *Unusual Observation*

Unusual observation adalah pengamatan menyimpang dari pengamatan lainnya. Tabel 4.3 juga menampilkan *unusual observation* dari percobaan yang telah dilakukan. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa pengamatan ke-44 menyimpang dari pengamatan lainnya.

4.4.7 Analisis Korelasi

Untuk mendeteksi multikolinearitas antar variabel prediktor, dapat diketahui dengan membuat korelasi antar variabel prediktor. Pada analisis korelasi ini, tidak hanya membuat korelasi antar variabel prediktor, tetapi juga membuat korelasi antara variabel prediktor dan variabel respons. Hipotesisnya adalah:

$$H_0 = \text{Tidak ada korelasi antar variabel}$$

$$H_1 = \text{Ada korelasi antar variabel}$$

Daerah penolakannya adalah menolak hipotesis awal apabila p-value kurang dari . Sebaliknya, gagal menolak hipotesis awal atau menerima hipotesis alternatif apabila p-value melebihi .

Tabel 4.5 Analisis korelasi untuk variabel BHN, *on time*, dan arus

Correlations: bhn; a; i			
	bhn	a	
a	0,324 0,030		
i	0,927 0,000	-0,000 1,000	

Cell Contents: Pearson correlation
P-Value

Tabel 4.5 menunjukkan bahwa tidak ada korelasi antara variabel *on time* dengan arus ditunjukkan dengan nilai korelasi 0,000. Sehingga kesimpulannya adalah menolak hipotesis awal, dan menunjukkan bahwa tidak ada multikolinearitas antara arus, dan *on time*.

4.4.8 Pemodelan Regresi

Pada tabel 4.3 persamaan yang dapat diperoleh melalui analisis regresi linier berganda ini adalah:

$$\text{kekerasan} = 47,800 + 2,457 a + 0,7033 I$$

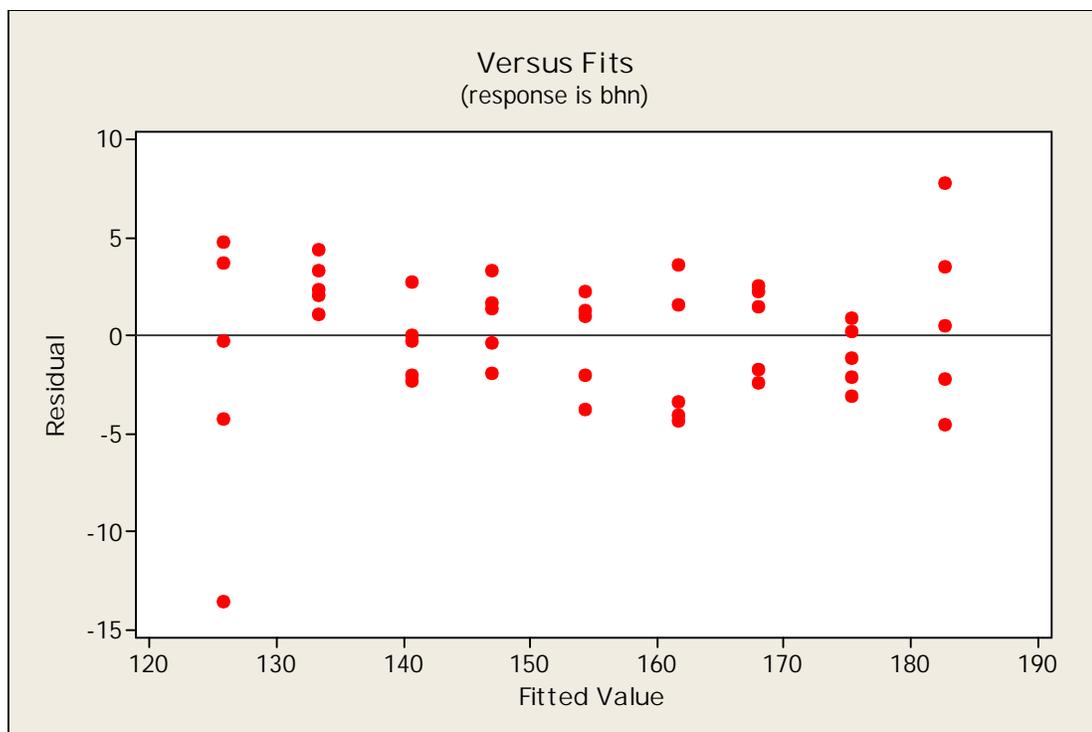
Variance influence factors (VIF) digunakan untuk mengidentifikasi adanya multikolinear dalam model. Mutikolinear adalah suatu keadaan dimana antar variabel prediktor terdapat hubungan sangat erat. Dalam regresi, apabila ada korelasi antar variabel prediktor, maka akan ada ketidaksesuaian model yang telah dibuat. Untuk mengatasinya, diperlukan metode regresi khusus yang mampu menangani kasus multikolinearitas. Diantaranya adalah regresi *stepwise*, *best subset*, *backward elimination*, *forward selection*, dan lain-lain.

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa nilai *variance inflaction factors* sebesar 1,0. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada multikolinearitas atau hubungan yang sangat

erat antar variabel prediktor, dan model yang digunakan sudah sesuai. Apabila $VIF > 1$, berarti ada korelasi antar variabel prediktor sehingga ada ketidaksesuaian model. Ada juga literatur yang menyebutkan apabila VIF lebih dari 5 atau 10, maka taksiran parameter kurang baik.

4.4.9 Uji Identik

Residual adalah jarak antara nilai sebenarnya dengan garis model taksiran. Pengujian varian identik bertujuan untuk memenuhi apakah residual mempunyai penyebaran yang sama. Jika penyebaran datanya acak atau tersebar di sekitar garis nol dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu, maka asumsi identik terpenuhi.

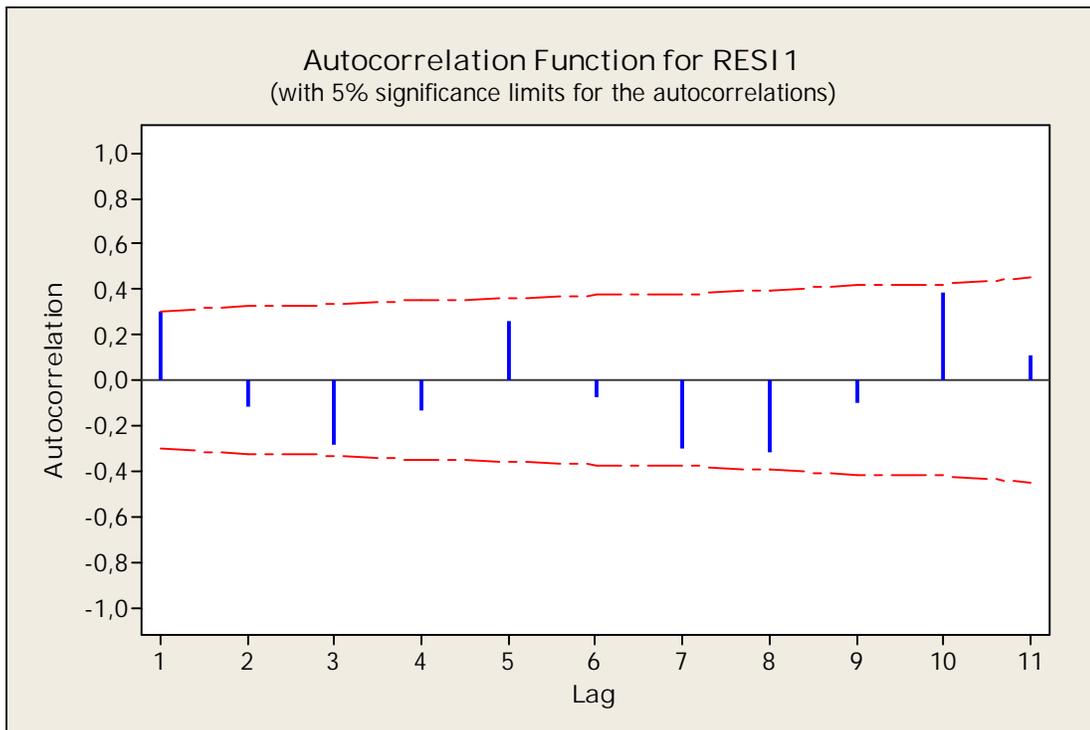


Grafik 4.1 Plot *Residuals Versus the Fitted Values*

Gambar 4.1 menunjukkan bahwa data tersebar acak di sekitar garis nol dan tidak menunjukkan pola-pola tertentu. Hal ini menunjukkan bahwa asumsi bersifat identik terpenuhi.

4.4.10 Uji Independen

Plot *autocorrelation function* yang ditunjukkan pada Gambar 4.2 menunjukkan bahwa tidak ada korelasi antar pengamatan yang dilakukan secara independen terpenuhi. Hal ini dibuktikan dengan semua korelasi berada pada interval $\pm \frac{2}{\sqrt{n}}$, dimana $n = 45$ yang berarti terdapat 45 percobaan.



Grafik 4.2 *Autocorrelation function* (ACF) untuk RESI1

4.4.11 Uji Kenormalan Residual

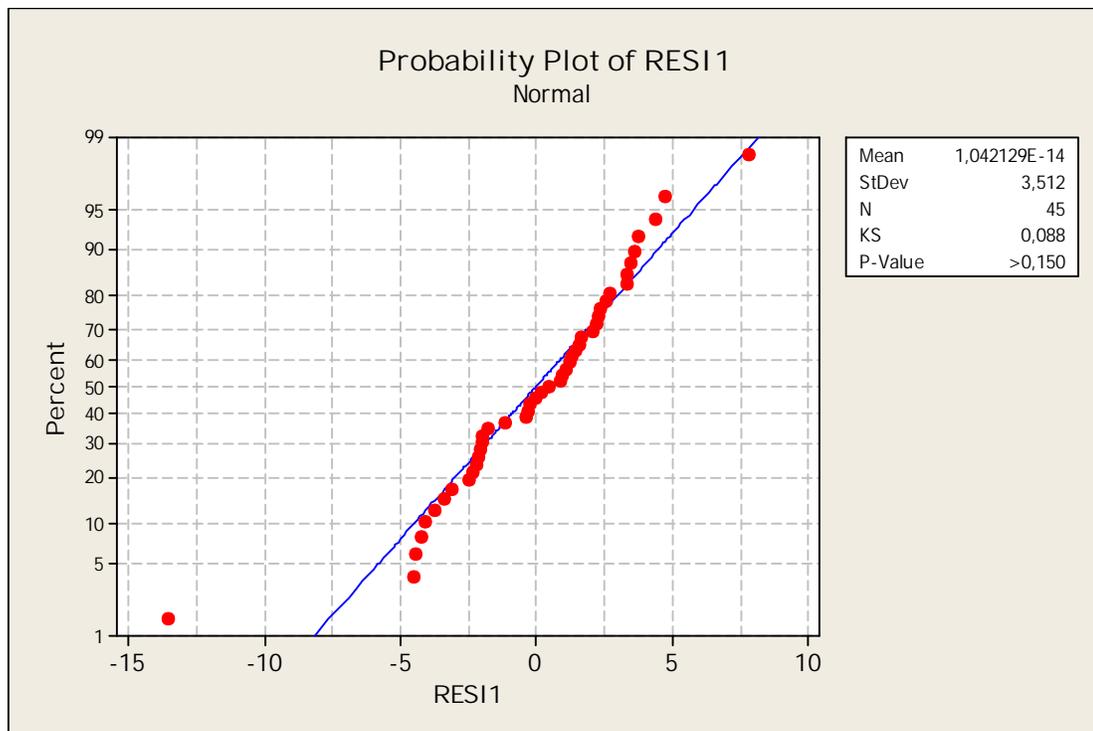
Untuk membuktikan bahwa residual model regresi linier berganda yang dibuat telah mengikuti distribusi normal yang diinginkan sesuai dengan asumsi model regresi, maka perlu dilakukan uji kenormalan residual model. Uji kenormalan residual ini menggunakan Kolmogorov-Smirnov *normality test*. Dengan hipotesis:

$$H_0 = \text{Residual berdistribusi normal}$$

H_1 = Residual tidak berdistribusi normal

Daerah penolakannya adalah $KS > KS_{1-\alpha}$ pada sejumlah pengamatan (n) tertentu. Apabila statistik Kolmogorov-Smirnov dikonversikan ke dalam p-value, maka daerah penolakannya adalah $p\text{-value} < \alpha$.

