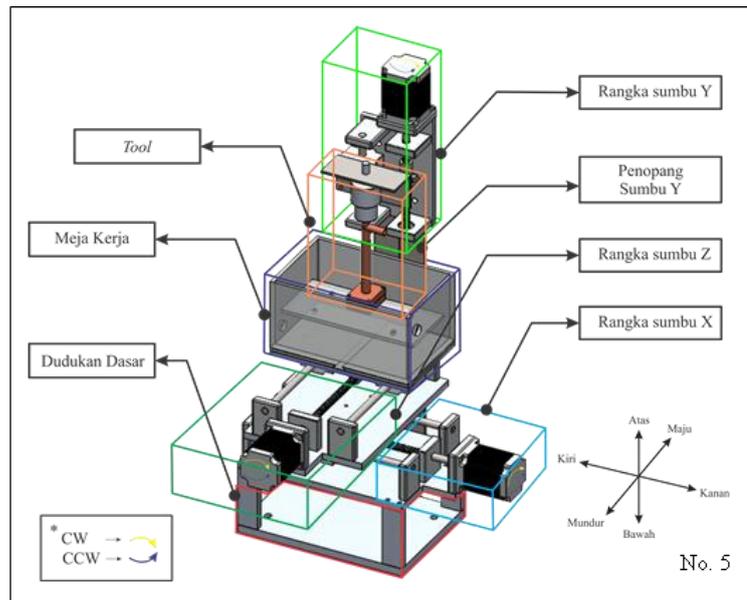


## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

#### 2.1. Kajian Pustaka

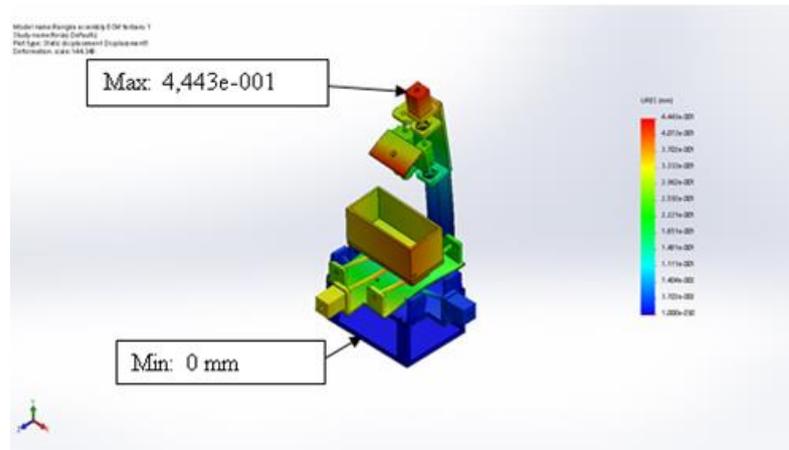
Firdaus (2015) dan Sulistiyo (2016) melakukan perancangan dan pembuatan mesin ECM *portable*. Bahan yang digunakan untuk perancangan mesin ECM ini adalah aluminium pejal. Pada proses perancangan menggunakan *software Solidwork*. Hasil perancangan mesin ECM ditunjukkan pada Gambar 2.1. Pada Gambar 2.1. dapat dilihat bahwa sistem mekanik yang dibuat terdapat 3 sistem penggerak yaitu pada sumbu X, Y, dan Z. Sumbu Y dalam keadaan diam, tegak lurus terhadap meja kerja, jika motor *stepper* yang terpasang pada sumbu Y berputar searah dengan jarum jam maka *tool* akan bergerak ke arah atas sedangkan jika motor *stepper* berputar berlawanan dengan arah jarum jam maka *tool* akan bergerak ke arah bawah. Sedangkan untuk fungsi dari penggerak sumbu Z dan sumbu X adalah untuk *positioning* meja kerja supaya tegak lurus dengan *tool* yang terpasang pada sumbu Y.



