

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian sebelumnya

Agung Sugiarto, 2004. meneliti tentang arus listrik dan kekerasan benda kerja pada baja karbon sedang terhadap kekasaran permukaan proses drilling EDM. Dengan parameter arus yang digunakan 6A, 12A, 18A, 24A dari data tersebut diketahui bahwa variasi arus listrik berpengaruh terhadap terhadap kekasaran permukaan karena semakin tinggi arus listrik maka energi yang dibangkitkan tiap sparking yang semakin besar yang akan meningkatkan kekasaran.

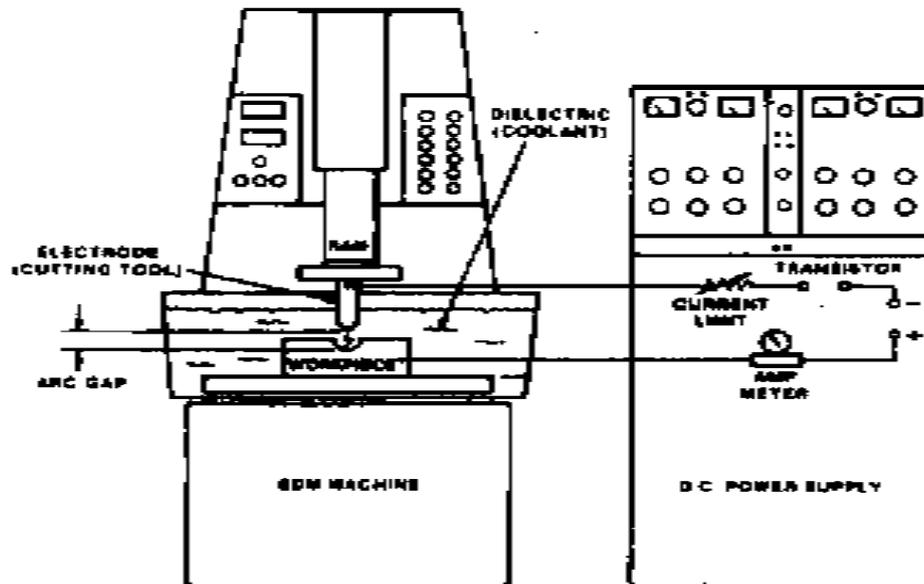
Dwi Hadi Slistyorini, 2003. Meneliti tentang pengaruh jenis elektroda dan polaritas terhadap kekasaran permukaan benda kerja. Dengan parameter yang digunakan elektroda dengan bahan tembaga, baja, aluminium, kuningan dan polaritas positif, polaritas negatif, dari data didapat jenis elektroda berpengaruh nyata terhadap kekasaran permukaan, dengan semakin tinggi konduktivitas listrik dari elektroda akan meningkatkan kekasaran permukaan benda kerja. Pemakaian polaritas berbeda mempunyai pengaruh nyata terhadap kekasaran permukaan, setiap jenis elektroda mempunyai kecenderungan sifat positif dan negatif yang akan mempengaruhi kekasaran permukaan benda kerja.

2.2 Prinsip Dasar EDM (*Electrical Discharge Machine*)

Pada prinsipnya proses EDM adalah proses pengerjaan material pemesinan non konvensional yang terjadi akibat loncatan bunga api listrik yang terjadi pada celah antara elektroda (katoda) dengan benda kerja (anoda). Loncatan bunga api listrik (*sparking*) tersebut terjadi secara partidak kontinu tetapi secara periodik (Panday ,P.C.Shan, 1980, 78). Secara keseluruhan proses pengerjaan material dengan EDM adalah suatu proses yang kompleks. Elektroda (pahat) dan benda kerja berada dalam fluida dielektrik yang berfungsi sebagai media isolator. Agar loncatan bunga api listrik bisa terjadi maka beda tegangan listrik pada celah antara pahat dan benda kerja harus lebih besar dari *break down voltage* atau tegangan yang memungkinkan terjadinya loncatan bunga api listrik, *Break down voltage* tergantung pada :

- Jarak terdekat antara pahat dan benda kerja
- Sifat isolator fluida dielektrik
- Tingkat pengotoran geram pada celah dielektrik

Sedangkan skema dasar pada *Electrical Discharge Machine* terlihat pada gambar 2.1 dibawah ini :



Gambar 2.1 Skema dasar EDM
Sumber : Paul.G. Simon

EDM memiliki banyak kelebihan dibandingkan mesin – mesin konvensional lainnya, antara lain :

- Mampu mengerjakan logam yang sangat keras yang tidak mudah dikerjakan oleh mesin konvensional.
- Proses EDM ini mampu mengerjakan bentuk – bentuk permukaan dalam bentuk kompleks.
- Mampu membentuk logam yang memiliki paduan yang sangat keras dan membentuknya dengan keakuratan tinggi dan hasil yang baik
- Proses mampu dikerjakan dengan mudah tanpa banyak memerlukan pengawasan yang banyak dari operator karena mesin bekerja dengan otomatis
- Selama proses permesinan, tidak terjadi kontak langsung antara tool dengan benda kerja. Hal ini membuat proses lebih efektif dengan hasil yang lebih presisi

Adapun faktor –faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan, yaitu : (Taufiq Rochim, 2001:55)

- Kualitas dari permukaan tergantung dari besarnya energi *sparking* yang dilepaskan pada waktu proses permesinan, semakin besar energi yang dilepaskan, maka akan

semakin besar dan cepat pembentukan kawah – kawah yang terjadi, akan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin kasar.

- Jika energi *sparking* yang digunakan terlalu kecil, maka proses pemakanan akan membutuhkan waktu lama, atau bahkan tidak akan terjadi proses pemotongan, akan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin halus.
- Meski proses ini menggunakan pelepasan arus, namun tidak membahayakan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin kasar

2.2.1 Loncatan Bunga Api listrik (*sparking*)

Proses terjadinya *sparking* dapat diuraikan sebagai berikut :

- Pengaruh medan listrik yang ada antara pahat dan benda kerja menyebabkan terjadinya pergerakan ion positif dan elektron yang masing-masing menuju kutub yang berlawanan. Akhirnya terbentuklah suatu saluran ion yang bersifat konduktif.
- Pada kondisi tersebut maka arus listrik dapat mengalir melalui saluran ion tersebut dan terjadilah loncatan bunga api.

Proses terjadinya saluran ion dapat diuraikan sebagai berikut :

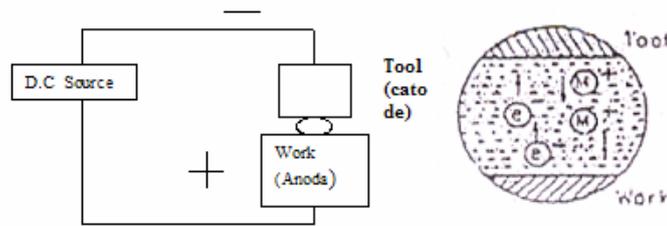
Dengan adanya medan listrik antara pahat dan benda kerja. Elektron – elektron bebas yang berada dipermukaan pahat akan tertarik menuju benda kerja. Dalam pergerakan menuju benda kerja, elektron – elektron yang mempunyai energi kinetik ini akan bertabrakan dengan molekul – molekul fluida dielektrik dan proses ionisasi dapat dilihat pada gambar 2.2 dibawah ini.

