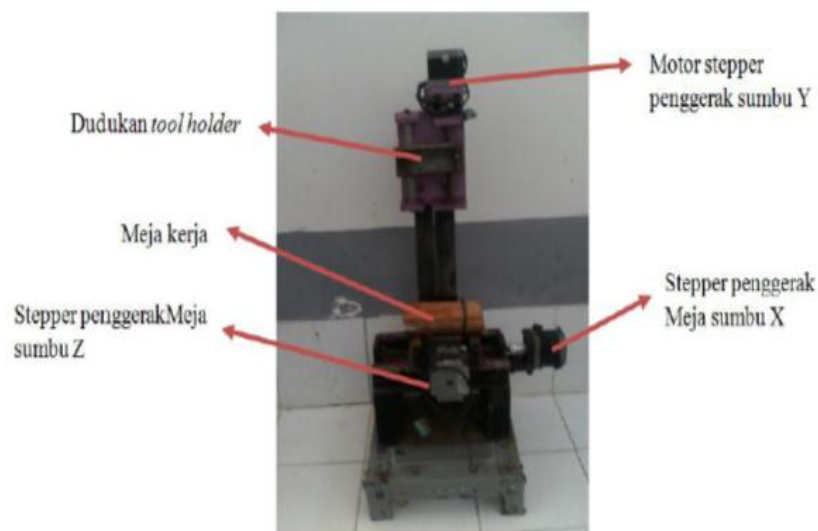


BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Kajian Pustaka

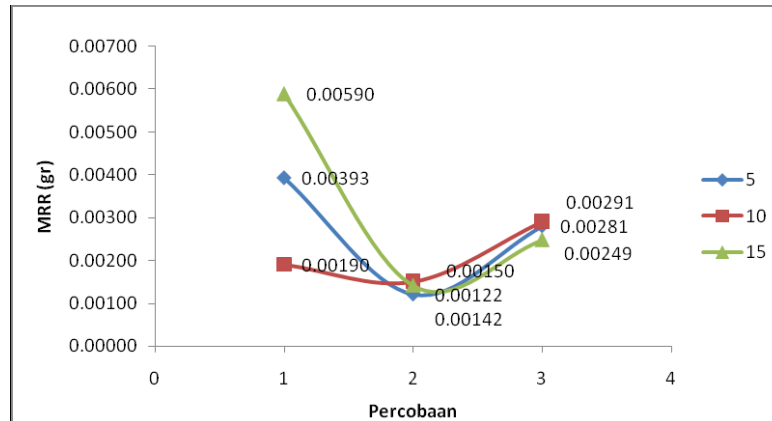
Mesin ECM telah dikembangkan oleh Feriyanta, (2015) dengan spesifikasi mesin yaitu : tegangan listrik 7 volt, *working gap* 3 mm, kecepatan aliran elektrolit 3,32 m/s serta menggunakan cairan elektrolit Natrium Chlorida (NaCl) dengan konsentrasi elektrolit 15% NaCl dan 85% aquades. Mesin ECM pada gambar 2.1 tersebut terbuat dari bahan jenis baja, *tool* elektroda tembaga yang mempunyai nilai konduktivitas listriknya yaitu $6,0 \times 10^7$ ($\text{ohm}^{-1}.\text{m}^1$) dan titik leburnya 1085°C .



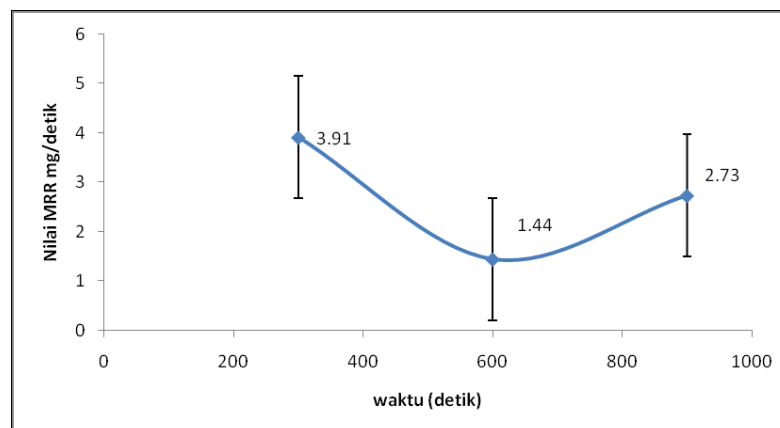
Gambar 2.1 Mesin ECM skala laboratorium (Feriyanta, 2015)

Mesin telah dibuat dapat berfungsi dengan baik sesuai rancangan, kemudian mesin dilakukan pengujian performasi mesin. Pengujian performasi mesin tersebut dengan melakukan pemesinan untuk membuat *gear spline*-dalam (*blind hole*) yang nantinya akan dihitung nilai pemakanan (*depth*) serta nilai *material removal rate* (MRR). Pada gambar 2.2 dan 2.3 dapat dilihat pengaruh waktu pemesinan terhadap nilai MRR benda kerja plat SLD. Lama waktu pemesinan berbanding terbalik terhadap nilai MRR SLD, semakin lama waktu pemesinan maka semakin kecil nilai MRR yang dihasilkan pada proses pemesinan

ECM. Nilai MRR tertinggi pada saat waktu 5 menit dengan nilai 3,91 mg/detik, sedangkan nilai MRR terendah pada waktu 10 menit dengan nilai 1,44 mg/detik.



Gambar 2.2 Grafik nilai MRR tiap percobaan (Feriyanta, 2015)



Gambar 2.3 Grafik nilai rata-rata MRR (Feriyanta, 2015)

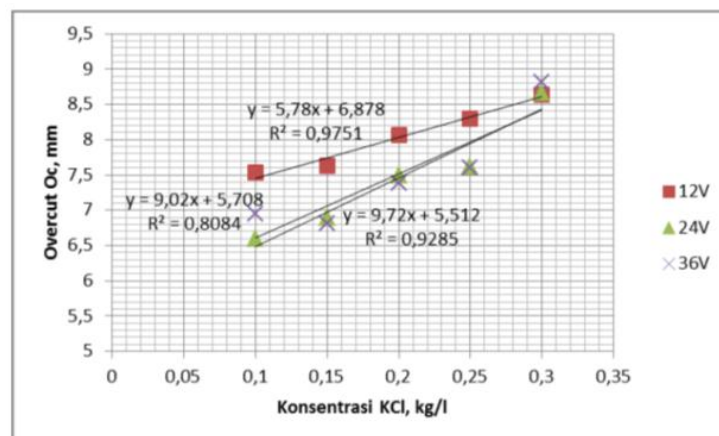
Suhardjono, (2014) melakukan eksperimen untuk menguji performansi kualitatif “*overcut*” (kelebihan ukuran) dan “*taper effect*” (efek tirus) dari lubang hasil drilling mesin ECM skala laboratorium akibat pengaruh konsentrasi elektrolit yang berupa larutan KCl dalam air. Larutan elektrolit yang digunakan adalah Kalium Klorida (KCl). Eksperimen ini menggunakan baja SKD 11 sebagai spesimennya. Dari penelitiannya Suhardjono, (2014) menyatakan pada gambar 2.4 menunjukkan hasil percobaan yang pertama dengan konsentrasi KCl 0.1 kg/l, $d_{\min}=10.84$ mm, $d_{\max}=16.52$ mm, 24V, 9.2 A. Pada percobaan kedua dengan konsentrasi KCl 0.3 kg/l, $d_{\min}=10.38$ mm, $d_{\max}=18.59$ mm, 24V, 15.5A. Pada

percobaan ketiga dengan konsentrasi KCl 0.3 kg/l, $d_{\min}=10.37$ mm, $d_{\max}=18.73$ mm, 36V, 26.9A.