Pada uji kenormalan ini menggunakan level toleransi (α) sebesar 5% atau 0,05. Dari tabel Kolmogorov-Smirnov, statistik Kolmogorov untuk $n = 45$ sebesar 0,05 dan jumlah pengamatan sebanyak 45 pengamatan adalah 0,2027 (uji 2 arah).



Grafik 4.3 Plot uji distribusi normal

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa titik-titik residual yang dihasilkan mendekati garis lurus yang ditentukan berdasarkan data (residual), maka residual dapat dikatakan telah mengikuti distribusi normal. Gambar 4.3 juga menunjukkan nilai rata-rata sebesar $1,042 \times 10^{-14}$, standar deviasi sebesar 3,5 dan jumlah pengamatan (n) = 45.

Nilai Kolmogorov-Smirnov untuk uji distribusi normal pada gambar 4.3 sebesar 0,088. Nilai Kolmogorov-Smirnov yang di dapat pada percobaan lebih kecil dari pada nilai Kolmogorov-Smirnov yang didapat pada tabel yaitu $0.093 < 0,2027$. Dan untuk p-value untuk uji normal residual grafik melebihi 15%. Maka kesimpulannya adalah menerima hipotesis awal yang berarti residual berdistribusi normal. Asumsi kenormalan residual pada suatu model regresi telah dipenuhi oleh model regresi linier berganda sehingga model regresi yang telah dibuat bisa digunakan.

4.5 Pembahasan Pengaruh Variabel terhadap Kekerasan Permukaan

Berdasarkan persamaan yang didapat secara statistik, semua variabel prediktor yaitu arus (I), dan *on time* (A) berpengaruh terhadap variabel respons yaitu kekerasan permukaan. Nilai kekerasan paling kecil diperoleh pada penggunaan arus sebesar 6 A, dan On time 90 μ s, yaitu sebesar 112,3 BHN. Sehingga nilai kekasaran permukaan paling besar diperoleh pada penggunaan arus sebesar 12 A, dan on time 150 μ s, yaitu sebesar 190,6 BHN.

Penggunaan variasi arus berpengaruh paling besar pada percobaan ini. Berdasarkan percobaan, semakin besar arus yang dipakai, semakin besar pula nilai kekerasan permukaan yang diperoleh. Hal ini disebabkan karena semakin besar arus yang dipakai, maka *spark* (loncatan bunga api listrik) yang dihasilkan akan semakin besar. Sehingga mengakibatkan kawah-kawah pada benda kerja semakin curam, sehingga nilai kekerasan permukaan menjadi meningkat.

Variasi *on time* juga berpengaruh cukup signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan pada proses *electrial discharge machining die sinking*. Semakin besar *on time* yang dipakai, maka nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan akan semakin meningkat pula. Hal ini disebabkan oleh *spark* (loncatan listrik) yang mengalir pada benda kerja akan semakin lama. Akibatnya kawah-kawah yang terbentuk akan semakin curam, sehingga nilai kekasaran permukaan

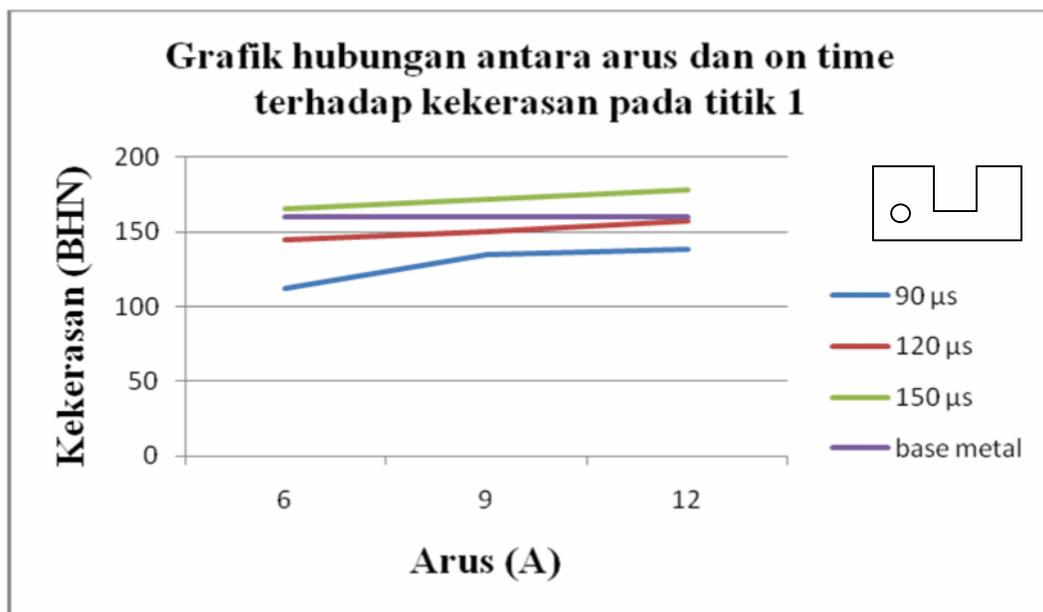
semakin meningkat. Selain itu, lebar gap akan semakin bertambah dengan bertambahnya on time.

Pada penelitian terdahulu juga menyimpulkan percikan listrik atau busur dapat menghasilkan suhu lokal yang tinggi di permukaan pada baja C 3840 sehingga menyebabkan perubahan kekerasan. Kekerasan baja menjadi 63 HRC (Z. Karastojkovic, Z. Janjusevic, 2003)

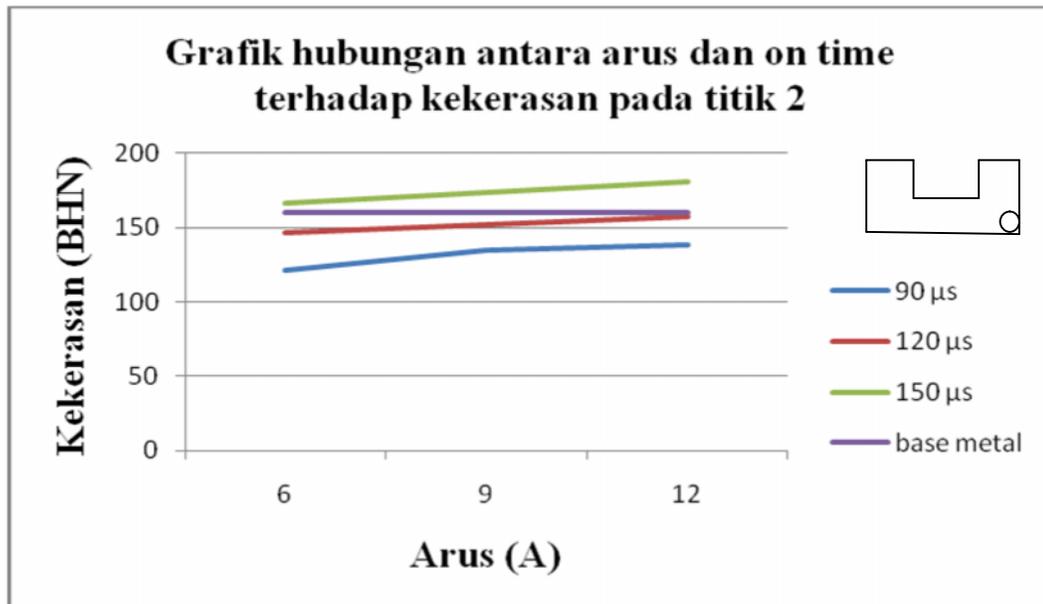
4.6 Analisis Grafik

4.6.1 Grafik Hubungan Arus dan *On Time* terhadap Kekerasan

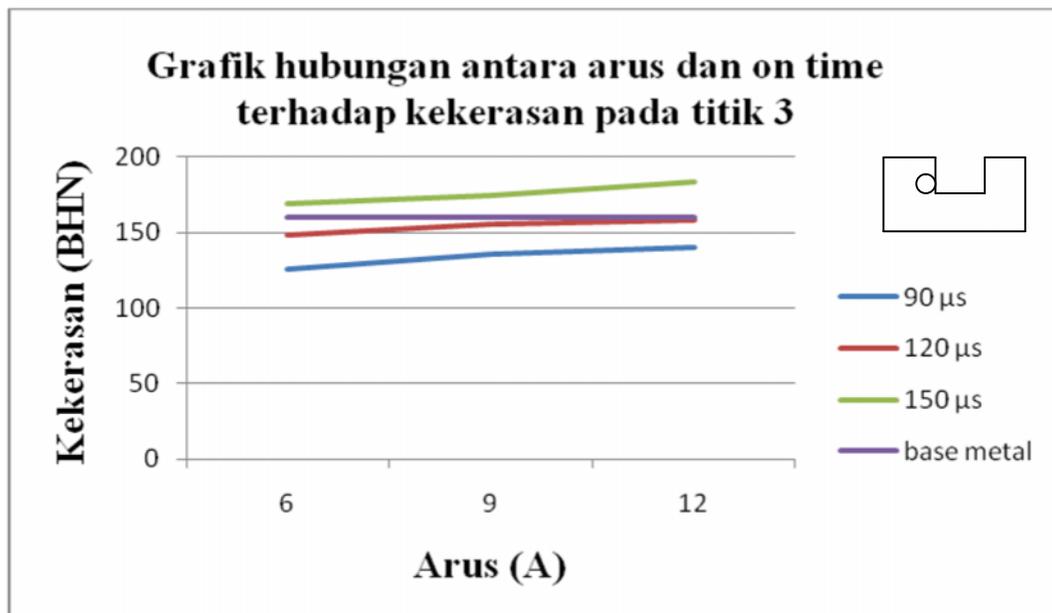
Untuk memudahkan pembacaan mengenai pengaruh antara arus dengan kekerasan permukaan, dari data pada tabel 4.2 dibuatlah grafik hubungan arus dan *on time* terhadap kekerasan pada suatu titik yang telah di tentukan sebagaimana tersaji pada grafik 4.4 sampai 4.8.



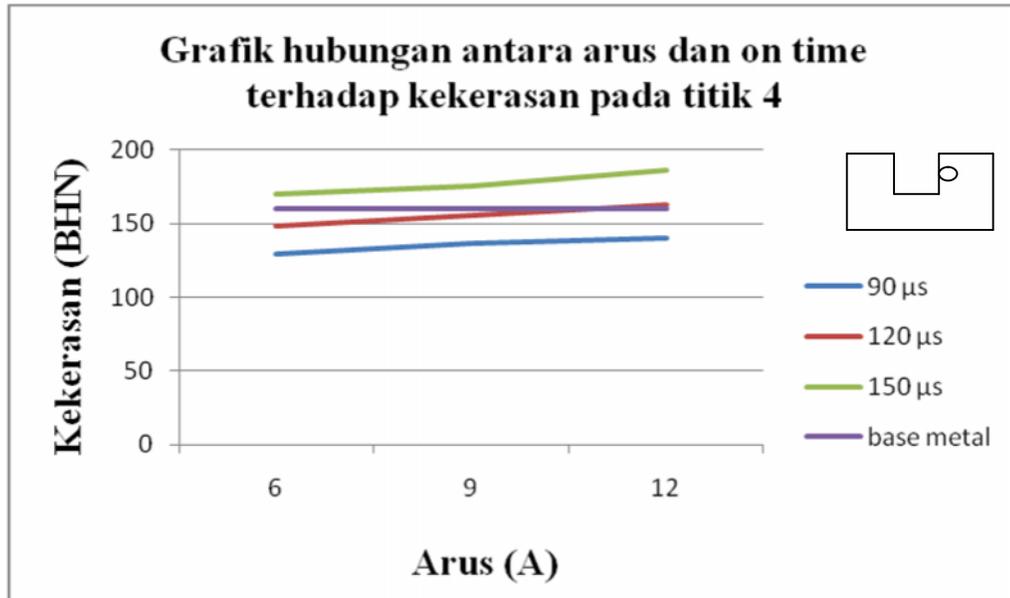
Grafik 4.4 Hubungan antara arus dan *on time* terhadap kekerasan pada titik 1



