

BAB II

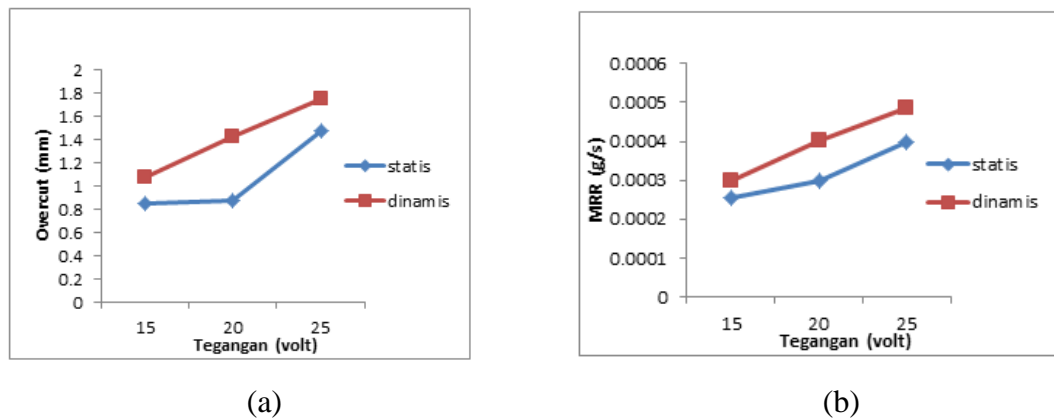
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Kajian Pustaka

Budiman, (2012) membahas tentang pengaruh variasi nilai konsentrasi larutan terhadap *overcut*, nilai *Material Removal Rate* (MRR) dan efek ketirusan pada pemesinan ECM. Pada penelitiannya menggunakan benda kerja SKD 11. SKD digunakan untuk pembuatan *punch, dies, cutting tool*, dan proses lainnya yang membutuhkan sifat tahan aus yang tinggi. Material pahat menggunakan tembaga (Cu) yang berbentuk silinder berlubang dengan diameter dalam 9 mm dan diameter luar 10 mm. Pemilihan tembaga sebagai material pahat karena tembaga bersifat penghantaran listrik yang baik dan mudah didapatkan. Kesimpulan dari penelitiannya semakin besar nilai konsentrasi larutan maka MRR yang terjadi akan semakin besar. Hal ini mengacu pada reaksi kimia antara NaCl dan H₂O. Dimana meningkatnya kadar asam (HCl) dipengaruhi oleh reaksi antara NaCl dan H₂O. Besarnya konsentrasi larutan akan menurunkan waktu dari pemesinan. Nilai konsentrasi yang tinggi akan mempengaruhi MRR tiap menit, dimana semakin tinggi nilai konsentrasi maka MRR yang terjadi juga akan naik. Hal inilah yang mempengaruhi waktu pemesinan yang semakin cepat seiring bertambahnya nilai konsentrasi larutan, karena material yang dilepaskan dari logam induk semakin banyak dan cepat.

Penelitian yang telah dilakukan oleh Wibowo, (2013) yang mempelajari tentang pengaruh besarnya tegangan terhadap *overcut* dan MRR yang terjadi. Penelitian ini menggunakan *tool electrode* kuningan, benda kerja *stainless steel* SS 304, *working gap* 0,5 mm, cairan elektrolit menggunakan NaCl, serta cara pemakanan statis dan dinamis, dengan parameter yang diubah adalah besarnya tegangan. Pada penelitiannya wibowo menjelaskan bahwa besarnya *overcut* dan MRR yang terjadi pada benda kerja berbanding lurus dengan besarnya tegangan yang disuplai saat pemesinan berlangsung. Hal ini dikarenakan beda potensial yang tinggi mengakibatkan arus pemesinan yang mengalir dari *anode* ke *katode*

semakin tinggi, dimana akan terjadi peningkatan pemakanan terhadap benda kerja sehingga pemesinan akan menghasilkan *overcut* dan MRR yang besar. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2.1.

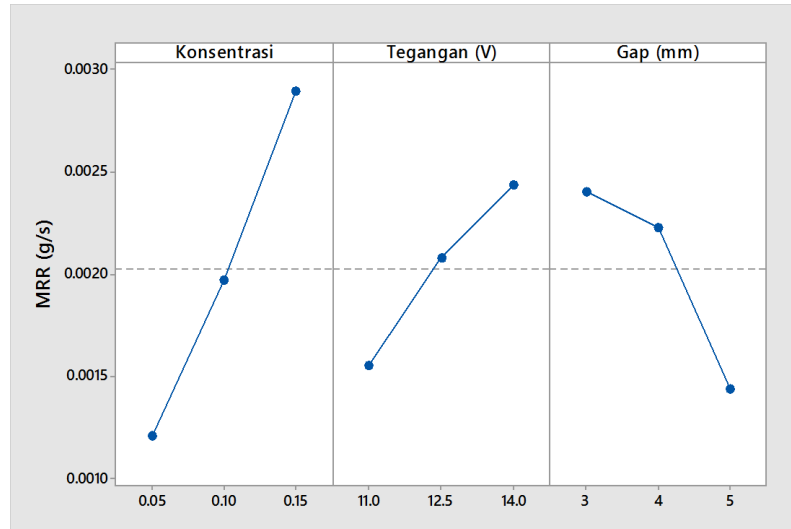


Gambar 2.1. Grafik rata-rata (a) *overcut* dan (b) MRR *stainless steel* SS 304 (Wibowo, 2013)

Studi lain dilakukan oleh Adi, (2015) membahas tentang pengaruh konsentrasi elektrolit, tegangan, dan *gap* pemesinan terhadap *material removal rate* (MRR), *overcut* dan *surface roughness* dalam pembuatan *micro-layered microfilter*. Bahan material yang digunakan adalah *stainless steel* 204, dengan dimensi 25 x 55 x 0,3 mm untuk respon *overcut* dan MRR dan 25 x 50 x 0,3 mm untuk respon *surface roughness*. Pada permukaan atas dari benda kerja dilapisi dengan *vynil* sebagai isolasi dari benda kerja tersebut. Tool elektroda terbuat dari bahan dasar *stainless steel* tipe 204 dengan delapan lubang untuk menyemprotkan elektrolit ke benda kerja. Pada penelitiannya terdapat 3 faktor dan 3 level, yaitu konsentrasi elektrolit NaCl 5%, 10%, 15%; tegangan 11 v, 12,5 v, 14 v dan *gap* 3mm, 4mm, 5mm.