Gambar 2.4 Prinsip contoh hasil *drilling* ECM *hardened tool steel* SKD 11 dimensi 100 x 40 x 4.5 mm (Suhardjono, 2014)

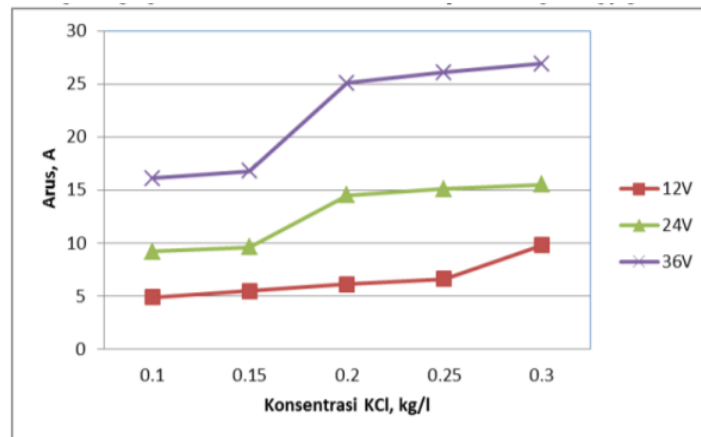
Setelah proses *drilling* dilakukan, maka lubang yang dihasilkan diukur diameter terbesar dan yang terkecil yang selanjutnya digunakan untuk menghitung *overcut* dan ketirusannya. Data yang diperoleh selanjutnya diolah dalam bentuk grafik seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5, gambar 2.6, dan gambar 2.7.



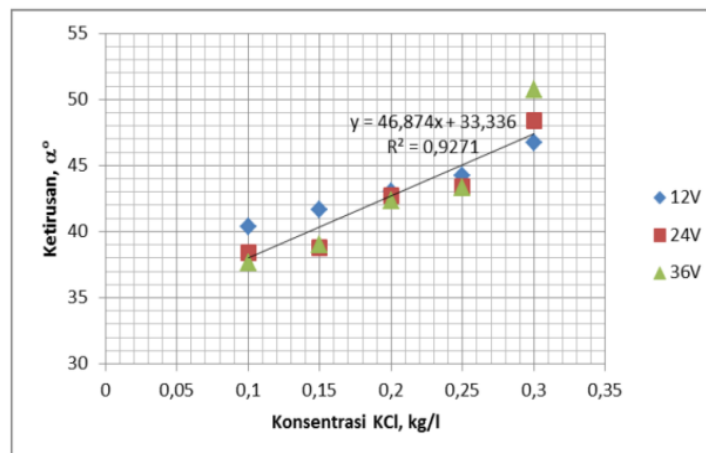
Gambar 2.5 Grafik fungsi konsentrasi KCl versus *overcut* untuk tegangan 12V, 24V dan 36V. (Persamaan garis y sebagai *overcut* dan x konsentrasi KCl) (Suhardjono, 2014)

Suhardjono, (2014) menyatakan dari gambar 2.5 terlihat bahwa semakin besar konsentrasi KCl semakin besar juga *overcut* nya. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya konduktivitas listrik dengan semakin besar konsentrasinya. Dengan kenaikan konduktivitas, maka semakin besar arus listrik yang mengalir seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6. *Overcut* untuk tegangan 12 V lebih

besar dibandingkan dengan tegangan 24 dan 36 V, sebab pada tegangan 12 V dibutuhkan waktu lebih lama dibandingkan tegangan 24 dan 36 V. Oleh karena itu erosi pada dinding lubang juga semakin besar.



Gambar 2.6 Hasil pengukuran arus listrik dengan jarak *gap* dijaga konstan 0,5 mm (Suhardjono, 2014)



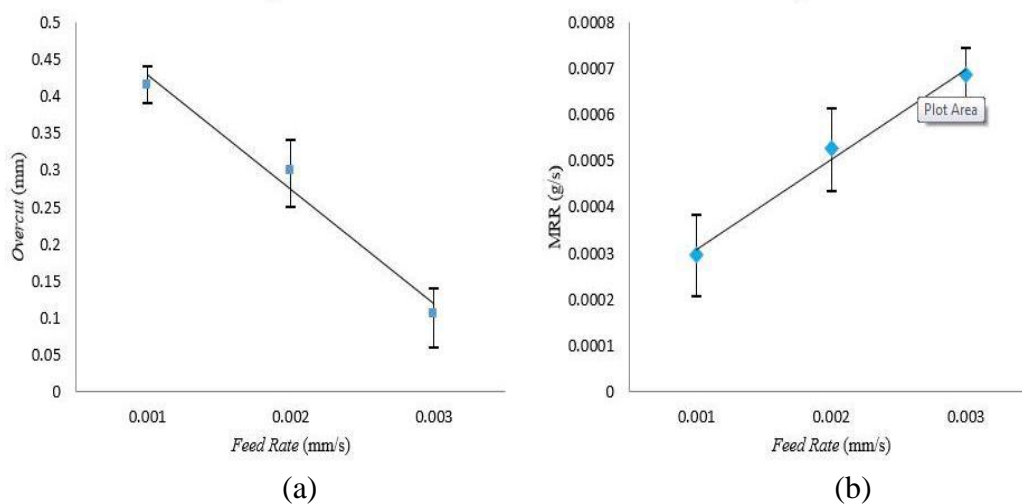
Gambar 2.7 Grafik fungsi Konsentrasi KCl versus Ketirusan untuk tegangan 12, 24 dan 36 V. (Persamaan garis y sebagai ketirusan dan x konsentrasi KCl) (Suhardjono, 2014)

Grafik ketirusan sebagai fungsi konsentrasi KCl diperlihatkan pada gambar 2.7. Pada grafik tersebut terlihat terjadi kenaikan ketirusan yang linear terhadap kenaikan konsentrasi KCl. Hal ini disebabkan oleh kenaikan arus listrik yang mengalir dengan semakin besarnya konsentrasi seperti grafik gambar 2.6. Pada gambar 2.7 juga terlihat bahwa ketirusan hampir tidak dipengaruhi oleh tegangan (Suhardjono, 2014).