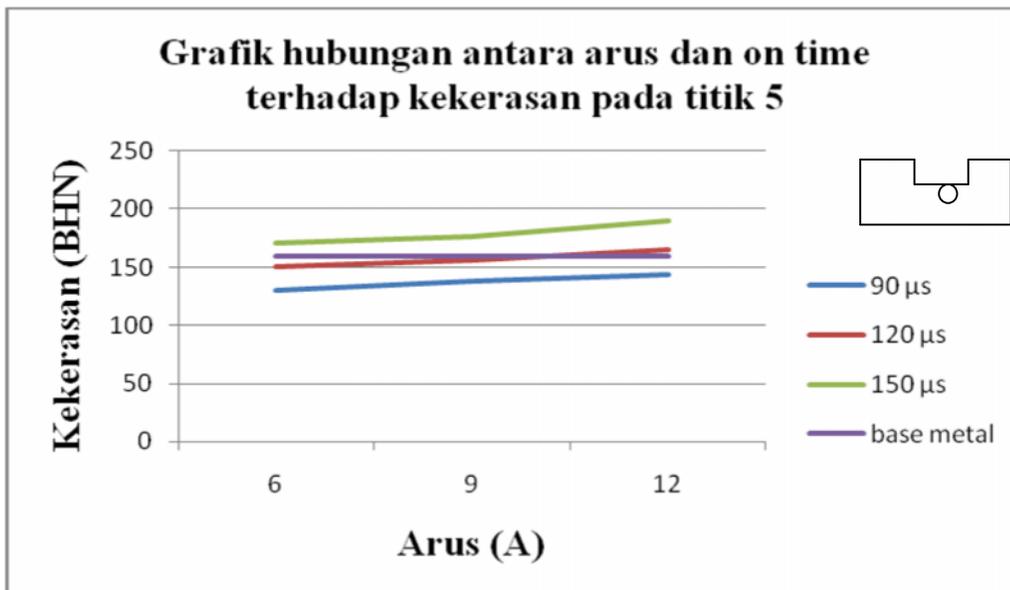
Grafik 4.5 Hubungan antara arus dan *on time* terhadap kekerasan pada titik 2



Grafik 4.6 Hubungan antara arus dan *on time* terhadap kekerasan pada titik 3



Grafik 4.7 Hubungan antara arus dan *on time* terhadap kekerasan pada titik 4



Grafik 4.8 Hubungan antara arus dan *on time* terhadap kekerasan pada titik 5

Dari grafik di atas dapat disimpulkan bahwa pada *on time* 150 μ s kekerasan mengalami kenaikan kekerasan. Hal ini disebabkan pada *on time* 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi yang lebih lama sehingga akan mengalami kenaikan temperatur yang paling tinggi sehingga ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam

transformasi oil) akan mengalami tegangan sisa yang lebih tinggi dan struktur butir yang lebih halus. Sehingga kekerasan selalu lebih tinggi dari base metal. Sebaliknya pada on time yang lebih rendah yaitu 90 dan 120 μ s kekerasan cenderung menurun. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga Struktur lapisan ini akan berubah dengan kekerasan yang sedikit menurun dan struktur butir yang lebih kasar dari base metal. Dari hasil pengujian keduanya berpengaruh baik arus maupun on time baik secara grafis maupun statistik akan tetapi yang paling dominan adalah on time.

4.7 Hasil Uji Mikro

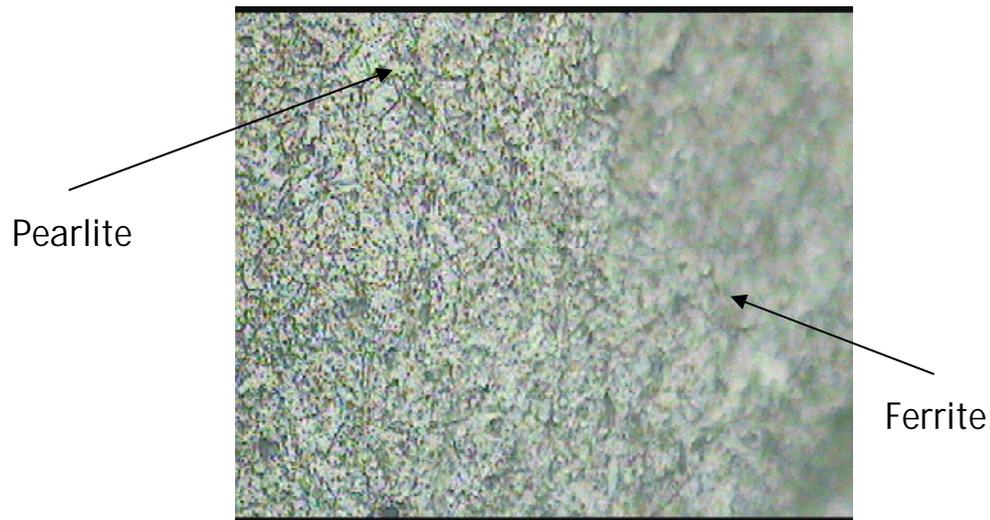
4.7.1 Struktur Mikro Baja Karbon Rendah Tipe AISI H-13 Sebelum Proses EDM

Pada Gambar 4.10 di bawah dapat dilihat struktur mikro pada baja karbon rendah tipe AISI H-13 sebelum EDM. Dari gambar tersebut terlihat bahwa struktur logam tersebut terdiri dari *pearlite* dan *ferrite*. Pada Gambar 4.10 struktur mikro dari *ferrite* berwarna putih dan struktur mikro dari *pearlite* yang berwarna coklat kehitaman.

Struktur *ferrite* tampak lebih dominan dari pada struktur *pearlite* sehingga mengakibatkan kekerasan dari *raw material* menjadi rendah. *Ferrite* ialah suatu komposisi logam yang mempunyai batas maksimum kelarutan Carbon 0,025%C pada temperature 723 derajat Celcius, struktur kristalnya BCC (Body Center Cubic).

Karena baja karbon rendah tipe AISI H-13 sebelum EDM mengandung 0,38% karbon. Pada grafik Fe-Fe₃C baja karbon yang mengandung 0,38%C mempunyai struktur mikro *ferrite* dan *pearlite*. Struktur mikro *ferrite* dan *pearlite* mempunyai sifat lebih lunak dibandingkan dengan baja karbon yang mempunyai struktur mikro *martensit*.

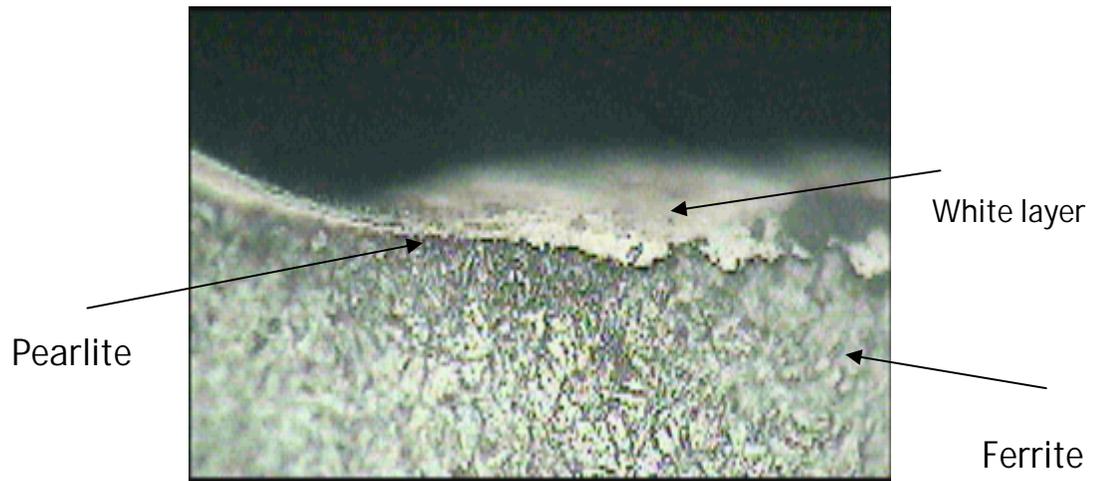
Pada penelitian terdahulu juga menyimpulkan percikan listrik atau busur dapat menghasilkan suhu lokal yang tinggi di permukaan pada baja C 3840 sehingga menyebabkan perubahan dalam struktur yaitu menjadi struktur martensit (Z. Karastojkovic, Z. Janjusevic, 2003)



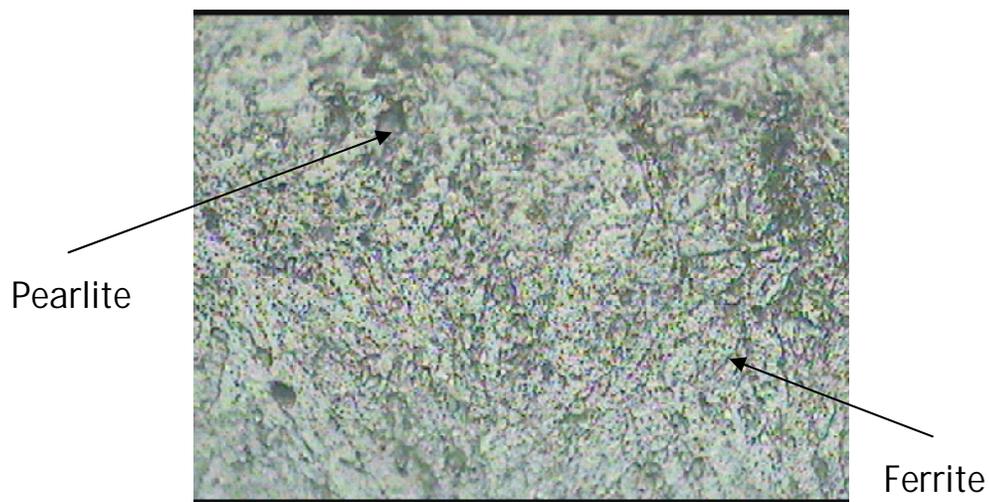
Gambar 4.1 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 sebelum EDM pada pembesaran 500X

4.7.2 Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 6 A

Dari Gambar 4.2 di bawah, dapat disimpulkan bahwa pada arus 6 A dan on time 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Terlihat pada Gambar 4.2 pada titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan pada arus 6 A dan on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) laju pendinginan yang semakin cepat struktur perlit semakin halus dan terjadinya white layer. Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga strukturnya cenderung kasar dari base metal. Dari hasil pengamatan struktur mikro pada titik terdekat dan terjauh permukaan proses sama-sama mengalami perubahan struktur mikro dari base metal. Dimana pada permukaan mempunyai struktur yang lebih halus. Sebaliknya pada titik terjauh memiliki struktur yang lebih kasar dari base metal.



Gambar 4.2 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X



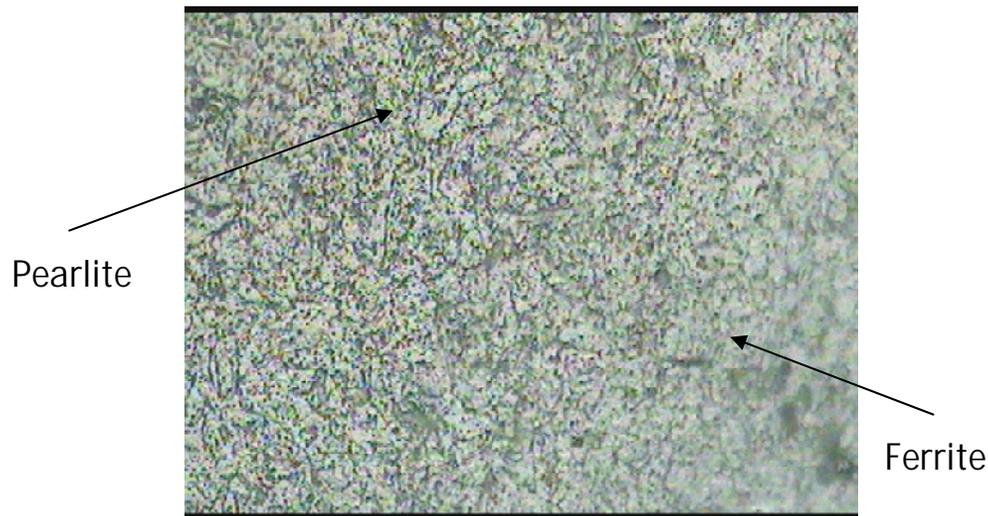
Gambar 4.3 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 6 A Dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

4.7.3 Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 9 A

Dari Gambar 4.4 di bawah, dapat disimpulkan bahwa pada arus 9 A dan on time 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Terlihat pada Gambar 4.4 pada titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan pada arus 9 A dan on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature yang tinggi. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) laju pendinginan yang semakin cepat struktur perlit semakin halus disertai tegangan sisa dan terjadinya white layer. Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga strukturnya lebih cenderung kasar. Dari hasil pengamatan struktur mikro pada titik terdekat dan terjauh permukaan proses sama-sama mengalami perubahan struktur mikro dari base metal. Dimana pada permukaan mempunyai struktur yang lebih halus. Sebaliknya pada titik terjauh memiliki struktur yang lebih kasar dari base metal.