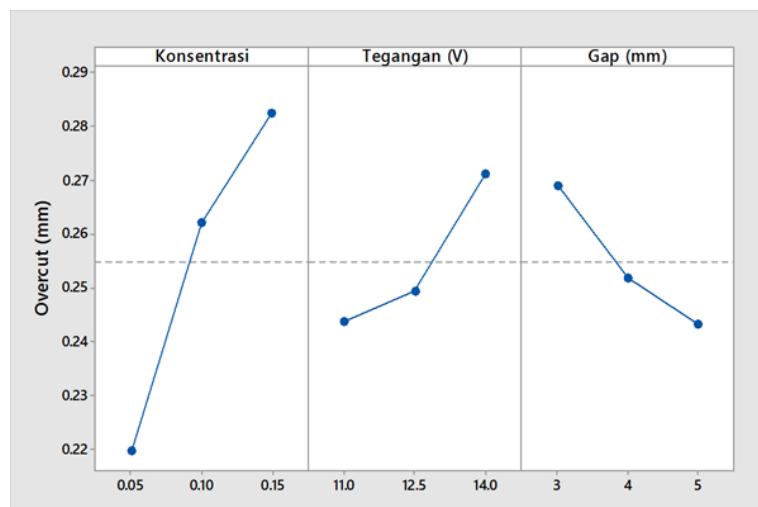
Menurut peneliti Adi, (2015) didapat nilai MRR yang optimal adalah konsentrasi elektrolit 15%, tegangan 14 volt, dan *gap* pemesinan 3 mm. Semakin tinggi konsentrasi maka MRR akan semakin tinggi. Hal serupa juga berlaku pada faktor tegangan, dimana semakin tinggi tegangan akan menghasilkan nilai MRR yang semakin tinggi pula. Untuk *gap* pemesinan, semakin kecil jarak antara tool

dengan benda kerja, atau semakin kecil *gap*, maka nilai MRR akan semakin tinggi.



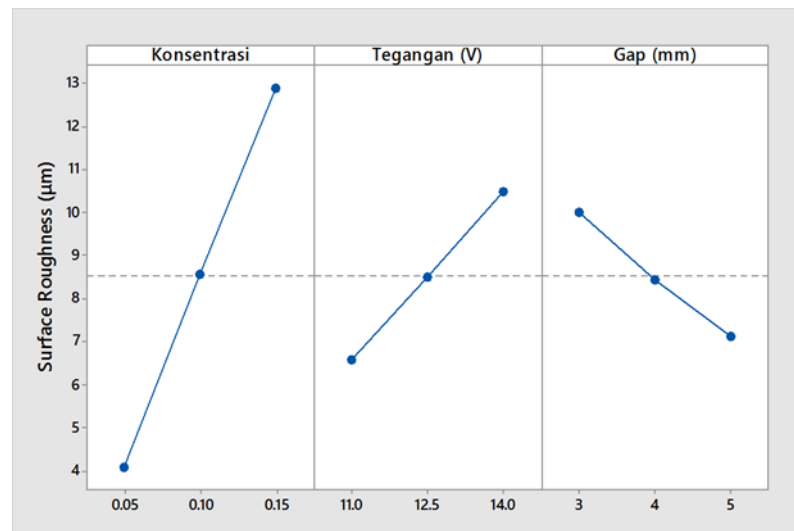
Gambar 2.2. Grafik nilai MRR (Adi, 2015)

Overcut terkecil didapat ketika konsentrasi elektrolit berada pada 5%, tegangan 11 volt, dan gap 5 mm. Nilai konsentrasi elektrolit dan tegangan memiliki pengaruh yang sama terhadap *overcut*, yaitu semakin tinggi nilai konsentrasi ataupun tegangan, maka *overcut* yang di hasilkan akan semakin tinggi, sedangkan untuk *gap* pemesinan, semakin kecil gap pemesinan maka nilai *overcut* semakin tinggi.



Gambar 2.3. grafik *overcut* (Adi, 2015)

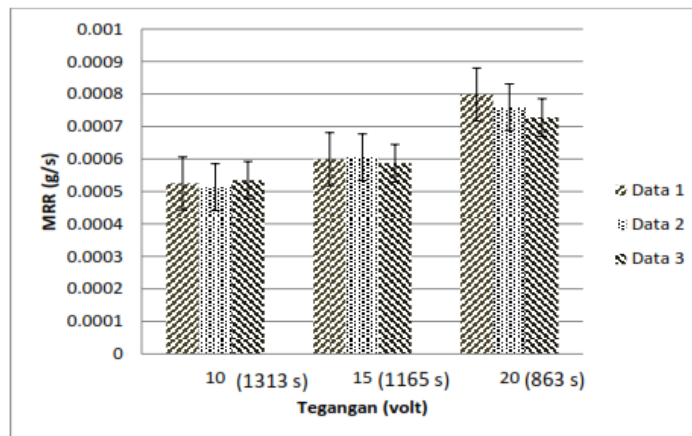
Surface roughness terkecil didapat pada konsentrasi elektrolit 5%, tegangan 11 volt, dan gap pemesian 3 mm. Nilai konsentrasi elektrolit, tegangan, dan gap memiliki pengaruh berbanding lurus terhadap *surface roughness*, yaitu semakin tinggi nilai konsentrasi, tegangan, ataupun gap maka *surface roughness* yang di hasilkan akan semakin tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.4.



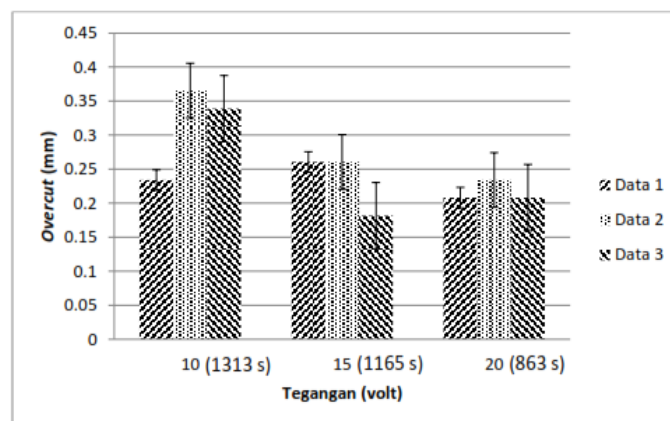
Gambar 2.4. Grafik *surface roughness* (Adi, 2015)

Penelitian lain tentang ECM dilakukan oleh Nugroho, (2014) mempelajari tentang pengaruh besarnya tegangan terhadap *overcut* dan MRR yang terjadi dalam pembuatan *micro-layered microfilter*. Penelitian ini menggunakan *tool electrode* kuningan dengan panjang 100 mm dan diameter 4 mm, benda kerja *stainless steel SS 204*, *working gap* 1 mm, cairan elektrolit menggunakan 150 mg/l NaCl, serta cara pemakanan statis dan dinamis, dengan parameter yang diubah adalah besarnya tegangan. Nugroho, (2013) menjelaskan bahwa besarnya MRR berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan. Hal ini terjadi akibat semakin tinggi beda potensial yang dialirkan maka semakin tinggi pula pemakanan terhadap benda kerja. Nugroho juga menambahkan bahwa semakin tinggi tegangan mempengaruhi nilai *overcut*, dimana semakin tinggi tegangan maka *overcut* semakin kecil. Pernyataan ini berlawanan dengan pernyataan dari

Wibowo, (2013). Dimana tegangan berbanding lurus dengan *overcut*. Sehingga nugroho menambahkan bahwa besarnya *overcut* juga dipengaruhi oleh lama pemesinan. Dimana semakin lama pemesinan maka *overcut* yang timbul semakin tinggi. Hasil yang dilakukan ditunjukkan pada gambar 2.5 dan gambar 2.6.