Budiman, (2012) juga melakukan penelitian lain dengan melakukan variasi nilai konsentrasi larutan pengaruhnya terhadap *overcut*, nilai *Material Removal Rate* (MRR) dan efek ketirusan pada pemesinan ECM. Pada penelitian ini benda kerja yang digunakan adalah SKD 11 yang biasa digunakan untuk pembuatan *punch, dies, cutting tool*, dan proses lainnya yang membutuhkan sifat tahan aus yang tinggi dengan panjang 100 mm, lebar 36,80 mm dan tebal 4,2 mm. Material pahat yang digunakan dalam percobaan ini adalah tembaga (Cu) berbentuk silinder berlubang dengan diameter dalam 9 mm dan diameter luar 10 mm. Pemilihan tembaga sebagai material dari pahat karena tembaga mempunyai sifat penghantaran listrik yang baik dan material tersebut mudah didapatkan. Hasil penelitian menyatakan bahwa semakin besar nilai konsentrasi larutan maka MRR yang terjadi akan semakin besar. Hal ini mengacu pada reaksi kimia antara NaCl dan H₂O. Dimana dengan semakin pekatnya konsentrasi larutan yang terbentuk dari reaksi antara NaCl dan H₂O maka kadar asam (HCl) yang terbentuk juga akan meningkat. Asam (HCl) sendiri mempunyai sifat korosif terhadap material yang terbuat dari logam. Semakin tinggi kadar asam maka sifat korosif yang ditimbulkan juga akan meningkat. Hal inilah yang mempengaruhi laju pengerjaan material yang terjadi, dimana unsur Fe yang merupakan salah satu unsur pembentuk material benda kerja yang dalam hal ini terbuat dari baja SKD 11 akan semakin mudah terlepas dari logam induknya karena tingkat intensitas HCl yang semakin tinggi. Sehingga bila semakin tinggi nilai konsentrasi elektrolit yang digunakan maka MRR akan semakin meningkat.

Selain itu Budiman, (2012) juga menyatakan semakin besar nilai konsentrasi maka waktu pemesinan akan semakin turun. Hal ini berarti bahwa waktu yang dibutuhkan untuk proses pemesinan akan lebih cepat untuk nilai konsentrasi yang lebih tinggi. 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.

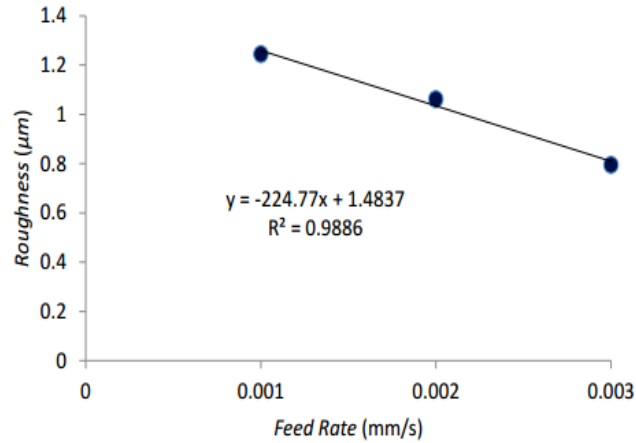
Penelitian lainnya dilakukan oleh Permana, (2012) yang mempelajari tentang pengaruh besarnya *feed rate* terhadap MRR, *overcut*, dan *surface roughness* yang terjadi setelah pemesinan berlangsung. Penelitian ini menggunakan *tool* elektroda aluminium, benda kerja *stainless steel* J-430, *working gap* 0,5 mm, cairan elektrolit menggunakan NaCl. Permana, (2012) menjelaskan bahwa besarnya MRR yang terjadi pada benda kerja berbanding lurus dengan besarnya *feed rate* yang digunakan saat pemesinan berlangsung. Hal ini disebabkan oleh jarak gap antara *tool* elektroda dan benda kerja menjadi semakin kecil, sehingga efisiensi arus pemesinan akan bertambah tinggi. Sebaliknya, *overcut* yang terjadi pada benda kerja berbanding terbalik dengan besarnya *feed rate* pemesinan karena semakin tinggi *feed rate* yang digunakan maka semakin cepat waktu pemesinan, *overcut* yang terbentuk akan semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh semakin cepat waktu pemesinan untuk mencapai kedalaman tertentu, maka semakin sedikit material yang terlepas sehingga *overcut* yang dihasilkan semakin kecil. Hasil MRR dan *overcut* yang terbentuk dari penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Grafik rata-rata (a) *overcut* dan (b) MRR *stainless steel* J-430 (Permana, 2012)

Hasil *surface roughness* pada penelitian yang dilakukan oleh Permana, (2012) menunjukkan bahwa *feed rate* berbanding terbalik terhadap *surface roughness stainless steel*, dimana semakin tinggi laju pemakanan maka semakin

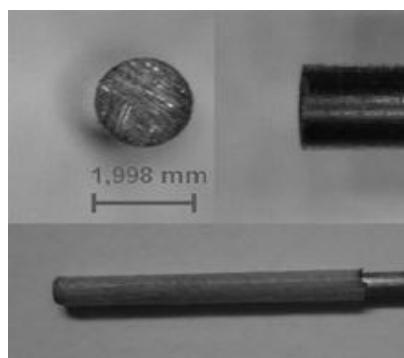
kecil *surface roughness* yang dihasilkan pada proses pemesian ECM, begitu pula sebaliknya. Hasil *surface roughness* yang terbentuk ditunjukkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Grafik rata-rata *surface roughness stainless steel j-430* (Permana, 2012)

Lapisan garam (*salt layer*) pada proses pemesian ECM dapat mengganggu distribusi arus pemesian sehingga kekasaran permukaan menjadi tinggi. Proses ECM *portable* pada penelitian ini menggunakan elektrolit NaCl. Oleh karena itu, garam perlu dihilangkan dengan memecahnya menjadi ion Na^+ dan Cl^- . Semakin tinggi efisiensi arus pemesian yang dihasilkan maka garam yang hilang menjadi ion akan semakin banyak dan distribusi arus pada elektrolit menjadi semakin merata.