Dalam proses tabrakan tersebut maka akan terjadi suatu keadaan, yaitu :

Tabrakan biasa, dimana elektron tersebut kurang energi kinetiknya. Jika energi kinetik elektron tersebut sangat tinggi, maka akan menghasilkan elektron baru yang berasal dari molekul dielektrik. Molekul fluida dielektrik yang telah kehilangan elektron akan menjadi ion positif dan akan tertarik kearah elektroda pahat.

Dengan adanya proses tabrakan tersebut akan menghasilkan elektron-elektron baru dan ion – ion positif baru, maka akan terbentuk suatu saluran ion.

Dengan terbentuknya saluran ion tersebut maka tahanan listrik pada saluran tersebut menjadi rendah sekali sehingga terjadi pelepasan energi listrik dalam waktu singkat berupa loncatan bunga api listrik. (Panday ,P.C.Shan, 1980)



Gambar 2.2 Proses Ionisasi
Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:89

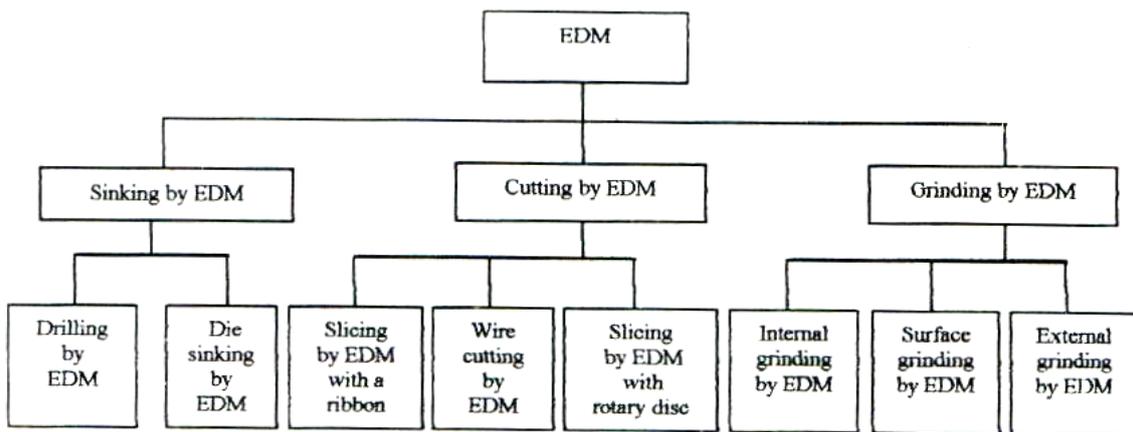
2.2.2 Proses Pemotongan Material (*Discharge Process*)

Pada Pemotongan Material (*Discharge Process*) dengan mesin EDM dapat diuraikan sebagai berikut :

- Setiap *sparking* yang terjadi menyebabkan suatu pemusatan aliran elektron yang bergerak dengan kecepatan tinggi dan menumbuk permukaan benda kerja.
- Bagian dari benda kerja ini akan mengalami kenaikan temperatur 8000°C - 12000°C dan akan menyebabkan pelelehan lokal pada bagian tersebut. Kondisi seperti ini terjadi juga pada permukaan elektroda. Pada saat bersentuhan terjadi juga penguapan, baik pada elektroda kerja maupun fluida dielektrik. Kenaikan temperatur menyebabkan membesarnya volume maupun tekanan gelembung uap tersebut.
- Setelah terjadi *sparking* maka aliran listrik terhenti yang akan menyebabkan penurunan temperatur secara mendadak yang akan menyebabkan gelembung uap yang terjadi mengkerut dan akhirnya bagian material yang meleleh tersebut akan terpancar keluar dari permukaan dan meninggalkan bekas berupa kawah-kawah halus, bagian – bagian yang terpancar tersebut akan membeku dengan cepat dan akan terbawa oleh aliran fluida dielektrik yang bersikulasi (Panday ,P.C.Shan, 1980, 78).

2.3 Proses-proses EDM

Berdasarkan Proses pengerjaannya, *Electrical Discharge Machine* dapat dikelompokkan secara garis besar seperti terlihat pada gambar 2.3 sebagai berikut :



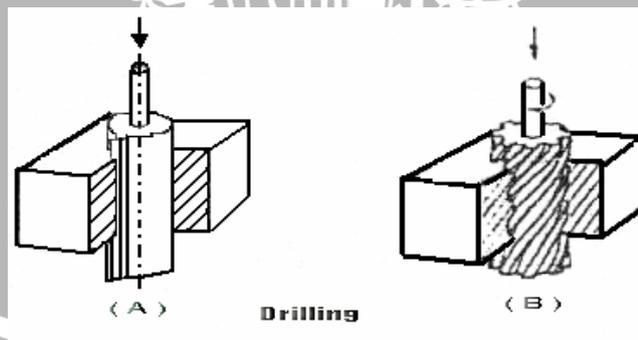
Gambar 2.3 Katagori Permesinan EDM
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:86

2.3.1 Proses Sinking

Adalah Proses Permesinan EDM dimana bentuk akhir dari benda kerja ditentukan langsung oleh bentuk elektroda. Proses ini dibagi menjadi dua, yaitu :

1. *Drilling*

Proses ini meliputi semua proses pengerjaan pembuatan lubang atau lekukan dengan elektroda berpenampang tetap. Lubang yang dihasilkan dapat berupa lubang tembus (*through hole*), ataupun lubang tidak tembus (*blind hole*) . Pembuatan lubang dalam permesinan EDM dapat dilakukan dengan dua cara yaitu. Elektroda menekan sambil berputar atau hanya menekan saja seperti terlihat pada gambar 2.4 berikut : (Panday P.C. Shan, 1980)

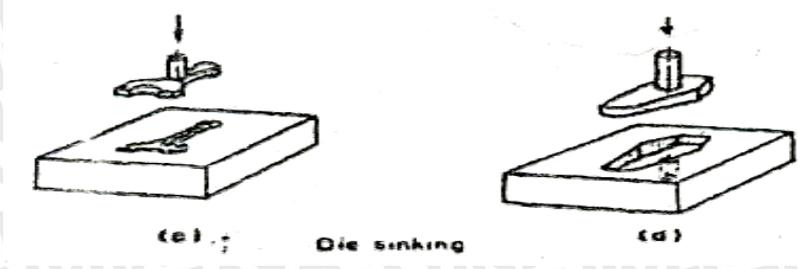


Gambar 2.4 Proses *Drilling EDM*
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:87

2. *Die Sinking*

Proses ini meliputi semua proses pengerjaan lekukan (*cavity*) dengan elektroda berpenampang tertentu seperti diperlihatkan pada gambar 2.5 berikut ini : (Panday P.C. Shan, 1980)



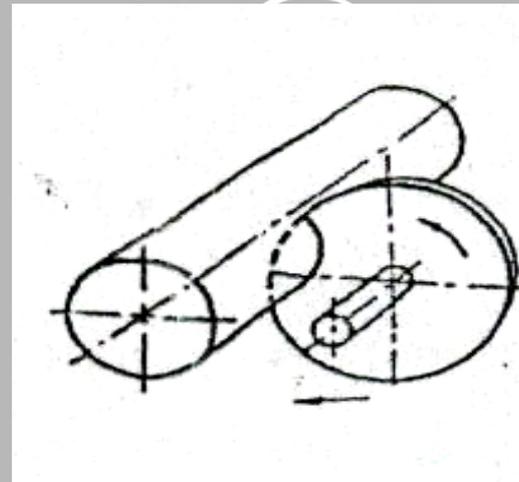


Gambar 2.5 Proses *Die Sinking* EDM
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:87