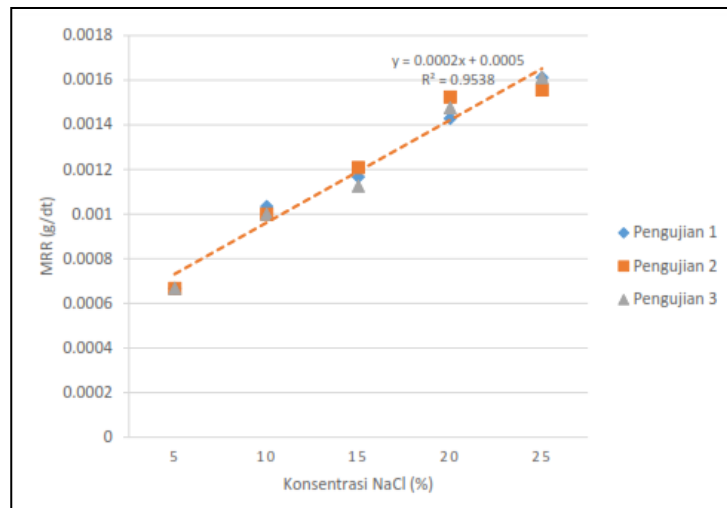
Gambar 2.5. Grafik MRR SS 204 (Nugroho, 2013)



Gambar 2.6. grafik *overcut* SS 204 (Nugroho, 2013)

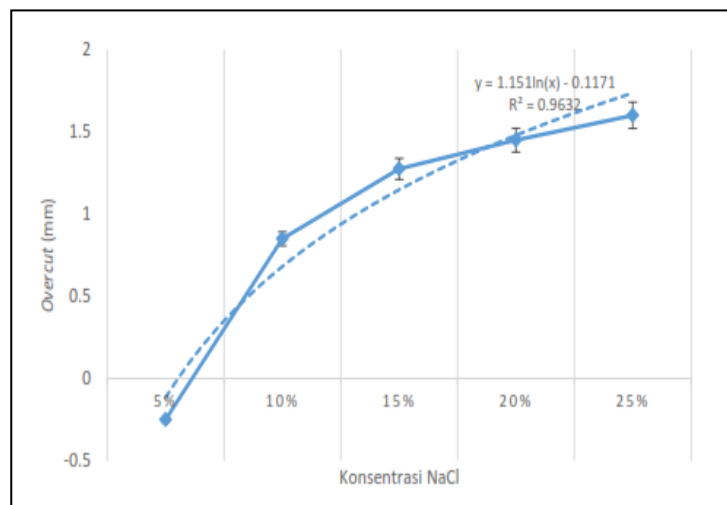
Penelitian lain dilakukan oleh Prasetya (2014) membahas tentang pengaruh cairan elektrolit NaCl terhadap MRR, *overcut* dan *surface roughness* dalam pembuatan *micro-layered microfilter*. *Tool electrode* yang digunakan adalah tembaga, benda kerja alumunium dengan ketebalan 3 mm, gap 3 mm dan tegangan 10 volt, variasi elektrolit NaCl adalah 5, 10, 15, 20, dan 25%.

Pada penelitiannya pengaruh elektrolit berbanding lurus dengan nilai MRR, dimana semakin tinggi konsentrasi larutan elektrolit NaCl maka semakin tinggi pula nilai MRR yang dihasilkan. Nilai MRR terbesar diperoleh pada konsentrasi NaCl 25% yaitu sebesar $1,59 \times 10^{-3}$ g/dt.



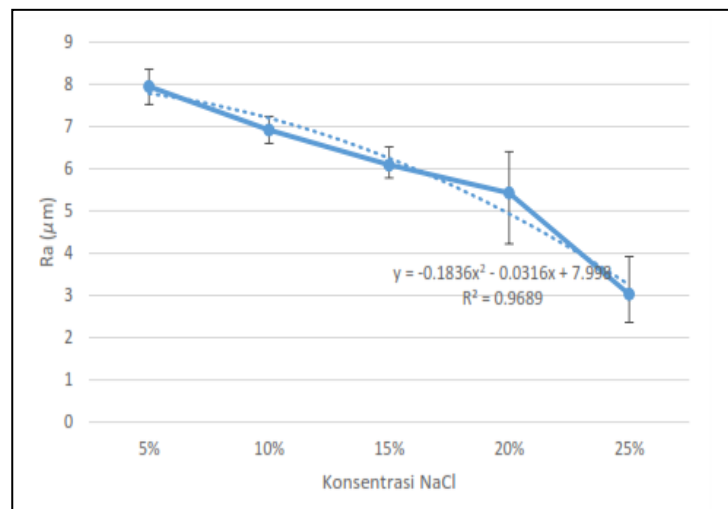
Gambar 2.7. Grafik MRR prasetya (2014)

Hal yang serupa juga berlaku untuk *overcut*, dimana semakin tinggi konsentrasi elektrolit NaCl maka *overcut* yang terbentuk semakin tinggi. Nilai *overcut* terkecil diperoleh dengan waktu 4 menit 30 detik pada konsentrasi NaCl 5% yaitu sebesar -0,25 mm.



Gambar 2.8. Grafik *overcut* prasetya (2014)

Konsentrasi NaCl dalam elektrolit berbanding terbalik terhadap *surface roughness* aluminium di mana semakin tinggi kadar NaCl dalam elektrolit maka semakin kecil nilai R_a yang dihasilkan pada proses pemesinan ECM, begitu pula sebaliknya. Kerapatan arus terbesar diperoleh pada konsentrasi NaCl 25% yang menghasilkan nilai *surface roughness* terkecil, yaitu 3,03 μm .



Gambar 2.9. Grafik *surface roughness* prasetya (2014)

Dari hasil kajian pustaka tersebut maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

Semakin tinggi nilai konsentrasi larutan NaCl maka nilai MRR akan semakin besar. Hal ini mengacu pada reaksi kimia antara NaCl dan H₂O. Dimana meningkatnya kadar asam (HCl) dipengaruhi oleh reaksi antara NaCl dan H₂O. Semakin tinggi nilai konsentrasi larutan NaCl maka waktu pemesinan akan menurun atau semakin singkat (Budiman, 2012). Nilai konsentrasi yang tinggi akan mempengaruhi MRR tiap menit, dimana semakin tinggi nilai konsentrasi maka MRR yang terjadi juga akan naik. Tegangan memiliki pengaruh dalam besar kecilnya nilai MRR. Semakin tinggi tegangan maka akan menghasilkan nilai MRR yang semakin tinggi (Nugroho, 2014). Hal ini dikarenakan beda potensial yang tinggi mengakibatkan arus pemesinan yang mengalir dari *anode* ke *katode* semakin tinggi, dimana akan terjadi peningkatan pemakanan terhadap benda kerja

sehingga pemesinan akan menghasilkan MRR yang besar. Jarak antara tool dan benda kerja (*gap*) juga memiliki pengaruh dalam besar kecilnya nilai MRR, dimana semakin kecil jarak antara tool dengan benda kerja, atau semakin kecil *gap*, maka nilai MRR akan semakin tinggi (Adi, 2015).