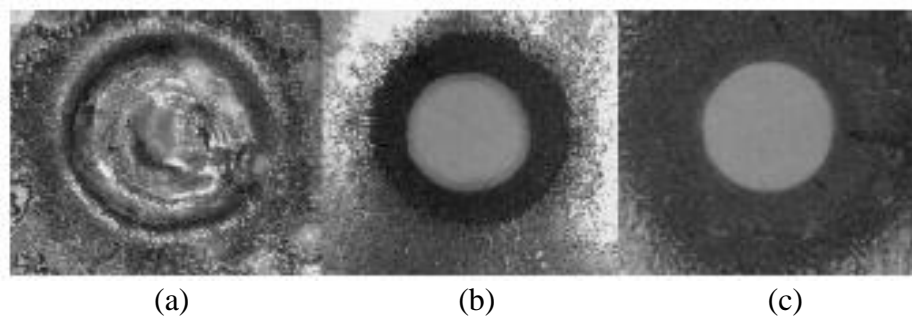
Studi eksperimental lain dilakukan oleh Sudiarso dkk, (2013) dengan benda kerja plat kuningan, *stainless steel 204*, dan aluminium 1100, dimana semua benda kerja mempunyai ketebalan 1 mm. Sedangkan elektroda berdiameter 2 mm dengan bahan kuningan, seperti ditunjukkan pada gambar 2.10.



Gambar 2.10 Elektroda kuningan (Sudiarso dkk, 2013)

Tegangan dijaga konstan pada 15 volt selama percobaan, *flow rate* pada elektrolit sebesar 6 m/s, gap 0.5 mm diantara elektroda dan benda kerja. Pemesinan membutuhkan waktu 5.5 menit untuk setiap bahan.

Hasil lubang yang telah dilakukan proses pemesinan ditunjukkan pada gambar 2.11. Diantara ketiga bahan ini, hanya material kuningan yang belum menghasilkan lubang, hal ini disebabkan kuningan membutuhkan lebih banyak waktu untuk membuat lubang karena *overcut* rata-rata jauh lebih besar dari *stainless steel* dan aluminium. Perlu sekitar 11 menit untuk menghasilkan lubang dari ketebalan 1 mm pada kuningan. Elektroda dan benda kerja terbuat dari bahan yang sama, maka sering terjadi percikan api, bunga api mempengaruhi hasil mesin. Seperti yang ditunjukkan gambar 2.11.



Gambar 2.11 Hasil lubang pemesinan menggunakan ECM dengan benda kerja (a) kuningan (b) *stainless steel* (c) aluminium (Sudiarso dkk, 2013)

Material *stainless steel* persentase *overcut* dengan diameter elektroda memiliki perbedaan yang signifikan jika menggunakan elektroda diameter 2 mm dan 6 mm. *Stainless steel* cenderung mempertahankan *overcut*, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1.

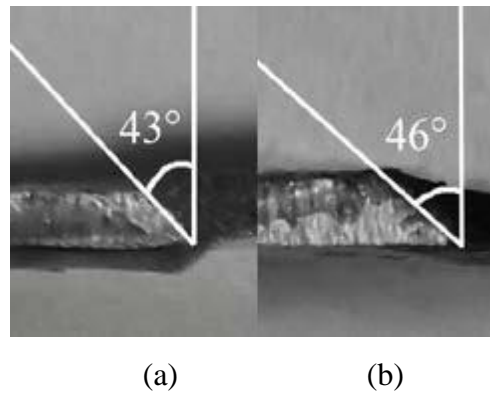
Tabel 2.1 Perbandingan *overcut* rata-rata dan sudut *overcut* rata-rata (Sudiarso dkk, 2013)

| NO | Diameter (mm) | Jenis Material | <i>Overcut</i> rata-rata (mm) | Sudut <i>Overcut</i> rata-rata (°) |
|----|---------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 2 | <i>Stainless steel</i> 204 | 0.30 | 43 |
| | | Aluminium 1100 | 0.33 | 42 |
| 2 | 6 | <i>Stainless steel</i> 204 | 0.40 | 46 |
| | | Aluminium 1100 | 0.86 | 43 |

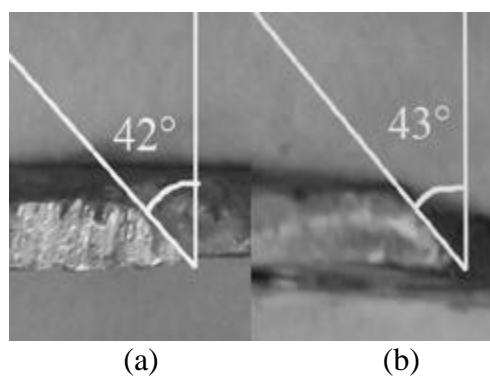
Tabel 2.2 Perbandingan *overcut* rata-rata dan sudut *overcut* rata-rata (Sudiarso dkk, 2013)

| NO | Diameter (mm) | Jenis Material | <i>Overcut</i> rata-rata (mm) | Persentase (%) |
|----|---------------|----------------------------|-------------------------------|----------------|
| 1 | 2 | <i>Stainless steel</i> 204 | 0.30 | 15.12 |
| | | Aluminium 1100 | 0.33 | 16.50 |
| 2 | 6 | <i>Stainless steel</i> 204 | 0.40 | 6.67 |
| | | Aluminium 1100 | 0.86 | 14.36 |

Pada gambar 2.12 material aluminium menggunakan elektroda 2 mm sudut sebelah kiri sebesar 42° , sedangkan sudut di sebelah kanan menggunakan elektroda 6 mm sebesar 43° .



Gambar 2.12 Sudut *overcut* material *stainless steel* (a) diameter 2 mm dan (b) diameter 6 mm menggunakan elektroda kuningan (Sudiarso dkk, 2013)



Gambar 2.13 Sudut *overcut* material aluminium (a) diameter 2 mm dan (b) diameter 6 mm menggunakan elektroda kuningan (Sudiarso dkk, 2013)

Dari hasil kajian pustaka tersebut maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

Hubungan antara variasi waktu dan nilai MRR berbanding terbalik. Pada pemesinan ECM nilai MRR tertinggi diperoleh pada waktu pemesinan 5 menit dengan nilai 3,91 mg/detik, sedangkan nilai MRR terendah diperoleh pada waktu 10 menit dengan nilai 1,44 mg/detik. Semakin lama pemesinan, maka akan semakin kecil nilai MRR pada benda kerja. Dari data yang disajikan bahwa setiap detiknya bisa memakan kedalaman 840 μm /detik semakin lama waktu yang digunakan dalam pemesinan berarti semakin dalam lubang benda kerja (Feriyanta, 2015).

Semakin besar nilai konsentrasi maka nilai MRR akan semakin besar. Semakin besar nilai konsentrasi maka waktu pemesinan akan semakin turun atau semakin singkat (Budiman, 2012). Besarnya MRR yang terjadi pada benda kerja berbanding lurus dengan besarnya *feed rate*. Sebaliknya, *overcut* yang terjadi pada benda kerja berbanding terbalik dengan besarnya *feed rate*. *Surface roughness* yang dihasilkan pada pemesinan juga berbanding terbalik dengan laju pemakanan / *feed rate* (Permana, 2012). Semakin besar konsentrasi KCl semakin besar juga *overcut*-nya. Hal ini disebabkan oleh semakin besarnya konduktivitas listrik dengan semakin besar konsentrasinya. Dengan kenaikan konduktivitas, maka semakin besar arus listrik yang mengalir (Suhardjono, 2014).