2.3.2 Proses *Cutting*

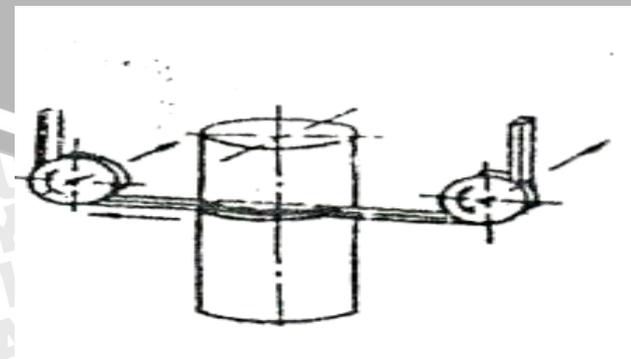
Adalah proses pemotongan logam dengan elektroda bergerak memotong benda kerja bersamaan dengan timbulnya loncatan bunga api. Proses *cutting* dalam *EDM* dibagi dalam tiga macam, yaitu : (Panday P.C. Shan, 1980)

1. *Slicing* dengan elektroda lempeng berputar seperti pada gambar 2.6



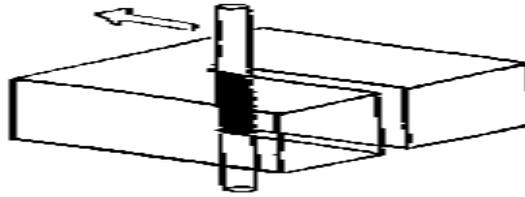
Gambar 2.6 Proses *Cutting* dengan lempeng berputar
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:88

2. *Slicing* dengan pahat bentuk pita seperti pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Proses *Cutting* dengan pita
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:88

3. *Cutting* dengan elektroda kawat seperti pada gambar 2.8

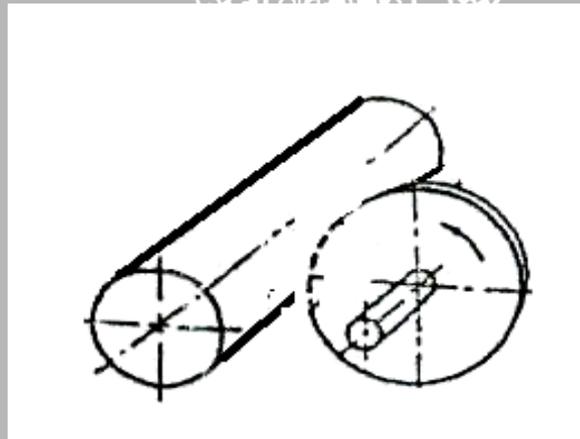


Gambar 2.8 *Cutting* dengan elektroda kawat
 Sumber: Panday ,P.C.Shan, 1980.

2.3.3 Proses *Grinding*

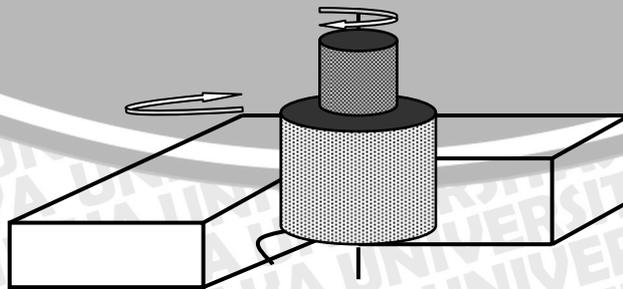
Adalah proses yang menggunakan elektroda yang berputar atau benda kerja ikut berputar. Bentuk benda kerja pada profil dari elektroda dan gerakan relatif antara elektroda dan benda kerja. Proses ini dibagi menjadi tiga macam yaitu : (Panday P.C. Shan, 1980)

1. Eksternal *Grinding* seperti diperlihatkan pada gambar 2.9 berikut :



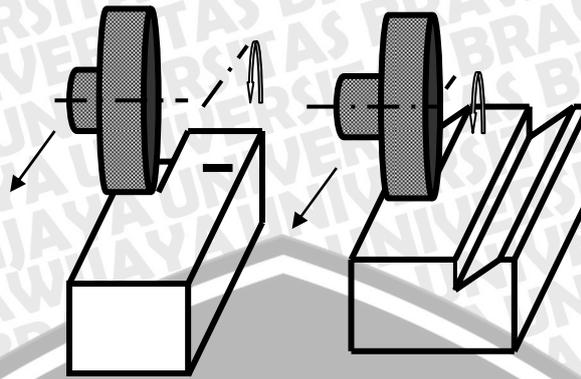
Gambar 2.9 Proses Gerinda luar Dengan *EDM*
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:88

2. Internal *Grinding* seperti diperlihatkan pada gambar 2.10 berikut :



Gambar 2.10 Proses Gerinda Dalam dengan *EDM*
 Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:88

3. Profile *Grinding* seperti diperlihatkan pada gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11 Gerinda *Surface* atau Profil Dengan *EDM*
Sumber: Panday P.C. Shan, 1980:88

2.4 Komponen Dasar *EDM*

2.4.1 Generator

Fungsi dari generator adalah mengedarkan energi listrik yang dibutuhkan secara periodik pada celah diantara pahat dan benda kerja. Generator terdiri dari suatu rangkaian elektronik, dimana rangkaian ini sekaligus juga berfungsi untuk mengatur dan mengendalikan karakteristik proses permesinan yang sedang berlangsung.

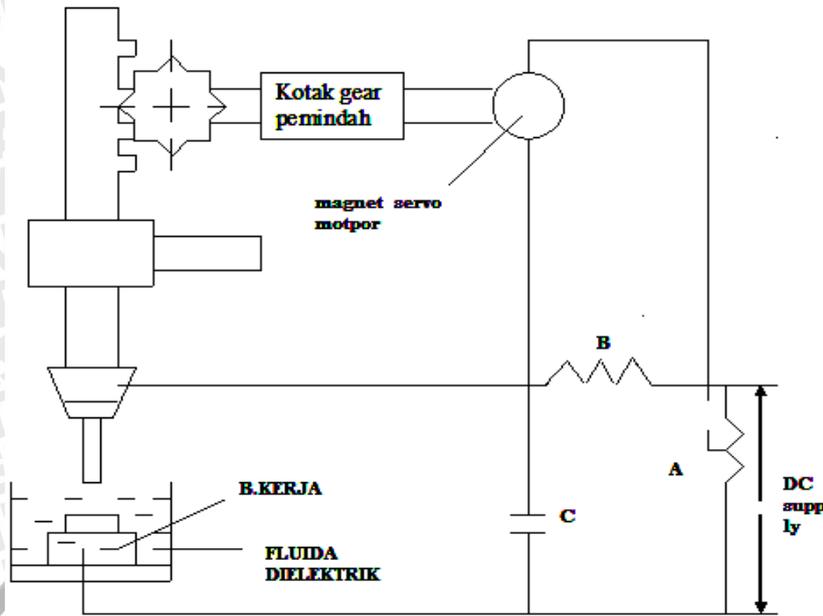
Generator merupakan salah satu komponen dasar yang memegang peranan penting. Generator berhubungan langsung dengan servo yang berfungsi untuk menjaga jarak antara elektroda dan benda kerja agar tidak terjadi *konsleting*. (Panday .P.C.Shan, 1980, 78)

2.4.2 Elektroda (Pahat) *EDM*

Elektroda yang digunakan dalam *die-sinking* *EDM* harus dibuat sesuai dengan bentuk produk yang diinginkan. Secara teoritis setiap material yang bersifat konduktor dapat digunakan sebagai elektroda pahat. Namun ada beberapa persyaratan sehingga suatu material dapat digunakan sebagai elektroda.