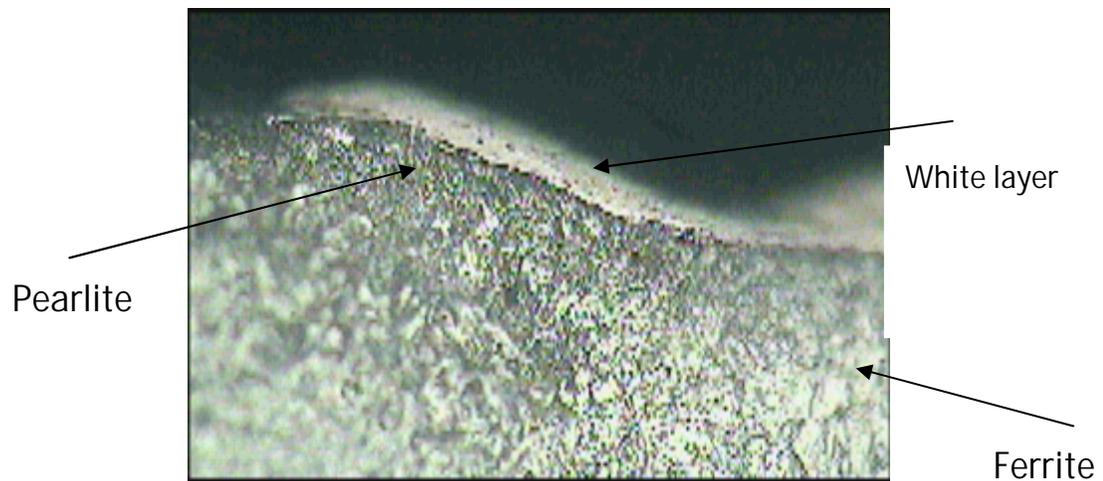
Gambar 4.4 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 9 A dan on time 150 μ s pada pembesaran 500 X



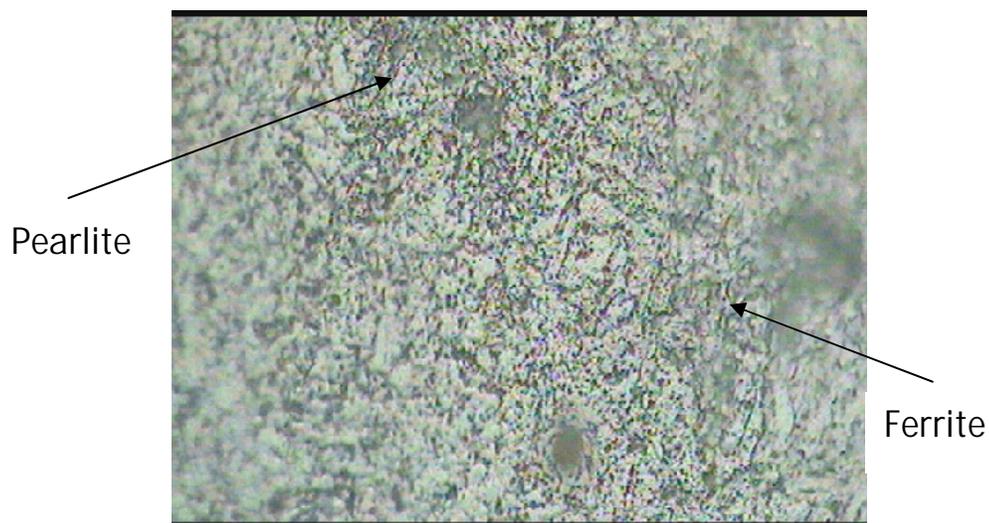
Gambar 4.5 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

4.7.4 Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 12 A

Dari Gambar 4.6 di bawah, dapat disimpulkan bahwa pada arus 12 A dan *on time* 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Terlihat pada Gambar 4.6 pada titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan pada arus 12 A dan *on time* 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature yang paling tinggi. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) laju pendinginan yang semakin cepat struktur perlit semakin halus, tegangan sisa yang lebih tinggi dan terjadinya white layer. Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga strukturnya lebih kasar dari base metal. Dari hasil pengamatan struktur mikro pada titik terdekat dan terjauh permukaan proses sama-sama mengalami perubahan struktur mikro dari base metal. Dimana pada permukaan mempunyai struktur yang lebih halus. Sebaliknya pada titik terjauh memiliki struktur yang lebih kasar dari base metal.



Gambar 4.6 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar 4.7 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

Dari titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 dapat disimpulkan bahwa pada arus 6, 9 dan 12 A dan on time 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Hal ini disebabkan semakin besar arus pada on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature yang lebih tinggi. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) dengan laju pendinginan yang cepat struktur semakin halus, tegangan sisa yang terjadi semakin tinggi dan terjadinya white layer.

Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 pada arus 6, 9 dan 12 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* pada bagian tersebut . Pada bagian ini hanya sedikit mengalami kenaikan temperature. Ketika dilakukan pendinginan dengan laju pendinginan yang rendah mengakibatkan strukturnya cenderung lebih kasar dari base metal.

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian pengaruh arus dan *on time* terhadap sifat mekanik dan struktur mikro permukaan pada proses *electrical discharge Machining die sinking* yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- a. Variabel arus, dan *on time* berpengaruh cukup signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan pada proses *electrical discharge machining die sinking*.
- b. Variabel prediktor mempunyai pengaruh sebesar 96,5% terhadap variabel respons. Hal ini ditunjukkan dengan nilai R-square = 96,5% pada *output* analisis statistik menggunakan *software* minitab 14.
- c. Variabel arus berpengaruh paling besar terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan pada proses *electrical discharge machining die sinking*.
- d. Nilai kekerasan permukaan pada proses diperoleh pada percobaan dengan, nilai arus sebesar 12 A, dan *on time* sebesar 150 μ s yaitu sebesar 190.6 BHN.
- e. Pada *on time* 150 μ s kekerasan mengalami kenaikan kekerasan. Hal ini disebabkan pada *on time* 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi yang lebih lama sehingga akan mengalami kenaikan temperatur yang paling tinggi sehingga ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) akan mengalami tegangan sisa yang lebih tinggi dan struktur butir yang lebih halus. Sehingga kekerasan selalu lebih tinggi dari base metal. Sebaliknya pada *on time* yang lebih rendah yaitu 90 dan 120 μ s kekerasan cenderung menurun. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* sehingga Struktur lapisan ini akan berubah dengan kekerasan yang sedikit menurun dan struktur butir yang lebih kasar dari base metal. Dari hasil pengujian keduanya berpengaruh baik arus maupun *on time* baik secara grafis maupun statistik akan tetapi yang paling dominan adalah *on time*.

- f. Dari titik terdekat permukaan proses yaitu pada titik 5 dapat disimpulkan bahwa pada arus 6, 9 dan 12 A dan on time 150 μ s mengalami perubahan jumlah ferit dan ukuran butir. Hal ini disebabkan semakin arus pada on time 150 μ s akan terjadi proses penambahan energi sehingga akan mengalami kenaikan temperature yang lebih tinggi. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) dengan laju pendinginan yang semakin cepat struktur semakin halus, tegangan sisa yang semakin tinggi dan terjadinya white layer.
- g. Sebaliknya pada titik terjauh permukaan proses yaitu pada titik 2 pada arus 6, 9 dan 12 mengalami perubahan struktur mikro. Hal ini disebabkan terjadinya *annealing* pada bagian tersebut. Pada bagian ini hanya sedikit mengalami kenaikan temperature. Ketika dilakukan *quenching* (terbenam dalam transformasi oil) dengan laju pendinginan yang semakin cepat dapat menghilangkan struktur pada bagian baja tersebut mengakibatkan strukturnya cenderung kasar dari base metal.

5.2 Saran

Dari hasil penelitian pengaruh proses EDM terhadap kekerasan dan struktur mikro specimen yang telah dilakukan ternyata membutuhkan penelitian yang lebih lanjut. Oleh karena itu masih banyak penyempurnaan yang perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil yang memuaskan, antara lain:

- a) Pada penelitian selanjutnya mencoba memakai bahan baja karbon tinggi atau sedang sehingga nantinya banyak diaplikasikan hasilnya.
- b) Masih banyak respon yang perlu ditinjau seperti *material removal rate*, *over cut*, dan keausan dan kekasaran permukaan *electrode*.
- c) Variabel yang dipakai pada penelitian ini adalah arus dan *on time*. Masih banyak variabel lain seperti polaritas, dan cairan dielektrik.
- d) Pada uji kekerasan sebaiknya menggunakan mikro vickers.

DAFTAR PUSTAKA

- Atlantika, J. 1993. *Analisa RMR dan Kekasaran Permukaan dengan Metode Respon Surface*. Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- Bagiasna, Komang. 1987. *Proses-Proses Permesinan Non Konvensional*. Diktat Teknologi Mekanik II. ITB.
- Brink D., EDM: Principles of Operation, EDM Technology Transfer. <http://www.edmtt.com>, diakses tahun 2007.
- Darsin, Mahros. 2010. *Proses Permesinan Nonkonvensional*. Penerbit Jember University Press. Jember.
- Dauw D.F., et al., 1990, Surface topography investigations by fractal analysis of spark eroded electrically conductive ceramics, Ann. CIRP 39 (1) 161–165.
- Grover, Mikel P. 1996. *Fundamental Of Modern Manufacturing Materials Processes and System*. Prentice Hall Inc. New Jersey.
- Partono, Patna. dan Riyadi, Tri Widodo Besar. 2008. *Studi Proses Electrical Discharge Machining dengan Electrode Tembaga*. Media Mesin Vol. 9. Jurusan Teknik Mesin UNMUH. Surakarta.
- Rachmat, Andrianto. 2010. *Pengaruh Bahan Electrode, Arus, dan On Time terhadap Nilai Kekasaran Permukaan Pada Proses Electrical Discharge Machining Die Sinking*. Tugas akhir yang tidak dipublikasikan. Jurusan Teknik Mesin UNEJ. Jember.
- Sapto, Bejo T. 2001. *Optimasi Laju Keausan Elektroda, Kekasaran Permukaan dan Overcut pada Proses EDM dengan Metode Taguchi Multi Respon*. Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.

- Setiawan, C. 1996. *Analisa RMR Benda Kerja dan Elektroda pada Proses EDM dengan Metode Fraksional Faktorial*. Tugas Akhir yang tidak dipublikasikan. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- Suhardjono, 2004. *Pengaruh Arc On dan Arc Off terhadap Kekasaran Permukaan dan Laju Pembuangan Geram Hasil Pemesinan Sinking EDM*. Jurnal Teknik Mesin Vol. 6. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- Suhardjono, Bambang Pramujati, Winarto. 2010. *Studi Eksperimen Pengaruh Variasi Tegangan terhadap Spark Gap Pada Proses EDM Sinking*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9. Palembang
- Suhermawan, Wahid. 2004. *Pengetahuan Bahan*. Jurusan Teknik Mesin ITS. Surabaya.
- Z. Karastojkovic. 2003. *Hardness and structure changes at surface in Electrical discharge machined steel c 3840*. Polytechnic Academy. High Technical School. 11070 Novi Beograd. Bui. Avnoja 152.