Besarnya MRR dan *overcut* yang terjadi pada benda kerja berbanding lurus dengan besarnya tegangan yang disuplai saat pemesinan berlangsung. Hal ini dikarenakan beda potensial yang tinggi mengakibatkan arus pemesinan yang mengalir dari *anode* ke *katode* semakin tinggi, dimana akan terjadi peningkatan pemakanan terhadap benda kerja sehingga pemesinan akan menghasilkan *overcut* dan MRR yang besar (Wibowo, 2013). Selain tegangan, konsentrasi larutan elektrolit juga memiliki peranan dalam tinggi rendahnya nilai MRR. Konsentrasi elektrolit berbanding lurus dengan nilai MRR, dimana semakin tinggi konsentrasi larutan elektrolit nacl maka semakin tinggi pula nilai MRR yang dihasilkan (Prasetya, 2014). Jarak antara tool dan benda kerja berbanding terbalik, dimana semakin kecil *gap* pemesinan maka nilai *overcut* semakin tinggi (Adi, 2015). Besarnya *overcut* juga dipengaruhi oleh lama pemesinan. Dimana semakin lama pemesinan maka *overcut* yang timbul semakin tinggi (Nugroho, 2014).

2.2. Dasar Teori

2.2.1. *Electro Chemical Machining* (ECM)

Electrochemical Machining (ECM) merupakan salah satu proses pemesinan non konvensional yang prinsip kerjanya berdasarkan hukum Faraday (1833). ECM adalah proses pemesinan yang bergantung pada penghapusan atom dari permukaan benda kerja (McGeough, 1988). ECM didasarkan pada proses *anodic dissolution* dalam elektrolisis (Tlusty, 2000). ECM adalah proses elektrolisis dimana pembuangan logam terjadi karena pelarutan secara proses kimia dari benda kerja (Sudiarso, 2009). Elektrolisis adalah suatu proses kimia yang mana terjadi ketika ada arus listrik yang melewati dua *electrode* yang terbenam di dalam larutan elektrolit. Contoh dari proses elektrolisis adalah *electro-plating* dan *electro-polishing*. Bentuk penghapusan atom, dalam hal ini disebut *Material Removal Rate* (MRR), yang ada di permukaan benda kerja bergantung pada bentuk dan gerakan alat terhadap benda kerja. Selain itu, parameter yang mempengaruhi MRR adalah kerapatan arus dan jarak *gap* yang dibentuk antara benda kerja dengan *tool*. Oleh karena itu suplai arus yang tinggi dibutuhkan untuk memperoleh MRR yang tinggi.

ECM memanfaatkan reaksi kimia melalui pelepasan muatan listrik sehingga terjadi pelarutan anodis dari material benda kerja (*anode*) oleh *electrode* (*katode*) yang keduanya bersifat konduktif (menghantarkan listrik). Listrik dengan kuat arus tinggi dan bertegangan rendah digunakan untuk melarutkan partikel logam dan mengikisnya dari benda kerja. Sumber tegangan yang digunakan adalah arus DC melalui perantara reaksi cairan elektrolit yang mengalir pada celah (*gap*) antara benda kerja dan *electrode*. ECM biasa digunakan untuk proses pemesinan material yang mempunyai tingkat kekerasan sangat tinggi serta sulit dikerjakan dengan metode konvensional.

Pemesinan menggunakan metode ECM mempunyai beberapa kelebihan, antara lain:

1. Mampu melakukan pemesinan pada benda kerja dengan kekerasan material yang tinggi karena prosesnya tidak dipengaruhi oleh kekerasan bahan benda kerja,

2. Pemesinan pada benda kerja jenis *fragile parts* dan *brittle materials* sangat aman menggunakan ECM,
3. Benda kerja *non-rigid* dapat diproses dengan mudah,
4. Tidak ada *cutting force* karena *electrode* dan benda kerja tidak bersentuhan, seta tidak bising selama proses pemesinan,
5. Mampu membuat bentuk yang sulit dikerjakan dengan metode konvensional,
6. Dapat digunakan untuk memotong benda yang sangat kecil atau dengan sudut yang kecil,
7. Tidak ada kerusakan akibat pengaruh panas dan tekanan (*thermal and mechanical stress*) pada benda kerja,
8. *Electrode* atau pahat lebih awet karena tidak ada keausan pemakaian,
9. Dibandingkan dengan mesin konvensional, ECM memiliki *time saving* yang lebih baik.

Di samping kelebihan tersebut, ECM mempunyai banyak kekurangan, antara lain:

1. Memerlukan daya yang tinggi untuk mengoperasikan ECM,
2. Memerlukan waktu dan biaya tambahan untuk membuat *electrode* sebagai alat potong pada ECM,
3. Penggunaan elektrolit dapat mengakibatkan korosi pada benda kerja dan mesin itu sendiri,
4. Pengikisan material benda kerja tergantung dari energi yang dipakai selama pemesinan.

2.2.2. Prinsip kerja pada *Electro Chemical Machining* (ECM)

Apabila arus listrik melewati dua *electrode* melalui cairan elektrolit maka akan terjadi *elektrolisis*. Sistem elektrolit dan cairan elektrolit dinamakan sel *elektrolisis*. Reaksi kimia yang terjadi pada *electrode* dinamakan reaksi anodis atau katodis. *Disolusi anodis* yang terjadi pada benda kerja merupakan dasar dari proses pemesinan ECM pada logam.

Dalam hukum Faraday tentang elektrolisis dinyatakan bahwa:

1. Jumlah massa yang dihilangkan oleh proses pemesinan, m , berbanding lurus dengan jumlah muatan listrik.

$$m \sim I.t \dots\dots\dots (2.1)$$

2. Jumlah substansi yang dihilangkan, m , dengan kuantitas elektrisitas yang sama berbanding lurus dengan berat kimia ekuivalen substansi tersebut.

$$m \sim E \dots\dots\dots (2.2)$$

$$E = \frac{M}{Z} \dots\dots\dots (2.3)$$

dengan,

I : arus listrik, *Ampere* (A)

m : massa benda (g)

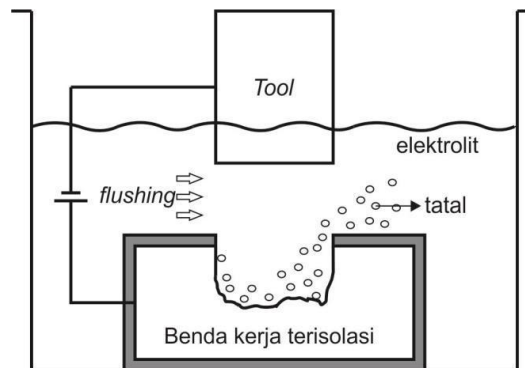
T : waktu pemesinan, detik (s)

E : berat kimia ekuivalen

M : berat atom (g)

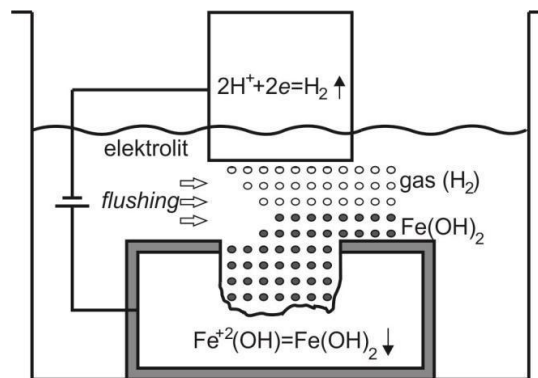
Z : valensi benda kerja

Prinsip ECM yaitu proses pengerjaan material dengan cara pelarutan anodis (*anodic dissolution*) dari benda kerja oleh cairan elektrolit yang mengalir melalui celah (*gap*) antara benda kerja (anode) dan *electrode* (katode), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.10. Benda kerja yang bertindak sebagai anode dihubungkan dengan sumber arus searah bermuatan positif (DC +), sedangkan *electrode (tool)* katode dihubungkan dengan sumber arus searah bermuatan negatif (DC -) dan cairan elektrolit dialirkan di antara electrode dan benda kerja.