Persyaratan tersebut antara lain : (Sumber : Panday. P.C Shan 1980 : 93)

- Bahan penghantar (konduktor) yang baik.
- Mudah dibentuk dengan harga yang terjangkau.
- Mempunyai ketahanan keausan yang baik/tinggi
- Tahan terhadap deformasi selama proses pemotongan
- Menghasilkan *metal removal* yang efisien dari benda kerja.
- Dapat digunakan untuk mengerjakan material benda kerja dengan kekerasan dan ketangguhan yang lebih tinggi.



Gambar 2.12 Pengontrol elektroda pahat EDM
 Sumber : Panday. P.C Shan 1980 : 93

Dalam hal ini elektroda yang paling baik adalah yang memiliki titik leleh yang tinggi dan tahanan listrik yang rendah. Dalam proses EDM ada dua macam elektroda, yaitu :

1. Elektroda Logam

Elektroda logam mempunyai beberapa jenis, antara lain :

a. Tembaga

Jenis elektroda yang paling umum digunakan adalah tembaga (*copper*) dengan komposisi :

- Massa jenis : 8900 kg/m³
- Titik leleh : 10834,5°C
- Tahanan listrik : 17 x 10⁻⁹ Ω m
- Daya hantar panas : 0,40 watt/mm²

Elektroda jenis ini harganya lebih murah dan menghasilkan permukaan yang halus pada benda kerja. Selain itu elektroda jenis ini dapat digunakan untuk semua jenis pengerjaan *roughing* dan *finishing*.

b. Tembaga paduan

Penambahan unsur paduan Chromium (Cr) dan seng (Zn) akan memperbaiki *machinability* dari material paduan tembaga pada proses permesinan konvensional.

Dibanding tembaga, material ini mempunyai keausan 15% -25 % lebih tinggi dan

rate of metal removalnya (RMR) 10 % lebih rendah untuk kandungan energi yang sama.

c. Tembaga wolfram (Cu-W) perunggu

Penambahan unsur wolfram sampai dengan 50 % pada unsur tembaga menaikkan ketahanan aus, namun hal ini akan menyebabkan paduan akan lebih sulit dikerjakan dengan proses permesinan konvensional. Harga tembaga wolfram ini termasuk mahal dan pembuatan pahat dengan metode konvensional akan lebih susah, namun terlepas dari kelemahan yang dimiliki paduan ini sangat baik untuk pengerjaan dengan sisi-sisi yang tajam dan pembuatan lubang yang tajam.

Sifat mekanik / listrik dari elektroda Cu-W :

- Tahanan jenis : $0.045 - 0.055 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
- Berat jenis : $8800 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Rapat jenis : $15-18 \text{ g}/\text{cm}^3$

Kelebihan elektroda tembaga – Wolfram :

- Mudah dikerjakan
- Mempunyai rigidity yang bagus
- *Surface finish* bagus
- Cocok untuk pemakaian pahat yang membutuhkan ketelitian yang tinggi

d. Kuningan

Pembuatan elektroda dari bahan ini mudah dikerjakan dengan mesin konvensional dan dapat digunakan pada beberapa jenis material namun khusus untuk pengerjaan benda kerja dari titanium. Namun elektroda kuningan ini jarang digunakan karena tingkat keausannya cukup tinggi namun dalam prakteknya pembuatan pahatnya sangat mudah dikerjakan dengan mesin konvensional.

Sifat mekanik / listrik dari elektroda kuningan :

- Berat jenis : $8500 \text{ kg}/\text{m}^3$
- Daya hantar panas : $0.12 \text{ Watt}/\text{mm}^2$
- Tahanan listrik : $62 \times 10 \Omega \cdot \text{m}$

e. Tungsten

Penggunaan elektroda ini dari bahan tungsten, digunakan untuk pembuatang lubang yang kecil (*microchole*) , ataupun dapat digunakan sebagai kawat elektroda pada permesinan EDM

f. Paduan alumunium

Paduan alumunium digunakan untuk proses pengerjaan saluran *cavity* tiga dimensi dengan hasil pengerjaan yang tidak begitu halus, sehingga akan lebih baik jika menggunakan elektroda dari bahan paduan alumunium, dengan komposisi kimia dari material sebagai berikut :

Al 85%, Si 11%, Mg 0,4 % - 0.6 %, Zn 1 %, Mn + Fe + Cu 1 %.

Material ini mempunyai kelebihan:

- Pembuatan pahatnya lebih mudah, karena material dapat dituang dengan mudah
- Proses – proses konvensional dapat digunakan dalam pembuatan pahatnya
- Mampu mengerjakan dalam pembuatan *cavity* dengan volume besar (500 cm^3) dengan benda kerja perkakas maupun paduan tertentu.
- Mudah untuk dibentuk ataupun dituang.
- Mampu mengerjakan bentuk – bentuk yang rumit.

g. Baja (*steel*)

Baja tidak hanya digunakan sebagai benda kerja, namun juga bisa digunakan sebagai elektroda sangat terbatas karena efisiensinya yang rendah bila dibandingkan dengan tembaga dan grafit. Pembuatan elektroda ini dapat dikerjakan dengan mesin konvensional atau untuk membuat cetakan plastik (*plastic mould*) dan *die casting*

2. Elektroda non logam

- Grafit

Grafit memiliki sifat –sifat antara lain :

- Tahanan jenis : $8 - 15 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$.
- Rapat jenis : $1.6 - 1.85 \text{ gr}/\text{cm}^3$
- Titik lebur : 3600°C (6512°F)
- Kekuatan Tarik : $200 - 700 \text{ kg}/\text{cm}^2$

Dibandingkan dengan elektroda metal, grafit lebih ringan sehingga tidak memberikan pembebanan pegangan pahat. Selain itu grafit juga lebih tahan terhadap kejutan panas pada proses pengerjaan dengan mesin konvensional. Namun pada pembuatan pahat harus benar hati – hati, karena grafit sangat getas sehingga mudah patah. Selain itu pahat grafit juga cukup mahal dibandingkan jenis pahat yang lain. Elektroda ini digunakan untuk membuat profil yang sulit pada benda kerja.

2.4.3 Fluida Dielektrik

Fluida dielektrik adalah fluida yang memisahkan dua konduktor listrik, elektroda dan benda kerja tanpa adanya aliran listrik. Fungsi fluida dielektrik dalam proses permesinan EDM adalah sebagai berikut : Sebagai pendingin antara pahat dan benda kerja.

- Dalam keadaan terionisasi, fluida dielektrik ini bersifat semacam konduktor sehingga memungkinkan terjadinya *sparking*.
- Untuk mengeluarkan geram (*chip*) dari celah antara elektroda pahat dan benda kerja.

Fluida dielektrik harus mempunyai sifat – sifat sebagai berikut :

- Tidak menghasilkan gelembung–gelembung uap dan gas yang berbahaya bagi kesehatan operator.
- Sifat kimianya netral terhadap mesin dan benda kerja.
- Tidak mudah terbakar.
- Murah dan mudah dalam pengoperasiannya.

