

**PENGARUH ARUS LISTRIK DAN *PULSE-ON TIME*  
PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) SINKING*  
TERHADAP KEKERASAN PERMUKAAN ALUMINIUM 6061**

**SKRIPSI  
TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DWI AGUNG MARSHELO  
NIM. 165060200111045**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2021**







## LEMBAR PENGESAHAN

# PENGARUH ARUS LISTRIK DAN *PULSE-ON TIME* PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) SINKING* TERHADAP KEKERASAN PERMUKAAN ALUMINIUM 6061

## SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK MANUFAKTUR

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**DWI AGUNG MARSHELO**

**NIM. 165060200111045**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing pada  
tanggal 16 Juni 2021

**Dosen Pembimbing I**

**Dosen Pembimbing II**

Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.  
NIP. 19710726 200012 1 001

Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.  
NIP. 2016078110241001



Mengetahui,  
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.  
NIP. 19740930 200012 1 001



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Malang, 16 Juni 2021

Mahasiswa,



Dwi Agung Marshelo

NIM. 165060200111045









**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**  
**FAKULTAS TEKNIK**  
**PROGRAM SARJANA**



## **SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : **586/UN10.F07.12.11/PP/2021**

Sertifikat ini diberikan kepada :

**DWI AGUNG MARSELO**

Dengan Judul Skripsi :

**PENGARUH ARUS LISTRIK DAN PULSE-ON TIME PADA ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING (EDM) SINKING TERHADAP KEKERASAN PERMUKAAN ALUMINIUM 6061**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal



Ketua Jurusan Teknik Mesin

**Prof. DJAROT B. DARMADI, Ir., MT., Ph.D**  
NIP. 19670518-199412 1 001

Malang, 9 Juni 2021

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

**MEGA NUR SASONGKO, ST., MT., Dr.Eng**  
NIP. 19740930 200012 1 001







**JUDUL SKRIPSI:**

Pengaruh Arus Listrik dan *Pulse-On Time* Pada *Electrical Discharge Machining* (EDM) *Sinking* Terhadap Kekerasan Permukaan Aluminium 6061

Nama Mahasiswa : Dwi Agung Marshelo

NIM : 165060200111045

Program Studi : Teknik Mesin

Konsentrasi : Teknik Manufaktur

**KOMISI PEMBIMBING**

Dosen Pembimbing 1 : Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT.

Dosen Pembimbing 2 : Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Dr. Sugiarto, ST., MT.

Dosen Penguji 2 : Ir. Erwin Sulistyono, MT.

Dosen Penguji 3 : Ir. Ari Wahyudi, MT.

Tanggal Ujian : 8 April 2021

SK Penguji : 591/UN10.F07/SK/2021

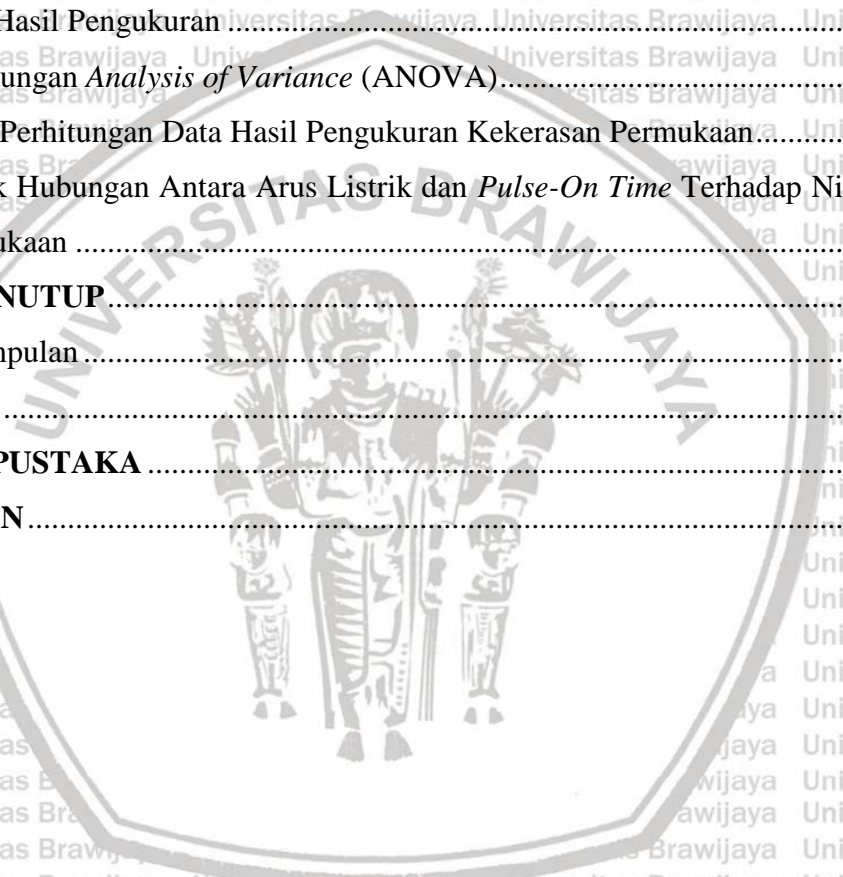




# DAFTAR ISI

|  |      |
|--|------|
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....                              | ii   |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....                                  | iii  |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....                                | v    |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....                               | vii  |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....                             | ix   |
| <b>RINGKASAN</b> .....                                   | xi   |
| <b>SUMMARY</b> .....                                     | xiii |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....                           | 1    |
| 1.1 Latar Belakang.....                                  | 1    |
| 1.2 Rumusan Masalah.....                                 | 2    |
| 1.3 Batasan Masalah.....                                 | 2    |
| 1.4 Tujuan Penelitian.....                               | 2    |
| 1.5 Manfaat Penelitian.....                              | 3    |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....                     | 5    |
| 2.1 Penelitian Sebelumnya.....                           | 5    |
| 2.2 EDM ( <i>Electrical Discharge Machine</i> ).....     | 6    |
| 2.2.1 Prinsip Kerja EDM <i>Sinking</i> .....             | 7    |
| 2.2.2 Mekanisme Permesinan pada EDM <i>Sinking</i> ..... | 8    |
| 2.2.3 Bagian – Bagian EDM <i>Sinking</i> .....           | 13   |
| 2.2.4 Parameter Proses EDM <i>Sinking</i> .....          | 14   |
| 2.2.5 Kawat Elektroda.....                               | 14   |
| 2.2.6 Cairan Dielektrik.....                             | 15   |
| 2.3 Arus Listrik.....                                    | 15   |
| 2.4 <i>Pulse On-Time</i> .....                           | 16   |
| 2.5 Aluminium.....                                       | 16   |
| 2.6 Kekerasan.....                                       | 17   |
| 2.4.1 Macam-macam Metode Pengujian Kekerasan.....        | 17   |
| 2.7 Hipotesis.....                                       | 22   |
| <b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....                   | 23   |
| 3.1 Metode Penelitian.....                               | 23   |
| 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian.....                     | 23   |
| 3.3 Variabel Penelitian.....                             | 23   |

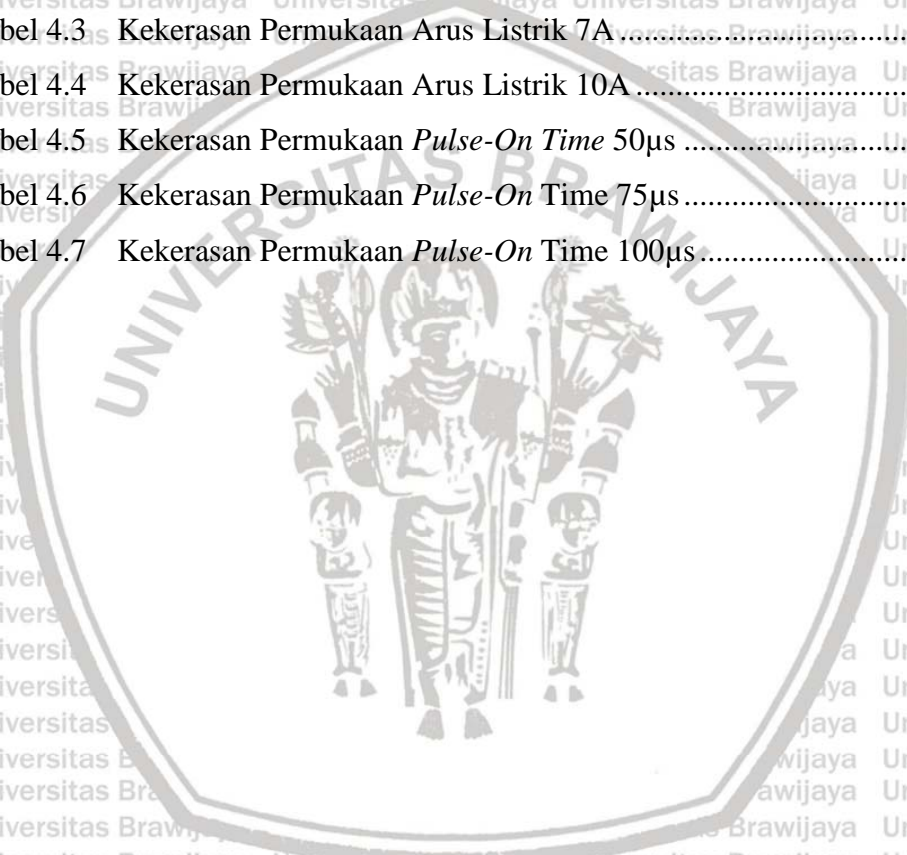
|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 3.4                                     | Spesifikasi Alat dan Bahan .....  | 24        |
| 3.4.1                                   | Alat Penelitian .....   | 24        |
| 3.4.2                                   | Bahan Penelitian .....  | 26        |
| 3.4.3                                   | Dimensi Benda Kerja .....   | 26        |
| 3.5                                     | Prosedur Penelitian.....  | 27        |
| 3.6.1                                   | Prosedur <i>Electrical Discharge Machining</i> .....  | 27        |
| 3.6.2                                   | Prosedur Pengukuran Nilai Kekerasan .....   | 27        |
| 3.7                                     | Diagram Alir Penelitian .....   | 28        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b> |   | <b>33</b> |
| 4.1                                     | Data Hasil Pengukuran .....   | 33        |
| 4.2                                     | Perhitungan <i>Analysis of Variance</i> (ANOVA).....  | 33        |
| 4.2.1                                   | Perhitungan Data Hasil Pengukuran Kekerasan Permukaan.....  | 33        |
| 4.3                                     | Grafik Hubungan Antara Arus Listrik dan <i>Pulse-On Time</i> Terhadap Nilai Kekerasan Permukaan ..... | 41        |
| <b>BAB V PENUTUP.....</b>               |   | <b>43</b> |
| 5.1                                     | Kesimpulan .....  | 43        |
| 5.2                                     | Saran .....   | 43        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>             |   | <b>45</b> |
| <b>LAMPIRAN.....</b>                    |   | <b>47</b> |





## DAFTAR TABEL

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Tabel 2.1 | Perbandingan Material Elektroda .....                           | 14 |
| Tabel 2.2 | Properties Material Aluminium 6061 Dipengaruhi Temperatur ..... | 17 |
| Tabel 2.3 | Skala Mohs .....  | 18 |
| Tabel 2.4 | <i>Rockwell Hardness Scale</i> .....                            | 20 |
| Tabel 2.5 | <i>Superficial Rockwell Hardness Scale</i> .....                | 21 |
| Tabel 3.1 | Komposisi kimia Aluminium 6061 .....                            | 26 |
| Tabel 4.1 | Data Hasil Pengujian dan Pengukuran Kekerasan Permukaan .....   | 31 |
| Tabel 4.2 | Kekerasan Permukaan Arus Listrik 4A .....                       | 32 |
| Tabel 4.3 | Kekerasan Permukaan Arus Listrik 7A .....                       | 32 |
| Tabel 4.4 | Kekerasan Permukaan Arus Listrik 10A .....                      | 32 |
| Tabel 4.5 | Kekerasan Permukaan <i>Pulse-On Time</i> 50 $\mu$ s .....       | 32 |
| Tabel 4.6 | Kekerasan Permukaan <i>Pulse-On Time</i> 75 $\mu$ s .....       | 32 |
| Tabel 4.7 | Kekerasan Permukaan <i>Pulse-On Time</i> 100 $\mu$ s .....      | 32 |





Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR GAMBAR

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Gambar 2.1  | Hasil Pengujian Kekerasan Alumunium Murni dan Alumunium 6061.....  | 5  |
| Gambar 2.2  | Grafik – Grafik Pengaruh <i>Discharge Current</i> dan <i>Pulse-On Time</i> pada<br>BMG Berbahan Zr (a) MRR, (b) Kekasaran, dan (c) Kekerasan ..... | 6  |
| Gambar 2.3  | Skema Alat EDM.....  | 8  |
| Gambar 2.4  | Prinsip Kerja EDM.....   | 8  |
| Gambar 2.5  | Proses terbentuknya spark pada EDM serta Grafik dan Tegangan Arusnya 1<br>.....  | 9  |
| Gambar 2.6  | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM serta Grafik dan tegangan arusnya 2<br>.....   | 9  |
| Gambar 2.7  | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM Serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>3.....  | 10 |
| Gambar 2.8  | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>4.....  | 10 |
| Gambar 2.9  | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>5.....  | 10 |
| Gambar 2.10 | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>6.....  | 11 |
| Gambar 2.11 | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada Edm serta Grafik dan Tegangan Arusnya 7<br>.....   | 11 |
| Gambar 2.12 | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM Serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>8.....  | 12 |
| Gambar 2.13 | Proses Terbentuknya <i>Spark</i> pada EDM Serta Grafik dan Tegangan Arusnya<br>9.....  | 12 |
| Gambar 2.14 | Bagian-bagian Mesin EDM <i>Sinking</i> .....   | 13 |
| Gambar 2.15 | <i>Scleroscope Hardness Tester</i> .....   | 17 |
| Gambar 2.16 | <i>Brinell Hardness Testing Machine</i> .....  | 19 |
| Gambar 2.17 | <i>Brinell Hardness Testing Machine Mechanism</i> .....  | 19 |
| Gambar 2.18 | Teknik Pengujian Kekerasan.....  | 22 |
| Gambar 3.1  | Mesin EDM C-TEK ZNC 320.....   | 24 |
| Gambar 3.2  | <i>Rockwell Type Hardness Test</i> .....   | 25 |
| Gambar 3.3  | Elektroda Tembaga.....   | 25 |
| Gambar 3.4  | Dimensi Benda Kerja.....   | 26 |

Gambar 3.5 Diagram Alir Penelitian ..... 29

Gambar 4.1 Grafik Hubungan Antara Arus Listrik (A) dan *Pulse-On Time* ( $\mu$ s) Terhadap Nilai Kekasaran Permukaan ( $\mu$ m) ..... 40





## DAFTAR LAMPIRAN

|            |                    |    |
|------------|--------------------|----|
| Lampiran 1 | Tabel Data         | 47 |
| Lampiran 2 | Foto spesimen      | 48 |
| Lampiran 3 | Komposisi Spesimen | 50 |
| Lampiran 4 | Tabel Distribusi F | 51 |





Halaman ini sengaja dikosongkan



## RINGKASAN

**Dwi Agung Marshelo**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2021, *Pengaruh Arus Listrik Dan Pulse-On Time Pada Electrical Discharge Machining (Edm) Sinking Terhadap Kekerasan Permukaan Aluminium 6061*. Dosen Pembimbing: Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT. dan Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

EDM *sinking* menggunakan energi termal yang tercipta dari bunga api listrik antara elektroda dan benda kerja yang terendam oleh cairan dielektrik untuk melakukan permesinan. EDM *sinking* sendiri tidak membutuhkan gaya deformasi untuk melakukan permesinan, sehingga sangat disarankan sebagai alat untuk melakukan permesinan pada bahan yang elastis dan mudah dibentuk, seperti aluminium 6061 yang digunakan pada penelitian ini. Penelitian ini menggunakan perubahan parameter arus listrik dengan variasi nilai 4A, 7A, 10A, serta *pulse-on time* sebesar 50 $\mu$ s, 75 $\mu$ s, 100 $\mu$ s dengan pengujian kekerasan menggunakan *Rockwell Type Hardness Tester* di tiga titik yang berbeda. Hasil pengujian kekerasan yang dilakukan mendapatkan rata – rata nilai kekerasan permukaan sebesar 39.97, 48.67, 50.73, 41.63, 49.73, 51.17, 47.67, 50.87, dan 51.90 dengan satuan uji HRB. Nilai kekerasan permukaan terkecil didapatkan pada parameter permesinan arus listrik 4A dan *pulse-on time* 50 $\mu$ s dengan rata-rata hasil uji 39.97 HRB, sedangkan nilai kekerasan permukaan terbesar didapatkan pada arus listrik 10A dan *pulse on-time* 100 $\mu$ s dengan rata-rata hasil uji 51.90 HRB. Hasil pengujian kekerasan yang telah dilakukan menunjukkan bahwa semakin besar nilai arus listrik dan *pulse-on time* maka suhu area permesinan akan semakin meningkat karena durasi dan besarnya bunga api listrik, diiringi dengan pendinginan cepat oleh cairan dielektrik dan juga bagian benda kerja yang tidak diberi proses permesinan akan membuat kekerasan permukaan hasil permesinan benda kerja akan meningkat.