Gambar 2.10. Prinsip ECM (McGeough, 1988)

McGeough (1988) menyatakan bahwa ketika beda potensial diterapkan pada *electrode* maka akan terjadi beberapa kemungkinan reaksi yang terjadi pada anode dan katode seperti diilustrasikan pada Gambar 2.11.



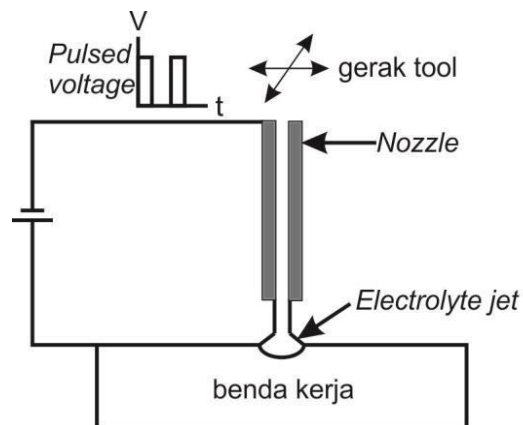
Gambar 2.11. Reaksi proses pemesinan ECM pada besi (McGeough, 1988)

2.2.3. Jenis *Electrochemical Machining* (ECM)

Electrochemical Machining (ECM) terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan kebutuhan pemesinan yang diperlukan, antara lain:

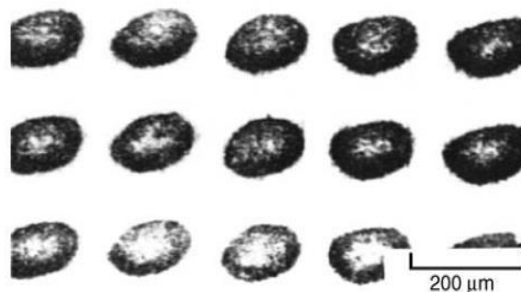
2.2.3.1. *Micro-ECM*

Electro Chemical Machining (ECM) biasanya dikategorikan sebagai proses pemesinan dengan akurasi yang rendah. Hal ini dikarenakan jarak antar *electrode* (*gap*) pemesinannya yang lebih lebar dibandingkan mesin konvensional lainnya.



Gambar 2.12. *Electrolyte Jet* (El-Hofy, 2005)

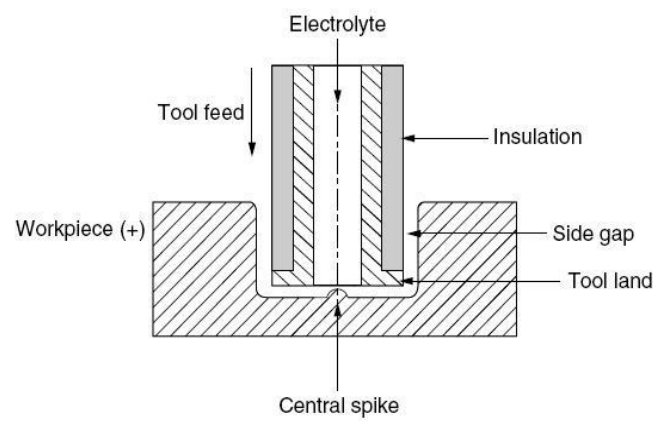
Pada *micro-ECM*, *tool* mikro yang digunakan adalah *electrolyte jet* seperti pada Gambar 2.12 di mana benda kerja yang bergerak terhadap *tool*-nya. Jenis arus yang digunakan pada *micro-ECM* adalah *pulse current* (arus kotak) yang dapat menghasilkan *indentasi* (cekungan) yang kecil saat pemesinan. *Indentasi* pada pemesinan mikro dapat dilihat pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13. *Indentasi* (cekungan) pada pemesinan mikro

2.2.3.2. *Electro Chemical Drilling (ECDR)*

Diameter yang dihasilkan pada *Electro Chemical Drilling (ECDR)* berkisar antara 1 sampai 2 mm dengan laju pemakanan 1 sampai 5 mm/menit. Seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.14, *tool electrode* yang digunakan pada ECDR adalah electrode jenis *tubular* (pipa). Cairan elektrolit kemudian dipompakan melalui tengah *tool* dan keluar melalui celah (*gap*) antara *tool* dan benda kerja.

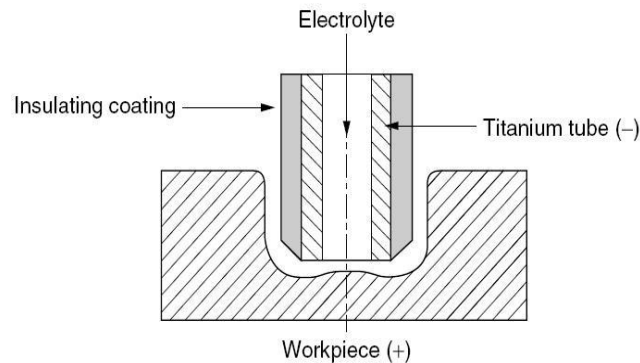


Gambar 2.14. Konfigurasi ECDR (El-Hofy, 2005)

Proses pemakanan benda kerja juga terjadi pada arah lateral yaitu antara permukaan samping *tool* dan permukaan benda kerja di dekatnya sehingga diameter lubang yang dihasilkan lebih besar daripada diameter *tool*. Untuk hasil pemesinan dengan *oversize* diameter yang rendah serta akurasi tinggi disarankan menggunakan laju pemakanan (*feed rate*) yang tinggi. Dengan kondisi yang sama, *material removal rate (MRR)* dan *surface quality* yang dihasilkan pun lebih tinggi.

2.2.3.3. *Shaped Tube Electrolytic Machining (STEM)*

Proses disolusi akibat adanya perbedaan tegangan listrik di antara *tool* dan benda kerja merupakan prinsip dasar *Shaped Tube Electrolyte Machining (STEM)*. Adanya medan listrik di antara *electrode* dengan perantara elektrolit menyebabkan terjadinya penghapusan material pada permukaan benda kerja.



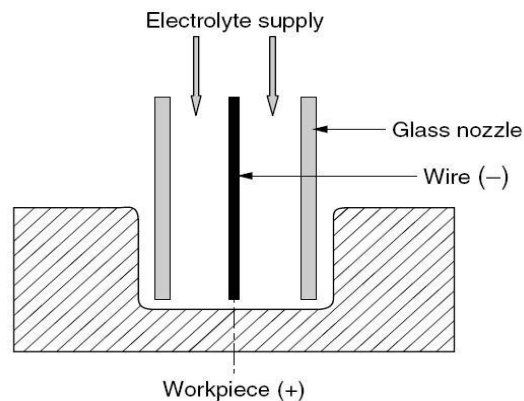
Gambar 2.15. Skema STEM (El-Hofy, 2005)

Sistem konfigurasi pemesinan pada STEM adalah sama dengan ECM, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.11. di atas. Namun sistem harus tahan terhadap asam (*acid resistant*), kekakuan tidak tinggi, dan memiliki *power supply* dengan polaritas yang dapat diubah secara periodik. Karena proses pemesinan pada STEM menggunakan elektrolit yang bersifat asam, maka penggunaannya terbatas untuk material yang tahan terhadap korosi (*corrosion resistant materials*). Diameter *oversize* lubang yang dihasilkan STEM lebih kecil daripada ECDR. Aplikasi pemesinan STEM misalnya pada komponen mesin jet dan turbin gas seperti: Lubang pendingin pada sudu turbin, *Fuel Nozzle*, Pengeboran alur pelumasan pada bearing dimana penggunaan EDM dapat menyebabkan *crack*.