Gambar 2.1. Mesin ECM dengan sumbu X, sumbu Z, meja kerja, sumbu Y dan *tool*. (Firdaus, 2015 dan Sulistiyo, 2016)

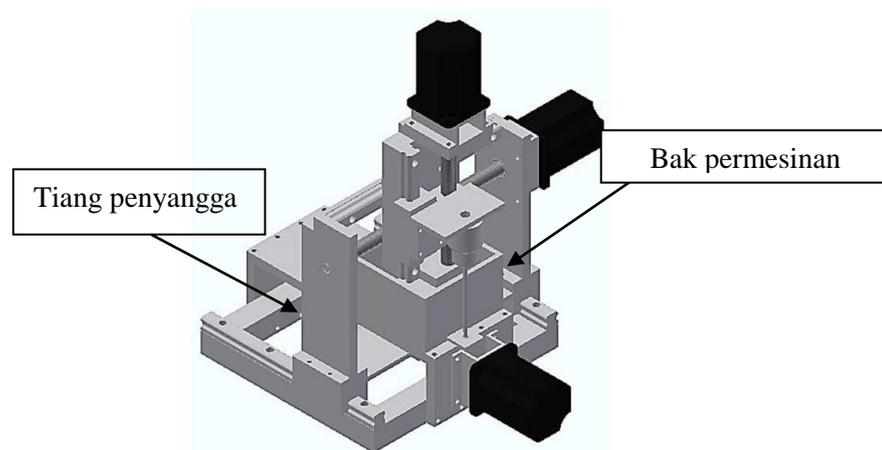
Perancangan bak pemesian yang dibuat terlalu kecil sehingga membuat sulit dalam menggantikan benda kerja, susah dalam mengamati benda kerja ketika proses pemesian, serta larutan elektrolit bisa terpantul keluar yang membuat komponen di sekitarnya terkorosi. Filter yang dirancang dan dibuat dalam sistem sirkulasi larutan elektrolit masih kurang optimal sehingga geram-geram hasil pemesian masih bisa masuk ke bak penampung yang bisa menyebabkan rusaknya propeler pompa, membuat kerja pompa semakin berat serta mempengaruhi benda kerja hasil pemesian. Dalam proses pengoperasian mesin ECM menggunakan *software Mach 3* sehingga diperlukan program G-kode untuk proses pengaturan *tool* dan dibutuhkannya seperangkat komputer karena *port* di *board Mach 3* masih menggunakan *port parallel*. Pompa yang berfungsi untuk mendorong larutan elektrolit itu tidak menggunakan *voltage regulator* sehingga kecepatan pompa tidak bisa divariasikan.

Hasil *stress analysis* dengan menggunakan *software Solidwork* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.2. Berdasarkan dari perancangan sistem mekanik didapatkan hasil *force stress* dengan pembebanan sebesar 50 N terdeteksi *yield point value* sebesar  $1.050 \times 10^8$  Mpa dan *von mises value* minimum yang terdeteksi adalah 6.5993 MPa, sedangkan *von mises value* maksimum yang terdeteksi adalah  $4.5105 \times 10^7$  MPa. *Force displacement* perancangan sistem mekanik ECM yang menunjukkan bahwa *displacement* maksimal yang terjadi adalah  $4.443 \times 10^{-1}$  mm, maka dapat diambil kesimpulan bahwa sistem mekanik mesin aman dan siap untuk dibuat.



Gambar 2.2 Hasil *stress analysis* (Firdaus, 2015 dan Sulistiyo, 2016)

Perancangan dan pembuatan mesin ECM yang selanjutnya dilakukan oleh Nugroho (2014) dengan menggunakan bahan aluminium pejal juga sebagai rangka utama. Dalam mendesain mesin ECM menggunakan *software Autodesk Inventor*. Mesin ECM ditunjukkan pada Gambar 2.3. Berdasarkan gambar tersebut terlihat bahwa komponen yang bergerak adalah kedua tiang penyangga mesin sedangkan benda kerja diam.