Jenis – jenis fluida dielektrik yang biasa dipakai dalam proses EDM yaitu :

- Air (*aqua destilasi*) : digunakan untuk pengerjaan *micromachining*.
- Minyak mineral (*mineral oil*) : digunakan secara luas dalam proses EDM dan memberikan hasil yang baik bila dalam keadaan minyak ini tidak ditambah zat pencampur. Viskositas minyak mineral ini perlu diperhatikan dengan pertimbangan apabila viskositas tinggi maka cairan dielektrik akan sulit mengalir melalui celah yang sempit tetapi akan memberikan efisiensi untuk proses yang kasar (*rough machining*).
- Kerosine : viskositasnya rendah sehingga cocok untuk pengerjaan finishing dan super finishing.

2.4.4 Flushing

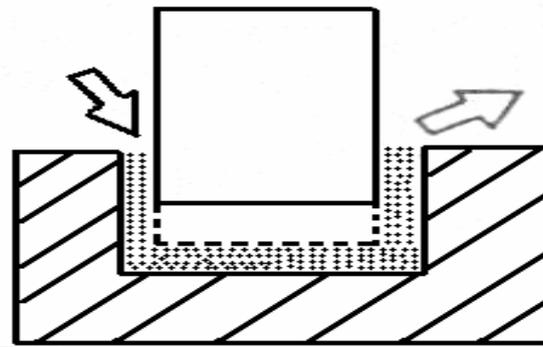
Flushing adalah sirkulasi dielektrik yang mengalir pada celah antara benda kerja dan pahat. Pada awal proses pengoperasian mesin dengan suplai fluida dielektrik yang bersih akan didapat kekuatan isolasi yang lebih besar daripada setelah fluida dielektrik mengalami kontaminasi oleh geram-geram yang bertindak sebagai kotoran yang berlokasi pada celah antara elektroda pahat dan benda kerja bila terkumpul dalam jumlah besar akan menyebabkan : (Panday ,P.C.Shan, 1980:88)

- Terjadinya loncatan bunga api listrik secara tidak normal sehingga menurunkan laju pengerjaan material.
- Terjadinya efek hubungan singkat (*consleting*) antara elektroda pahat dan benda kerja.

- Terjadinya busur api listrik antara elektroda pahat dan benda kerja yang bisa merusak keduanya.

Macam-macam metode *flushing* :

- ❖ *Flushing sisi (side flushing)*.

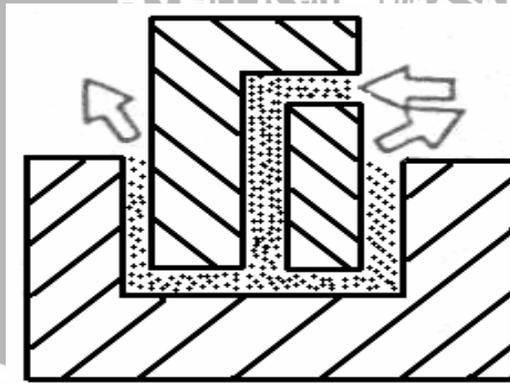


Gambar 2.13 *Flushing sisi*

Sumber : *KING SPARK PULSE EDM operation manual*, 1992, hlm 49

Flusing sisi yang dapat dilihat pada gambar 2.13 merupakan proses penyemprotan fluida masuk kearah sisi benda kerja yang mengakibatkan *chip* (geram) yang berada antara benda kerja dan elektroda akan terbawa oleh aliran fluida yang keluar dari arah sisi lain benda kerja.

- ❖ *Injection flushing*

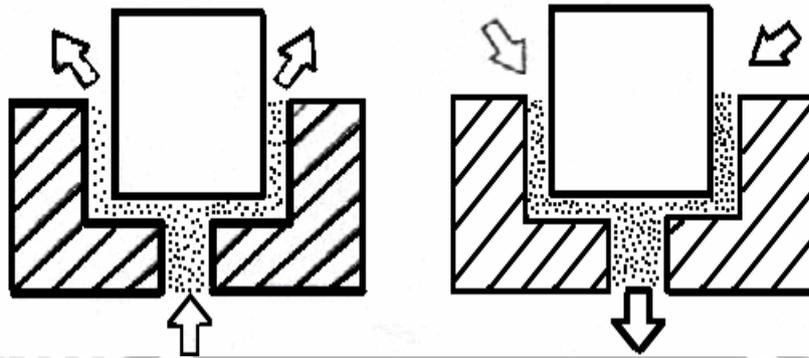


Gambar 2.14 *Injection Flushing*

Sumber : *KING SPARK PULSE EDM operation manual*, 1992, hlm 49

Injection flushing yang dapat dilihat pada gambar 2.14 ini dilakukan dengan menyemprotkan fluida melalui saluran (lubang) yang telah dibuat sebelumnya sehingga chip (geram) akan keluar bersama aliran fluida yang keluar melalui sisi benda kerja.

❖ *Suction flushing*



Gambar 2.15 *Suction Flushing*

Sumber : *KING SPARK PULSE EDM operation manual*, 1992, hlm 49

Suction flushing yang dapat dilihat pada gambar 2.15 dilakukan dengan menyemprotkan fluida dari bagian bawah benda kerja yang telah dilubangi sebelumnya sehingga chip (geram) akan keluar bersama keluarnya aliran fluida melalui bagian sisi benda kerja. Jenis fluida ini biasanya dipakai untuk proses pengerjaan yang menghasilkan lubang yang cukup dalam.

2.5 Parameter Permesinan EDM

2.5.1 Arus

Arus disini adalah batas arus maksimum yang ditetapkan pada proses pemotongan dengan *EDM*, pada mesin yang digunakan tingkat intensitas arus dinyatakan dengan :

Simbol	Intensitas Arus
½	1,25 A
1	2,5 A
1½	3,75 A
3	7,5 A
6	15 A

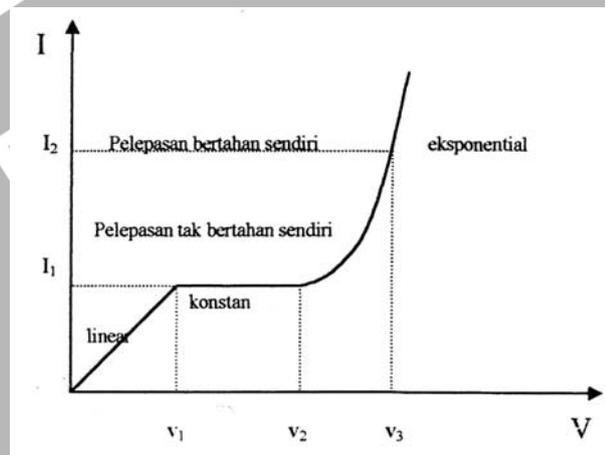
Tabel 2.1 Intensitas Arus

(Sumber : G. Semon, ing, *A Pratical Guide to EDM* 8)

Arus pada benda kerja dan pahat sendiri merupakan fungsi pada tegangan yang ditetapkan, kenaikan tegangan akan menaikkan arus. Arus yang digunakan pada permesinan ini besarnya ditentukan oleh besar kecilnya luas permukaan bidang kontak antara elektroda pahat dengan benda kerja. Hal ini untuk mencegah terjadinya arus berlebih yang mana dapat menyebabkan terjadinya efek hubungan singkat yang mengakibatkan fluida kerja



terbakar. Gerakan elektron adalah fungsi dari tegangan dan arahnya berlawanan arah dengan arus listrik maka jika suatu tegangan ditetapkan antara dua elektroda arus akan bergerak kearah katoda dan bertambah perlahan-lahan sesuai dengan penambahan elektron (*KING SPARK PULSE EDM operation manual*, 1992). Arus listrik pada proses *drilling EDM* sangat memegang peranan, besar kecilnya arus listrik berpengaruh langsung terhadap kekasaran permukaan, semakin besar arus listrik yang diterapkan maka proses pemotongan benda kerja semakin besar pula. Hal ini menyebabkan permukaan benda kerja yang dihasilkan semakin kasar. (Bungalore, HMT, 1980 : 470)