2.2.3.4. *Electrostream (Capillary) Drilling*

Electrostream (Capillary) Drilling merupakan pengembangan dan teknik khusus dari ECM yang digunakan untuk menghasilkan lubang (*holes*) yang baik dimana terlalu dalam apabila menggunakan EDM dan terlalu kecil jika menggunakan STEM. *Tool* yang digunakan adalah *glass nozzle* (diameter 0,025-0,50 mm).

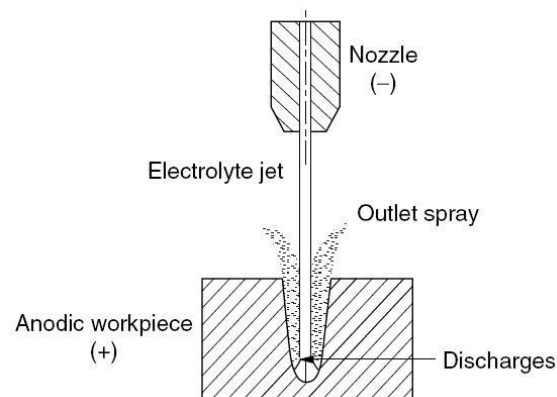
Untuk mengkonduksikan arus pemesinan menuju elektrolit, digunakan kawat platina yang terpasang di dalam *glass nozzle*. Skema *Electrostream (Capillary) Drilling* dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Skema *Electrostream (Capillary) Drilling* (El-Hofy, 2005)

2.2.3.5. *Electro Chemical Jet Drilling (ECJD)*

Electro Chemical Jet Drilling (ECJD) digunakan dalam pembuatan lubang yang lebih kecil yang dapat dicapai menggunakan *electrostream (Capillary) Drilling*. Proses pemesinannya dapat dilihat pada Gambar 2.17. dimana *nozzle* berperan sebagai katodenya.

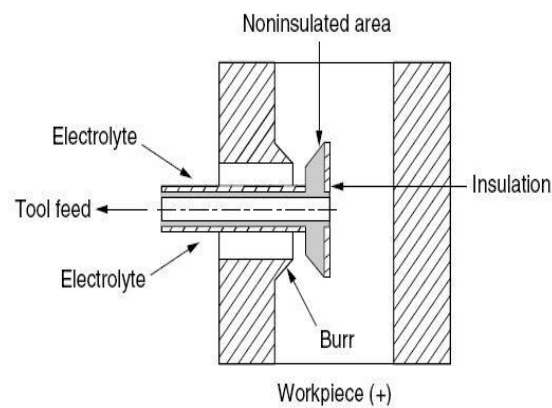


Gambar 2.17. *Electro Chemical Jet Drilling* (El-Hofy, 2005)

Khusus *Electrochemical Jet Drilling*, besar tegangan listrik yang digunakan yaitu antara 400 sampai 800 Volt. Umumnya, lubang yang dihasilkan oleh ECJD lebih besar daripada *Electrolyte Jet* karena proses disolusi pada ECJD dibantu dengan tekanan air dari *nozzle*.

2.2.3.6. *Electro Chemical Deburring (ECDB)*

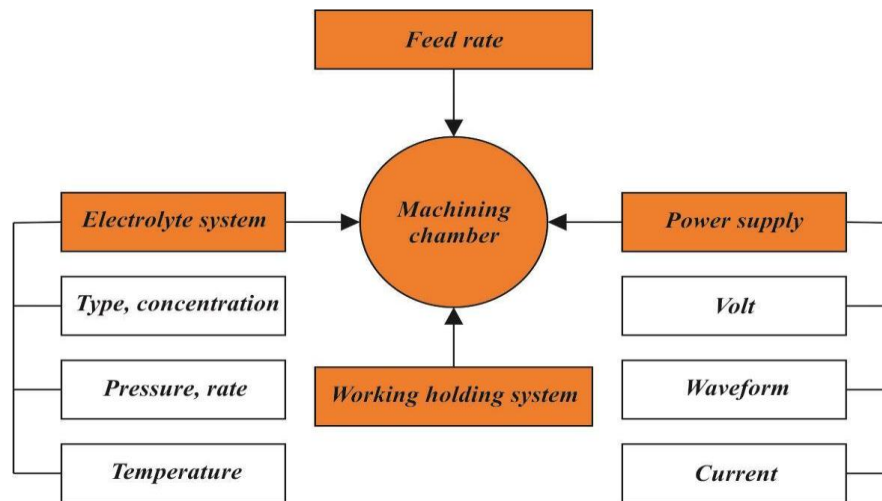
Electro Chemical Deburring (ECDB) digunakan untuk menghilangkan *burr* hasil dari proses pengeboran. *Burr* merupakan sisa material yang tidak diinginkan pada bagian komponen mesin sebagai hasil dari proses manufaktur dan perlu untuk dihilangkan. Mekanisme *deburring* pada ECDB ditunjukkan pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18. Mekanisme ECDB (El-Hofy, 2005)

2.2.4. Peralatan *Electro Chemical Machining*

Komponen utama pada mesin ECM yaitu terdiri dari sistem kontrol pemakanan, sistem elektrolit, *power supply*, dan pemegang benda kerja seperti yang ditunjukkan Gambar 2.19. berikut.



Gambar 2.19. Komponen sistem pada ECM (El-Hofy, 2005)

2.2.4.1. Power Supply

Power supply regulated, tegangannya tidak akan berubah apabila dikenai beban, sedangkan *power supply unregulated* tegangan akan turun apabila dikenai beban. *Power supply unregulated* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi berikut ini:

1. tegangan 2-80 Volt (kontinu atau pulse),
2. kisaran arus antara 5-50 ampere,
3. penyesuaian tegangan pada *gap* berlangsung secara kontinu,
4. pengendali arus dalam keadaan darurat (*emergency*),
5. proteksi arus pendek (*short circuit*) dalam 0,001 s.

2.2.4.2. Elektrolit

Fungsi utama elektrolit pada proses pemesinan ECM adalah:

1. Menciptakan kondisi *anodic dissolution* pada material benda kerja,
2. Mengonduksikan arus pemesinan,
3. Menghilangkan *debris* hasil reaksi dari proses ecm,
4. Memindahkan panas (*dissipation*) yang dihasilkan oleh proses pemesinan,
5. Mempertahankan suhu agar tetap konstan.

Elektrolit yang biasa digunakan adalah *Natrium Klorida* (NaCl), *Natrium Nitrat* (NaNO₃), dan *Natrium Hidroksida* (NaOH). Pengoperasian ECM menggunakan campuran elektrolit yang disesuaikan dengan kebutuhan.