**Kata Kunci:** *Electrical Discharge Machine Sinking, Arus Listrik, Pulse-On Time, Kekerasan Permukaan, Aluminium A6061*



Halaman ini sengaja dikosongkan



## SUMMARY

**Dwi Agung Marshelo**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2021, *Effect of Electrical Current And Pulse-On Time on Electrical Discharge Machining (EDM) Sinking to Surface Hardness Value Aluminum 6061*. Advisor Lecturer's: Moch. Syamsul Ma'arif, ST., MT. and Redi Bintarto, ST., M.Eng.Pract.

Sinking EDM uses thermal energy created by electric sparks between the electrodes and the workpiece which are submerged by dielectric fluid to carry out the machining process. Sinking EDM itself does not require deformation forces to perform machining process, so it is highly recommended as a tool to do machining process for materials that has high elasticity and malleability, such as aluminum 6061 which is used in this research. This research uses various values of electrical discharge (4A, 7A, 10A), and pulse-on time (50 $\mu$ s, 75 $\mu$ s, 100 $\mu$ s) to determine the changes of hardness at the surface of aluminium 6061 using the Rockwell Type Hardness Tester with three different points of testing. The hardness testing process obtained an average value of surface hardness; 39.97, 48.67, 50.73, 41.63, 49.73, 51.17, 47.67, 50.87, and 51.90 HRB. The smallest surface hardness value was obtained at 4A of electrical discharge and 50 $\mu$ s of pulse-on time machining parameters with an average test result of 39.97 HRB, while the largest surface hardness value was obtained at 10A electrical discharge and 100 $\mu$ s of pulse-on time machining parameters with an average test result of 51.90 HRB. The results of the hardness testing that have been carried out show that the greater the value of electrical discharge and pulse-on time, the temperature of the machining area will increase due to the duration and size of the electric sparks, accompanied by rapid cooling by the dielectric fluid and also the part of the workpiece that is not given a machining process. This sequences will increase the surface hardness of the workpiece.

**Keywords:** *Sinking Electrical Discharge Machine, Electrical Discharge, Pulse-On Time, Hardness, Aluminium A6061*



Halaman ini sengaja dikosongkan



# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Saat ini *Electrical discharge machining* (EDM) merupakan teknik pemesinan non-konvensional yang sering digunakan. Pada umumnya EDM mempunyai tiga tipe pemesinan, yaitu *sinking*, *cutting*, *grinding*. Prinsip kerja EDM sendiri adalah dengan memanfaatkan energi panas yang dihasilkan oleh percikan listrik antara elektroda dengan benda kerja, dimana proses tersebut terendam oleh fluida dielektrik. Dasar dari proses EDM adalah mereduksi material pada benda kerja dengan cara melepaskan energi listrik di antara elektroda dan spesimen di dalam fluida dielektrik. (Abulais, 2014). EDM *sinking* memiliki banyak keuntungan dalam membuat cetakan dan juga dalam bidang otomotif, penerbangan, dan alat operasi medis (Ho dan Newman, 2003). Menurut Raut dan Shinde (2007), EDM digunakan karena kemampuannya untuk melakukan pemesinan untuk produk yang mempunyai bentuk yang rumit, dan juga membutuhkan akurasi yang tinggi.

Aluminium 6061 banyak digunakan dalam berbagai bidang dikarenakan kemudahannya untuk dibentuk dan mempunyai elastisitas yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, dan rasio kekuatan – berat yang bagus (Jayakumar dan Leon, 2014). Dalam pengerjaannya penggunaan EDM *sinking* sangat dianjurkan untuk Aluminium 6061 yang elastis dan mudah dibentuk. Menurut Quediri dkk (2020), pemesinan EDM *sinking* tidak membutuhkan gaya deformasi untuk melakukan proses pemesinan, sehingga dapat membuat produk dengan desain yang rumit, serta bisa mendapatkan ketelitian produk yang tinggi.

Salah satu properti yang sangat dibutuhkan untuk menentukan kualitas produk adalah kekerasan. Kekerasan sendiri merupakan salah satu properti mekanis yang sering diuji, karena tidak membutuhkan waktu lama dan juga relatif murah, serta berhubungan dengan beberapa properti lain seperti ketahanan aus dan kekuatan (Zuback dan DebRoy, 2018). Menurut Akkurt (2010), Perubahan kekerasan dan kualitas permukaan pada saat proses pemesinan adalah hal yang penting dalam aplikasi industri.

Dalam proses EDM *sinking*, perubahan parameter akan mempengaruhi kualitas produk yang diinginkan. Beberapa parameter yang akan menentukan kekerasan dari suatu produk pada proses EDM *sinking* adalah arus listrik dan *pulse- on time*. Menurut El-Hofy (2005),



pemberian arus listrik yang semakin besar akan mempengaruhi besarnya bunga api listrik yang tercipta. Ketika aliran arus listrik ( $A$ ) diikuti dengan beda potensial/tegangan ( $V$ ) pada saat proses permesinan semakin besar, maka energi listrik yang tercipta juga akan semakin tinggi. Energi listrik ini akan mempengaruhi peningkatan temperatur yang tercipta pada area permesinan. *Pulse-on time* adalah waktu dimana ada arus listrik dialirkan pada elektroda yang nantinya mempengaruhi waktu bunga api listrik yang tercipta (Quediri dkk, 2020). El Hofy (2005), berkata bahwa peningkatan temperatur dari proses permesinan akan memberikan efek perlakuan panas pada benda kerja, dan akan didinginkan secara cepat oleh efek konduksi dari benda kerja yang tidak diberi permesinan dan juga cairan dielektrik sehingga kekerasan permukaan dari benda kerja akan berubah.

Berdasarkan uraian diatas kekerasan yang dihasilkan dari proses EDM bisa dipengaruhi oleh dua parameter yang dijelaskan, yaitu arus listrik dan *pulse-on time*. Penelitian ini dijalankan untuk mencari tahu seberapa besar pengaruh perubahan arus listrik dan *pulse-on time* terhadap kekerasan permukaan Aluminium 6061 pada proses EDM *sinking*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini adalah seberapa besar pengaruh arus listrik dan *pulse-on time* terhadap kekerasan permukaan Aluminium 6061 pada proses EDM *sinking*.

## 1.3 Batasan Masalah;

1. Tidak membahas sistem elektronika, kontrol, dan CNC yang digunakan.
2. Tidak membahas tentang biaya dalam proses permesinan maupun penelitian.
3. *Pulse-off time* yang digunakan dalam penelitian ini adalah 4us.
4. Elektroda yang digunakan adalah tembaga.

## 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mencari tahu pengaruh yang ditimbulkan oleh perubahan *pulse-on time* dan arus listrik kepada kekerasan permukaan Aluminium 6061 pada proses EDM *sinking*.



## 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapatkan dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh perubahan arus listrik dan *pulse-on time* terhadap kekerasan permukaan Aluminium 6061 ada proses permesinan *EDM sinking*.
2. Sebagai bahan referensi tambahan bagi mahasiswa teknik mesin baik untuk melakukan penelitian-penelitian tentang proses permesinan logam khususnya pada proses *EDM sinking* serta media belajar pada mata kuliah teknik manufaktur bagi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.





Halaman ini sengaja dikosongkan

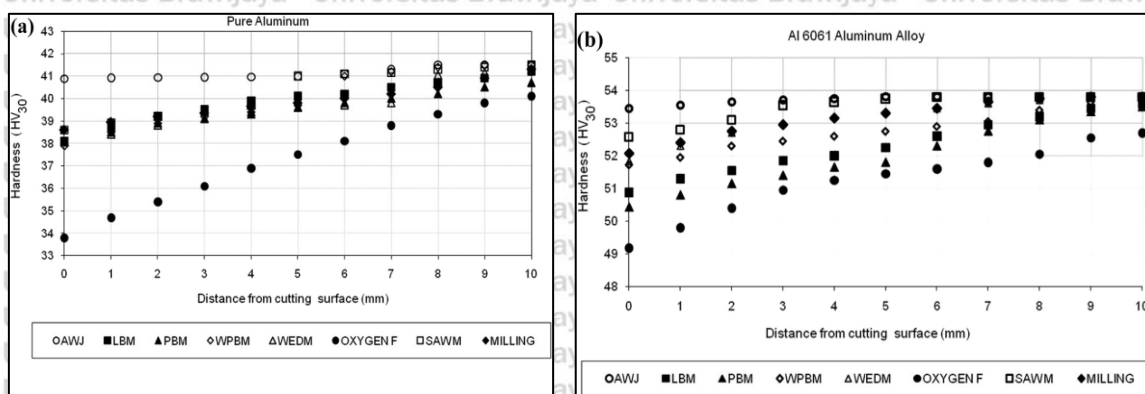


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

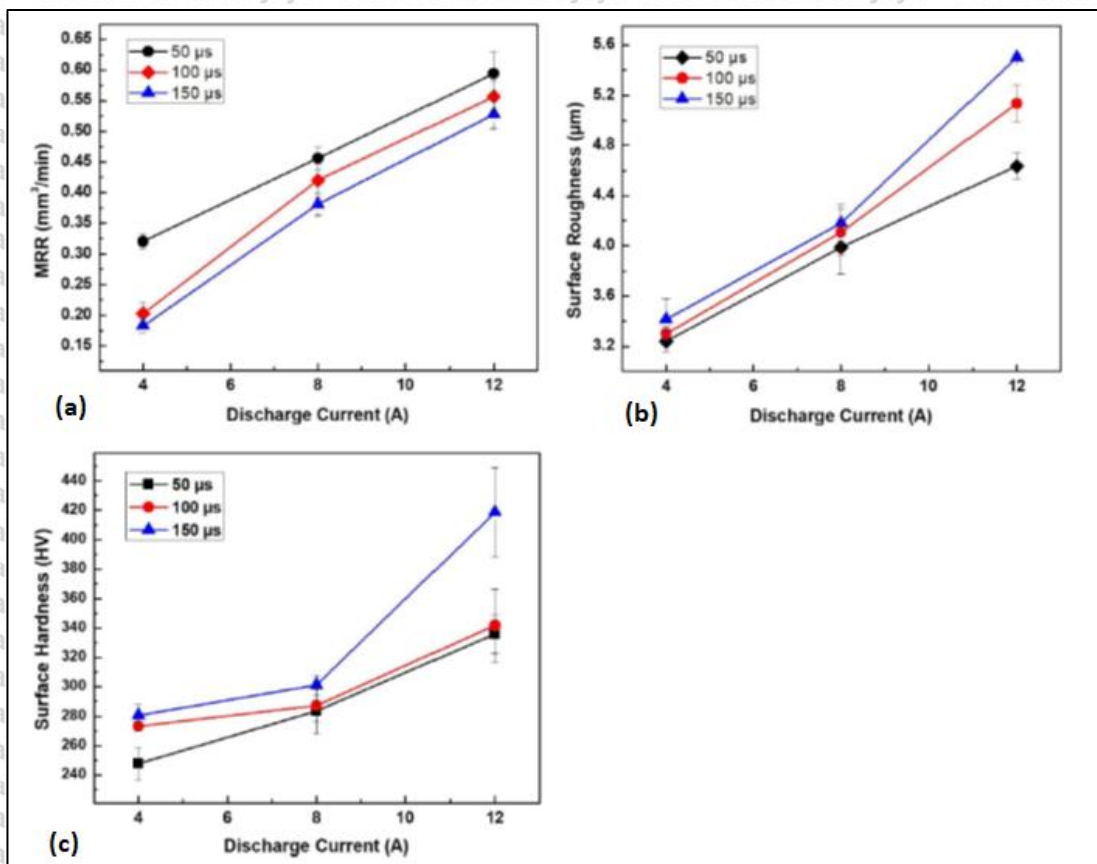
**Mulyadi dan Agus (2016)** Optimalisasi Hasil Proses *Wire-Cut* EDM Dengan Metode *Principal Component Analysis* (PCA). Penelitian yang dilakukan ini menguji hasil maksimal yang dapat dicapai dari proses permesinan *Wire-Cut* EDM pada material SKD-11 (HRC 60) dengan panjang 15 mm yang dilakukan dengan optimasi *multiple response*. Permesinan dengan waktu tersingkat diperoleh pada 5 menit 21 detik, lebar hasil permesinan tersempit adalah 0,481 mm, kekasaran permukaan terkecil adalah Ra sebesar 6,0  $\mu\text{m}$  dan MRR maksimum 13,93 ( $\text{mm}^3/\text{mnt}$ ). Hasil yang diperoleh dicapai dengan menetapkan parameter *Pulse interval* selama 9 $\mu\text{s}$ , *electric current* sebesar 10A, *Wire speed* pada kecepatan 5 mm/s dan *variable frequency* sebesar 80.

**Akkurt, Adnan (2017)** *The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy*. Penelitian tersebut menunjukkan pengaruh berbagai macam metode pemotongan terhadap kekerasan permukaan secara keseluruhan dari aluminium 6061. Pemberian panas yang berlebihan pada saat proses pemotongan menghasilkan butiran yang lebih besar. Setelah pemotongan dilakukan, maka mikrostruktur dari benda kerja akan berubah dan menghasilkan kekerasan yang berbeda dan mempunyai kecenderungan menurun dari ujung normal ke ujung hasil permesinan dari benda kerja dikarenakan perbedaan penyebaran panas yang berbeda. Rasio penurunan kekerasan pada benda kerja akan berbeda – beda pula pada setiap jenis proses pemotongan. Grafik penurunan kekerasan terhadap jarak dari permukaan yang dipotong bisa dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Hasil pengujian kekerasan aluminium murni dan aluminium 6061  
Sumber: Akkurt (2017:6)

Pradana dkk (2020) *The Effect of Discharge Current dan Pulse-On Time on Biocompatible Zr-Based BMG*. Riset tersebut dilakukan untuk meneliti pengaruh dari *discharge current* dan *pulse-on time* pada MRR, kekerasan dan kekasaran permukaan kaca logam pejal/*Bulk Metallic Glass (BMG)* yang berbahan *Zirconium*. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa, *Material Removal Rate (MRR)* akan meningkat seiring dengan bertambahnya *discharge current* dan berkurangnya *pulse-on time*, kekasaran permukaan akan meningkat dengan bertambahnya *discharge current* dan *pulse on-time*, serta kekerasan permukaan akan meningkat seiring bertambahnya *discharge current* dan *pulse on-time*. Hasil pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Grafik – Grafik pengaruh *discharge current* dan *pulse-on time* pada BMG berbahan Zr (a) MRR, (b) Kekasaran, dan (c) Kekerasan  
Sumber: Pradana dkk (2020:403)

## 2.2 EDM (*Electrical Discharge Machining*)

Sejarah awal EDM (*Electrical Discharge Machining*) dimulai pada tahun 1770, ilmuwan Inggris bernama Joseph Priestly meneliti efek pengikisan percikan arus listrik. Selanjutnya tahun 1943, ilmuwan Rusia B. Lazarenko dan N. Lazarenko mempunyai ide untuk menggunakan efek destruktif dari percikan daru arus listrik untuk proses permesinan yang terkontrol secara elektrik dengan bahan konduktif. Dari penelitian yang telah



dilakukan, proses EDM sederhana muncul. Lazarenko bersaudara melanjutkan penelitian mereka dengan cara memberikan cairan non-konduktif pada daerah terciptanya percikan listrik di antara dua konduktor, cairan yang digunakan diberi nama cairan dielektrik. Saat ini alat yang diciptakan oleh Lazarenko telah banyak dikembangkan dan digunakan untuk produksi.