Material aluminium dan *stainless steel* memiliki kesamaan nilai *overcut* rata-rata, sementara pada material kuningan memiliki perbedaan *overcut* rata-rata yang signifikan hingga 5 kali lebih tinggi dibandingkan 2 material tersebut. Pada material kuningan perlu waktu yang lebih lama untuk menghasilkan lubang dibandingkan material aluminium dan *stainless steel*. *Tool* dan benda kerja berbahan sama sering menciptakan percikan api sehingga bunga api mempengaruhi hasil pemesinan. Namun sebaliknya dengan *tool* dan benda kerja yang berbahan berbeda, waktu pemesinan yang dibutuhkan lebih cepat. Semakin besar diameter elektroda, semakin besar pula *overcut* yang dihasilkan. Hal ini disebabkan luas permukaan elektroda semakin besar seiring besarnya diameter tersebut. Semakin besar diameter elektroda, membutuhkan arus yang lebih tinggi selama proses pemesinan (Sudiarso dkk, 2013).

Perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya adalah perbedaan material benda kerja yang digunakan, untuk mengetahui hasil pemesinan ECM pada material tersebut. Material yang digunakan adalah kuningan sebagai elektroda, sedangkan *stainless steel*, dan aluminium sebagai benda kerja. Penyusun meneliti hasil pemesinan ECM *portable* menggunakan *tool* elektroda terisolasi statis dengan variabel variasi tegangan dan jarak celah (*gap*) yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi tegangan dan *gap* terhadap MRR, *overcut*, dan efek tirus pada material *stainless steel* 304 dan aluminium 1100 hasil *drilling* proses ECM.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 *Electro Chemical Machining* (ECM)

Electro chemical Machining (ECM) merupakan salah satu proses pemesinan non konvensional yang prinsip kerjanya berdasarkan hukum Faraday. ECM adalah proses pemesinan yang bergantung pada penghapusan atom dari permukaan benda kerja (McGeough, 1988). ECM didasarkan pada proses *anodic dissolution* dalam elektrolisis (Tlustý, 2000). Elektrolisis adalah suatu proses kimia yang mana terjadi ketika ada arus listrik yang melewati dua elektroda 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 elektroda (*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 elektroda. ECM biasa digunakan untuk proses pemesinan material yang mempunyai tingkat kekerasan sangat tinggi serta sulit dikerjakan dengan metode konvensional.

Pemesinan menggunakan 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 elektroda dan benda kerja tidak bersentuhan,
5. Mampu membuat bentuk yang kompleks 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. Elektroda atau pahat lebih awet karena tidak ada keausan pemakaian,
9. *Surface finish* yang baik,
10. Dibandingkan dengan mesin konvensional, ECM memiliki *time saving* yang lebih baik,
11. Proses pemesinan tidak bising (*smooth*).

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 elektroda 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 elektroda melalui cairan elektrolit maka akan terjadi elektrolisis. Sistem elektrolit dan cairan elektrolit dinamakan sel elektrolisis. Reaksi kimia yang terjadi pada elektroda 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.

$$m \sim It \dots\dots\dots (2.1)$$

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)

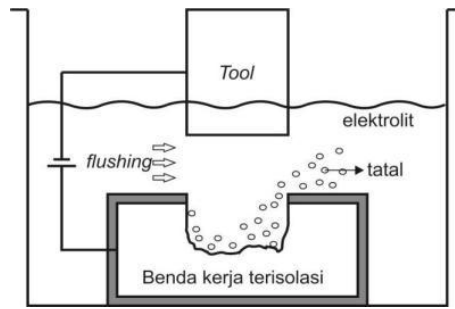
T : waktu permesinan, detik (s)

E : berat kimia ekuivalen

M : berat atom (g)

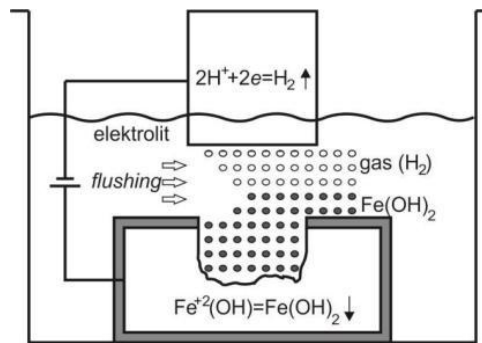
Z : valensi benda kerja

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 (anoda) dan elektroda (katoda), seperti ditunjukkan pada Gambar 2.14. Benda kerja yang bertindak sebagai anoda dihubungkan dengan sumber arus searah bermuatan positif (DC +), sedangkan elektroda (*tool*) katoda dihubungkan dengan sumber arus searah bermuatan negatif (DC -) dan cairan elektrolit dialirkan di antara elektroda dan benda kerja.



Gambar 2.14 Prinsip ECM (McGeough, 1988)

McGeough, (1988) menyatakan bahwa ketika beda potensial diterapkan pada elektroda maka akan terjadi beberapa kemungkinan reaksi yang terjadi pada anode dan katode seperti diilustrasikan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Reaksi proses pemesinan ECM pada besi (McGeough, 1988)

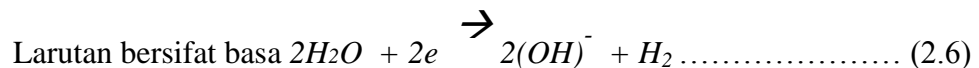
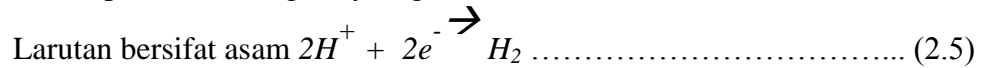
2.2.3 Reaksi kimia pada proses *Electro Chemical Machining* (ECM)

1. Pada Katode (elektroda):

a. Proses pelapisan pada ion-ion logam



b. Proses pembentukan gas hydrogen

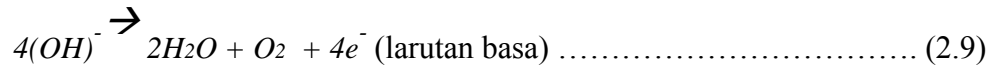
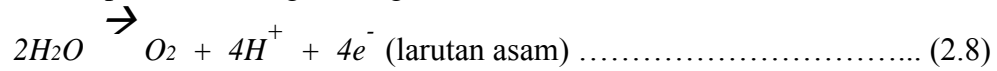


2. Pada Anode (benda kerja)

a. Proses pelarutan dari ion metal di dalam cairan elektrolit

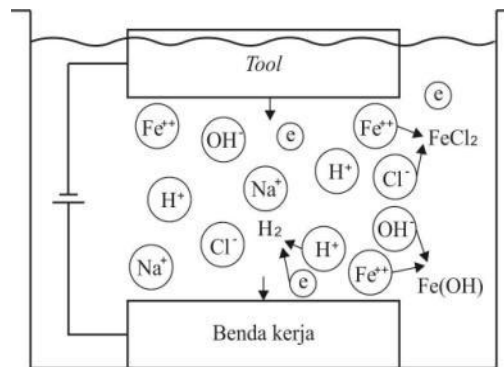


b. Proses pembentukan gas oksigen



c. Difusi, pergerakan ion akibat adanya medan listrik, seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.16.

d. Proses konveksi karena aliran elektrolit.