Gambar 2.16 Grafik hubungan Arus – Tegangan
 Sumber : A.Arismunandar ,1987 : 9

Yang mana hal ini dapat dijelaskan arus mula-mula naik sebanding dengan tegangan, selanjutnya jika tegangan naik melebihi batas tertentu arus akan naik secara eksponensial seperti terlihat pada grafik 2.1. Kenaikan arus ini disebabkan oleh adanya ionisasi benturan elektron secara matematis dirumuskan sebagai berikut : (A. Arismunandar : 10)

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha \cdot d} \tag{2.1}$$

Dimana :

I_0 = arus yang meninggalkan katoda

α = jumlah elektron yang dihasilkan dalam jalur elektron yang bergerak sepanjang 1 cm

d = jarak celah

e = ketetapan = 2,718

Energi yang dibutuhkan dalam proses pelepasan energi listrik dapat dijelaskan dalam rumusan sebagai berikut : (Sukartono; 1994,7)

$$W = 1/2C.V^2 = i^2.R.t = V.i.t \quad (2.2)$$

$$P = \frac{W}{t} = i^2.R = V.i \quad (2.3)$$

Dimana :

W = Energi yang digunakan (Joule)

C = Kapasitas (farad)

i = Arus listrik (Ampere)

R = Hambatan listrik (Ω)

t = Waktu (detik)

P = Daya listrik (watt)

2.5.2 Discharge time (On time)

Di dalam praktek *discharge time* disebut dengan *On Time*. Satuan dari *discharge time* ini adalah mikro detik (μs). *Discharge time* adalah waktu pelepasan arus listrik melalui celah antara elektroda pahat dan benda kerja dimana pada waktu yang singkat ini akan terjadi proses erosi logam dan juga peningkatan suhu pada permukaan benda kerja.

Discharge time mempunyai interval antara 1 - 1600 μs .

Mesin yang digunakan dalam praktek tingkat *discharge time* dinyatakan dengan angka-angka sebagai berikut:

1 = 2 μs	7 = 50 μs
2 = 3 μs	8 = 100 μs
3 = 4 μs	9 = 200 μs
4 = 6 μs	10 = 400 μs
5 = 12 μs	11 = 800 μs
6 = 25 μs	12 = 1600 μs

(KING SPARK PULSE EDM operation manual, 1992).

2.5.3 Off Time

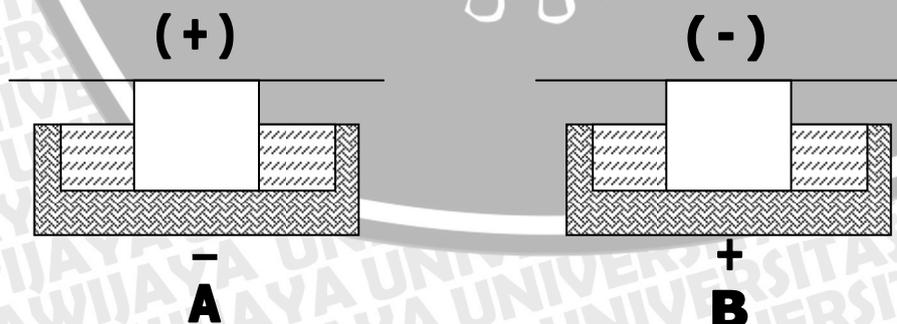
Off time adalah waktu sela antara pelepasan arus setelah proses *discharge time*. Pada periode ini terjadi pendinginan pada celah pahat dan benda kerja. (KING SPARK PULSE EDM operation manual, 1992).

2.5.4 Servo

Servo berfungsi sebagai pengatur tegangan yang yang diterapkan untuk pemotongan dan berhubungan langsung dengan pengaturan celah antara elektroda (pahat) dengan benda kerja. Servo pada mesin EDM juga berfungsi untuk mengarahkan elektroda menuju benda kerja dan menarik kembali elektroda menuju benda kerja dan menarik kembali elektroda setelah proses pemotongan logam dengan energi *sparking* secara otomatis (*KING SPARK PULSE EDM operation manual, 1992*).

2.5.5 Polaritas

Polaritas adalah hubungan antara benda kerja dengan kutub listrik. Ada dua macam polaritas yang digunakan pada proses permesinan dengan EDM, yaitu polaritas positif (+) yang dapat dilihat pada gambar 2.17 (A), apabila elektroda dihubungkan dengan kutub positif dan benda kerja dihubungkan dengan kutub negatif, sehingga aliran ion yang terjadi dari kutup positif (+) atau elektroda menuju ke kutup negatif (-) atau benda kerja sehingga terjadi penumpukan ion pada kutup negatif (-) atau benda kerja sehingga terjadi pengikisan bentuk pada benda kerja sesuai dengan bentuk elektrode dan begitu sebaliknya pada polaritas negatif (-) yang dapat dilihat pada gambar 2.17 (B), apabila benda kerja dihubungkan dengan kutub positif sedangkan elektrode dihubungkan dengan kutub negatif, sehingga aliran ion yang terjadi dari kutup positif (+) atau benda kerja menuju ke kutup negatif (-) atau elektrode sehingga terjadi penumpukan ion pada kutup negatif (-) atau elektrode sehingga terjadi pengikisan bentuk pada benda kerja sesuai dengan bentuk elektrode, sedangkan pada elektrode juga terjadi pengikisan yang tidak terlalu besar dikarenakan material elektrode yang lebih kuat dibandingkan dengan material benda kerja (*KING SPARK PULSE EDM operation manual, 1992*)



Gambar 2.17 Polaritas arus
 Sumber : G.Semon, 1975 :30

Keterangan : A, (+) kutub positif pada pahat, (-) kutub negatif pada benda kerja
 B, (+) kutub positif pada benda kerja, (-) kutub negatif pada pahat

2.5.6 Discharge gap

Merupakan celah batas terjadinya sparking antara elektroda dan benda kerja. *Discharge gap* ini mempunyai 99 steps yang masing-masing stepnya mewakili jarak 0,001 mm. Satuan dari *discharge gap* ini adalah mm (*KING SPARK PULSE EDM operation manual, 1992*).

2.6 Karakteristik Proses Permesinan EDM

2.6.1 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan benda kerja merupakan ketidakrataan yang terjadi pada benda kerja, kekasaran permukaan ini dapat dilihat dan dirasakan dengan adanya gelombang-gelombang pada permukaan benda kerja, yaitu adanya ketidakrataan pada benda yang dapat dirasakan adanya tonjolan-tonjolan yang sangat kecil. Kekasaran permukaan yang dihasilkan pada proses EDM adalah kawah – kawah halus yang tersebar pada permukaan kawah. Ada faktor –faktor yang mempengaruhi kekasaran permukaan, yaitu : (Taufiq Rochim, 2001:55)

- Kualitas dari permukaan tergantung dari besarnya energi *sparking* yang dilepaskan pada waktu proses permesinan, semakin besar energi yang dilepaskan, maka akan semakin besar dan cepat pembentukan kawah – kawah yang terjadi, akan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin kasar
- Jika energi *sparking* yang digunakan terlalu kecil, maka proses pemakanan akan membutuhkan waktu lama, atau bahkan tidak akan terjadi proses pemotongan, akan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin halus
- Meski proses ini menggunakan pelepasan arus, namun tidak membahayakan tetapi hasil benda kerja yang dihasilkan akan semakin kasar.