EDM menggunakan energi termal untuk melakukan permesinan terhadap berbagai macam benda kerja dengan berbagai kekerasan. Mekanisme pemotongan/pengurangan material menggunakan energi listrik yang diubah menjadi energi termal dari percikan bunga api listrik yang terjadi karena interaksi antara elektroda dan benda kerja yang terjadi di dalam fluida dielektrik. (Ho dan Newman, 2003)

Ada 3 kategori jenis EDM yang dapat dibagi atas perbedaan jenis pahat yang digunakan (Pandey dan Shan, 1980), yaitu:

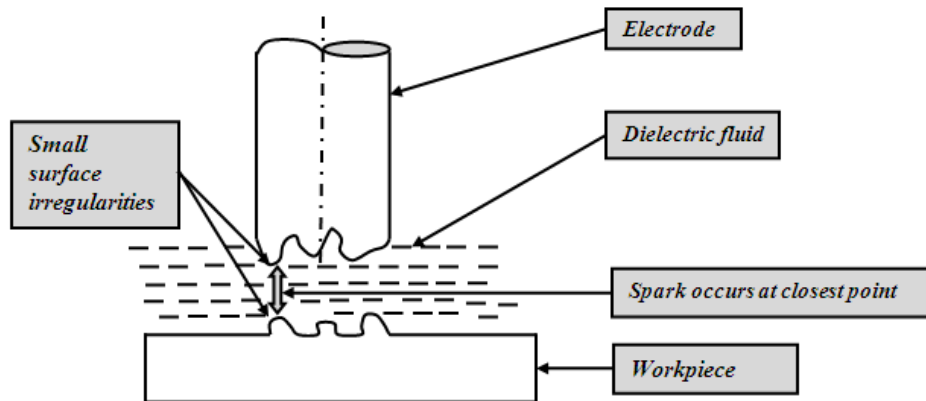
1. *Sinking*, mempunyai bentuk pahat negatif dari bentuk yang direncanakan pada benda kerja. Pahat melakukan gerakan penetrasi ke benda kerja.
2. *Cutting*, menggunakan pahat yang berbentuk antara lain plat, pita, kawat, atau piringan. Arah gerakan pahat tegak lurus terhadap benda kerja. Pahat yang berupa pita memotong benda kerja dengan arah melintang. Pahat yang berupa piringan sambil berputar pada sumbunya bergerak dengan arah tegak lurus terhadap benda kerja.
3. *Grinding*, menggunakan pahat yang bentuknya serupa dengan pahat gerinda konvensional. Pahat ini juga berputar pada sumbunya selain melakukan gerakan pemakanan.

### **2.2.1 Prinsip Kerja EDM *Sinking* (*Electrical Discharge Machining*)**

Prinsip kerja dari EDM *sinking* ditunjukkan pada Gambar 2.3 dan Gambar 2.4. Elektroda bergerak menuju benda kerja sehingga daya yang diberikan dapat mengionisasi fluida dielektrik. Percikan bunga api listrik akan tercipta di antara benda kerja dan elektroda. Efek erosi dari bunga api listrik yang tercipta akan mengikis benda kerja. Fluida dielektrik berfungsi untuk mengkonsentrasikan percikan bunga api listrik yang tercipta pada daerah pertemuan elektroda dan benda kerja. Selain itu berfungsi untuk mendinginkan elektroda dan mengeluarkan sisa hasil pemotongan. Tingkat ketahanan elektrik dari fluida mempengaruhi energi dan ritme dari loncatan bunga api listrik. Ketahanan listrik yang rendah akan menimbulkan bunga api listrik akan tercipta terlalu awal, begitu juga sebaliknya. Sistem servo berfungsi untuk memastikan elektroda bergerak dengan kecepatan yang tetap agar bunga api yang tercipta juga stabil, selain itu juga untuk

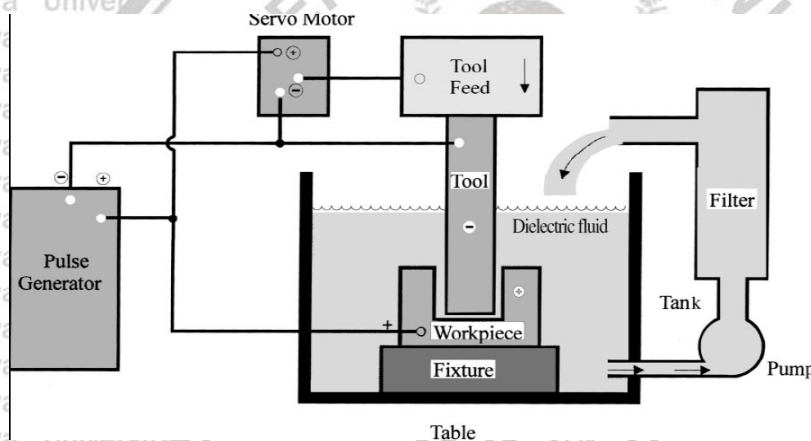
menarik elektroda jika terjadi konslet. Ketika daya yang diberikan lebih tinggi dari daya referensi sistem servo, maka kecepatan pemakanan akan menjadi cepat. Sebaliknya jika daya yang diberikan lebih rendah, maka kecepatan pemakanan akan menjadi lebih rendah.

(Abulais, 2014)



Gambar 2.3 Prinsip kerja EDM

Sumber: Abulais (2014:101)



Gambar 2.4 Skema alat EDM

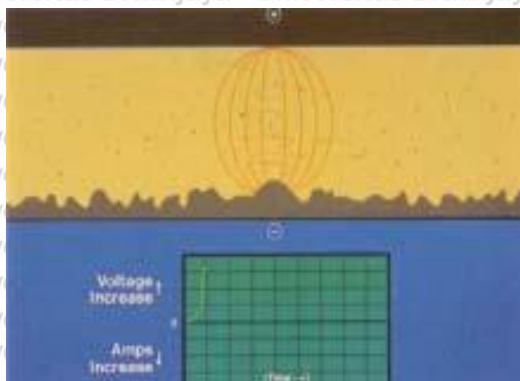
Sumber: Shinde dan Raut (2015:89)

### 2.2.2 Mekanisme Permesinan pada EDM Sinking

1. Awal dari proses EDM, elektroda diberi tegangan listrik (bermuatan positif) lalu didekatkan menuju ke arah benda kerja (ujung elektroda bermuatan positif didekatkan dengan benda kerja). Di antara benda kerja dan elektroda terdapat minyak isolasi yang dinamakann cairan dielektrik. Meskipun cairan ini merupakan isolator, beda potensial yang besar dapat mengakibatkan cairan dielektrik membentuk partikel bermuatan, sehingga membuat tegangan listrik dapat melewatinya dari elektroda menuju benda kerja. Hadirnya grafit serta partikel – partikel logam yang ikut tercampur dalam cairan dapat membantu menghantarkan tegangan listrik. Partikel –

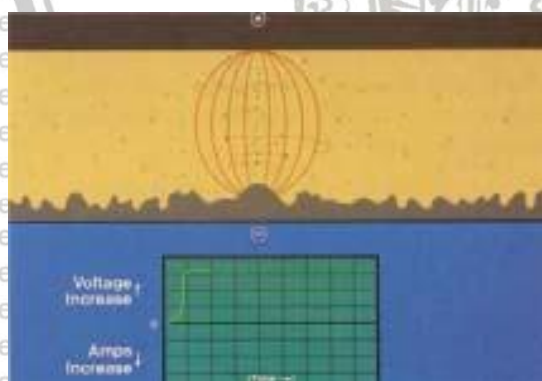


partikel logam yang bersifat konduktor akan ikut mengionisasi cairan dielektrik serta menghantarkan tegangan listrik secara langsung, selain itu partikel – partikel tersebut juga akan memudahkan pembentukan tegangan listrik dalam cairan dielektrik. Daerah yang mempunyai tegangan listrik paling tinggi terdapat pada titik dengan jarak antara elektroda dan benda kerja paling dekat, seperti yang dapat dilihat dari gambar. Grafik disamping gambar dibawah menerangkan bahwa tegangan (beda potensial) meningkat, tetapi arusnya nol. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.5.



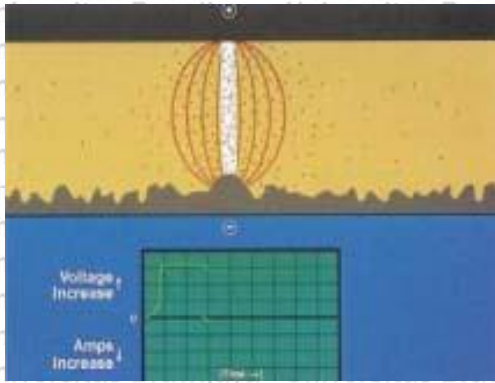
Gambar 2.5 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 1  
Sumber: Sagedistira (2012)

2. Saat jumlah partikel bermuatan semakin tinggi, sifat isolator milik cairan dielektrik akan semakin lemah pada sepanjang tengah jalur dengan jarak tersempit di daerah tersebut. Tegangan akan meningkat sampai titik paling tinggi tapi arus masih belum mengalir. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.6.



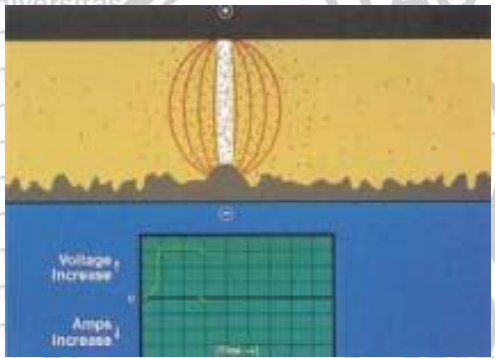
Gambar 2.6 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 2  
Sumber: Sagedistira (2012)

3. Ketika sifat isolator dari cairan dielektrik menjadi yang paling kecil maka arus akan mulai mengalir, diikuti dengan beda tegangan yang mulai turun. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.7.



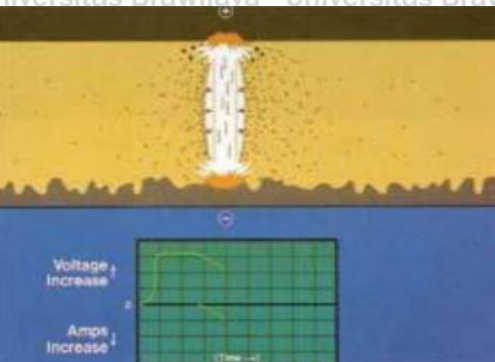
Gambar 2.7 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 3  
 Sumber: Sagedistira (2012)

4. Panas akan segera muncul pada saat arus listrik meningkat serta tegangan yang mulai menurun dengan sangat cepat. Panas yang tercipta akan menguapkan sebagian cairan dielektrik, benda kerja, dan elektroda. Pada saat ini jalur *discharge* antara benda kerja dan elektroda akan terbentuk. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 4  
 Sumber: Sagedistira (2012)

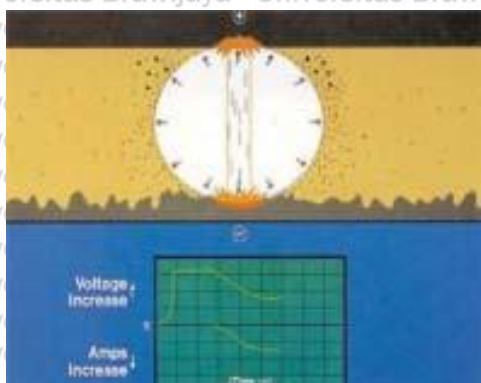
5. Di sepanjang jalur *discharge* akan terbentuk gelembung uap yang melebar, pelebaran ini akan dibatasi oleh kotoran – kotoran ion di sepanjang jalur *discharge*. Ion-ion tersebut akan ditahan oleh medan elektromagnet yang timbul. Pada saat ini tegangan akan terus menurun dan arus tetap meningkat. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 5  
 Sumber: Sagedistira (2012)

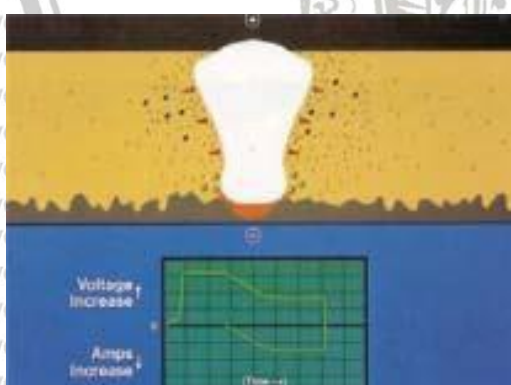


6. Menuju akhir dari proses, tekanan dan panas pada gelembung uap mencapai ukuran maksimal, tegangan dan arus listrik mencapai posisi stabil, serta sebagian logam benda kerja telah ter-erosi. Lapisan benda kerja yang berada di bawah jalur *discharge* dalam kondisi mencair, dan tetap tertahan di posisinya karena mendapat tekanan dari gelembung uap. Pada saat ini jalur *discharge* berisi plasma yang mempunyai suhu tinggi, sehingga saat arus melaluinya dengan intensif akan tercipta uap berupa logam, minyak dielektrik, dan karbon. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.10.



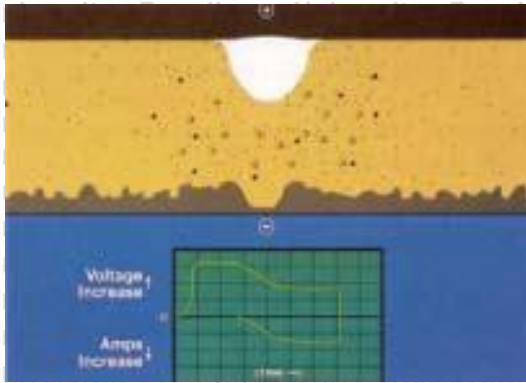
Gambar 2.10 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 6  
Sumber: Sagedistira (2012)

7. Kemudian, saat tegangan dan arus turun mencapai titik nol. Turunnya temperatur karena hal ini akan menciptakan peristiwa pecahnya gelembung sehingga membuat logam cair pada benda kerja akan lepas. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 7  
Sumber: Sagedistira (2012)

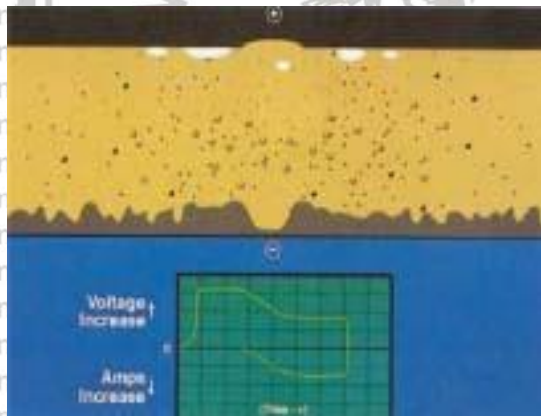
8. Setelah itu, cairan dielektrik yang bersih akan diberikan dan masuk di celah antara benda kerja dan elektroda untuk mengeluarkan (*flush*) kotoran dari proses permesinan serta mendinginkan permukaan benda kerja dengan cepat. Logam cair pada permukaan benda kerja yang tidak terlepas akan mengeras lalu akan terbentuk lapisan baru hasil dari proses ini. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 8

Sumber: Sagedistira (2012)

9. Logam dari proses permesinan yang telah lepas akan mengeras dan membentuk bola-bola kecil yang menyebar bersama dengan sisa karbon yang lepas dari elektroda dalam cairan dielektrik. Uap sisa dari permesinan akan naik menuju ke permukaan. Percikan bunga api yang tidak stabil dapat terbentuk tanpa waktu putus (*pulse-off time*) yang cukup, karena kotoran yang tidak terbuang akan terkumpul dan mengganggu proses permesinan. Peristiwa ini disebut dengan *DC arc*, yang dapat merusak benda kerja dan elektroda. Grafik pengujiannya dapat dilihat pada Gambar 2.13.