Gambar 2.16 Skema representatif reaksi pada ECM (Tlusty, 2000)

2.2.4 Proses Ideal Pada ECM

Pada proses pemesinan ECM terdapat kondisi ideal yang ditentukan sebagai berikut:

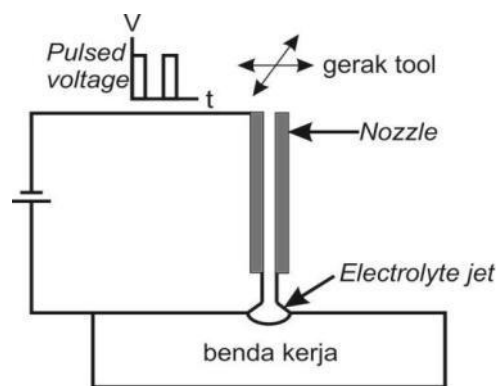
1. Hukum faraday mencakup seluruh proses pada *gap* antar elektroda dan permukaan benda kerja;
2. Pergerakan ion dan transfer elektron yang mengakibatkan disolusi pada permukaan benda kerja;
3. Konduktivitas elektrik dan termal pada tengah-tengah *gap* bernilai konstan terhadap waktu dan tempat;
4. Beda potensial, hambatan, efisiensi arus memiliki nilai yang tetap pada setiap titik permukaan benda kerja;
5. Adanya *flushing* yang berfungsi untuk pendingin, medium elektrolisis, dan penghapusan tatal.

2.2.5 Jenis *Electro Chemical Machining (ECM)*

Electro chemical machining (ECM) terbagi menjadi beberapa jenis berdasarkan kebutuhan pemesinan yang diperlukan, antara lain:

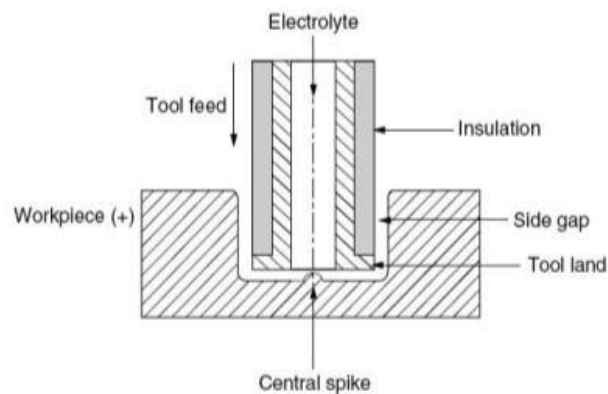
1. *Micro-ECM*

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



Gambar 2.17 *Electrolyte Jet* (El-Hofy, 2005)

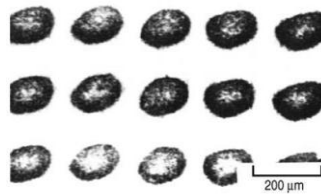
Pada *micro-ECM*, *tool* mikro yang digunakan adalah *electrolyte jet* seperti pada gambar 2.17 dimana benda kerja yang bergerak terhadap *tool*-nya. Jenis arus yang digunakan pada *micro-ECM* adalah *pulse current* (arus kotak) yang dapat menghasilkan indentasi (cekungan) yang kecil saat pemesinan. Indentasi pada pemesinan mikro dapat dilihat pada gambar 2.18.



Gambar 2.18 Indentasi (cekungan) pada pemesinan mikro (Masuzawa dan Tonshof, 1997)

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 2.19, *tool* elektroda yang digunakan pada ECDR adalah elektroda jenis *tubular* (pipa). Cairan elektrolit kemudian dipompakan melalui tengah *tool* dan keluar melalui celah (*gap*) antara *tool* dan benda kerja.

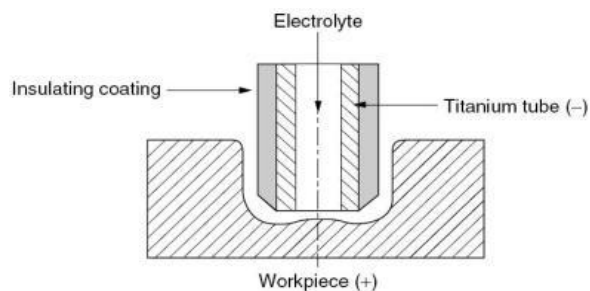


Gambar 2.19 Konfigurasi ECDR (El-Hofy, 2005)

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.

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 elektroda dengan perantara elektrolit menyebabkan terjadinya penghapusan material pada permukaan benda kerja.

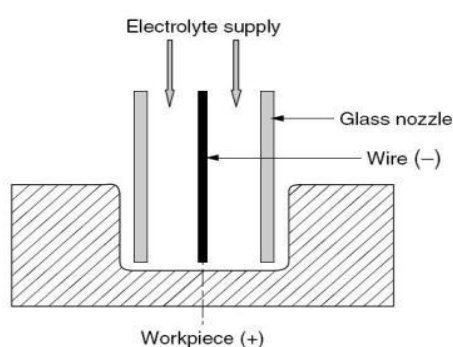


Gambar 2.20 Skema STEM (El-Hofy, 2005)

Sistem konfigurasi permesinan pada STEM adalah sama dengan ECM, seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.20 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 permesinan 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 permesinan 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*.

4. *Electrostream (Capillary) Drilling*

Electrostream (Capillary) Drilling merupakan pengembangan danteknik 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 *glassnozzle* (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 2.21.

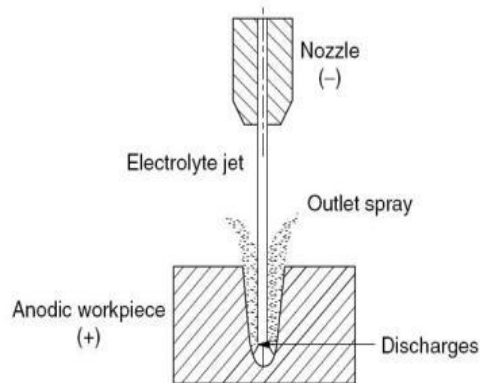


Gambar 2.21 Skema *electrostream (capillary) drilling* (El-Hofy, 2005)

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 2.22 dimana *nozzle* berperan sebagai katodenya.