Tabel 2.1 Elektrolit dan laju pemesinan berbagai benda kerja

<i>Work material</i>	<i>Electrolyte</i>		Removal rate, mm ³ /(min·A)
	<i>Constituent</i>	<i>Concentration g/L H₂O</i>	
<i>Grey iron</i>	NaCl	300	2,0
	NaNO ₃	600	2,0
<i>White cast iron</i>	NaNO ₃	600	1,6
<i>Steel; hardened tool Steel</i>	NaClO ₃	780	2,0
<i>Steel; iron-, and nickel-, and cobalt- base alloy</i>	NaNO ₃	600	2,1
	NaCl or KCl	300	2,1
<i>Copper & copper Alloy</i>	NaCl or KCl	300	4,4
	NaNO ₃	600	3,3
<i>Tungsten</i>	NaOH	180	1,0
<i>Titanium alloy</i>	NaCl or KCl	120	1,6
<i>Molybdenum</i>	NaOH	180	1,0

2.2.4.3. *Tool electrode*

Tool electrode pada pemesinan ECM harus tahan terhadap karat untuk waktu yang lama dan mampu menghantarkan listrik. Material yang digunakan sebaiknya bersifat anti-karat, mempunyai konduktivitas termal dan konduktivitas listrik yang baik, serta mudah dilakukan pemesinan sesuai geometri yang dibutuhkan. Akurasi dimensional dan *surface finish* pada *tool electrode* berpengaruh langsung terhadap akurasi dan *surface finish* pada benda kerja. Aluminium, kuningan, tembaga, karbon, perak, stainless steel, dan monel adalah

material yang biasa digunakan sebagai *electrode* pada pemesian ECM. Adapun material *tool electrode* yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuningan.

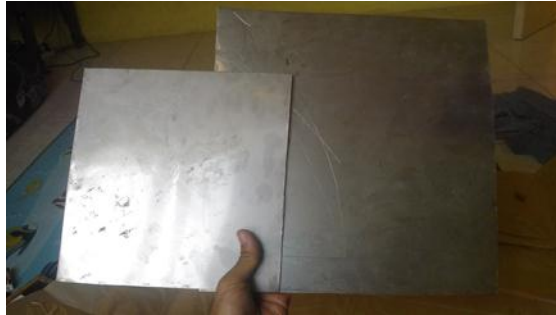
Kuningan merupakan logam paduan antara tembaga (Cu) dan seng (Zn). Perbandingan antara tembaga dan seng beragam, tergantung dengan karakteristik kuningan yang ingin dihasilkan. Namun, umumnya kadar tembaga antara 60-90% dari massa total.



Gambar 2.20 *Tool / electrode* Kuningan

2.2.4.4. Benda kerja (*workpiece*)

Benda kerja pada ECM haruslah mampu menghantarkan listrik. Beda potensial yang terkandung dalam unsur benda kerja sangat menentukan terciptanya efisiensi arus dalam pemesian. Kereaktifan unsur benda kerja juga menjadi salah satu faktor yang dapat mempengaruhi hasil pemesian pada benda kerja. Selain itu, benda kerja yang diproses dengan pemesian ECM adalah benda kerja yang bersifat mampu mendapat perlakuan panas. Pada penelitian ini material benda kerja yang digunakan adalah plat SS 316, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.21.



Gambar 2.21 Plat baja SS 316

Plat baja stainless steel 316 adalah jenis baja tahan karat yang dibuat untuk diaplikasikan sebagai alat kimia, peralatan medis dan alat pengolahan makanan. Plat SS316 memiliki kekuatan yang baik pada suhu yang sangat tinggi ataupun rendah dan tahan terhadap korosi. Berdasarkan ASTM A240, komposisi kimia dari plat SS316, yaitu terdiri dari *Carbon* (C) 0,08%, *Mangan* (Mn) 2%, *Silicon* (Si) 0,75%, *Phosphor* (P) 0,045%, *Sulfur* (S) 0,03%, *Chrom* (Cr) 16 sampai 18%, *Nickel* (Ni) 10 sampai 14% dan *Nitrogen* (N) 0,1%.

2.2.5. *Material Removal Rate* (MRR)

MRR adalah jumlah massa material benda kerja yang terkikis per satuan waktu. Secara teoritis MRR dapat dihitung berdasarkan prinsip Faraday tentang elektrolisis menggunakan persamaan di bawah ini :

$$m = \frac{I \cdot t}{F} = \frac{M \cdot I \cdot t}{2 \cdot F} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$MRR = \frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{2 \cdot F} \dots\dots\dots (2.5)$$

dengan,

- m : massa dalam gram (g)
 I : arus listrik, Ampere (A)
 t : waktu pemesinan, detik (dt)
 F : konstanta Faraday, (96500 As)

Persamaan tersebut merupakan penyederhanaan dari beberapa asumsi dimana perhitungan tidak terpengaruh dari beberapa variabel proses, misalnya perubahan valensi disolusi elektrokimia saat pemesinan, evolusi gas serta pembentukan gelembung, konduktivitas listrik, temperatur yang bervariasi pada aliran elektrolit, *over potential*, dan lain-lain (McGeough, 1974).

Namun secara aktual besarnya MRR dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini :

$$MRR = \frac{m_0 - m_t}{t} \dots \dots \dots (2.6)$$

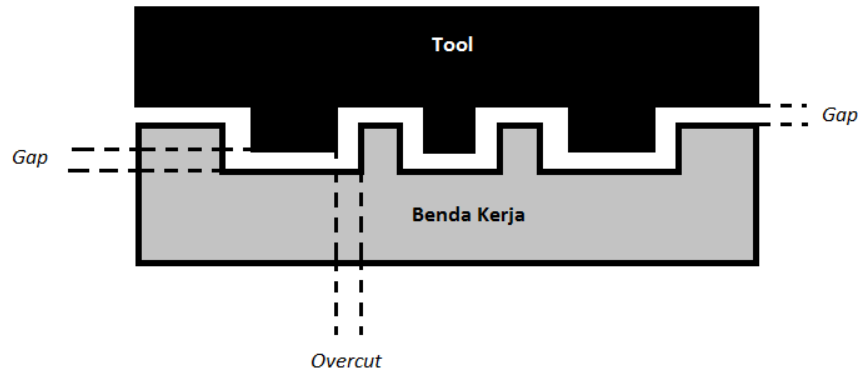
Dimana,

- MRR : Material Removal Rate (g/dt)
 m_0 : Massa benda kerja sebelum pemesinan (gram)
 m_t : Massa benda kerja setelah pemesinan (gram)
 t : Waktu pemesinan (detik)

2.2.6. *Overcut*

Menurut Suharjono, (2014) dalam jurnalnya *overcut* didefinisikan sebagai penyimpangan yang menunjukkan bahwa ukuran lubang hasil drilling lebih besar dari ukuran pahat yang digunakan. Pada dasarnya *overcut* pada ECM tidak dapat dihilangkan 100%, karena *overcut* tetap diperlukan untuk kelangsungan sirkulasi dari cairan elektrolit dan lagi *elektrode* sebagai pahat tidak boleh bersentuhan dengan benda kerja agar tidak terjadi hubung singkat (*short circuit*). Namun bila *overcut* yang dihasilkan terlalu besar maka hal tersebut akan berpengaruh terhadap menurunnya kualitas produk, terutama faktor yang berkaitan dengan

ketelitian ukuran maupun geometri produk .