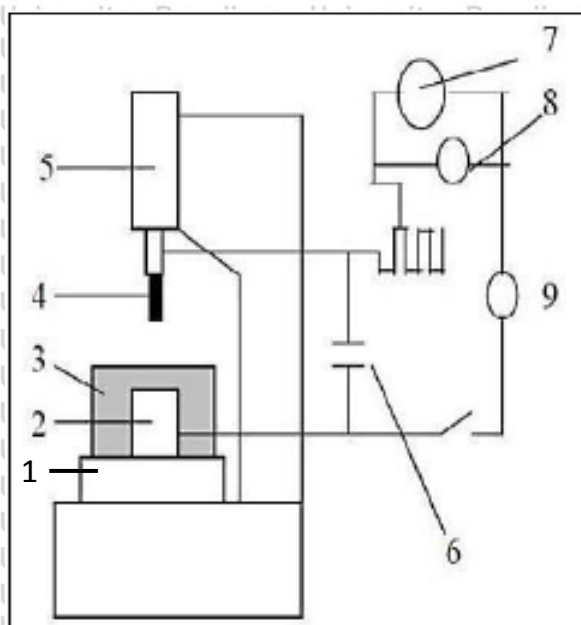
Gambar 2.13 Proses terbentuknya *spark* pada EDM serta grafik tegangan arusnya 9

Sumber: Sagedistira (2012)



### 2.2.3 Bagian – bagian EDM *sinking*

Bagian – bagian utama dalam mesin EDM *sinking* dapat dilihat pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Bagian – bagian mesin EDM *sinking*  
Sumber: Prayogo (2014:6)

Berikut ini merupakan keterangan dari komponen EDM *sinking* yang ditunjukkan oleh Gambar 2.14 beserta fungsinya:

1. Meja Kerja EDM *Sinking*, berfungsi sebagai dudukan cekam benda kerja.
2. Cekam Benda Kerja, berfungsi sebagai dudukan benda kerja.
3. Fluida Dielektrik, berfungsi untuk mendinginkan dan membersihkan kotoran pada benda yang dikerjakan.
4. Elektroda, berfungsi sebagai sebuah media penghantar tegangan listrik untuk mengikis serta membentuk profil sesuai dengan desain yang diatur pada sistem permesinan CNC.
5. Kepala EDM *Sinking*, berfungsi untuk menyimpan pahat dan komponen penting dari EDM *Sinking*.
6. Kapasitor, digunakan sebagai media untuk menyimpan energi listrik yang akan digunakan waktu proses permesinan berlangsung.
7. Generator Arus Pulsa (Amperemeter), digunakan untuk mengukur besar arus yang dialirkan ke mesin.
8. Voltmeter, berfungsi untuk mengetahui voltase di rangkaian listrik mesin EDM.
9. *Power Supply*, sebagai alat yang berfungsi untuk menyuplai arus listrik ke komponen mesin.

### 2.2.4 Parameter Proses EDM *Sinking*

Terdapat beberapa parameter yang bisa diteliti pada proses EDM diantaranya adalah *gap voltage*, *gap width*, *discharge current*, *flushing*, polaritas elektroda, *pulse-on time*, *pulse-off time*, *supply voltage* dan lain – lain. Variabel yang akan digunakan pada penelitian ini adalah arus listrik dan *pulse -on time*.

### 2.2.5 Kawat Elektroda

Elektroda berfungsi untuk mengalirkan tegangan listrik dan mengerosi benda kerja agar sesuai dengan desain yang diinginkan. Elektroda yang diciptakan dengan bahan yang berbeda akan memberikan efek yang berbeda pula pada saat proses permesinan. Beberapa elektroda memiliki kemampuan mengerosi benda kerja secara efisien tetapi dengan keausan yang tinggi, sedangkan material elektroda lain akan mengerosi benda kerja dengan lambat, akan tetapi memiliki tingkat keausan yang rendah. Oleh sebab itu, karakteristik material elektroda yang harus dimiliki adalah sebagai berikut (Bisono, 2015):

1. Memiliki sifat konduktor panas dan listrik yang baik.
2. Kemudahan dalam pembentukan elektroda.
3. Kecocokan material elektrode dengan jenis material yang akan dikerjakan.

Elektroda yang baik adalah ketika memiliki *melting point* tinggi dan *electrical resistance* yang rendah. Bahan pembuatan elektroda dalam permesinan EDM dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu: (Olivia, 1999)

1. Material elektroda logam : Tembaga, paduan tembaga, kuningan, tungsten dan baja
2. Elektroda non logam; grafit
3. Kombinasi antara logam dan non logam tembaga grafit

Tabel 2.1 dibawah merupakan perbandingan beberapa material pahat;

Tabel 2.1  
Perbandingan Material Elektroda

| Material                    | Wear ratio | Material remove rate          | Fabrication                 | Coat | Application                  |
|-----------------------------|------------|-------------------------------|-----------------------------|------|------------------------------|
| Copper                      | Low        | High on rough range           | Easy, can be sprayed also   | High | On All metal                 |
| Brass                       | High       | High only on finishing ranges | Easy                        | Low  | On all metal                 |
| Tungsten -<br>Copper Alloys | Low        | Low                           | Difficult                   | High | Used for high accuracy work  |
| Cast Iron                   | Low        | Low                           | Easy                        | Low  | Can be used on few materials |
| Steel                       | High       | Low                           | Easy                        | Low  | Can be used on all metals    |
| Copper<br>graphite          | Low        | High                          | Very delicate and difficult | High | Can be used on all materials |

Sumber: Olivia (1999)



### 2.2.6 Cairan Dielektrik

Cairan dielektrik merupakan salah satu factor penting selama proses pengerjaan dengan EDM, karena mempunyai fungsi sebagai berikut (Olivia, 1999):

1. Sebagai media untuk menghantarkan listrik dan perantara agar loncatan bunga api listrik dapat tercipta.
2. Pendingin komponen permesinan (pahat dan benda benda kerja).
3. Untuk membawa dan mengalirkan getaran – getaran yang terjadi.

Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh cairan dielektrik adalah sebagai berikut (Olivia, 1999)

1. Aman, tidak menghasilkan asap dan bau hasil permesinan yang mengganggu, serta tidak berbahaya untuk kulit.
2. Proses filtrasi cairan dielektrik mudah, supaya tercipta kondisi kerja yang optimal
3. Cairan yang biasanya digunakan adalah: CPC, ESSO, CHEVRON, KEROSENE, MENTOR-28, dan lain lain.

### 2.3 Arus Listrik

Hukum Ohm menyatakan bahwa besarnya Arus Listrik (I) yang mengalir melalui sebuah penghantar atau konduktor adalah berbanding lurus dengan beda potensial atau Tegangan (V) dan berbanding terbalik dengan hambatannya (R). Besarnya arus listrik akan berpengaruh pada besarnya energi serta panas yang dikeluarkan saat proses permesinan EDM (Pradana dkk, 2020).

$$I = \frac{V}{R}$$

Dimana:

V = Beda potensial (V)

I = Kuat arus (Ampere)

R = Hambatan (Ohm)

Dalam proses EDM *sinking*, arus listrik berperan pada besarnya pembentukan bunga api listrik pada elektroda dan juga besarnya energi listrik yang tercipta pada saat proses permesinan berlangsung. Energi listrik timbul pada kuat arus dalam satuan Ampere (A) yang mengalir akibat adanya beda potensial atau tegangan listrik dengan satuan volt (V). Arus listrik yang semakin besar maka semakin besar energi listrik yang dikeluarkan, sehingga semakin besar pula luasan benda kerja yang dapat dilelehkan. (Bisano, 2015).



Besarnya arus listrik juga akan mempengaruhi peningkatan temperatur pada saat proses permesinan (El-Hofy, 2015).

Jika arus listrik ditingkatkan maka energi listrik dan bunga api listrik yang tercipta akan semakin besar, hal ini akan diikuti dengan peningkatan temperatur pada area permesinan benda kerja. Temperatur yang sangat tinggi di area permesinan benda kerja, disertai dengan pendinginan cepat oleh cairan dielektrik akan membuat benda kerja akan mengalami peristiwa perlakuan panas yang nantinya akan mengubah kekerasan pada benda kerja.

#### 2.4 *Pulse-On Time*

*Pulse-on time* adalah waktu dimana arus listrik diaplikasikan (Quediri dkk, 2020). Ketika proses ini berlangsung, elektroda bergerak mendekati benda kerja untuk mengalirkan energi listrik tanpa menyentuh elektroda. Energi yang dihasilkan pada saat *on-time* akan mempengaruhi durasi pelelehan benda kerja oleh reaksi dari elektroda. (Bisono. 2015).

Semakin panjang durasi *pulse-on time*, maka semakin lama juga bunga api listrik tercipta. Hal ini akan mempengaruhi durasi perlakuan panas yang diberikan oleh kenaikan temperatur pada benda kerja, dan ketika waktu *pulse-on time* berhenti maka cairan dielektrik akan dengan cepat mendinginkan benda kerja hingga *pulse on-time* berikutnya. Serangkaian peristiwa tersebut akan membuat kekerasan benda kerja akan berubah.

#### 2.5 Aluminium

Aluminium 6061 banyak digunakan dalam berbagai bidang dikarenakan kemudahannya untuk dibentuk dan mempunyai elastisitas yang tinggi, ketahanan korosi, serta rasio kekuatan – berat yang bagus (Jayakumar dan Leon, 2014). Aluminium bisa digunakan dalam industri otomotif seperti membuat rumah kopling dan juga blok mesin. EDM *sinking* bisa digunakan dalam membuat *spare part* kendaraan dan juga cetakan. Hal ini dikarenakan mesin EDM *sinking* dapat membentuk profil yang rumit dengan ketelitian tinggi. Penelitian ini akan menggunakan aluminium 6061 dengan properti sesuai tabel 2.2 :



Tabel 2.2

## Properti Material Aluminium 6061 Dipengaruhi Temperatur

| Temperatur(°C) | Densitas | Modulus<br>young | Poisson's ratio | Konduktivitas<br>termal | Specific<br>heat |
|----------------|----------|------------------|-----------------|-------------------------|------------------|
| 37,8           | 2690     | 68,5             | 0,33            | 162                     | 945              |
| 93,3           | 2690     | 66,2             | 0,33            | 177                     | 978              |
| 149            | 2670     | 63,1             | 0,33            | 184                     | 1000             |
| 204            | 2660     | 59,2             | 0,33            | 192                     | 1030             |
| 260            | 2660     | 54               | 0,33            | 201                     | 1052             |
| 316            | 2630     | 47,5             | 0,33            | 207                     | 1080             |
| 317            | 2630     | 40,3             | 0,33            | 217                     | 1100             |

Sumber: Khan (2011)

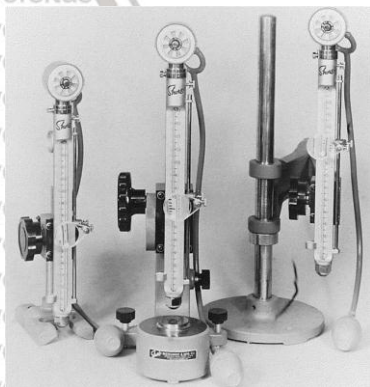
## 2.6 Kekerasan

Kekerasan merupakan kemampuan material. atau bahan dalam menahan indentasi atau deformasi permanen saat menerima beban dari indenter. Atau bisa juga didefinisikan dengan kemampuan material untuk menahan beban berupa goresan, pantulan, maupun indentasi (penakanan). Jika kekerasan material semakin tinggi maka material itu akan lebih susah untuk terdeformasi oleh beban yang diberikan penekan.

### 2.4.1 Macam-Macam Metode Pengujian Kekerasan

#### 1. Metode pantulan

Pada metode pantulan, alat yang digunakan untuk menentukan kekerasan benda adalah *Scleroscope* dengan contoh Gambar 2.15. *Scleroscope* bekerja dengan menjatuhkan pemukul dari ketinggian tertentu dari permukaan spesimen, lalu mengukur ketinggian pantulan pemukul tersebut. Semakin tinggi pantulan yang dihasilkan akan berbanding lurus dengan kekerasan spesimen.



Gambar 2.15 Model C. scleroscope hardness tester

Sumber: Baily (2000)



## 2. Metode goresan

Metode yang ditemukan Friedrich Mohs ini membagi kekerasan material yang ada di dunia dengan skala (skala Mohs). Skala Mohs terdiri dari nilai 1 sebagai nilai kekerasan terendah, dengan acuan kekerasan material *talc*, sampai skala 10 sebagai nilai kekerasan tertinggi dengan acuan kekerasan material intan.

Tabel 2.3

Tabel Skala Mohs

| No. | Nama Material             | Skala Kekerasan |
|-----|---------------------------|-----------------|
| 1   | <i>Talc</i>               | 1               |
| 2   | <i>Gypsum</i>             | 2               |
| 3   | <i>Calcite</i>            | 3               |
| 4   | <i>Fluorite</i>           | 4               |
| 5   | <i>Apatite</i>            | 5               |
| 6   | <i>Orthoclase</i>         | 6               |
| 7   | <i>Quartz</i>             | 7               |
| 8   | <i>Topaz</i>              | 8               |
| 9   | <i>Corundum Shapphire</i> | 9               |
| 10  | <i>Diamond</i>            | 10              |

Sumber: Callister (2007:227)

Tabel 2.3 menunjukkan skala mohs dari 1-10. Contoh pengujian dari metode ini adalah jika suatu spesimen dapat digores dengan mineral skala nomor 6 (*Orthoclase*) tapi tidak dapat digores dengan mineral skala nomor 5 (*Apatite*), dapat disimpulkan bahwa nilai kekerasan spesimen ada diantara skala nomor 5 dan 6. Metode ini memiliki beberapa kekurangan seperi; tidak dapat menentukan kekerasan secara akurat, dan jika mineral – mineral yang digunakan sebagai skala diuji dengan metode lain, nilai skala 9 dan 10 mempunyai rentang yang lebih besar daripada skala lain.

## 3. Metode uji penekanan (*Indentation Hardness*)

Metode ini adalah pengujian kekerasan pada material dengan cara menganalisis indentasi pada permukaan spesimen oleh reaksi pemberian beban dari tekanan indenter. Metode pengujian ini mempunyai dua tipe beban yaitu, *minor load* dan *major load*. *Minor load* digunakan untuk menentukan posisi dan juga melakukan kalibrasi indenter, sedangkan *major load* digunakan untuk memberikan indentasi yaag menjadi ukuran dalam menentukan kekerasan.

Sesuai jenis indentornya, metode uji penekanan dibagi menjadi tiga metode, yaitu:

### a. Brinell

Metodi ini menggunakan bola baja yang keras dengan diameter D (pada gambar 2.16 dan 2.17) ditekan pada permukaan material selama 10-15 detik dengan pemberian beban (P) secara bertahap. Diameter lekukan (deformasi) pada



material kemudian diukur dengan bantuan mikroskop. Untuk menghitung besarnya nilai kekerasan dalam pengujian brinell, kita masukkan nilai dari data yang telah diperoleh pada rumus:

$$BHN = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]} \quad (2-1)$$

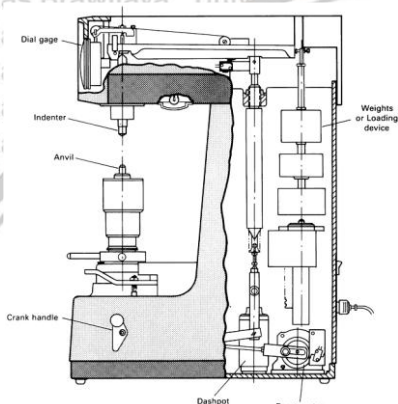
Dimana:

BHN = nilai kekerasan dengan metode Brinell ( $\text{kgf/mm}^2$ )

P = beban uji (kgf)

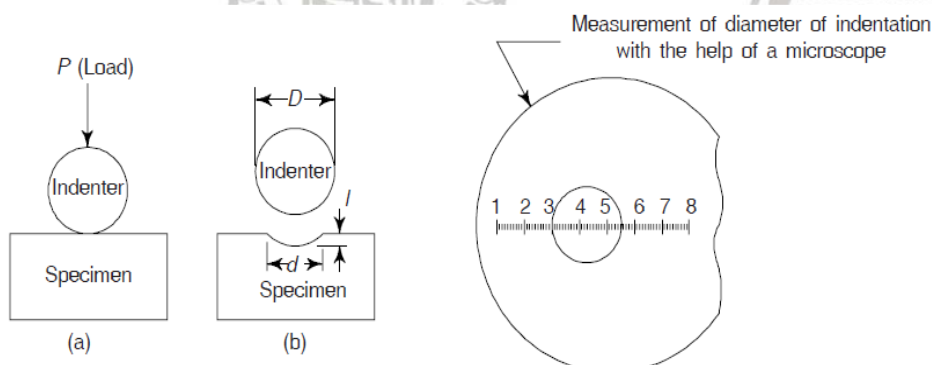
D = diameter indenter (mm)

d = diameter deformasi pengujian (mm)



Gambar 2.16 Brinell hardness testing machine

Sumber: Bailey (2000)



Gambar 2.17 Brinell hardness testing machine mechanism

Sumber: Kakani (2014:251)

## b. Rockwell

Metode uji ini menggunakan dua jenis penekan (indemtor) berupa bola baja dengan diameter antara 1/16, 1/8, 1/4, dan 1/2 in (1,588; 3,175; 6.350, dan 12,70 mm), dan juga intan dengan bentuk kerucut (*Brale*) sebagai indemtor untuk spesimen dengan kekerasan tinggi.

Nilai kekerasan yang didapatkan pada pengujian ini ditentukan dari selisih kedalaman penekanan indentor pertama (beban minor) dan penekanan kedua (beban mayor). Dari beban yang diberikan (minor dan mayor), pengujian ini dapat dibagi menjadi dua, yaitu Rockwell pada Tabel 2.4 dan *Superficial* Rockwell pada Tabel 2.5. Pada pengujian Rockwell, beban minor yang digunakan adalah 10 kgf, dengan beban mayor 60, 100, dan 150 kgf. Skala yang diberikan akan ditandai dengan huruf alfabet yang dapat dilihat di tabel.