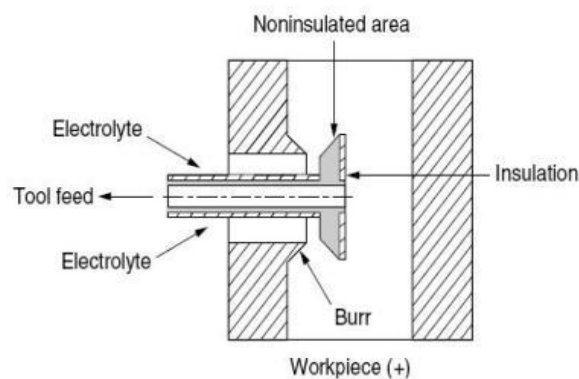


Gambar 2.22 *Electro chemical jet drilling* (El-Hofy, 2005)

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*.

6. *Electro Chemical Deburring* (ECDB)

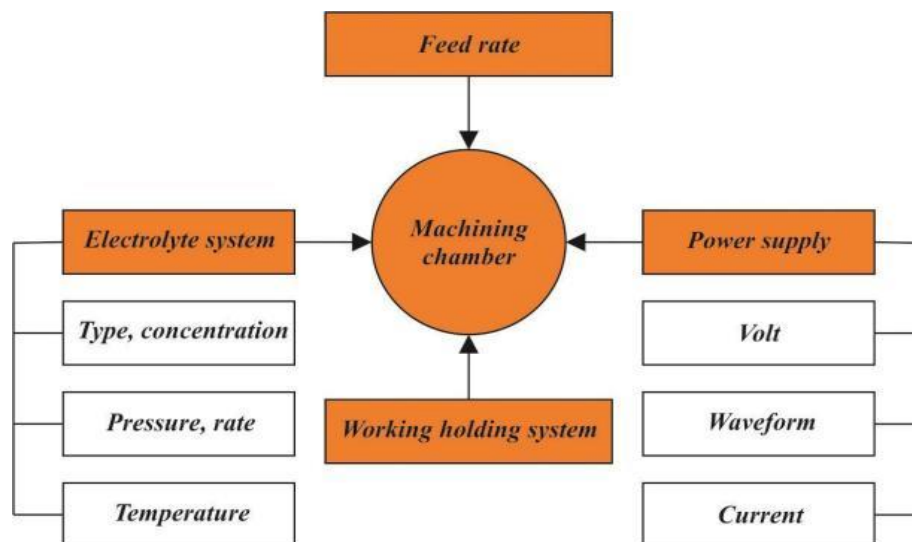
Electro Chemical Deburring (ECDB) digunakan untuk menghilangkan *burr* hasil dari proses pengeboran. *Burr* merupakan sisa material yang tidak diinginkan pada bagian komponen mesin sebagai hasil dari proses manufaktur dan perlu untuk dihilangkan. Mekanisme *deburring* pada ECDB ditunjukkan pada Gambar 2.23.



Gambar 2.23 Mekanisme ECDB (El-Hofy, 2005)

2.2.6 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 2.24 berikut.



Gambar 2.24 Komponen sistem pada ECM

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:

- a. Tegangan 2-80 Volt (kontinu atau *pulse*),
- b. Kisaran arus antara 5-50 *ampere*,
- c. Penyesuaian tegangan pada *gap* berlangsung secara kontinu,
- d. Pengendali arus dalam keadaan darurat (*emergency*),
- e. Proteksi arus pendek (*short circuit*) dalam 0,001 s.

2. Elektrolit

Fungsi utama elektrolit pada proses pemesinan ECM adalah:

- a. Menciptakan kondisi *anodic dissolution* pada material benda kerja,
- b. Mengonduksikan arus pemesinan,
- c. Menghilangkan *debris* hasil reaksi dari proses ECM,

- d. Memindahkan panas (*dissipation*) yang dihasilkan oleh proses pemesinan,
- e. 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 2.3 Elektrolit dan laju pemesinan berbagai benda kerja
(*Metals Handbook*, 1989)

| <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 |

3. *Tool* elektroda

Material yang digunakan sebagai *tool* 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* elektroda 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 elektroda pada pemesinan ECM. Adapun material *tool* elektroda yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuningan.

Kuningan adalah paduan logam tembaga (cu) 70% dan seng (zn) 30%. Material ini mempunyai konduktivitas listrik sebesar $1,6 \times 10^7$. Kuningan memiliki titik lebur pada 1130 °C. Paduan tembaga-seng atau kuningan dapat digunakan untuk alat penukar panas, suku cadang yang tahan korosi dan kuat serta memiliki keuletan.

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 pemesinan. Kereaktifan unsur benda kerja juga menjadi salah satu faktor yang dapat mempengaruhi hasil pemesinan pada benda kerja. Selain itu, benda kerja yang diproses dengan pemesinan ECM adalah benda kerja yang bersifat mampu mendapat perlakuan panas. Adapun material benda kerja yang digunakan dalam penelitian ini adalah *stainless steel* 304 dan aluminium 1100.

Stainless steel adalah jenis baja tahan karat yang dibuat untuk di aplikasikan sebagai mesin di industri makanan dan minuman, peralatan dapur, industri perminyakan. *Stainless steel* merupakan baja perkakas yang banyak dipergunakan dalam industri karena memiliki sifat tahan karat yang tinggi akibat kandungan krom yang tinggi 18-20%. Komposisi kimia dari *stainless steel* 304 yaitu, karbon 0,07%, Silicon 1%, Mangan 2%, Fosfor 0,045%, Sulfur 0,030%, Nikel 8-10%, Nitrogen 0,11%, Krom 18-20% (*European Stainless Steel Development Association*).

Aluminium merupakan logam yang reaktif sehingga mudah teroksidasi dengan oksigen membentuk lapisan aluminium oksida, alumina (Al_2O_3) dan membuatnya tahan korosi yang baik. Namun bila kadar Fe, Cu dan Ni ditambahkan akan menurunkan sifat tahan korosi karena kadar aluminya menurun. Aluminium bersifat ulet, mudah dimesin dan dibentuk dengan kekuatan tarik untuk aluminium murni sekitar $4\sim 5 \text{ kgf/mm}^2$. Bila diproses penguatan regangan seperti dirol dingin kekuatan bisa mencapai $\pm 15 \text{ kgf/mm}^2$. Komposisi kimia dari aluminium 1100 yaitu, Silikon 1,0%, Besi 1,0%, Tembaga 0,13%, Mangan 0,05%, Seng 0,1% (Yudy, 2013).

2.2.7 *Material Removal Rate (MRR)*

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

$$m = \frac{I \cdot t}{F} = \frac{M \cdot I \cdot t}{2 \cdot F} \dots\dots\dots (2.10)$$

$$MRR = \frac{m}{t} = \frac{M \cdot I}{2 \cdot F} \dots\dots\dots (2.11)$$

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, 1988).