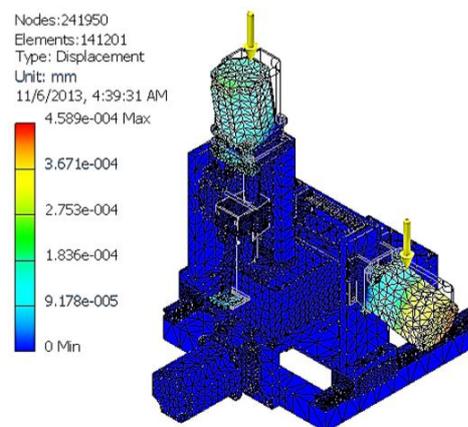


Gambar 2.3. Desain mesin ECM (Nugroho, 2014)

Pada perancangan mesin ECM bak permesinan terlalu kecil dan tidak ada penutup sehingga bisa menyebabkan larutan elektrolit yang disemprotkan ke benda kerja itu terpantul keluar yang membuat komponen yang di sekitarnya terkorosi, sulitnya mengatikan benda kerja dan susahny mengamati benda kerja

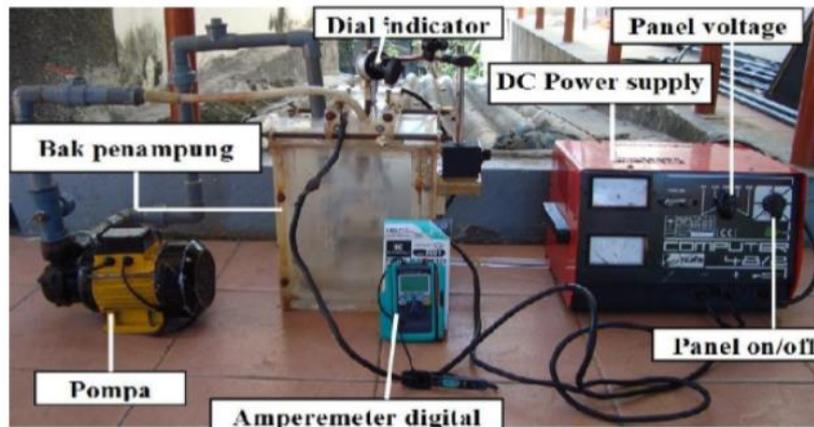
ketika dalam proses permesinan. Dalam proses pengoperasian mesin ECM menggunakan *software Mach 3* sehingga diperlukan program G-kode dalam pengaturan *tool* dan dibutuhkannya seperangkat komputer dikarenakan *port* di *board Mach 3* menggunakan *port parallel*.

Dalam perancangan mesin ECM melakukan *stress analysis* yang terdapat pada perangkat lunak *autodesk inventor*. Gaya yang diberikan sebesar 10 N pada sisi atas dan samping (terletak pada motor *stepper*). Pada tahap ini akan diketahui bagian - bagian dari konstruksi yang mengalami *displacement* maksimal, agar dapat disimpulkan desain mesin ECM *portable* ini layak atau tidak. Hasil *stress analysis* menunjukkan bahwa *displacement* maksimal adalah  $4,59 \times 10^{-4}$  mm, sehingga konstruksi mesin dikatakan aman dan layak untuk dibuat. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Hasil *stress analysis* (Nugroho, 2014)

Mesin ECM yang dibuat selanjutnya oleh Suhardjono (2014) dibuat dengan lebih *simple* dan mudah. Pada Gambar 2.5 bisa dilihat bahwa mesin ECM terdiri dari beberapa komponen diantaranya DC *power supply*, pompa, *dial indicator*, amperemeter digital, dan bak pemesinan.