**LAMPIRAN A. TABEL SET UP PARAMETER MESIN EDM
REKOMENDASI MANUAL BOOK**

Para. block	electrode	workpiece	area	Para. block	electrode	workpiece	area
1	copper	steel	1~5 mm ²	26	copper	steel	mm ²
2	copper	steel	1~10 mm ²	27	copper	steel	mm ²
3	copper	steel	10~15 mm ²	28	copper	steel	mm ²
4	copper	steel	15~20 mm ²	29	copper	steel	mm ²
5	copper	steel	20~30 mm ²	30	copper	steel	mm ²
6	copper	steel	30~40 mm ²	31	copper	steel	mm ²
7	copper	steel	40~50 mm ²	32	copper	steel	mm ²
8	copper	steel	50~60 mm ²	33	copper	steel	mm ²
9	copper	steel	60~80 mm ²	34	copper	steel	mm ²
10	copper	steel	80~100 mm ²	35	copper	steel	mm ²
11	copper	steel	100~200 mm ²	36	copper	steel	mm ²
12	copper	steel	200~300 mm ²	37	copper	steel	mm ²
13	copper	steel	400~500 mm ²	38	copper	steel	mm ²
14	copper	steel	500~700 mm ²	39	copper	steel	mm ²
15	copper	steel	700~1000 mm ²	40	copper	steel	mm ²
16	copper	steel	1000~1500 mm ²	41	copper	steel	mm ²
17	copper	steel	1000~1500 mm ²	42	copper	steel	mm ²
18	copper	steel	1500~3000 mm ²	43	graphites	steel	mm ²
19	copper	steel	3000~4500 mm ²	44	graphites	steel	mm ²
20	copper	steel	4500~6000 mm ²	45	graphites	steel	mm ²
21	graphites	steel	100 mm ²	46	steel	steel	mm ²
22	graphites	steel	500 mm ²	47	steel	steel	mm ²
23	steel	steel	1000 mm ²	48	copper	copper	mm ²
24	copper	copper	100 mm ²	49	copper	copper	mm ²
25	copper	tungsten	100 mm ²	50	copper	tungsten	mm ²

①	Depth	T. On	T. Of	L. A.	H. A.	Z Dn	Z Up	GAP.	Pol a
0	-0.050	30	1	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	1	1.5	1	4	5	50	+
2	-0.400	30	1	1.5	1	5	5	50	+
3	-0.900	10	1	1.5	1	4	5	50	+
4	-0.940	8	1	1.5	1	3	5	50	+
5	-0.970	4	1	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	2	1	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
②									
0	-0.050	30	1	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	1	1.5	1	4	5	50	+
2	-0.400	30	1	1.5	1	5	5	50	+
3	-0.900	20	1	1.5	1	4	5	50	÷
4	-0.940	8	1	1.5	1	3	5	50	÷
5	-0.970	6	1	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	4	1	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
③									
0	-0.050	30	1	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	1	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	30	1	3	1	5	5	45	+
3	-0.900	15	1	3	1	4	5	45	+
4	-0.940	10	1	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	8	1	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	6	1	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
④									
0	-0.050	30	1	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	1	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	30	1	3	1	5	5	45	+
3	-0.900	15	1	3	1	4	5	45	+
4	-0.940	10	1	3	1	3	5	45	÷
5	-0.970	8	1	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	6	1	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
⑤									
0	-0.050	30	1	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	60	1	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	90	1	4.5	1	5	5	40	+
3	-0.900	30	1	4.5	1	4	5	40	+
4	-0.940	10	1	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	8	1	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	6	1	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									

⑥	Depth	T. On	T. Of	L. A.	H. A.	Z Dn	Z Up	GAP.	Pola
0	-0.050	30	2	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	2	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	90	2	4.5	1	5	5	40	+
3	-0.900	30	2	4.5	1	4	5	40	+
4	-0.940	2	2	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	10	2	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	8	2	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
⑦									
0	-0.050	30	2	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	2	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	90	2	6	1	5	5	40	+
3	-0.900	30	2	4.5	1	4	5	40	+
4	-0.940	20	2	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	10	2	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	8	2	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
⑧									
0	-0.050	30	2	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	2	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	120	2	6	1	5	5	40	+
3	-0.900	30	2	4.5	1	4	5	40	+
4	-0.940	20	2	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	10	2	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	8	2	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
⑨									
0	-0.050	30	2	1.5	1	3	5	50	+
1	-0.200	30	2	3	1	4	5	45	+
2	-0.400	150	2	6	1	5	5	40	+
3	-0.900	90	2	4.5	1	4	5	40	+
4	-0.940	30	2	3	1	3	5	45	+
5	-0.970	10	2	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	8	2	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									
⑩									
0	-0.050	30	2	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	120	2	6	1	4	5	40	+
2	-0.400	120	2	9	1	5	5	40	+
3	-0.900	90	2	4.5	1	4	5	45	+
4	-0.940	30	2	3	1	3	5	50	+
5	-0.970	10	2	1.5	1	3	5	50	+
6	-1.000	8	2	0	1	3	5	50	+
7									
8									
9									

⑪	Depth	T. On	T. Of	L. A.	H. A.	Z Dn	Z Up	GAP.	Pola
0	-0.050	30	3	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	90	3	4.5	1	4	5	40	+
2	-0.400	120	3	6	1	5	5	40	+
3	-0.600	120	3	9	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑫									
0	-0.050	60	3	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	90	3	4.5	1	4	5	40	+
2	-0.400	120	3	6	1	5	5	40	+
3	-0.600	150	3	12	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑬									
0	-0.050	60	3	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	90	3	6	1	4	5	40	+
2	-0.400 ✓	120	3	9	1	5	5	40	+
3	-0.600	120	3	12	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑭									
0	-0.050	60	3	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	90	3	6	1	4	5	40	+
2	-0.400	120	3	9	1	5	5	40	+
3	-0.600	300	3	15	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑮									
0	-0.050	60	3	3	1	3	5	45	+
1	-0.200	90	3	6	1	4	5	40	+
2	-0.400	150	3	9	1	5	5	40	+
3	-0.600	400	3	15	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+

⑮	Depth	T. On	T. Of	L. A.	H. A.	Z Dn	Z Up	GAP.	Pol a
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	90	2	9	1	4	5	40	+
2	-0.400	150	2	12	1	5	5	40	+
3	-0.600	400	2	21	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑰									
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	150	2	9	1	4	5	40	+
2	-0.400	400	2	12	1	5	5	40	+
3	-0.600	500	2	21	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑮									
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	150	2	9	1	4	5	40	+
2	-0.400	500	2	21	1	5	5	40	+
3	-0.600	500	2	30	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑰									
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	150	2	21	1	4	5	40	+
2	-0.400	500	2	30	1	5	5	40	+
3	-0.600	600	2	45	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
⑰									
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	300	2	15	1	4	5	40	+
2	-0.400	600	2	30	1	5	5	40	+
3	-0.600	800	2	60	1	7	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	6	5	40	+
5	-0.840	30	3	6	1	5	5	40	+
6	-0.900	20	4	4.5	1	4	5	40	+
7	-0.940	15	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+

②	Depth	T. On	T. Of	L. A.	H. A.	Z Dn.	Z Up	GAP.	Pol a
0	-0.050	60	3	3	1	2	5	45	+
1	-0.200	60	3	6	1	3	5	40	+
2	-0.400	90	3	9	1	4	5	40	+
3	-0.600	150	3	12	1	5	5	40	+
4	-0.780	90	3	9	1	4	5	40	+
5	-0.840	60	3	6	1	3	5	40	+
6	-0.900	30	4	4.5	1	3	5	40	+
7	-0.940	30	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	30	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	30	5	0	1	3	5	50	+
②②									
0	-0.050	60	2	6	1	3	5	40	+
1	-0.200	90	2	9	1	4	5	40	+
2	-0.400 ✓	150	2	12	1	5	5	40	+
3	-0.600	200	2	21	1	6	5	40	+
4	-0.780	150	3	9	1	5	5	40	+
5	-0.840	90	3	6	1	4	5	40	+
6	-0.900	60	4	4.5	1	3	5	40	+
7	-0.940	30	4	3	1	3	5	45	+
8	-0.970	30	5	1.5	1	3	5	50	+
9	-1.000	30	5	0	1	3	5	50	+
②③									
0	-0.050	150	3	6	1	5	5	40	+
1	-0.200	150	3	9	1	5	5	40	+
2	-0.400 ✓	150	3	12	1	6	5	40	+
3	-0.600	200	3	21	1	7	5	40	+
4	-0.840	150	3	12	1	6	5	40	+
5	-0.940	90	3	9	1	5	5	40	+
6	-0.970	90	3	6	1	5	5	40	+
7	-1.000	90	3	0	1	5	5	40	+
8									
9									
②④									
0	-0.050	20	5	1.5	1	2	5	50	+
1	-0.200	30	5	3	1	2	5	45	+
2	-0.400	60	5	6	1	3	5	40	+
3	-0.600	90	5	9	1	4	5	40	+
4	-0.840	60	6	6	1	3	5	40	+
5	-0.940	30	6	3	1	3	5	45	+
6	-0.970	20	7	1.5	1	3	5	50	+
7	-1.000	10	7	0	1	3	5	50	+
8									
9									
②⑤									
0	-0.050	20	3	3	1	2	5	45	+
1	-0.200	30	3	6	1	3	5	40	+
2	-0.400	60	4	9	1	4	5	40	+
3	-0.600	150	4	12	1	5	5	40	+
4	-0.780	60	5	9	1	4	5	40	+
5	-0.840	30	5	6	1	3	5	40	+
6	-0.940	20	5	3	1	3	5	45	+
7	-0.970	10	5	1.5	1	3	5	50	+
8	-1.000	8	5	0	1	3	5	50	+
9									

LAMPIRAN B. TABEL SET UP PARAMETER EDM DIE SINKING

No.	Electrode	On Time	Off Time	I	V	Z Dn	Z Up	Gap	Pol
1	Tembaga	90	1	6	1	3	3	1	+
2	Tembaga	90	1	9	1	3	3	1	+
3	Tembaga	90	1	12	1	3	3	1	+
4	Tembaga	120	1	6	1	3	3	1	+
5	Tembaga	120	1	9	1	3	3	1	+
6	Tembaga	120	1	12	1	3	3	1	+
7	Tembaga	150	1	6	1	3	3	1	+
8	Tembaga	150	1	9	1	3	3	1	+
9	Tembaga	150	1	12	1	3	3	1	+

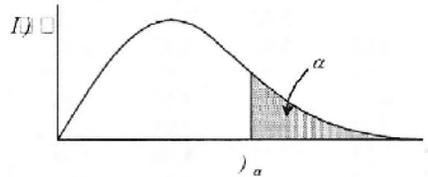
LAMPIRAN C. HASIL PERCOBAAN KEKERASAN PERMUKAAN

Arus (A)	Overtime (us)	Lokasi pengujian	Kekerasan			Rata-rata kekerasan
			1	2	3	
6	90	1	120	108	109	112.3
		2	120	120	125	121.6
		3	125	130	122	125.6
		4	118	145	126	129.6
		5	165	100	127	130.6
9	90	1	150	122	131	134.3
		2	160	115	132	135.3
		3	166	112	135	135.6
		4	152	125	133	136.6
		5	125	155	135	137.6
12	90	1	120	160	135	138.3
		2	130	150	138	138.6
		3	145	140	137	140.3
		4	140	150	140	140.6
		5	160	130	140	143.3
6	120	1	140	140	155	145
		2	140	140	160	146.6
		3	180	120	145	148.3
		4	185	115	143	148.6
		5	155	150	147	150.3
9	120	1	150	155	145	150.6
		2	178	130	149	152.3
		3	190	125	152	155.3
		4	195	130	145	155.6
		5	168	155	156	155.6
12	120	1	148	170	154	157.3
		2	150	175	150	157.6
		3	170	150	155	158.3
		4	150	180	160	163.3
		5	175	160	162	165.3
6	150	1	170	155	169	165.6
		2	158	178	163	166.3
		3	195	185	185	169.5
		4	195	150	167	170.3
		5	200	145	173	170.6
9	150	1	178	170	169	172.3

Arus (A)	On time(us)	Lokasi pengujian	Kekerasan			Rata-rata kekerasan
			1	2	3	
		2	210	140	170	173.3
		3	182	170	171	174.3
		4	180	175	172	175.6
		5	180	176	173	176.3
12	150	1	192	168	175	178.3
		2	190	175	177	180.6
		3	190	180	180	183.3
		4	170	190	180	186.3
		5	185	200	187	190.6

LAMPIRAN D. TABEL DISTRIBUSI

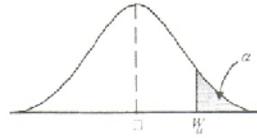
Tabel Distribusi F ($\alpha = 0,05$)



v_2	v_1	Derajat bebas (df) pembilang (v_1)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,9	238,9	240,5
2	1	18,51	19,0	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38
3	1	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81
4	1	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00
5	1	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77
6	1	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10
7	1	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68
8	1	5,30	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39
9	1	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18
10	1	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02
11	1	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90
12	1	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80
13	1	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71
14	1	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65
15	1	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59
16	1	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54
17	1	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49
18	1	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46
19	1	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42
20	1	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39
21	1	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37
22	1	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34
23	1	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32
24	1	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30
25	1	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28
26	1	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27
27	1	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25
28	1	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24
29	1	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22
30	1	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21
40	1	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12
60	1	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04
120	1	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96
∞	1	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88