Untuk pengujian *Superficial* Rockwell, beban minor yang digunakan adalah 3 kgf dengan beban mayor 15, 30, dan 45 kgf. Skala yang diberikan ditandai dengan angka 15, 30, atau 45 (beban yang digunakan) selanjutnya ditambah dengan huruf N, T, W, X, atau Y (penekan yang digunakan). *Superficial* Rockwell diaplikasikan pada spesimen yang tipis.

Pada pengujian kekerasan Rockwell dan *Superficial*, penulisan nilai kekerasan yang didapatkan harus diikuti skala yang digunakan. Nilai yang didapatkan menggunakan simbol HR diteruskan dengan menunjukkan skala pengujian. Sebagai contoh, 90 HRB menunjukkan kekerasan Rockwell 90 menggunakan skala uji B dan 80HR30W menunjukkan kekerasan *Superficial* 80 menggunakan skala 30W.

Tabel 2.4

*Rockwell Hardness Scale*

| <i>Scale Symbol</i> | <i>Indenter</i>         | <i>Major Load (kg)</i> |
|---------------------|-------------------------|------------------------|
| A                   | Diamond                 | 60                     |
| B                   | $\frac{1}{16}$ in. ball | 100                    |
| C                   | Diamond                 | 150                    |
| D                   | Diamond                 | 100                    |
| E                   | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 100                    |
| F                   | $\frac{1}{16}$ in. ball | 60                     |
| G                   | $\frac{1}{16}$ in. ball | 150                    |
| H                   | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 60                     |
| K                   | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 150                    |

Sumber: Callister (2007:179)



Tabel 2.5  
*Superficial Rockwell Hardness Scale*

| <i>Scale Symbol</i> | <i>Indenter</i>         | <i>Major Load (kg)</i> |
|---------------------|-------------------------|------------------------|
| 15                  | Diamond                 | 15                     |
| 30                  | Diamond                 | 30                     |
| 45                  | Diamond                 | 45                     |
| 15                  | $\frac{1}{16}$ in. ball | 15                     |
| 30                  | $\frac{1}{16}$ in. ball | 30                     |
| 45                  | $\frac{1}{16}$ in. ball | 45                     |
| 15                  | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 15                     |
| 30                  | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 30                     |
| 45                  | $\frac{1}{8}$ in. ball  | 45                     |

Sumber: Callister (2007:179)

$$\text{HRN} = \frac{k(h_1 - h_2)}{c} \dots\dots\dots(2-2)$$

Dimana:

HRN = nilai kekerasan rockwell ( $\text{kgf/mm}^2$ )

k = konstanta; intan = 0,2 dan bola baja = 0,6

$h_1$  = kedalaman oleh beban mayor (mm)

$h_2$  = kedalaman oleh beban minor (mm)

c. Vickers

Metode pengujian ini menggunakan indenter yang terbuat dari intan kecil dengan bentuk geometri piramida. Beban indenter yang diberikan juga lebih kecil daripada pengujian rockwell, dan. brinel. Beban yang diberikan pada pengujian ini adalah 5 kg hingga 120 kg. Nilai kekerasan yang didapat dihitung dengan cara:

$$\text{VHN} = \frac{1,854 P}{d_i^2} \dots\dots\dots(2-3)$$

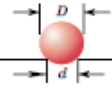

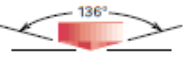

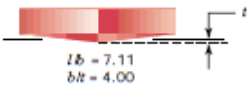

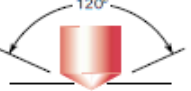

Dengan:

VHN = besarnya nilai kekerasan dalam metode vicker ( $\text{kgf/mm}^2$ )

P = beban yang dikenakan pada specimen (kgf)

$d_i$  = panjang diagonal indentasi ( $\text{mm}^2$ )

Gambar 2.18 merupakan perbandingan dari tiga pengujian kekerasan

| Test                              | Indenter   | Shape of Indentation  |  | Load   | Formula for Hardness Number*                   |
|-----------------------------------|--|---|--|--|--|
|                                   |  | Side View   | Top View   |  |  |
| Brinell                           | 10-mm sphere of steel or tungsten carbide  |  |  | $P$  | $HB = \frac{2P}{\pi D [D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$ |
| Vickers microhardness             | Diamond pyramid  |  |  | $P$  | $HV = 1.854P/d^2$                              |
| Knoop microhardness               | Diamond pyramid  |  |  | $P$  | $HK = 14.2P/l^2$                               |
| Rockwell and Superficial Rockwell | Diamond cone<br>$\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}$ in diameter steel spheres |  |  | 60 kg } Rockwell<br>100 kg }<br>150 kg }<br>15 kg } Superficial Rockwell<br>30 kg }<br>45 kg } |  |

\* For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.

Source: Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

Gambar 2.18 Teknik pengujian kekerasan  
Sumber: Callister (2007:178)

## 2.7 Hipotesis

Semakin besar arus listrik yang diberikan pada saat permesinan menggunakan EDM *sinking* maka temperatur pada celah antar benda kerja dan elektroda akan semakin tinggi, serta semakin lama *pulse-on time*, maka durasi peningkatan temperatur yang dialami juga semakin lama. Hal ini diiringi oleh pendinginan cairan dielektrik akan menimbulkan peningkatan nilai kekerasan pada benda kerja.



## BAB III METODE PENELITIAN

### 3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan menggunakan metode *experimental research* (penelitian eksperimental), yaitu melakukan pengamatan untuk mengetahui sebab – akibat dalam suatu proses melalui eksperimen sehingga akan didapatkan data bagaimana pengaruh arus listrik dan *pulse on-time* pada proses *Electrical Discharge Machining* terhadap kekerasan permukaan pada pemotongan Aluminium 6061.

### 3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di *workshop* Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Malang pada bulan November 2020, dan untuk pengukuran nilai kekerasan permukaan dilaksanakan di Laboratorium Pengujian Bahan Jurusan Teknik Fakultas Teknik Universitas Brawijaya pada bulan November 2020.

### 3.3 Variabel Penelitian

#### 1. Variabel bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

Arus listrik : 4A 7A, 10A

*Pulse On-time* : 50  $\mu$ s, 75  $\mu$ s, dan 100  $\mu$ s

#### 2. Variabel terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh variabel bebas yang telah ditentukan. Variabel terikatnya adalah kekerasan.

#### 3. Variabel terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang nilainya dijaga agar tidak berubah selama pengujian berlangsung. Variabel terkontrolnya adalah:

Elektroda tembaga : Diameter 25,4 mm dan panjang 50 mm

*Pulse On-time* : 4  $\mu$ s

*Voltage* : 240 V

### 3.4 Spesifikasi Alat dan Bahan

#### 3.4.1 Alat Penelitian

##### 1. Mesin EDM C-TEK ZNC

Gambar 3.1 merupakan mesin edm yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3.1 Mesin EDM-C TEK ZNC 320

Sumber: Workshop Teknik Mesin Universitas Negeri Malang (2020)

|   |   |
|---|---|
| Merek   | : EDM C-TEK                               |
| Model   | : ZNC 320                                 |
| Tahun   | : 2012                                    |
| Voltage   | : 240 V                                   |
| Size of container   | : 880 x 520 x 330 mm                      |
| Table size  | : 600 x 300 mm                            |
| Table travel – longitude                                  | : 300 mm                                  |
| Table travel – crossward                                  | : 200 mm                                  |
| Table travel – vertical                                   | : 180 mm                                  |
| Electrode Head Travel                                     | : 180 mm                                  |
| Max. distance between Electrode head<br>And working table | : 420 mm                                  |
| Max. load of electrode head                               | : 100 kg                                  |
| Machine size  | : 1300 x 1250 x 1200 mm                   |
| Net weight  | : 1150 kg                                 |
| Filter container cubic                                    | : 250 liter Build inside the machine body |



## 2. Rockwell Type Hardness Tester

Gambar 3.2 merupakan alat uji yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3.2 Rockwell type hardness test

Sumber: Laboratorium Pengujian Bahan Uniiversitas Brawijaya (2020)

Merek : CV 600A

Indentor bola Rockwell : 1/16"

Indentor intan : 120°

Buatan : Jerman

Skala pembebanan : HRA = 588 N

HRB = 980 N

HRC = 1471 N

## 3. Elektroda Tembaga

Gambar 3.3 merupakan elektroda yang digunakan pada penelitian kali ini.



Gambar 3.3 Elektroda tembaga

### 3.4.2 Bahan Penelitian

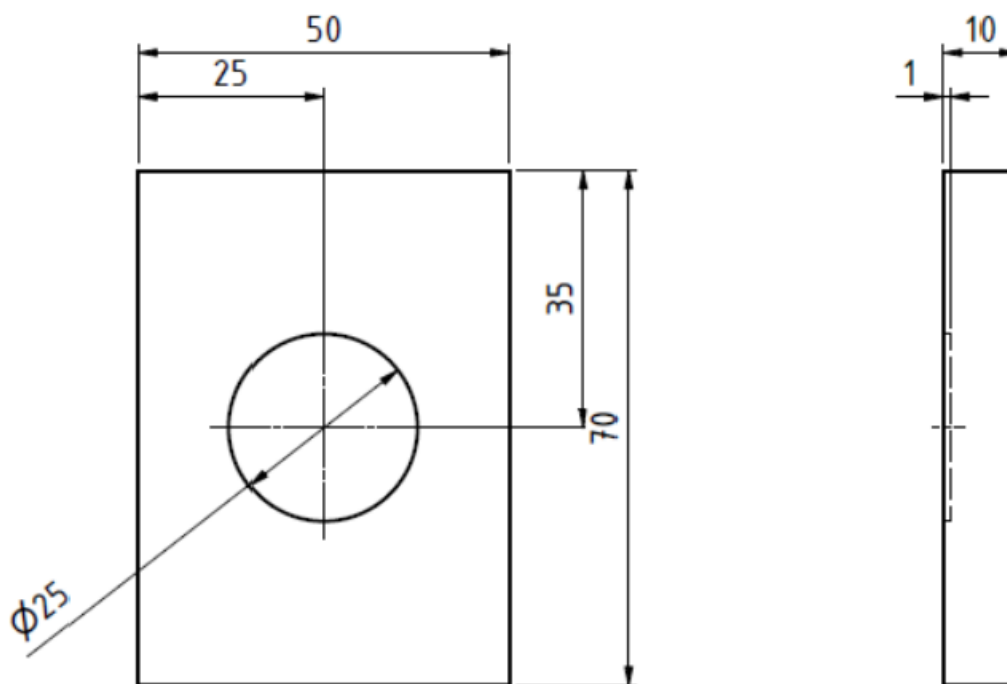
Penelitian ini menggunakan bahan yang digunakan adalah Aluminium 6061 dengan komposisi seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1  
Komposisi Kimia Aluminium 6061

| Si   | Mg   | Fe   | Cu   | Zn   | Ti   | Cr   | Other | Al      |
|------|------|------|------|------|------|------|-------|---------|
| 0,63 | 0,98 | 0,19 | 0,18 | 0,10 | 0,08 | 0,05 | 0,15  | Balance |

### 3.5.3 Dimensi Benda Kerja

Berikut dapat dilihat pada Gambar 3.4 adalah dimensi benda kerja dalam satuan mm.



Gambar 3.4 Dimensi benda kerja

Titik pengujian kekerasan *Rockwell Type Hardness Tester* pada benda kerja dilakukan di area tengah permukaan hasil proses permesinan yang memiliki dimensi 25 mm. Hal ini dilakukan karena area tengah merupakan area yang paling terpengaruh secara signifikan oleh proses permesinan elektroda EDM.



### 3.6 Prosedur Penelitian

#### 3.6.1 Prosedur *Electrical Discharge Machining*

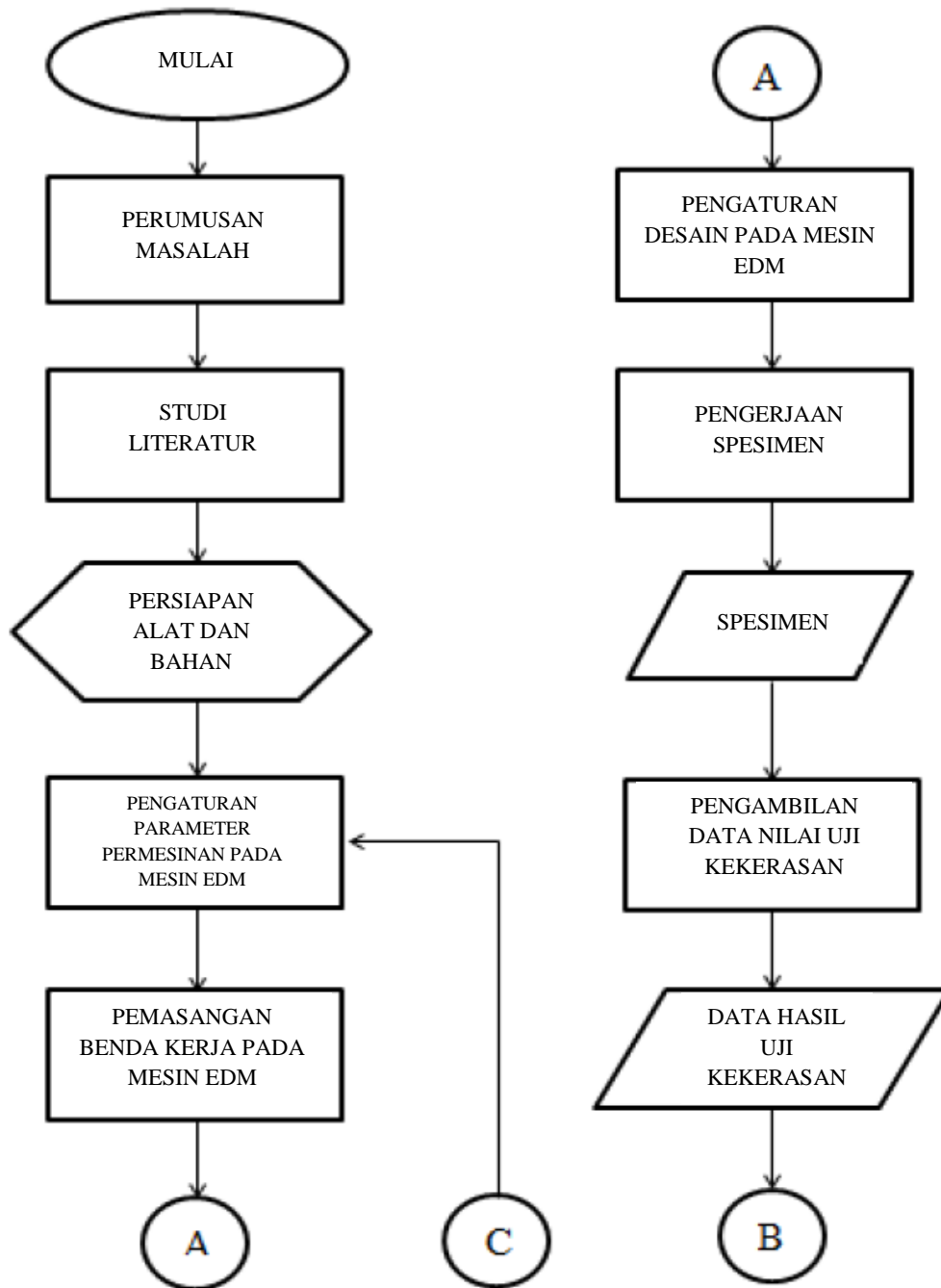
1. Mempersiapkan desain specimen.
2. Menyiapkan elektroda.
3. Mengatur parameter permesinan sesuai dengan variabel yang ditentukan.
4. Menempatkan benda kerja pada cekam mesin EDM.
5. Memasang elektroda pada *tool holder* mesin EDM *sinking*.
6. Mengatur posisi elektroda hingga tegak lurus dengan benda kerja menggunakan *feeler gauge*.
7. Mengatur parameter pemesinan (Arus listrik dan *Pulse On-Time*).
8. Input desain specimen dalam mesin EDM.

#### 3.6.2 Prosedur Pengujian Kekerasan

1. Spesimen ditempatkan pada cekam mesin uji kekerasan.
2. Hidupkan mesin uji kekerasan.
3. Tekan tombol *start* pada mesin uji kekerasan untuk memulai pengujian.
4. Setelah pengujian selesai nilai hasil pengujian kekerasan akan muncul.
5. Proses pengujian 1-4 diulangi hingga semua specimen diuji.