2.6.2 Konfigurasi Permukaan

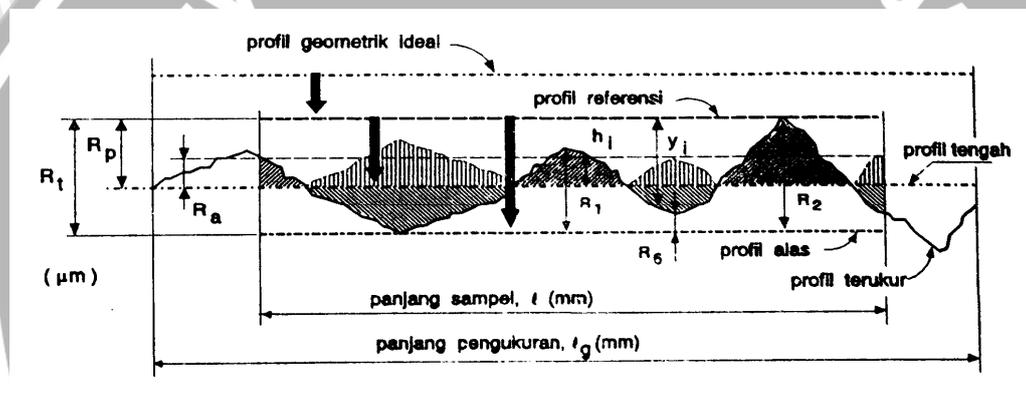
Kekasaran permukaan (*surface roughness*) merupakan ketidakrataan konfigurasi suatu permukaan beban kerja yang bisa berupa goresan-goresan atau kawah kecil pada suatu permukaan ditinjau dari profilnya. Konfigurasi ialah batas yang memisahkan benda padat dan sekelilingnya. Ketidakrataan konfigurasi dari suatu permukaan dapat diuraikan menjadi beberapa tingkatan, yaitu (Taufiq Rochim, 2001:55) :

1. Ketidakrataan geometris yang berupa kesalahan bentuk (*form error*), disebabkan oleh adanya lenturan yang terjadi pada perkakas atau benda kerja dan kesalahan posisi pada waktu pencekaman/pemegangan benda kerja.

2. Ketidakteraturan permukaan yang menyerupai gelombang (*waviness*), disebabkan oleh terjadinya getaran sewaktu proses pemotongan berlangsung.
3. Ketidakteraturan permukaan berupa alur (*grooves*), disebabkan oleh adanya guratan yang merupakan jejak atau bekas jalannya pahat.
4. Ketidakteraturan berupa serpihan (*falkes*), disebabkan oleh proses pembentukan geram yang sedang berlangsung.

2.6.3 Pengukuran Kekasaran Permukaan

Untuk menghasilkan permukaan benda kerja, jarum peraba (*stylus*) dari alat ukur harus digerakkan mengikuti lintasan yang berupa garis lurus dengan jarak yang sudah ditentukan terlebih dahulu. Panjang lintasan ini disebut panjang pengukuran (*transversing length*) bagian dari panjang pengukuran dimana dilakukan analisis dari profil permukaan yang disebut dengan panjang sampel (*sample length*).



Gambar 2.18. Posisi dan Profil-Profil
(Sumber : Spesifikasi Geometris Metrologi Industri dan Kontrol Kualitas, hal 56)

Dalam pengukuran kekasaran permukaan suatu material dikenal beberapa istilah penting seperti pada gambar 2.18 berikut diatas yaitu (Taufiq Rochim, 2001:56):

1. Profil geometris ideal (*geometrically ideal profile*) yaitu profil permukaan yang dapat berupa garis lurus, lingkaran atau garis lengkung.
2. Profil terukur (*measured profile*) yaitu profil permukaan material/benda kerja yang akan diukur.
3. Profil referensi (*reference profile*) yaitu profil yang digunakan sebagai acuan untuk menganalisis ketidakteraturan konfigurasi permukaan. Profil referensi dapat berupa garis lurus atau garis dengan bentuk sesuai dengan profil geometris ideal dan menyinggung puncak tertinggi dari profil terukur dalam suatu panjang sampel.
4. Profil dasar (*root profile*) yaitu profil referensi yang digeserkan ke bawah menyinggung titik terendah profil terukur.

5. Profil tengah (*center profile*) merupakan nama yang diberikan untuk profil referensi yang digeserkan ke bawah sehingga jumlah luas daerah atas profil tengah sampai ke profil terukur sama dengan jumlah luas daerah bawah profil tengah sampai ke profil terukur.

Berdasarkan profil-profil yang diterangkan diatas maka dapat didefinisikan beberapa parameter permukaan yaitu yang berhubungan dengan dimensi pada arah mendatar. Pada dimensi arah tegak dikenal beberapa parameter yaitu :

1. Kekasaran rata-rata kuadrat

kekasaran rata-rata kuadrat (*root mean square*) dinyatakan dalam persamaan (Sharma,2001:376) :

$$R_q = \sqrt{\frac{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + \dots + y_n^2}{n}} \quad (2.4)$$

dimana :

R_q = kekasaran rata-rata kuadrat (μm)

y = jarak profil terukur dengan profiltengah (μm)

n = jumlah data

2. Kekasaran rata-rata aritmatik

kekasaran rata-rata aritmatik (*center line average*) adalah metode pengukuran kekasaran yang umum dipakai. Kekasaran rata-rata aritmatik dinyatakan dalam persamaan (Sharma,2001:376) :

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n} \quad (2.5)$$

dimana :

R_a = kekasaran aritmatik (μm)

y = jarak profil terukur dengan profil tengah(μm)

n = jumlah data

3. Kekasaran total

Kekasaran total adalah jarak antara profil terukur maksimal (puncak tertinggi) dengan profil minimal (lembah terendah). Kekasaran total dinyatakan dalam persamaan 2-11:

$$R_t = R_{\max} = y_{\max} + y_{\min} \quad (2.6)$$

dimana :

$R_t = R_{\max}$ = kekasaran total (μm)

y_{\max} = jarak profil terukur maksimal dengan profil tengah (μm)

y_{\min} = jarak profil terukur minimal dengan profil tengah (μm)

4. Kekasaran total rata-rata

Kekasaran total rata-rata adalah jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima puncak tertinggi dikurangi jarak rata-rata profil alas ke profil terukur pada lima lembah terendah. Kekasaran total rata-rata dinyatakan dalam persamaan (Rochim,2001:57)

$$R_z = \sum \left(\frac{R_1 + R_2 + \dots + R_5 - (R_6 + \dots + R_{10})}{5} \right) \quad (2.7)$$

dimana:

R_z = kekasaran total rata-rata (μm)

R_1, R_2, \dots, R_5 = jarak profil alas ke profil terukur tertinggi (μm)

R_6, R_7, \dots, R_{10} = jarak profil alas ke profil terukur terendah (μm)

5. Kekasaran perataan

Kekasaran perataan adalah jarak antara profil terukur maksimal (puncak tertinggi) dengan garis tengah (*center line*). Kekasaran perataan dinyatakan dengan persamaan:

$$R_p = y_{\max} \quad (2.8)$$

Dimana :