C.2 Tabel Distribusi t

Tabel Distribusi t



df	α					
	0.25	0.1	0.05	0.025	0.01	0.005
1	1,000	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657
2	0,816	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925
3	0,765	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841
4	0,741	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604
5	0,727	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032
6	0,718	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707
7	0,711	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499
8	0,706	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355
9	0,703	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250
10	0,700	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169
11	0,697	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106
12	0,695	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055
13	0,694	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012
14	0,692	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977
15	0,691	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947
16	0,690	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921
17	0,689	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898
18	0,688	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878
19	0,688	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861
20	0,687	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845
21	0,686	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831
22	0,686	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819
23	0,685	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807
24	0,685	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797
25	0,684	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787
26	0,684	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779
27	0,684	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771
28	0,683	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763
29	0,683	1,311	1,669	2,045	2,462	2,756
30	0,683	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750
40	0,681	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704
60	0,679	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660
120	0,677	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617
∞	0,674	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

df	α							
	0,0025	0,0010	0,0005	0,00025	0,00010	0,00005	0,00025	0,00001
1	127,321	318,309	636,619	1,273,239	3,183,099	6,366,198	12,732,395	31,830,989
2	14,089	22,327	31,598	44,705	70,700	99,992	141,416	233,603
3	7,453	10,214	12,924	16,326	22,204	28,000	35,298	47,928
4	5,598	7,173	8,610	10,306	13,034	15,544	18,522	23,332
5	4,773	5,893	6,869	7,976	9,678	11,178	12,893	15,547
6	4,317	5,208	5,959	6,788	8,025	9,082	10,261	12,032
7	4,029	4,785	5,408	6,082	7,063	7,885	8,782	10,103
8	3,833	4,501	5,041	5,618	6,442	7,120	7,851	8,907
9	3,690	4,297	4,781	5,291	6,010	6,594	7,215	8,102
10	3,581	4,144	4,587	5,049	5,694	6,211	6,757	7,527
11	3,497	4,025	4,437	4,863	5,453	5,921	6,412	7,098
12	3,428	3,930	4,318	4,716	5,263	5,694	6,143	6,756
13	3,372	3,852	4,221	4,597	5,111	5,513	5,928	6,501
14	3,326	3,787	4,141	4,499	4,985	5,363	5,753	6,287
15	3,286	3,733	4,073	4,417	4,880	5,239	5,607	6,109
16	3,252	3,686	4,015	4,346	4,791	5,134	5,484	5,960
17	3,223	3,646	3,965	4,286	4,714	5,044	5,379	5,832
18	3,197	3,610	3,922	4,233	4,648	4,966	5,288	5,722
19	3,174	3,579	3,883	4,187	4,590	4,897	5,209	5,627
20	3,153	3,552	3,850	4,146	4,539	4,837	5,139	5,543
21	3,135	3,527	3,819	4,110	4,493	4,784	5,077	5,469
22	3,119	3,505	3,792	4,077	4,452	4,736	5,022	5,402
23	3,104	3,485	3,768	4,048	4,415	4,693	4,972	5,343
24	3,090	3,467	3,745	4,021	4,382	4,654	4,927	5,290
25	3,0778	3,450	3,725	3,997	4,352	4,619	4,887	5,241
26	3,067	3,435	3,707	3,974	4,324	4,587	4,850	5,197
27	3,057	3,421	3,690	3,954	4,299	4,558	4,816	5,157
28	3,047	3,408	3,674	3,935	4,275	4,530	4,784	5,120
29	3,038	3,396	3,659	3,918	4,254	4,506	4,756	5,086
30	3,030	3,385	3,646	3,902	4,234	4,482	4,729	5,054
40	2,971	3,307	3,551	3,788	4,094	4,321	4,544	4,835
50	2,937	3,261	3,496	3,723	4,014	4,228	4,438	4,711
60	2,915	3,232	3,460	3,681	3,962	4,169	4,370	4,631
70	2,899	3,211	3,435	3,651	3,926	4,127	4,323	4,576
80	2,887	3,195	3,416	3,629	3,899	4,096	4,288	4,535
90	2,878	3,183	3,402	3,612	3,878	4,072	4,261	4,503
100	2,871	3,174	3,390	3,598	3,862	4,053	4,240	4,478
∞	2,807	3,090	3,291	3,481	3,719	3,891	4,056	4,265

C.3 Tabel Kuantil Uji Statistik Kolmogorov-Smirnov

Tabel Kuantil Uji Statistik Kolmogorov - Smirnov

Uji satu arah p	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
Uji dua arah p	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99
n					
1	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
2	0.684	0.776	0.842	0.900	0.929
3	0.565	0.636	0.708	0.785	0.829
4	0.793	0.565	0.624	0.689	0.734
5	0.447	0.509	0.563	0.627	0.669
6	0.410	0.468	0.516	0.577	0.617
7	0.381	0.436	0.483	0.538	0.576
8	0.358	0.410	0.454	0.507	0.542
9	0.339	0.387	0.430	0.480	0.513
10	0.323	0.369	0.409	0.457	0.489
11	0.308	0.352	0.391	0.437	0.468
12	0.296	0.338	0.375	0.419	0.449
13	0.285	0.325	0.361	0.404	0.432
14	0.275	0.314	0.349	0.390	0.418
15	0.266	0.304	0.338	0.377	0.404
16	0.258	0.295	0.327	0.366	0.392
17	0.250	0.286	0.318	0.355	0.381
18	0.244	0.279	0.309	0.346	0.371
19	0.237	0.271	0.301	0.337	0.361
20	0.232	0.265	0.294	0.329	0.352
21	0.226	0.259	0.287	0.321	0.344
22	0.221	0.253	0.281	0.314	0.337
23	0.216	0.247	0.275	0.307	0.330
24	0.212	0.242	0.269	0.301	0.323
25	0.208	0.238	0.264	0.295	0.317
26	0.204	0.233	0.259	0.290	0.311
27	0.200	0.229	0.254	0.284	0.305
28	0.197	0.225	0.250	0.279	0.300
29	0.193	0.221	0.246	0.275	0.295
30	0.190	0.218	0.242	0.270	0.290

Uji satu arah p	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
Uji dua arah p	0.80	0.90	0.95	0.98	0.99
n					
31	0.187	0.214	0.238	0.266	0.285
32	0.184	0.211	0.234	0.262	0.281
33	0.182	0.208	0.231	0.258	0.277
34	0.179	0.205	0.227	0.254	0.273
35	0.177	0.202	0.224	0.251	0.269
36	0.174	0.199	0.221	0.247	0.265
37	0.172	0.196	0.218	0.244	0.262
38	0.170	0.194	0.215	0.241	0.258
39	0.168	0.191	0.213	0.238	0.255
40	0.165	0.189	0.210	0.235	0.252
Pendekatan untuk $n > 40$	$\frac{1,07}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,22}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,36}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,52}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,63}{\sqrt{n}}$

LAMPIRAN E. FOTO-FOTO PENELITIAN

E.1 Foto Mesin EDM dan Proses EDM



Gambar E.1 Mesin EDM *Die Sinking*



Gambar E.2 Mesin EDM *Die Sinking*



Gambar E.3 Proses pengerjaan benda kerja dengan mesin EDM *Die Sinking*



Gambar E.4 Proses pengerjaan benda kerja dengan mesin EDM *Die Sinking*

Foto Alat Uji Struktur Mikro



Gambar E.5 Mesin Poles



Gambar E.6 *Mikroskop Metalografi Olympus BX41M*

Foto Alat Uji Kekerasan



Gambar E.7 Mesin Uji Electric Brinell Hardness Tester Hauser Henry S A

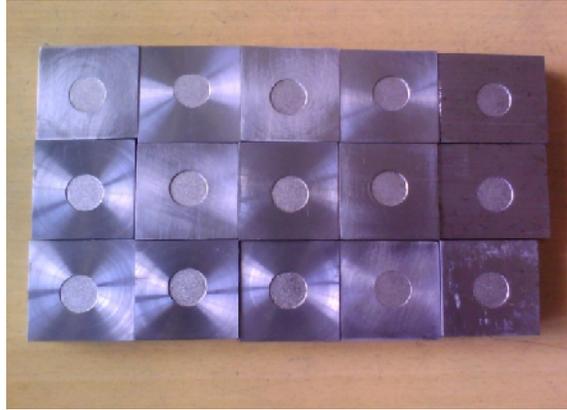
Foto Hasil Pengerjaan EDM dan *Electrode*



Gambar E 8. Elektroda



Gambar E 9. Baja AISI H-13



Gambar E 10. Baja AISI H-13 setelah proses EDM



Gambar E 11. Baja AISI H-13 setelah di potong

F. FOTO HASIL PENELITIAN

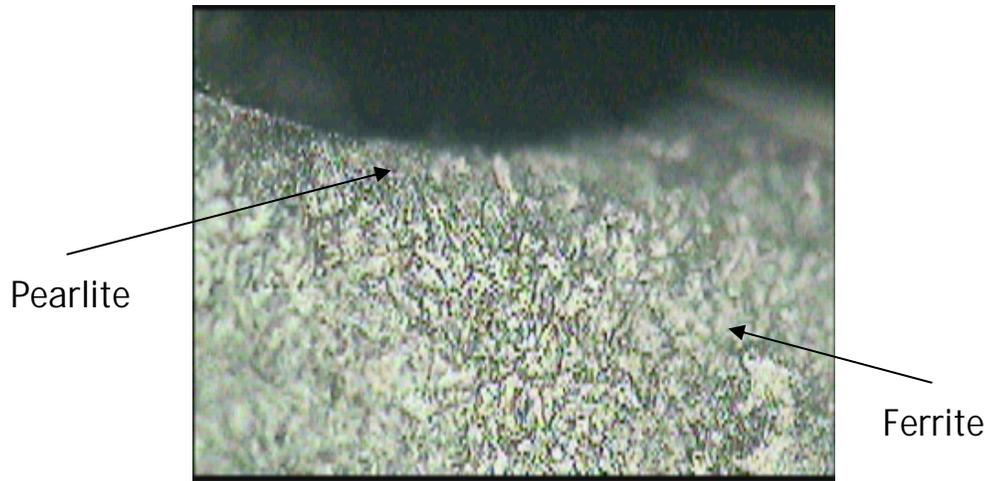
Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 6 A



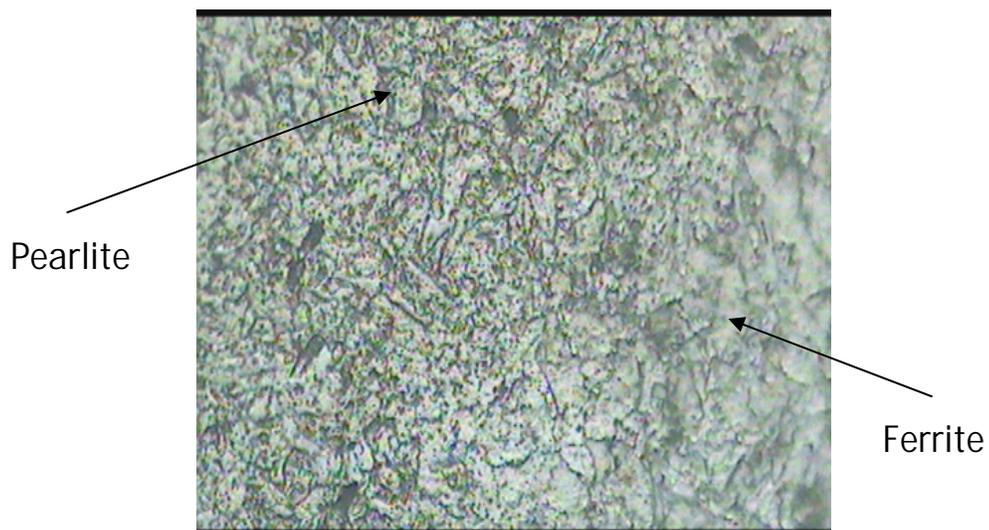
Gambar F.1 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