### 3.7 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.5 merupakan diagram alir penelitian dalam skripsi ini.







Gambar 3.5 Diagram alir penelitian



Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Hasil Pengukuran

Proses permesinan material aluminium 6061 telah dilakukan dengan menggunakan EDM, proses permesinan tersebut dilakukan dengan 2 variasi yaitu arus listrik dan *pulse-on time*. Dari spesimen hasil permesinan sesuai dengan variasi yang diberikan kemudian dilakukan pengukuran untuk memperoleh data yang dihasilkan sehingga dapat mengetahui pengaruh dari variasi yang telah dilakukan. Pengukuran yang telah dilakukan adalah pengujian kekerasan dengan menggunakan alat *rockwell hardness tester* dan setiap variasi dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali sehingga didapatkan nilai rata-rata ketiga pengulangan tersebut pada setiap variasi. Tabel 4.1 merupakan data hasil pengujian dan pengukuran kekerasan permukaan.

Tabel 4.1  
Data Hasil Pengujian dan Pengukuran Kekerasan Permukaan

| Spesimen | Arus Listrik (A) | Pulse-on Time (µs) | Kekerasan Permukaan (HRB) |      |      | Rata-rata |
|----------|------------------|--------------------|---------------------------|------|------|-----------|
|          |                  |                    | 1                         | 2    | 3    |           |
| 1        | 4                | 50                 | 39,8                      | 40,4 | 39,7 | 39,97     |
| 2        | 4                | 75                 | 49,2                      | 48,3 | 48,5 | 48,67     |
| 3        | 4                | 100                | 50,3                      | 51,1 | 50,8 | 50,73     |
| 4        | 7                | 50                 | 41,4                      | 41,6 | 41,9 | 41,63     |
| 5        | 7                | 75                 | 49,3                      | 49,8 | 50,1 | 49,73     |
| 6        | 7                | 100                | 50,9                      | 51,4 | 51,2 | 51,17     |
| 7        | 10               | 50                 | 47,5                      | 47,8 | 47,7 | 47,67     |
| 8        | 10               | 75                 | 50,4                      | 50,9 | 51,3 | 50,87     |
| 9        | 10               | 100                | 52,2                      | 51,6 | 51,9 | 51,90     |

### 4.2 Perhitungan *Analysis of Variance* (ANOVA)

Perhitungan *analysis of variance* bertujuan untuk mengetahui apakah variasi yang diberikan yaitu perubahan nilai arus listrik dan *pulse-on time* memberi pengaruh yang signifikan terhadap data yang diperoleh dari hasil pengukuran kekasaran permukaan. *Analysis of variance* yang digunakan adalah *one way* (satu arah).

#### 4.2.1 Perhitungan Data Hasil Pengukuran Kekerasan Permukaan

Karena menggunakan menggunakan metode *one way analysis of variance* maka data harus dikelompokkan menjadi sebagai berikut:

Tabel 4.2

##### Kekerasan Permukaan Arus Listrik 4A

| No | Pulse On-Time |            |             |
|----|---------------|------------|-------------|
|    | 50 $\mu$ s    | 75 $\mu$ s | 100 $\mu$ s |
| 1  | 39,8          | 49,2       | 50,3        |
| 2  | 40,4          | 48,3       | 51,1        |
| 3  | 39,7          | 48,5       | 50,8        |

Tabel 4.3

##### Kekerasan Permukaan Arus Listrik 7A

| No | Pulse On-Time |            |             |
|----|---------------|------------|-------------|
|    | 50 $\mu$ s    | 75 $\mu$ s | 100 $\mu$ s |
| 1  | 41,4          | 49,3       | 50,9        |
| 2  | 41,6          | 49,8       | 51,4        |
| 3  | 41,9          | 50,1       | 51,2        |

Tabel 4.4

##### Kekerasan Permukaan Arus Listrik 10A

| No | Pulse On-Time ( $\mu$ s) |            |             |
|----|--------------------------|------------|-------------|
|    | 50 $\mu$ s               | 75 $\mu$ s | 100 $\mu$ s |
| 1  | 47,5                     | 50,4       | 52,2        |
| 2  | 47,8                     | 50,9       | 51,6        |
| 3  | 47,7                     | 51,3       | 51,9        |

Tabel 4.5

##### Kekerasan Permukaan Pulse-On Time 50 $\mu$ s

| No | Arus Listrik |      |      |
|----|--------------|------|------|
|    | 4A           | 7A   | 10A  |
| 1  | 39,8         | 41,4 | 47,5 |
| 2  | 40,4         | 41,6 | 47,8 |
| 3  | 39,7         | 41,9 | 47,7 |

Tabel 4.6

##### Kekerasan Permukaan Pulse-On Time 75 $\mu$ s

| No | Arus Listrik |      |      |
|----|--------------|------|------|
|    | 4A           | 7A   | 10A  |
| 1  | 49,2         | 49,3 | 50,4 |
| 2  | 48,3         | 49,8 | 50,9 |
| 3  | 48,5         | 50,1 | 51,3 |

Tabel 4.7

##### Kekerasan Permukaan Pulse-On Time 100 $\mu$ s

| No | Arus Listrik |      |      |
|----|--------------|------|------|
|    | 4A           | 7A   | 10A  |
| 1  | 50,3         | 50,9 | 52,2 |
| 2  | 51,1         | 51,4 | 51,6 |
| 3  | 50,8         | 51,2 | 51,9 |



1. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.2

- Hipotesis

H<sub>0</sub> : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

H<sub>1</sub> : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} \text{JKT} &= \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2/N) \\ &= (39,7^2 + 40,4^2 + 39,7^2 + 49,2^2 + 48,3^2 + 48,5^2 + 50,3^2 + 51,1^2 + 50,8^2) - ((39,7 + 40,4 + 39,7 + 49,2 + 48,3 + 48,5 + 50,3 + 51,1 + 50,8)^2/9) \\ &= 196,94 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\begin{aligned} \text{JKK} &= \sum_{i=1}^k (X_i^2/K + X_i^2/N) \\ &= ((39,7 + 40,4 + 39,7)^2/3 + (49,2 + 48,3 + 48,5)^2/3 + (50,3 + 51,1 + 50,8)^2/3) \\ &\quad - ((41,4 + 41,6 + 41,9 + 49,2 + 48,3 + 48,5 + 50,3 + 51,1 + 50,8)^2/9) \\ &= 195,88 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned} \text{JKG} &= \text{JKT} - \text{JKK} \\ &= 196,94 - 195,88 \\ &= 1,06 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\begin{aligned} \text{KTK} &= \text{JKK} / (k - 1) \\ &= 195,88 / (3 - 1) \\ &= 97,94 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\begin{aligned} \text{KTG} &= \text{JKG} / (n - k) \\ &= 196,94 / (9 - 3) \\ &= 0,18 \end{aligned}$$

- $f_{\text{hitung}} = \text{KTK} / \text{KTG}$

$$\begin{aligned} &= 97,94 / 0,18 \\ &= 554,38 \end{aligned}$$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{hitung}$  sebesar 554,38 dan nilai  $f_{tabel}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{hitung} > f_{tabel}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai arus berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

## 2. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.3

- Hipotesis

$H_0$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2/N) \\ &= (41,4^2 + 41,6^2 + 41,9^2 + 49,3^2 + 49,8^2 + 50,1^2 + 50,9^2 + 51,4^2 + 51,2^2) - ((41,4 \\ &\quad + 41,6 + 41,9 + 49,3 + 49,8 + 50,1 + 50,9 + 51,4 + 51,3)^2 / 9) \\ &= 159,13 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \sum_{i=1}^k (X_i^2/K + X_i^2/N) \\ &= ((41,4 + 41,6 + 41,9)^2 / 3 + (49,2 + 48,3 + 48,5)^2 / 3 + (50,3 + 51,1 + 51,3)^2 / 3) \\ &\quad - ((41,4 + 41,6 + 41,9 + 49,2 + 48,3 + 48,5 + 50,3 + 51,1 + 51,3)^2 / 9) \\ &= 159,55 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned} JKG &= JKT - JKK \\ &= 159,13 - 159,55 \\ &= 0,58 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\begin{aligned} KTK &= JKK / (k - 1) \\ &= 158,55 / (3 - 1) \\ &= 79,27 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\begin{aligned} KTG &= JKG / (n - k) \\ &= 0,58 / (9 - 3) \\ &= 0,10 \end{aligned}$$



- $f_{hitung} = KTK / KTG$   
 $= 79,05 / 0,11$   
 $= 820,08$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{hitung}$  sebesar 820,08 dan nilai  $f_{tabel}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{hitung} > f_{tabel}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai arus berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

### 3. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.4

- Hipotesis

$H_0$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} JKT &= \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2/N) \\ &= (47,5^2 + 47,8^2 + 47,7^2 + 50,4^2 + 50,9^2 + 51,3^2 + 52,2^2 + 51,6^2 + 51,9^2) - ((47,5 \\ &\quad + 47,8 + 47,7 + 50,4 + 50,9 + 51,3 + 52,2 + 51,6 + 51,9)^2 / 9) \\ &= 29,86 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\begin{aligned} JKK &= \sum_{i=1}^k (X_i^2/K + X_i^2/N) \\ &= ((41,4 + 41,6 + 41,9)^2 / 3 + (49,2 + 48,3 + 48,5)^2 / 3 + (50,3 + 51,1 + 51,3)^2 / 3) \\ &\quad - ((41,4 + 41,6 + 41,9 + 49,2 + 48,3 + 48,5 + 50,3 + 51,1 + 51,3)^2 / 9) \\ &= 29,23 \end{aligned}$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned} JKG &= JKT - JKK \\ &= 29,86 - 29,23 \\ &= 0,63 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\begin{aligned} KTK &= JKG / (k - 1) \\ &= 0,63 / (3 - 1) \\ &= 0,315 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\text{KTG} = \text{JKG} / (n - k)$$

$$= 0,63 / (9 - 3)$$

$$= 0,11$$

- $f_{\text{hitung}} = \text{KTK} / \text{KTG}$

$$= 14,61 / 0,11$$

$$= 138,45$$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{\text{hitung}}$  sebesar 138,45 dan nilai  $f_{\text{tabel}}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{\text{hitung}} > f_{\text{tabel}}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai arus berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

#### 4. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.5

- Hipotesis

$H_0$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\text{JKT} = \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2/N)$$

$$= (39,8^2 + 41,4^2 + 39,7^2 + 41,4^2 + 41,6^2 + 41,9^2 + 47,5^2 + 47,8^2 + 47,7^2) - ((39,8 + 41,4 + 39,7 + 41,4 + 41,6 + 41,9 + 47,5 + 47,8 + 47,7)^2 / 9)$$

$$= 98,93$$

- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\text{JKK} = \sum_{i=1}^k (X_i^2/K + X_i^2/N)$$

$$= ((39,8 + 41,4 + 39,7)^2 / 3 + (41,4 + 41,6 + 41,9)^2 / 3 + (47,5 + 47,8 + 47,7)^2 / 3) - ((39,8 + 41,4 + 39,7 + 41,4 + 41,6 + 41,9 + 47,5 + 47,8 + 47,7)^2 / 9)$$

$$= 98,47$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\text{JKG} = \text{JKT} - \text{JKK}$$

$$= 98,93 - 98,47$$

$$= 0,46$$



- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\text{KTK} = \text{JKK} / (k - 1)$$

$$= 98,9 / (3 - 1)$$

$$= 49,23$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\text{KTG} = \text{JKG} / (n - k)$$

$$= 0,46 / (9 - 3)$$

$$= 0,08$$

- $f_{\text{hitung}} = \text{KTK} / \text{KTG}$

$$= 36,63 / 0,08$$

$$= 642,19$$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{\text{hitung}}$  sebesar 624,19 dan nilai  $f_{\text{tabel}}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{\text{hitung}} > f_{\text{tabel}}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai *pulse-on time* berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

#### 5. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.6

- Hipotesis

$H_0$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\text{JKT} = \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2/N)$$

$$= (49,2^2 + 48,3^2 + 48,5^2 + 49,3^2 + 49,8^2 + 50,1^2 + 50,4^2 + 50,9^2 + 51,3^2) - ((49,2 + 48,3 + 48,5 + 49,3 + 49,8 + 50,1 + 50,4 + 50,9 + 51,3)^2 / 9)$$

$$= 8,44$$

- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\text{JKK} = \sum_{i=1}^k (X_i^2/K + X_i^2/N)$$

$$= ((49,2 + 48,3 + 48,5)^2 / 3 + (49,3 + 49,8 + 50,1)^2 / 3 + (50,1 + 50,4 + 50,9)^2 / 3) - ((41,4 + 41,6 + 41,9 + 49,2 + 48,3 + 48,5 + 50,3 + 51,1 + 51,3)^2 / 9)$$

$$= 7,26$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\begin{aligned} \text{JKG} &= \text{JKT} - \text{JKK} \\ &= 8,44 - 7,26 \\ &= 1,18 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\begin{aligned} \text{KTK} &= \text{JKK} / (k - 1) \\ &= 7,26 / (3 - 1) \\ &= 3,63 \end{aligned}$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\begin{aligned} \text{KTG} &= \text{JKG} / (n - k) \\ &= 1,18 / (9 - 3) \\ &= 0,2 \end{aligned}$$

- $f_{\text{hitung}} = \text{KTK} / \text{KTG}$

$$\begin{aligned} &= 3,63 / 0,2 \\ &= 18,46 \end{aligned}$$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{\text{hitung}}$  sebesar 18,46 dan nilai  $f_{\text{tabel}}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{\text{hitung}} > f_{\text{tabel}}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai *pulse-on time* berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

#### 6. Perhitungan untuk data dari Tabel 4.7

- Hipotesis

$H_0$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang sama ( $\mu_1 = \mu_2$ )

$H_1$  : masing-masing variabel bebas yang diberikan menghasilkan nilai kekerasan permukaan yang berbeda ( $\mu_1 \neq \mu_2$ )

- Jumlah Kuadrat Total (JKT)

$$\begin{aligned} \text{JKT} &= \sum_{i=1}^k (X_i^2 - X_i^2 / N) \\ &= (50,3^2 + 51,1^2 + 50,8^2 + 50,9^2 + 51,4^2 + 51,2^2 + 52,2^2 + 51,6^2 + 51,9^2) - ((50,3 \\ &\quad + 51,1 + 50,8 + 50,9 + 51,4 + 51,2 + 52,2 + 51,6 + 51,9)^2 / 9) \\ &= 2,72 \end{aligned}$$



- Jumlah Kuadrat Kolom (JKK)

$$\begin{aligned} \text{JKK} &= \sum_{i=1}^k (Xi^2/K + Xi^2/N) \\ &= ((50,3 + 51,1 + 50,8)^2 / 3 + (50,9 + 51,4 + 51,2)^2 / 3 + (52,2 + 51,6 + 51,9)^2 / 3) \\ &= ((50,3 + 51,1 + 50,8 + 50,9 + 51,4 + 51,2 + 52,2 + 51,6 + 51,9)^2 / 9) \end{aligned}$$

$$= 2,09$$

- Jumlah Kuadrat Galat (JKG)

$$\text{JKG} = \text{JKT} - \text{JKK}$$

$$= 2,72 - 2,09$$

$$= 0,63$$

- Kuadrat Tengah Kelompok (KTK)

$$\text{KTK} = \text{JKK} / (k - 1)$$

$$= 2,09 / (3 - 1)$$

$$= 1,04$$

- Kuadrat Tengah Galat (KTG)

$$\text{KTG} = \text{JKG} / (n - k)$$

$$= 0,63 / (9 - 3)$$

$$= 0,11$$

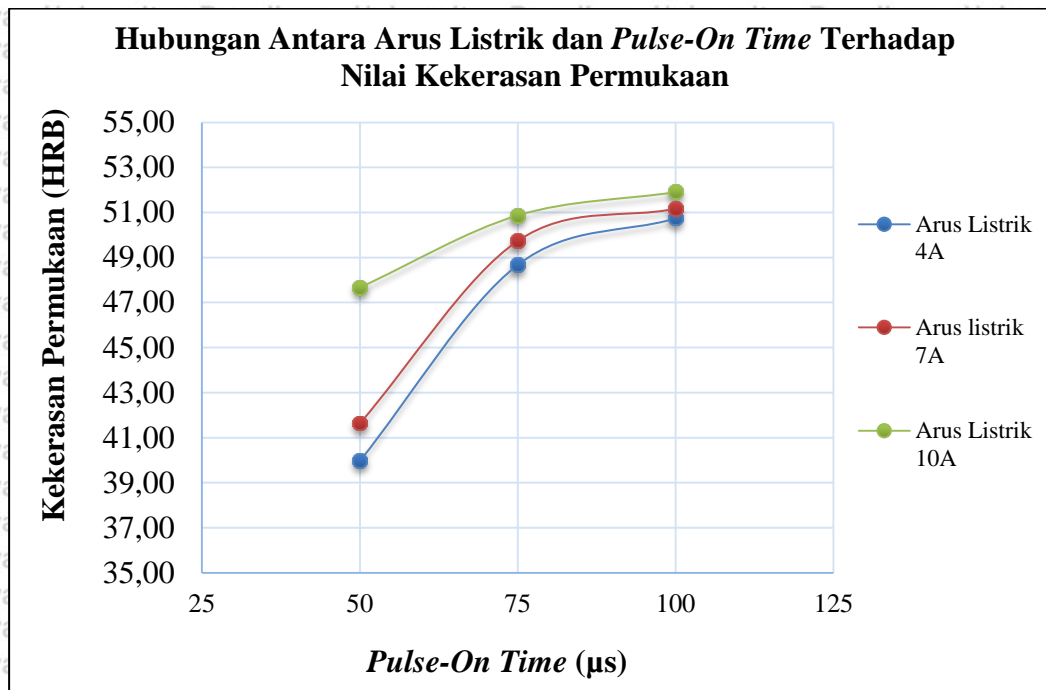
- $f_{hitung} = \text{KTK} / \text{KTG}$

$$= 79,05 / 0,11$$

$$= 9,88$$

- Hasil perhitungan diatas memperoleh nilai  $f_{hitung}$  sebesar 9.88 dan nilai  $f_{tabel}$  tabel uji  $f$  dengan nilai  $\alpha$  sebesar 0,05 adalah 5,14. Jadi kesimpulannya adalah nilai  $f_{hitung} > f_{tabel}$  artinya tolak  $H_0$  atau terima  $H_1$ , yang artinya perbedaan variasi yang dilakukan yaitu pada perubahan nilai *pulse-on time* berpengaruh secara signifikan terhadap nilai kekerasan permukaan yang dihasilkan.