Gambar 2.22 Ilustrasi *overcut*

Nilai *overcut* merupakan hasil dari luasan setelah pemesinan dikurangi dengan luasan bagian yang tidak tertutup stiker marking dimana dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$O_c = d_2 - d_0 \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan,

O_c : *overcut*, milimeter (mm)

d_2 : luasan hasil pemesinan ECM bagian depan *workpiece*, milimeter (mm)

d_0 : luasan bagian yang tidak tertutup stiker, milimeter (mm)

2.3. Desain Eksperimen

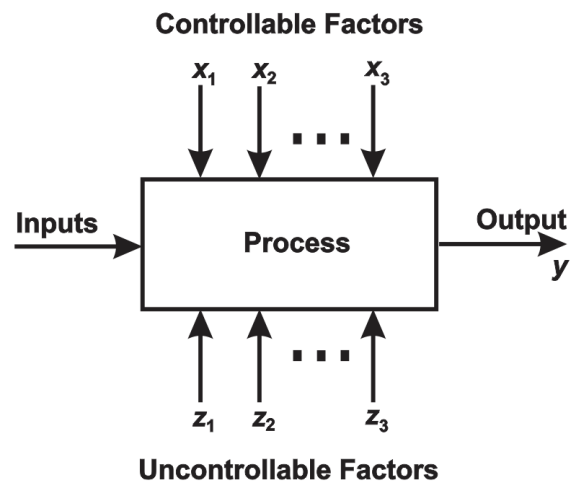
Eksperimen dilakukan pada semua disiplin keteknikan dan science, merupakan bagian penting dari cara kita belajar tentang bagaimana sistem dan proses bekerja. Validitas dari kesimpulan yang ditarik dari percobaan tergantung pada bagaimana eksperimen itu dilakukan. Oleh karena itu, design of experiment (DOE) memainkan peran penting dalam menemukan solusi akhir dari masalah, yang merupakan motivasi awal dari eksperimen (Montgomery & Runger, 2003).

Ross di dalam bukunya yang berjudul 'Taguchi Techniques for Quality Engineering', 1996, mendefinisikan DOE sebagai tindakan evaluasi secara simultan terhadap dua atau lebih faktor (parameter) dengan meninjau kemampuan faktor – faktor tersebut untuk memberikan dampak atau pengaruh yang mengacu pada karakteristik proses suatu objek penelitian. Montgomery (2003), menyebutkan bahwa DOE adalah alat yang sangat penting untuk engineers dan scientists, yang tertarik untuk memperbaiki performa dari proses manufaktur. DOE membantu untuk mengurangi jumlah eksperimen diperlukan untuk menentukan faktor-faktor yang dapat mempengaruhi hasil eksperimen.

Tujuan DOE adalah untuk menemukan variabel-variabel dan menganalisa besarnya pengaruh terhadap respon. Beberapa terminologi dalam DOE di antaranya:

- a. Faktor : variabel yang dikontrol untuk dilihat dampaknya terhadap respon.
- b. Level : nilai yang ditentukan untuk setiap faktor.
- c. Perlakuan : sekumpulan kondisi percobaan yang akan dikenakan pada unit percobaan
- d. Interaksi : dua faktor/lebih yang secara bersama-sama menghasilkan hasil yang berbeda
- e. Replikasi : pengulangan kembali perlakuan yang sama dalam suatu percobaan dengan kondisi yang sama untuk memperoleh ketelitian yang tinggi.

Suatu proses tentunya terdiri dari input dan akan menghasilkan sebuah output yang dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor terkontrol (X_1, X_2, \dots, X_p) maupun faktor tak terkontrol (Z_1, Z_2, \dots, Z_p). Proses yang bekerja dapat digambarkan seperti pada gambar 2.23.



Gambar 2.23. Model Umum Proses (Montgomery & Runger, 2003)

Taguchi memperkenalkan metode Taguchi sebagai salah satu cara mendesain eksperimen. Taguchi menggunakan orthogonal array dalam menentukan urutan run dan kombinasi parameterinya. Taguchi menjanjikan run eksperimen yang tidak sebanyak DOE. Untuk empat faktor dengan tiga level saja, Taguchi hanya membutuhkan sembilan kali run, dengan memilih orthogonal array L9 yang ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 *Orthogonal Array L9*

Run	X1	X2	X3	X4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Sidi & Wahyudi (2013) menyebutkan bahwa terdapat beberapa langkah yang diusulkan oleh Taguchi untuk melakukan eksperimen secara sistematis, yaitu :

- a. perumusan masalah,
- b. tujuan eksperimen,
- c. mengidentifikasi faktor bebas dan tidak bebas,
- d. menentukan level setiap faktor,
- e. identifikasi interaksi antar faktor kontrol,
- f. memilih orthogonal array,
- g. persiapan percobaan,
- h. melakukan eksperimen dan menganalisa hasil dengan ANOVA,
- i. analisa data,
- j. interpretasi hasil,
- k. konfirmasi.

2.4. Analisis statistik

Analisis statistik yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan *analysis of variance*(ANOVA) dan Rasio S/N untuk respon nilai MRR.

2.4.1. Analysis of Variance

ANOVA merupakan metode untuk menguji perbedaan antara rata-rata dengan menganalisis variance-nya. Dalam analisisnya, terdapat beberapa asumsi yang digunakan, yaitu :

1. Populasi memiliki variance yang sama. Asumsi ini disebut the assumption of homogeneity of variance.
2. Populasi terdistribusi normal.
3. Setiap nilai dari sampel independen terhadap nilai lainnya.

Beberapa hal yang dihitung dalam ANOVA adalah degree of freedom (df), sum of square (SS), dan mean square (MS) serta Fhitung. Ringkasan dari perhitungan ANOVA untuk tiga faktor dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 *Three Way ANOVA*

	Source	SS	Df	MS	F
1	A	SS_a	a-1	SS_A / df_a	MS_A / MS_{Error}
2	B	SS_b	b-1	SS_B / df_b	MS_B / MS_{Error}
3	C	SS_c	c-1	SS_C / df_c	MS_C / MS_{Error}
8	Error	SS_{Error}	N-abc	SS_{Error} / dfa_{Error}	
9	Total	SS_T	N-1		

2.4.2. Rasio S/N

Rasio S/N (signal to noise) digunakan untuk mengetahui level faktor mana yang berpengaruh pada hasil eksperimen Sidiq & Wahyudi (2013). Terdapat beberapa jenis perhitungan rasio S/N, namun terdapat dua jenis perhitungan yang sering digunakan. Smaller is better digunakan ketika semakin kecil keluaran dari penelitian akan semakin baik. Persamaannya ditunjukkan pada Persamaan 2.10.

$$SN = -10x \log \left(\frac{\sum y^2}{n} \right) \dots\dots\dots (2.10)$$

Sedangkan larger is better digunakan ketika semakin besar keluaran dari penelitian akan semakin baik. Persamaannya ditunjukkan pada persamaan 2.11.

$$SN = -10x \log \left(\frac{\sum \frac{1}{y^2}}{n} \right) \dots\dots\dots (2.11)$$