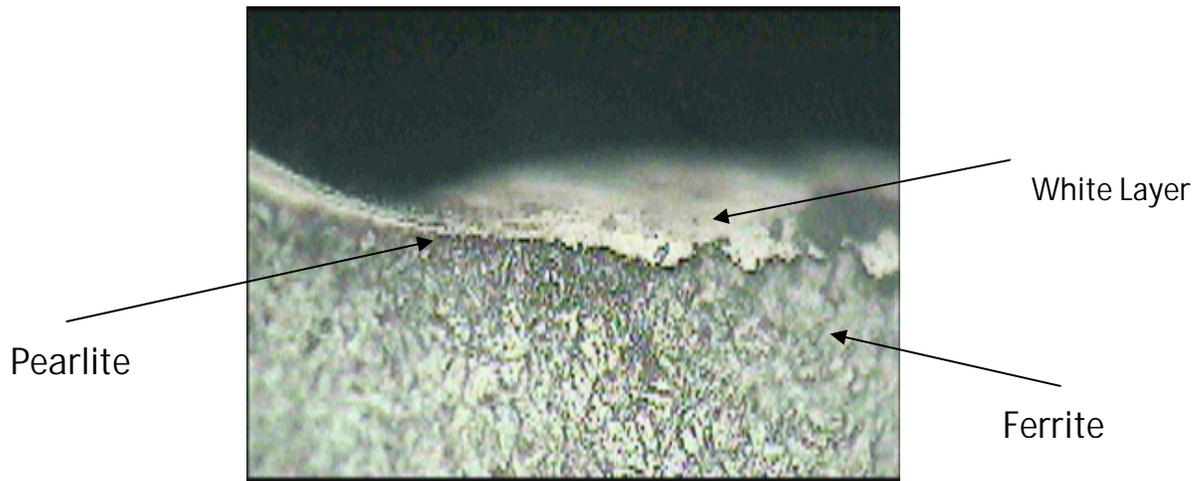
Gambar F.2 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu titik 2 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



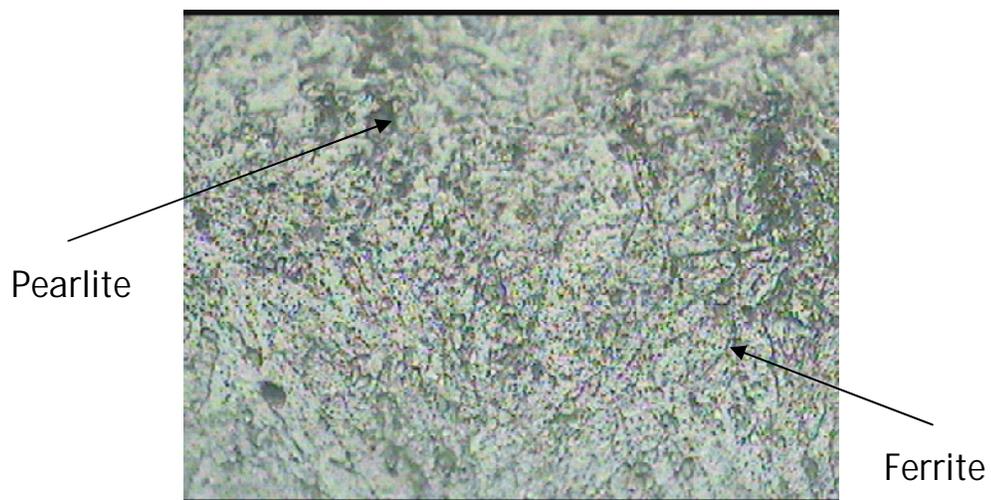
Gambar F.3 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar F.4 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X

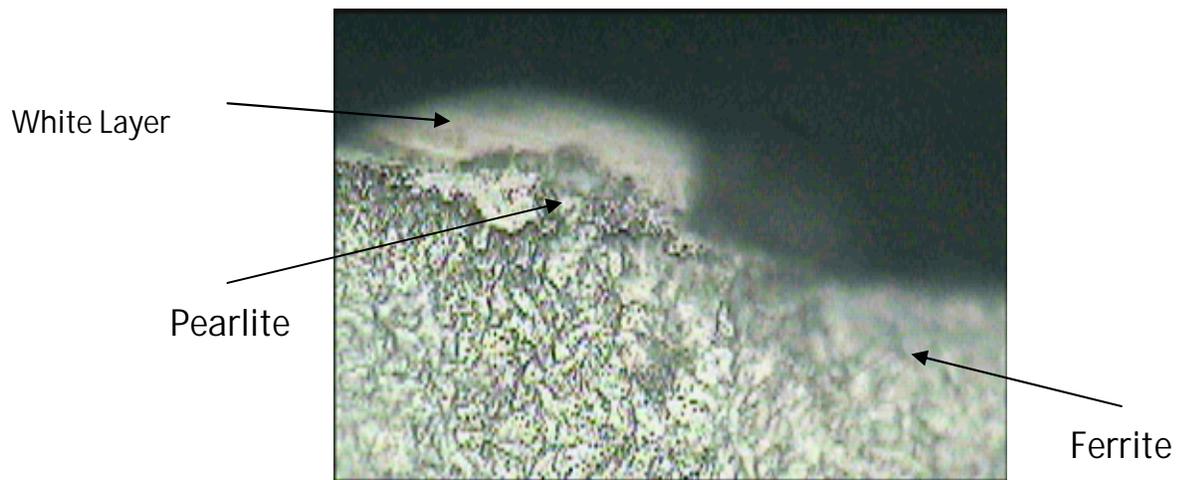


Gambar F.5 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

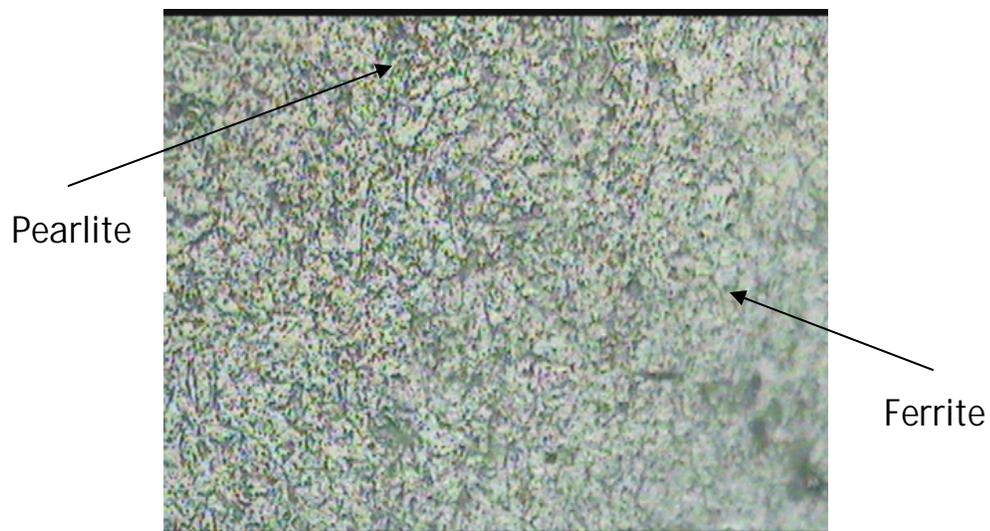


Gambar F.6 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 6 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

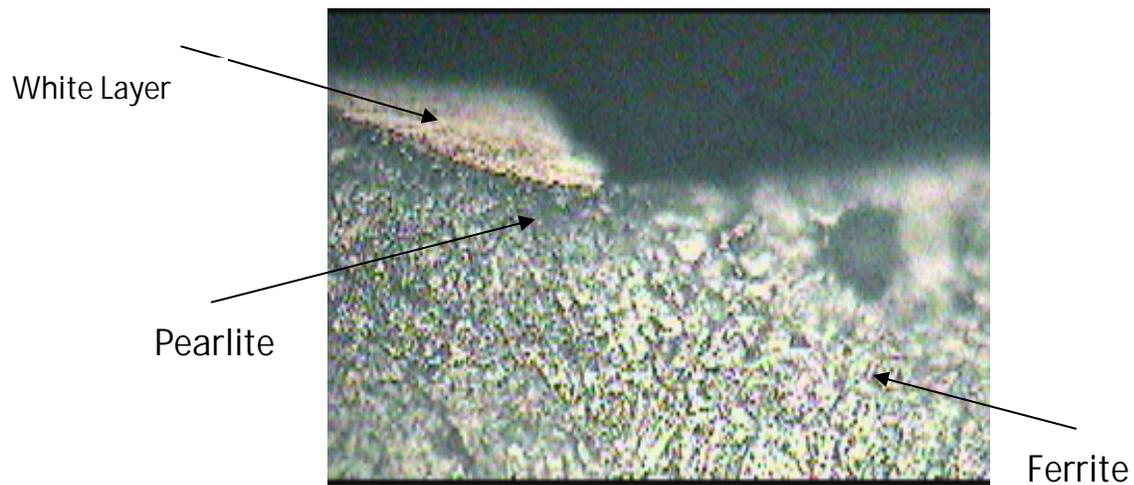
Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 9 A



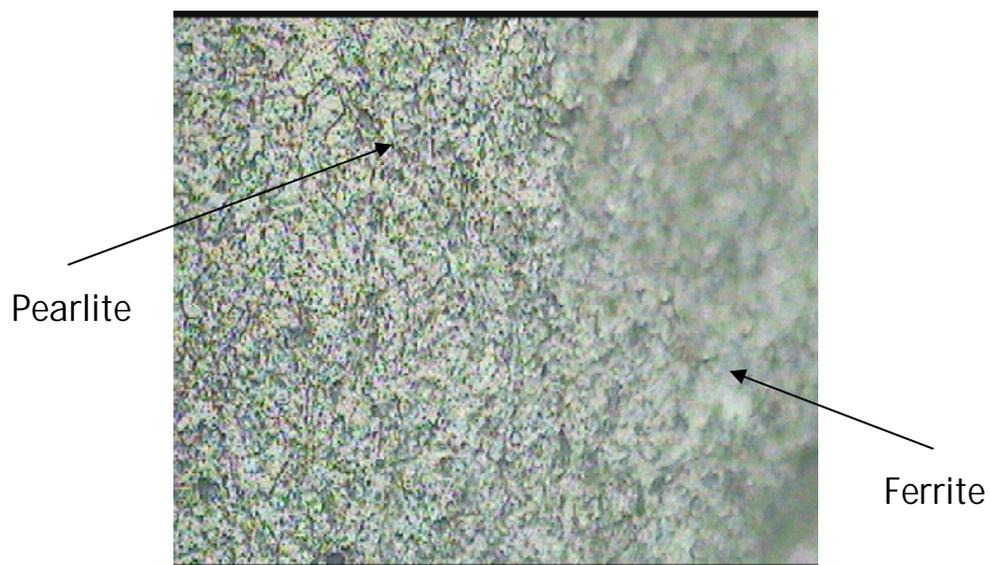
Gambar F.7 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



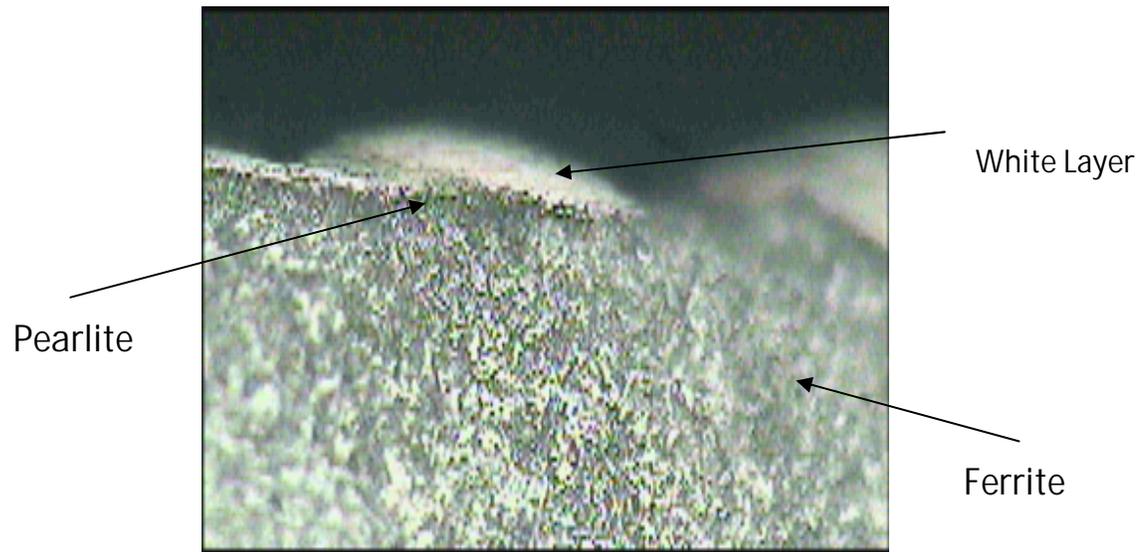
Gambar F.8 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