### 4.3 Grafik Hubungan Antara Arus Listrik dan *Pulse-On Time* Terhadap Nilai Kekerasan Permukaan



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara arus listrik (A) dan *Pulse-On Time* ( $\mu\text{s}$ ) Terhadap nilai kekerasan permukaan (HRB)

Berdasarkan grafik hubungan antara arus listrik dan *pulse-on time* terhadap nilai kekerasan permukaan, terlihat pada titik biru menunjukkan arus 4 ampere dengan *pulse-on time* 50  $\mu\text{s}$  menghasilkan nilai kekerasan 39,97 HRB untuk arus 4 ampere dengan *pulse-on time* 75  $\mu\text{s}$  nilai kekerasan yang dihasilkan adalah sebesar 48,67 HRB, serta pada arus 4 ampere dengan *pulse-on time* 100  $\mu\text{s}$  nilai kekerasan yang dihasilkan adalah sebesar 50,73 HRB.

Pada titik merah menunjukkan arus 7 ampere dengan *pulse-on time* 50  $\mu\text{s}$  menghasilkan nilai kekerasan permukaan 41,63 HRB, untuk arus 7 ampere dengan *pulse-on time* 75  $\mu\text{s}$  kekerasan permukaan yang dihasilkan 49,73 HRB, serta pada arus 7 ampere dengan *pulse-on time* 100  $\mu\text{s}$  nilai kekerasan yang dihasilkan adalah sebesar 51,17 HRB.

Pada titik hijau menunjukkan arus 10 ampere dengan *pulse-on time* 50  $\mu\text{s}$  menghasilkan nilai kekerasan permukaan 47,67 HRB untuk arus 10 ampere dengan *pulse-on time* 75  $\mu\text{s}$  kekerasan permukaan yang dihasilkan 50,87 HRB, serta pada arus 10 ampere dengan *pulse-on time* 100  $\mu\text{s}$  nilai kekerasan yang dihasilkan adalah sebesar 51,90 HRB.

Menurut El-Hofyn (2005), pemberian arus listrik yang semakin besar akan mempengaruhi besarnya bunga api listrik yang tercipta. Ketika arus listrik semakin tinggi,



maka bunga api listrik yang tercipta juga akan semakin besar dan menimbulkan temperatur pada area permesinan semakin tinggi.

*Pulse-on time* adalah waktu dimana ada arus listrik dialirkan pada elektroda yang nantinya mempengaruhi waktu bunga api listrik yang tercipta (Quediri dkk., 2020). Durasi *pulse-on time* sendiri akan mempengaruhi waktu pemanasan dari benda kerja oleh bunga api listrik yang tercipta.

Terjadi sedikit penambahan dimensi pada daerah hasil permesinan benda kerja dikarenakan panas dari proses peleburan yang terjadi saat proses permesinan berlangsung. Tetapi perubahan yang terjadi tidak terlalu signifikan terhadap desain yang direncanakan untuk penelitian ini.

El Hofy (2005), juga berkata bahwa peningkatan temperatur dari proses permesinan akan memberikan efek perlakuan panas pada benda kerja, dan akan didinginkan secara cepat oleh efek konduksi dari benda kerja yang tidak diberi permesinan dan juga cairan dielektrik yang nantinya akan membuat terjadinya perubahan kekerasan permukaan dari benda kerja. Bunga api listrik yang semakin besar diakibatkan oleh peningkatan arus listrik yang diberikan, dan semakin lamanya durasi bunga api listrik yang dipengaruhi oleh nilai *pulse-on time* akan membuat suhu permesinan yang diterima benda kerja semakin tinggi. Perlakuan berupa pemanasan yang diberikan oleh proses permesinan yang suhunya semakin meningkat dikarenakan oleh semakin besarnya nilai arus listrik dan *pulse-on time* serta diiringi oleh pendinginan cepat oleh cairan dielektrik dan bagian benda kerja yang tidak diberi proses permesinan akan meningkatkan nilai kekerasan dari benda kerjas yang diberi proses permesinan.



Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengujian, pengukuran dan pengolahan data hasil penelitian bisa diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil seluruh perhitungan statistik ANOVA pada bab 4 menunjukkan bahwa  $f_{hitung} > f_{tabel}$ , hal ini menunjukkan bahwa arus listrik dan *pulse-on time* pada proses permesinan EDM *sinking* memiliki pengaruh pada kekerasan material Aluminium 6061.
2. Dari Gambar 4.1 pada subbab 4.3 dapat dilihat bahwa semakin besar arus listrik dan *pulse-on time* yang digunakan pada penelitian ini mengakibatkan nilai kekerasan meningkat, hal ini dikarenakan karena semakin besar bunga api listrik dan durasi terciptanya bunga api listrik pada proses permesinan maka semakin tinggi temperatur proses permesinan sehingga akan mengubah kekerasan permukaan dari Aluminium 6061.
3. Nilai kekerasan permukaan yang paling kecil terjadi pada parameter arus 4A, *pulse-on time* 50  $\mu$ s dengan nilai kekerasan permukaan 39,97 HRB. Sedangkan untuk nilai kekerasan paling besar terjadi pada parameter arus 10A, *pulse-on time* 100  $\mu$ s dengan nilai kekerasan permukaan 51,90 HRB.

### 5.2 Saran

1. Perlu dilakukan penelitian mengenai jenis cairan dielektrik yang digunakan untuk proses permesinan EDM *sinking* dengan material yang berbeda.
2. Perlu dilakukan peneliian lebih terhadap parameter proses permesinan EDM *sink* yang lain seperti variasi lebar celah antara benda kerja dan elektroda serta perubahan voltase permesinan.



Halaman ini sengaja dikosongkan



## DAFTAR PUSTAKA

- Abulais, Shaaz. 2014. *Current Research trends in Electric Discharge Machining (EDM): Review*. Division of Manufacturing Processes & Automation Engineering Univesity of Delhi, India.
- Akkurt, Adnan. 2014. *The effect of cutting process on surface microstructure and hardness of pure and Al 6061 aluminium alloy*. Department of Industrial Design Engineering Faculty of Technology, Gazi University, Turkey.
- Bailey, John.A. 2000. *Mechanical Testing and Evaluation, ASM Handbook, Vol.8 No.E18*. The Timkin Company. Ohio.
- Bisono, R. M. 2015. *Optimization of Multi-Response Of The EDM Sinking Process on DAC Tool Steel Using Taguchi-Grey-Fuzzy*. Departement of Mechanical Engineering Faculty of Industrial Technology Sepuluh November. Surabaya.
- Callister, William D. 2007. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley. Utah.
- El-Hofy, H. 2005. *Advenced Machining Processes (Nontraditional and Hybrid Machining Processes)*. In Production Engineering Department Alexandria University, Egypt.
- Ho, K. H., dan Newman, S. T. 2003. *State of the art electrical discharge machining (EDM)*. Advanced Manufacturing Systems and Technology Centre of Loughborough University, Loughborough.
- Jayakumar, V., dan Leon, Stephen J. 2014. *Investigation of Mechanical Properties of Aluminium 6061 Alloy Friction Stir Welding*. Ibray College of Technology. Oman.
- Kakani, S.L. 2014. *Material Science, Edisi Revisi*. New Age International Pvt Ltd Publishers. New Delhi.
- Khan, Ishtiaq Ahmed. 2011. *Experimental and Numerical Investigation on the Friction Welding Process*. Jawaharlal Nehru Tecnology University Hyderabad. India.
- Mulyadi, dan Agus Puji Suryanto. 2016. *Optimalisasi Hasil Proses Wire-Cut EDM Dengan Metode Principal Component Analysis (PCA)*. Universitas Muhammadiyah Sidoarjo. Sidoarjo.
- Olivia, Yossie. 1999. *Studi Tentang Pengaruh Variabel – Variabel Electrical Discharge Machine (EDM) Dengan Elektroda Grafit Terhadap Kekasaran Permukaan dan Metal Removal Rate Baja AISI 1050 Dengan Metode Taguchi*. Fakultas Teknik Universitas Surabaya. Surabaya.
- Pradana, Yanuar dkk. 2016. *The Effect of Discharge Current and Pulse-On Time on Biocompatible Zr-based BMG Sinking-EDM*. De Gruyter License. Berlin.
- Prayogo, B. A. 2014. *EDM (Electrical Discharge Machine)*. Politeknik Negeri Jakarta. Jakarta.
- Quediri, Abu Jaber E dkk. 2020. *Principles and Characteristics of Diferrent EDM Processes in Machining Tool and Die Steels*. Licensee MDPI. Basel.



Raut, Trupti G., dan Shinde., M. Y. 2015. *A Review on Optimization of Machining Parameters in EDM*. College of Engineering Satara Maharashtra. India.

Sagedistira, I. 2012. *Studi Pengaruh Variasi Arus Proses Pemesinan EDM Sinking Terhadap Kekerasan Dan Karakteristik Struktur Mikro Material Baja SKD 11*. Universitas Jember. Jember.

Zuback, J.S., dan Debroy T. 2018. *The Hardness of Additively Manufactured Alloys*. Licensee MDPI, Basel.





Lampiran 1 Tabel data

| Spesimen | Arus Listrik (A) | Pulse-on Time ( $\mu$ s) | Kekerasan Permukaan |      |      | Rata-rata |
|----------|------------------|--------------------------|---------------------|------|------|-----------|
|          |                  |                          | 1                   | 2    | 3    |           |
| 1        | 4                | 50                       | 39.8                | 40.4 | 39.7 | 39.97     |
| 2        | 4                | 75                       | 49.2                | 48.3 | 48.5 | 48.67     |
| 3        | 4                | 100                      | 50.3                | 51.1 | 50.8 | 50.73     |
| 4        | 7                | 50                       | 41.4                | 41.6 | 41.9 | 41.63     |
| 5        | 7                | 75                       | 49.3                | 49.8 | 50.1 | 49.73     |
| 6        | 7                | 100                      | 50.9                | 51.4 | 51.2 | 51.17     |
| 7        | 10               | 50                       | 47.5                | 47.8 | 47.7 | 47.67     |
| 8        | 10               | 75                       | 50.4                | 50.9 | 51.3 | 50.87     |
| 9        | 10               | 100                      | 52.2                | 51.6 | 51.9 | 51.90     |



Lampiran 2 Foto spesimen sebelum penelitian



Foto spesimen setelah permesinan

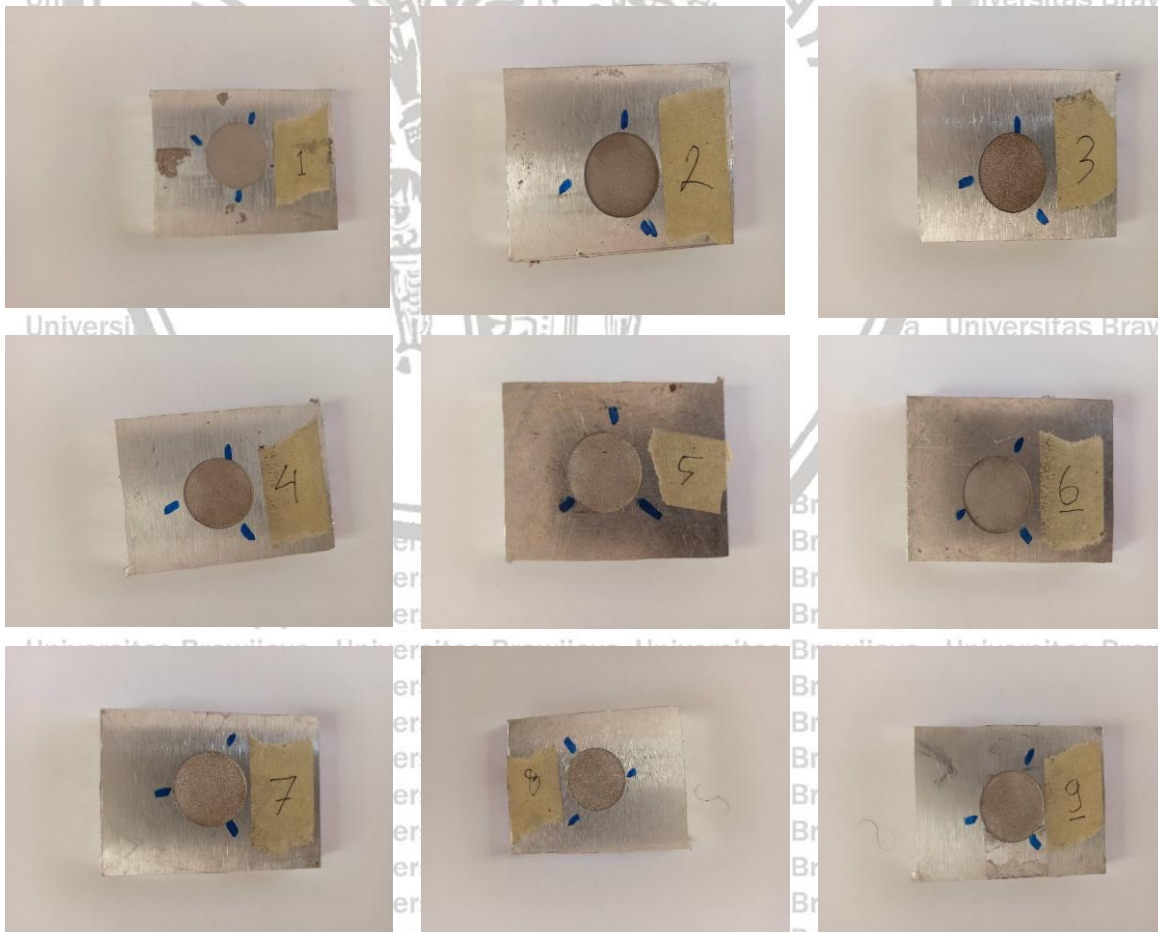
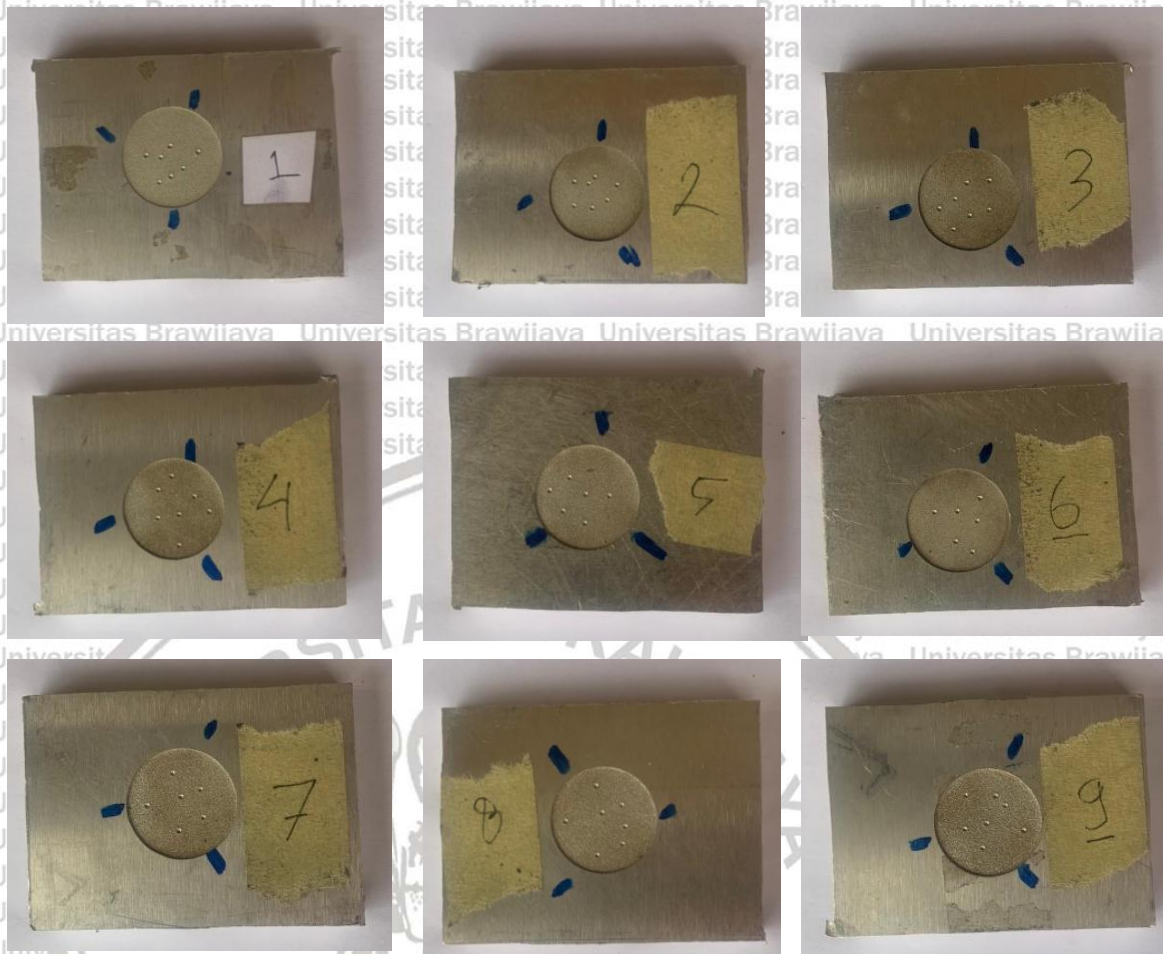