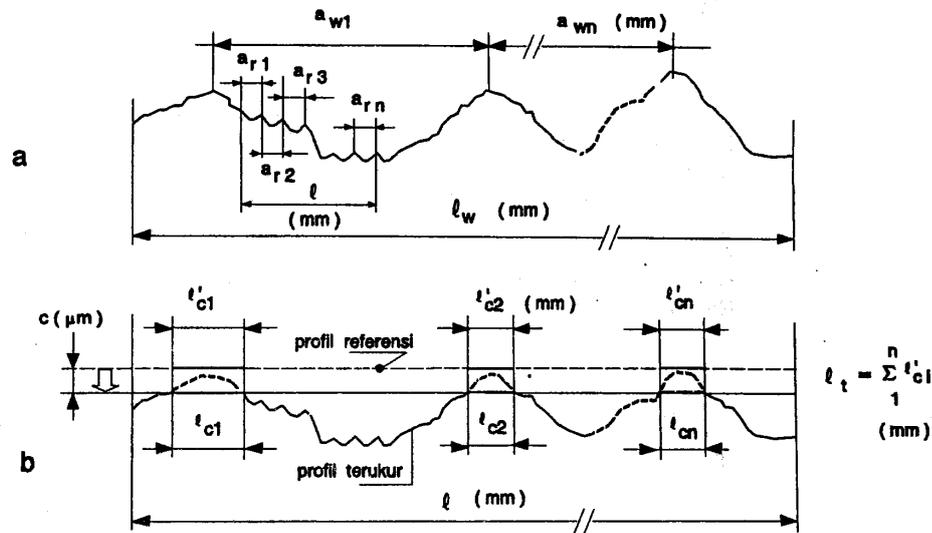
R_p = kekasaran perataan

y_{\max} = jarak profil terukur maksimal dengan profil tengah (μm)

Selanjutnya, parameter dimensi arah mendatar seperti terlihat pada gambar 2.19 antara lain (Rochim,2001,57):

- Lebar gelombang (*waviness width*) A_w adalah rata-rata aritmetis dari semua jarak a_{wi} di antara puncak gelombang (dari profil terukur) yang berdekatan pada suatu panjang sampel l_w dimensinya dalam mm.
- Lebar kekasaran (*roughness width*), A_r adalah rata-rata aritmetis dari semua jarak a_{ri} di antara dua puncak kekasaran (dari profil terukur) yang berdekatan pada satu panjang sampel l_r , dimensinya dalam mm.
- Panjang penahan (*bearing length*), l_1 adalah profil referensi digeserkan kebawah sejauh c maka akan memotong profil terukur sepanjang $l_{c1}, l_{c2}, \dots, l_{cn}$ pada profil geometris ideal dimensinya dalam mm.

Bagian panjang penahan (*bearing length fraction*), t_p adalah hasil bagi dari panjang penahan terhadap panjang sampelnya



Gambar 2.19 Analisa Profil Terukur dalam Arah Mendatar
(Sumber : Spesifikasi Geometris Metrologi Industri dan Kontrol Kualitas, hal 57)

2.6.4 Ketelitian (*Accuracy*)

Karena selama proses berlangsung terjadi proses *sparking* kearah radial dari pahat, maka akan berpengaruh terhadap ketelitian. Ketelitian pada proses *EDM* meliputi dua hal yaitu :

1. Gejala taper

Disebabkan oleh *side sparking* (*sparking* kearah tepi). Hal ini dapat dikurangi dengan menggunakan metode *flushing* hisap,

2. *Overcut*

Adalah *deviasi* yang menunjukkan bahwa besarnya (diameter) lubang yang dikerjakan oleh proses *EDM*, lebih besar daripada ukuran elektrodanya. Besarnya *overcut* ini tergantung pada kedalaman kawah yang terjadi, berarti dalam hal ini sangat tergantung dari besarnya energi yang digunakan oleh elektron untuk menubruk benda kerja.

2.7 Baja Karbon (*Carbon Steel*)

Baja yang sering digunakan pada proses permesinan *EDM* adalah baja karbon. Baja karbon merupakan baja yang mengandung karbon tidak lebih dari 1,4 % dan sedikit unsur lain seperti Silikon tidak lebih dari 0,60% dan mangan tidak lebih dari 1,65%. Unsur-unsur lain seperti *Phosphor*, *Sulfur* dan *Cuprum* tidak terdapat dalam jumlah besar.

(www.efunda.com)

2.7.1 Klasifikasi Baja Karbon

Berdasarkan kadar karbonnya, baja karbon dibedakan atas tiga jenis yaitu:

1. Baja karbon rendah (*low karbon steel*)

Kandungan karbon yang dimiliki baja karbon rendah berkisar antara 0,08%-0,30%C. Baja karbon ini mempunyai kemampukerasan (*hardena bility*) yang rendah. Baja karbon ini sering digunakan untuk konstruksi umum. Contohnya pada struktur bangunan, jembatan, kerangka lokomotif dan mobil. Jika pada baja ini diberi perlakuan dingin maka akan memperbaiki sifat mekanik, tegangan tarik dan tegangan luluhnya akan meningkat.

2. Baja karbon sedang (*medium carbon steel*)

Kandungan karbon yang dimiliki baja karbon menengah berkisar 0,30%-0,45%C. Baja ini di aplikasikan untuk baja tempa kekuatan tinggi, untuk roda turbin, poros pinion, lengan kemudi, poros kereta api dan chanksaft.

3. Baja karbon tinggi (*high carbon steel*)

Kandungan karbon yang dimiliki baja ini berkisar antara 0,45%-1,7%C. Biasanya di berikan perlakuan panas pada baja ini untuk memperbaiki mutunya. Baja ini biasanya di aplikasikan untuk produk *tools*, cetakan (*die*).

2.7.2 Baja St 42

Baja St 42 termasuk baja karbon rendah dengan kadar karbon 0,2%. Baja karbon rendah mempunyai struktur *body center cubic*. Selain itu, baja St 42 mempunyai sifat mekanik yang khas yaitu :

- Keuletan yang baik
- Mampu tempa yang baik
- Mampu dikerjakan di semua mesin perkakas

Baja karbon St 42 merupakan paduan besi dan karbon (Fe-C) yang mengandung karbon (C) 0,2% dan sedikit unsur lainnya seperti Mangan (Mn) 0,2%, fosfor (P) 0,08%, sulfur 0,050%,. Sifat baja karbon tergantung pada jumlah karbon yang terkandung didalamnya, sehingga baja ini dikelompokkan berdasarkan kadar karbonnya.

Baja St 42 dapat dikeraskan tergantung kadar karbon didalamnya dan mempunyai kekerasan serta ketahanan aus permukaan yang cukup tinggi. Sehingga dapat digunakan sebagai rangka kendaraan, mur baut, pipa, tangki dan lain-lain yang memerlukan kekuatan serta ketangguhan yang tinggi.

2.8 Hipotesa

Dengan melakukan perubahan arus listrik akan menyebabkan terjadinya loncatan bunga api (*sparking*), semakin meningkatnya arus listrik yang digunakan maka semakin besar pula energi yang dihasilkan, sehingga pada proses pengikisan permukaan benda kerja membentuk kawah-kawah yang besar dan mengakibatkan kekasaran pada permukaan benda kerja semakin meningkat, sedangkan untuk polaritas akan mempengaruhi arah arus listrik sehingga kekasaran permukaan benda kerja akan meningkat ; begitu juga dengan fenomena yang sebaliknya.