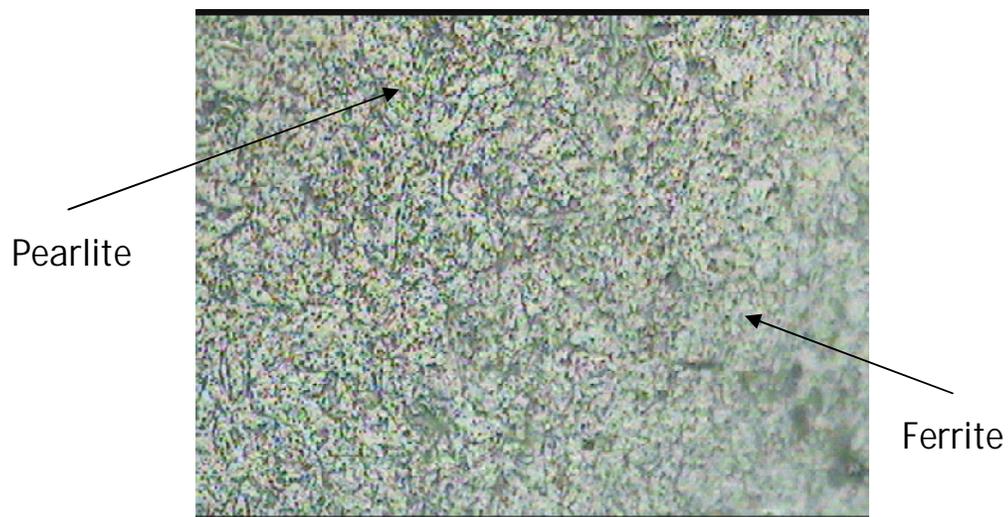
Gambar F.9 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar F.10 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X

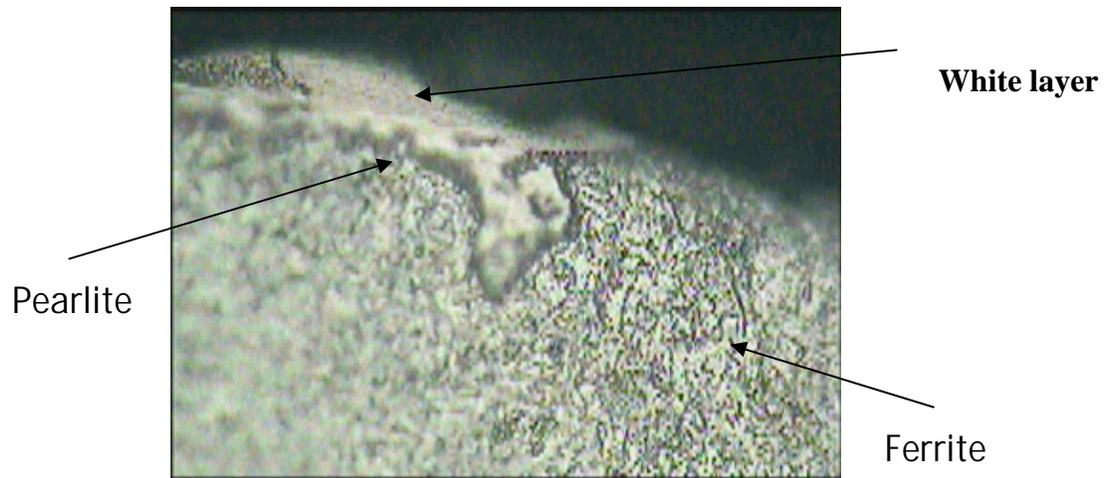


Gambar F.11 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

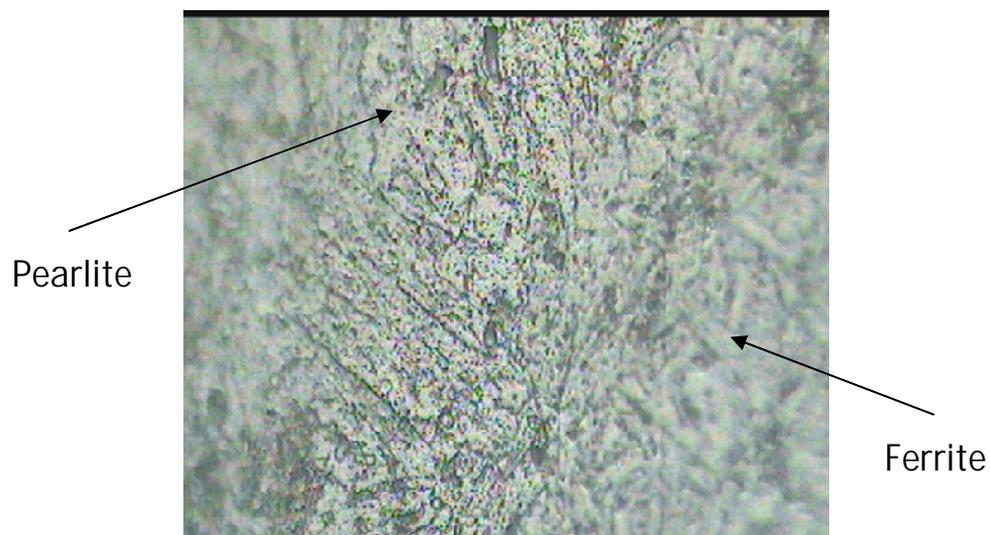


Gambar F.12 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 9 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X

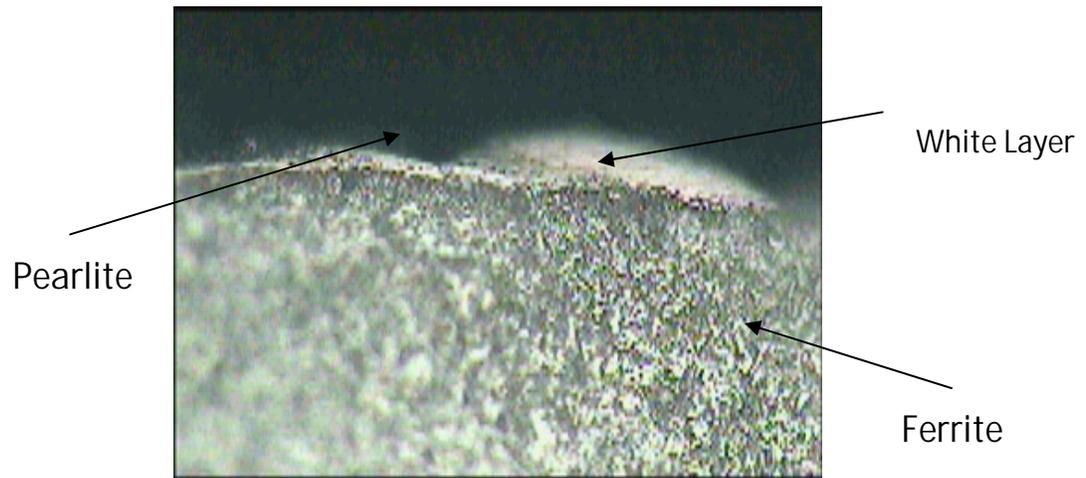
Struktur Mikro Specimen Hasil Proses EDM pada Arus 12 A



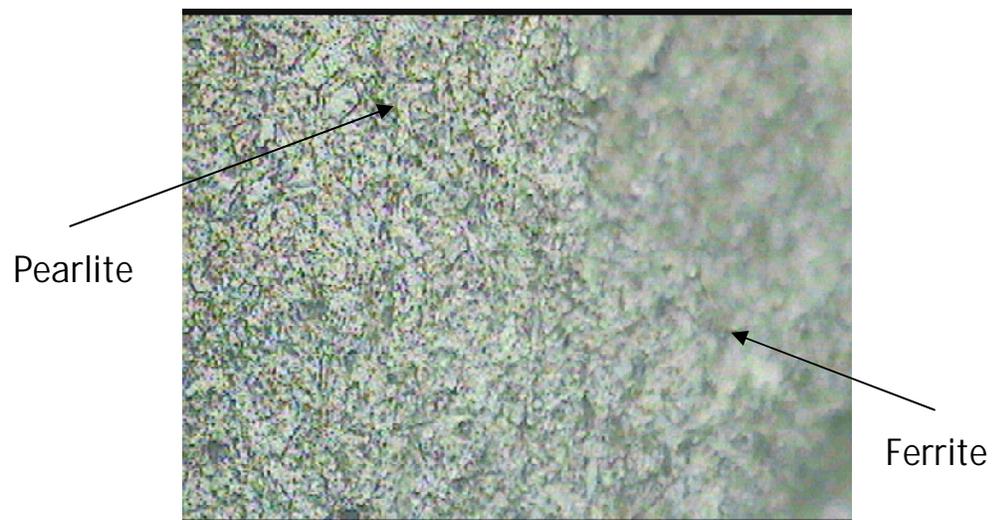
Gambar F.13 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



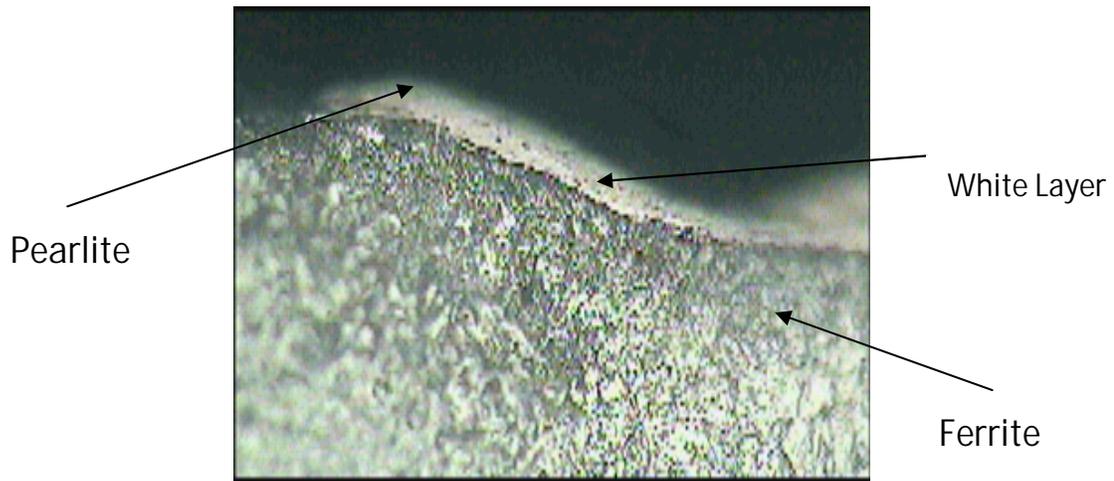
Gambar F.14 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 90 μ s pada pembesaran 500 X



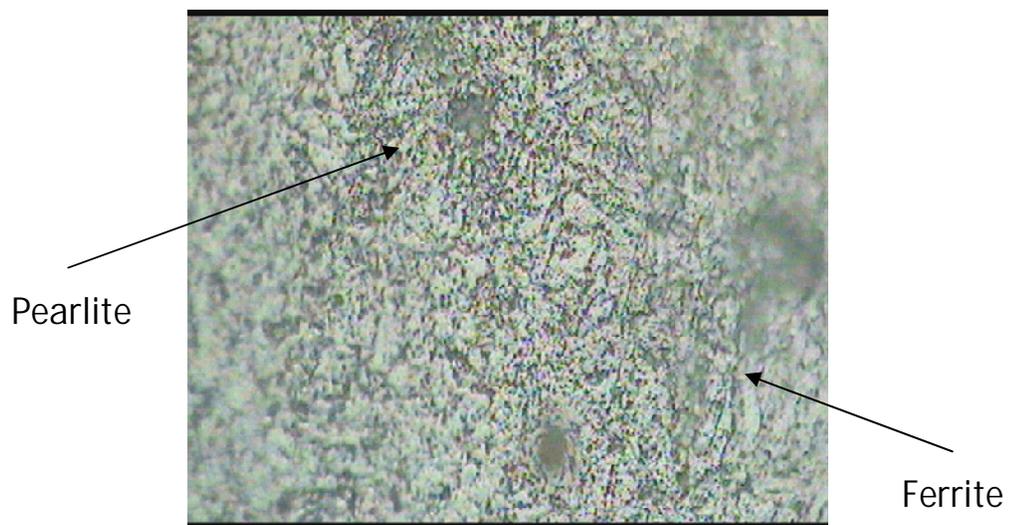
Gambar F.15 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar F.16 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjauh proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 120 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar F.17 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terdekat proses yaitu pada titik 5 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X



Gambar F.18 Struktur mikro baja karbon rendah tipe AISI H-13 pada titik terjaun proses yaitu pada titik 2 proses EDM dengan arus 12 A dan *on time* 150 μ s pada pembesaran 500 X