Namun secara aktual besarnya MRR dihitung dengan menggunakan persamaan berikut ini (Neto, 2006):

$$MRR = \frac{m_o - m_t}{\rho \cdot t} \dots\dots\dots (2.12)$$

dimana,

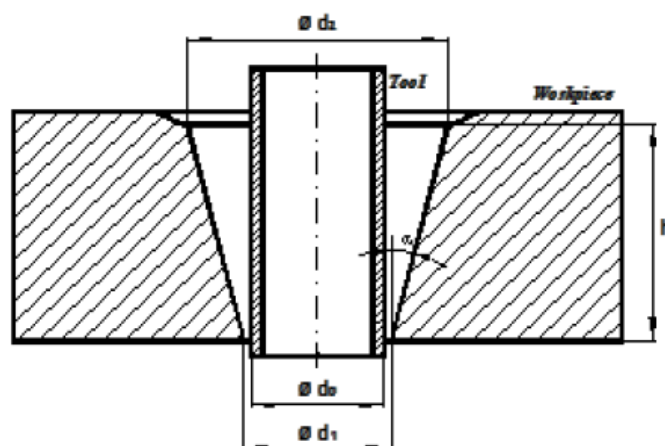
- MRR : *Material Removal Rate* (mm³/dt)
- m_o : Massa benda kerja sebelum pemesinan (gram)
- m_t : Massa benda kerja setelah pemesinan (gram)
- t : Waktu pemesinan (detik)
- ρ : Massa jenis benda kerja (g/cm³)

2.2.8 *Overcut dan efek tirus*

Sebelum melakukan perhitungan *overcut* dan ketirusan, hasil foto makro material dibantu oleh *software ImageJ* untuk diolah terlebih dahulu, mencari

luas daerah serta sudut hasil lubang pemesinan. *ImageJ* adalah domain publik program pengolah gambar *Java*. *ImageJ* dapat menampilkan, mengedit, menganalisa, memproses, menyimpan dan mencetak gambar 8-bit, 16-bit, 32-bit, RGB. *ImageJ* dapat membaca banyak format gambar termasuk TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS. *ImageJ* juga dapat mengukur jarak dan sudut, serta dapat membuat histogram kepadatan dan *plot profil line*. *Software* ini didukung standar fungsi pengolah gambar seperti manipulasi kontras, *sharpening*, *smoothing*, deteksi tepi dan median *filtering*.

Menurut Suhardjono (2014), *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 elektroda 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. Sedangkan ketirusan didefinisikan sebagai sudut yang terbentuk sebagai penyimpangan atau deviasi antara lubang terbesar dan yang terkecil. Untuk lebih jelasnya *overcut* dan efek tirus diperlihatkan sesuai skema gambar 2.25.



Gambar 2.25 *Overcut* dan efek tirus pada lubang hasil *drilling* ECM (Suhardjono, 2014)

Jadi *overcut* O_c dirumuskan sebagai berikut:

$$O_c = d_2 - d_0 \dots\dots\dots (2.13)$$

Sedangkan ketirusan α dihitung berdasarkan rumus:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cdot h} \right) \dots\dots\dots (2.14)$$

dengan,

d_2 : diameter benda kerja sisi belakang, (mm)

d_0 : diameter *tool*, (mm)

d_1 : diameter benda kerja sisi depan, (mm)

h : ketebalan benda kerja, (mm)

α : sudut benda kerja, ($^\circ$)

Rumus menghitung luas area menjadi diameter sebagai berikut:

$$d = \sqrt{\frac{D}{\pi/4}} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana,

D : luas area, (mm²)

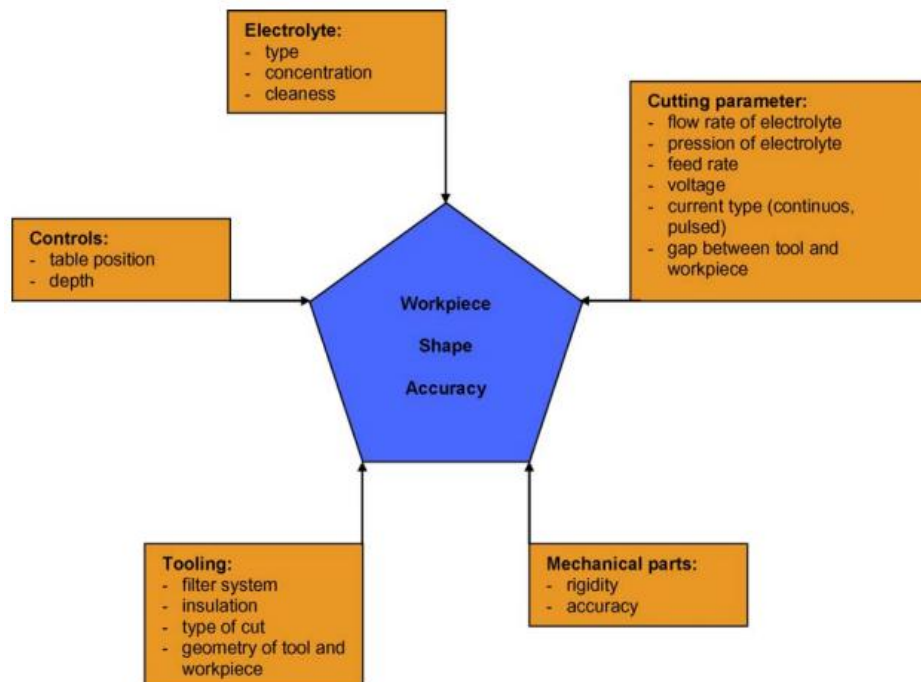
d : diameter, (mm)

2.2.9 Akurasi ECM

Akurasi pada proses pemesinan ECM tergantung pada densitas arus yang dipengaruhi oleh:

1. Parameter pengujian seperti *flow rate* elektrolit, *feed rate*, *voltage*, *gap*
2. Komponen mekanik seperti kekakuan, akurasi
3. Alat kerja seperti *filter system*, isolasi, geometri alat dan benda kerja
4. Kontrol seperti posisi meja mesin, *depth*
5. Properti elektrolit seperti konsentrasi, jenis, *cleanness*

Faktor yang mempengaruhi akurasi pada pemesinan ECM ditunjukkan pada gambar 2.26 berikut:



Gambar 2.26 Faktor yang mempengaruhi akurasi pemesinan pada ECM (Neto J. dkk. 2006)

Keakuratan proses pemesinan ECM diukur melalui *overcut* yang dihasilkan selama proses pemesinan berlangsung. *Overcut* yang dihasilkan diukur dengan cara membandingkan besarnya lubang yang ingin dibuat dengan besarnya lubang yang dihasilkan pada benda kerja. Semakin kecil *overcut* yang terbentuk maka semakin akurat proses pemesinan tersebut.