Foto specimen setelah pengujian kekerasan



## Lampiran 3 Komposisi Spesimen

## INSPECTION CERTIFICATE No 12.56784

EN 13204-3.8

| Consignes:                        |                 | Quantity        |                     | 25                   |              | Net Weight Kg   |           | 1.250          |             |              |  |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|----------------------|--------------|---|-----------|----------------|-------------|--------------|--|
| Contract Number                   |                 | V1881-S         |                     | Specification No     |              | V1985   |           | Lot No         |             | 17           |  |
| Article number                    |                 | -               |                     | Package No           |              | 67885   |           |                |             |              |  |
| Description of Goods Plates       |                 |                 |                     |                      |              | Requirements on the Products                          |           |                |             |              |  |
| Grade of Product                  |                 |                 | Dimensions. Inch/mm |                      |              | Material conform to quality of 6061 T6                |           |                |             |              |  |
|                                   |                 |                 | 10 x 1220x 2440     |                      |              | Product conform to all requirements of<br>ASTMB209-07 |           |                |             |              |  |
| <b>Mechanical Properties</b>      |                 |                 |                     |                      |              |   |           |                |             |              |  |
| The condition of Tested Standards | Lot Number      | Cast Number     | Number of Tests     | Tensile Strength     |              | Yield Strenth (0,2% Offset)                           |           | Elongation %   |             | Hardness. HB |  |
|                                   |                 |                 |                     | ksi                  | ksi          | ksi   | ksi       | min            | max         |              |  |
| Required                          |                 |                 |                     | 42,0                 | -            | 35,0  | -         | 9,0            | -           | -            |  |
|                                   | 673707          | 19-4577         | 2                   | 45,7                 | 45,7         | 42,1  | 42,6      | 13,0           | 13,0        | 100,0        |  |
| <b>Chemical Composition %</b>     |                 |                 |                     |                      |              |   |           |                |             |              |  |
| Element                           | Silicon St      | Iron Fe         | Copper Ce           | Manganese Mn         | Magnesium Mg | Chromium Cr   | Nickel Ni | Zinc Zn        | Titanium Ti | Zirconium Zr |  |
| Required                          | 0,4-0,8         | 0,7             | 0,15-0,40           | 0,15                 | 0,8-1,2      | 0,04-0,35   | -         | 0,25           | 0,15        | -            |  |
| Contents                          | 0,64            | 0,2             | 0,19                | 0,06                 | 1,0          | 0,15  | -         | 0,05           | 0,07        | -            |  |
| Elements                          | Tr+Zr           | Na              | Tm Sn               | Bismuth Bi           | Plumbum Pb   | Mn+Cr   | Ca        | Other Elements |             | Al           |  |
| Required                          | -               | -               | -                   | -                    | -            | -   | -         | 0,05           | 0,15        | remainder    |  |
| Contents                          | -               | -               | -                   | -                    | -            | -   | -         | 0,05           | 0,15        | remainder    |  |
| <b>Other Tests</b>                |                 |                 |                     |                      |              |   |           |                |             |              |  |
| Method                            | Macro-Structure | Micro-Structure | USI                 | Electro-conductivity | SCF          | Contents H2 of Metals cm3/100gr                       |           |                |             |              |  |
| Result                            | -               | -               | -                   | -                    | -            | -   |           |                |             |              |  |



## Lampiran 4 Tabel Distribusi F

Titik Persentase Distribusi F untuk Probabilita = 0,05

| df untuk penyebut (N2) | df untuk pembilang (N1) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                        | 1                       | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    |
| 1                      | 161                     | 199   | 216   | 225   | 230   | 234   | 237   | 239   | 241   | 242   | 243   | 244   | 245   | 245   | 246   |
| 2                      | 18.51                   | 19.00 | 19.16 | 19.25 | 19.30 | 19.33 | 19.35 | 19.37 | 19.38 | 19.40 | 19.40 | 19.41 | 19.42 | 19.42 | 19.43 |
| 3                      | 10.13                   | 9.55  | 9.28  | 9.12  | 9.01  | 8.94  | 8.89  | 8.85  | 8.81  | 8.79  | 8.76  | 8.74  | 8.73  | 8.71  | 8.70  |
| 4                      | 7.71                    | 6.94  | 6.59  | 6.39  | 6.26  | 6.16  | 6.09  | 6.04  | 6.00  | 5.96  | 5.94  | 5.91  | 5.89  | 5.87  | 5.86  |
| 5                      | 6.61                    | 5.79  | 5.41  | 5.19  | 5.05  | 4.95  | 4.88  | 4.82  | 4.77  | 4.74  | 4.70  | 4.68  | 4.66  | 4.64  | 4.62  |
| 6                      | 5.99                    | 5.14  | 4.76  | 4.53  | 4.39  | 4.28  | 4.21  | 4.15  | 4.10  | 4.06  | 4.03  | 4.00  | 3.98  | 3.96  | 3.94  |
| 7                      | 5.59                    | 4.74  | 4.35  | 4.12  | 3.97  | 3.87  | 3.79  | 3.73  | 3.68  | 3.64  | 3.60  | 3.57  | 3.55  | 3.53  | 3.51  |
| 8                      | 5.32                    | 4.46  | 4.07  | 3.84  | 3.69  | 3.58  | 3.50  | 3.44  | 3.39  | 3.35  | 3.31  | 3.28  | 3.26  | 3.24  | 3.22  |
| 9                      | 5.12                    | 4.26  | 3.86  | 3.63  | 3.48  | 3.37  | 3.29  | 3.23  | 3.18  | 3.14  | 3.10  | 3.07  | 3.05  | 3.03  | 3.01  |
| 10                     | 4.96                    | 4.10  | 3.71  | 3.48  | 3.33  | 3.22  | 3.14  | 3.07  | 3.02  | 2.98  | 2.94  | 2.91  | 2.89  | 2.86  | 2.85  |
| 11                     | 4.84                    | 3.98  | 3.59  | 3.36  | 3.20  | 3.09  | 3.01  | 2.95  | 2.90  | 2.85  | 2.82  | 2.79  | 2.76  | 2.74  | 2.72  |
| 12                     | 4.75                    | 3.89  | 3.49  | 3.26  | 3.11  | 3.00  | 2.91  | 2.85  | 2.80  | 2.75  | 2.72  | 2.69  | 2.66  | 2.64  | 2.62  |
| 13                     | 4.67                    | 3.81  | 3.41  | 3.18  | 3.03  | 2.92  | 2.83  | 2.77  | 2.71  | 2.67  | 2.63  | 2.60  | 2.58  | 2.55  | 2.53  |
| 14                     | 4.60                    | 3.74  | 3.34  | 3.11  | 2.96  | 2.85  | 2.76  | 2.70  | 2.65  | 2.60  | 2.57  | 2.53  | 2.51  | 2.48  | 2.46  |
| 15                     | 4.54                    | 3.68  | 3.29  | 3.06  | 2.90  | 2.79  | 2.71  | 2.64  | 2.59  | 2.54  | 2.51  | 2.48  | 2.45  | 2.42  | 2.40  |
| 16                     | 4.49                    | 3.63  | 3.24  | 3.01  | 2.85  | 2.74  | 2.66  | 2.59  | 2.54  | 2.49  | 2.46  | 2.42  | 2.40  | 2.37  | 2.35  |
| 17                     | 4.45                    | 3.59  | 3.20  | 2.96  | 2.81  | 2.70  | 2.61  | 2.55  | 2.49  | 2.45  | 2.41  | 2.38  | 2.35  | 2.33  | 2.31  |
| 18                     | 4.41                    | 3.55  | 3.16  | 2.93  | 2.77  | 2.66  | 2.58  | 2.51  | 2.46  | 2.41  | 2.37  | 2.34  | 2.31  | 2.29  | 2.27  |
| 19                     | 4.38                    | 3.52  | 3.13  | 2.90  | 2.74  | 2.63  | 2.54  | 2.48  | 2.42  | 2.38  | 2.34  | 2.31  | 2.28  | 2.26  | 2.23  |
| 20                     | 4.35                    | 3.49  | 3.10  | 2.87  | 2.71  | 2.60  | 2.51  | 2.45  | 2.39  | 2.35  | 2.31  | 2.28  | 2.25  | 2.22  | 2.20  |
| 21                     | 4.32                    | 3.47  | 3.07  | 2.84  | 2.68  | 2.57  | 2.49  | 2.42  | 2.37  | 2.32  | 2.28  | 2.25  | 2.22  | 2.20  | 2.18  |
| 22                     | 4.30                    | 3.44  | 3.05  | 2.82  | 2.66  | 2.55  | 2.46  | 2.40  | 2.34  | 2.30  | 2.26  | 2.23  | 2.20  | 2.17  | 2.15  |
| 23                     | 4.28                    | 3.42  | 3.03  | 2.80  | 2.64  | 2.53  | 2.44  | 2.37  | 2.32  | 2.27  | 2.24  | 2.20  | 2.18  | 2.15  | 2.13  |
| 24                     | 4.26                    | 3.40  | 3.01  | 2.78  | 2.62  | 2.51  | 2.42  | 2.36  | 2.30  | 2.25  | 2.22  | 2.18  | 2.15  | 2.13  | 2.11  |
| 25                     | 4.24                    | 3.39  | 2.99  | 2.76  | 2.60  | 2.49  | 2.40  | 2.34  | 2.28  | 2.24  | 2.20  | 2.16  | 2.14  | 2.11  | 2.09  |
| 26                     | 4.23                    | 3.37  | 2.98  | 2.74  | 2.59  | 2.47  | 2.39  | 2.32  | 2.27  | 2.22  | 2.18  | 2.15  | 2.12  | 2.09  | 2.07  |
| 27                     | 4.21                    | 3.35  | 2.96  | 2.73  | 2.57  | 2.46  | 2.37  | 2.31  | 2.25  | 2.20  | 2.17  | 2.13  | 2.10  | 2.08  | 2.06  |
| 28                     | 4.20                    | 3.34  | 2.95  | 2.71  | 2.56  | 2.45  | 2.36  | 2.29  | 2.24  | 2.19  | 2.15  | 2.12  | 2.09  | 2.06  | 2.04  |
| 29                     | 4.18                    | 3.33  | 2.93  | 2.70  | 2.55  | 2.43  | 2.35  | 2.28  | 2.22  | 2.18  | 2.14  | 2.10  | 2.08  | 2.05  | 2.03  |
| 30                     | 4.17                    | 3.32  | 2.92  | 2.69  | 2.53  | 2.42  | 2.33  | 2.27  | 2.21  | 2.16  | 2.13  | 2.09  | 2.06  | 2.04  | 2.01  |
| 31                     | 4.16                    | 3.30  | 2.91  | 2.68  | 2.52  | 2.41  | 2.32  | 2.25  | 2.20  | 2.15  | 2.11  | 2.08  | 2.05  | 2.03  | 2.00  |
| 32                     | 4.15                    | 3.29  | 2.90  | 2.67  | 2.51  | 2.40  | 2.31  | 2.24  | 2.19  | 2.14  | 2.10  | 2.07  | 2.04  | 2.01  | 1.99  |
| 33                     | 4.14                    | 3.28  | 2.89  | 2.66  | 2.50  | 2.39  | 2.30  | 2.23  | 2.18  | 2.13  | 2.09  | 2.06  | 2.03  | 2.00  | 1.98  |
| 34                     | 4.13                    | 3.28  | 2.88  | 2.65  | 2.49  | 2.38  | 2.29  | 2.23  | 2.17  | 2.12  | 2.08  | 2.05  | 2.02  | 1.99  | 1.97  |
| 35                     | 4.12                    | 3.27  | 2.87  | 2.64  | 2.49  | 2.37  | 2.29  | 2.22  | 2.16  | 2.11  | 2.07  | 2.04  | 2.01  | 1.99  | 1.96  |
| 36                     | 4.11                    | 3.26  | 2.87  | 2.63  | 2.48  | 2.36  | 2.28  | 2.21  | 2.15  | 2.11  | 2.07  | 2.03  | 2.00  | 1.98  | 1.95  |
| 37                     | 4.11                    | 3.25  | 2.86  | 2.63  | 2.47  | 2.36  | 2.27  | 2.20  | 2.14  | 2.10  | 2.06  | 2.02  | 2.00  | 1.97  | 1.95  |
| 38                     | 4.10                    | 3.24  | 2.85  | 2.62  | 2.46  | 2.35  | 2.26  | 2.19  | 2.14  | 2.09  | 2.05  | 2.02  | 1.99  | 1.96  | 1.94  |
| 39                     | 4.09                    | 3.24  | 2.85  | 2.61  | 2.46  | 2.34  | 2.26  | 2.19  | 2.13  | 2.08  | 2.04  | 2.01  | 1.98  | 1.95  | 1.93  |
| 40                     | 4.08                    | 3.23  | 2.84  | 2.61  | 2.45  | 2.34  | 2.25  | 2.18  | 2.12  | 2.08  | 2.04  | 2.00  | 1.97  | 1.95  | 1.92  |
| 41                     | 4.08                    | 3.23  | 2.83  | 2.60  | 2.44  | 2.33  | 2.24  | 2.17  | 2.12  | 2.07  | 2.03  | 2.00  | 1.97  | 1.94  | 1.92  |
| 42                     | 4.07                    | 3.22  | 2.83  | 2.59  | 2.44  | 2.32  | 2.24  | 2.17  | 2.11  | 2.06  | 2.03  | 1.99  | 1.96  | 1.94  | 1.91  |
| 43                     | 4.07                    | 3.21  | 2.82  | 2.59  | 2.43  | 2.32  | 2.23  | 2.16  | 2.11  | 2.06  | 2.02  | 1.99  | 1.96  | 1.93  | 1.91  |
| 44                     | 4.06                    | 3.21  | 2.82  | 2.58  | 2.43  | 2.31  | 2.23  | 2.16  | 2.10  | 2.05  | 2.01  | 1.98  | 1.95  | 1.92  | 1.90  |
| 45                     | 4.06                    | 3.20  | 2.81  | 2.58  | 2.42  | 2.31  | 2.22  | 2.15  | 2.10  | 2.05  | 2.01  | 1.97  | 1.94  | 1.92  | 1.89  |