Gambar 2.5. Mesin ECM (Suhardjono, 2014)

Pengaturan jarak *tool* dengan benda kerja masih digerakkan secara manual dan ketika proses pemesinan *tool* dalam keadaan diam, sehingga tidak bisa melakukan proses pemesinan dengan *tool* bergerak turun ke bawah. Dalam sistem sirkulasi larutan elektrolit masih kurang optimal karena tidak ada filter yang berfungsi untuk memisahkan geram - geram hasil pemesinan dengan larutan elektrolit sebelum masuk ke dalam pompa yang bisa merusak propeler pompa, kerja pompa semakin berat dan mempengaruhi hasil proses pemesinan. Bak pemesinan masih kurang besar sehingga sulit dalam memasang dan mengkatikan benda kerja. Pada pompa tidak dipasang *voltage regulator* sehingga kecepatan pompa tidak bisa diatur.

Perbedaan antara perancangan kali ini dengan perancangan sebelumnya adalah dari bahan yang digunakan untuk rangka menggunakan akrilik, sistem sirkulasi larutan elektrolit, sistem mekanik mesin yang hanya menggunakan *single axis*, sistem kelistrikan dan analisa yang dilakukan terhadap perancangan mesin ECM menggunakan *software Solidworks*.

## 2.2. Dasar Teori

### 1.2.1. *Electrochemical Machining* (ECM)

*Electrochemical Machining* (ECM) adalah proses pembubaran anodik menggunakan kepadatan arus listrik yang tinggi ( $> 20 \text{ A cm}^{-2}$ ) yang secara efektif dapat menghilangkan bahan dari logam, terlepas dari kekerasannya (Rajurkar,

1999). Mesin ECM merupakan proses pemesinan yang bergantung pada penghapusan atom dari permukaan benda kerja (McGeough, 1988). ECM didasarkan pada proses *anodic dissolution* dalam elektrolisis (Tlusty, 2000). Mesin ECM merupakan proses elektrolisis dimana pembuangan logam terjadi karena pelarutan secara proses kimia dari benda kerja (Sudiarso, 2009). Mesin ECM adalah salah satu proses pemesinan *non-konvensional*, yang prinsip kerjanya berdasarkan hukum Faraday. Proses pemesinan terjadi akibat adanya reaksi oksidasi dan reduksi pada saat elektrolisis. Pada mesin ECM reaksi reduksi dan oksidasi ditunjukkan dengan adanya pengerosian (lepasnya elektron) benda kerja serta penambahan massa (penempelan ion metal positif pada pahat). Proses ECM penempelan ion metal tersebut dicegah dengan memberikan *flusing* (elektrolit yang disemprotkan) pada area kerja. Sehingga ion metal yang lepas dari benda kerja tidak sempat menempel pada pahat (Pandey, 2000).

Elektrolisis merupakan suatu proses kimia yang mana terjadi ketika ada arus listrik yang melewati dua elektroda yang terbenam di dalam larutan elektrolit. Contoh dari proses elektrolisis yaitu *electroplating* dan *electropolishing*. Mesin ECM memanfaatkan reaksi kimia melalui pelepasan muatan listrik sehingga terjadi pelarutan anodis dari material benda kerja (anode) oleh elektroda (katode) yang keduanya bersifat menghantarkan listrik (konduktif). Listrik dengan kuat arus tinggi dan bertegangan rendah digunakan untuk melarutkan dan mengikis partikel logam benda kerja. Sumber tegangan yang digunakan adalah arus DC melalui perantara reaksi larutan elektrolit yang mengalir pada celah (*gap*) antara benda kerja dan elektroda. Mesin ECM biasa digunakan untuk proses pemesinan material yang mempunyai tingkat kekerasan sangat tinggi serta sulit dikerjakan dengan metode konvensional.

Pemesinan menggunakan mesin ECM mempunyai beberapa kelebihan, antara lain:

1. Dapat melakukan pemesinan pada benda kerja dengan kekerasan sangat tinggi karena prosesnya tidak dipengaruhi oleh kekerasan bahan benda kerja.
2. Pemesinan pada benda kerja jenis *fragile parts* dan *brittle materials* sangat

aman menggunakan mesin ECM.

3. Benda kerja *non-rigid* mampu diproses dengan mudah.
4. Tidak ada *cutting force* karena elektroda serta benda kerja tidak bersentuhan.
5. Dapat membuat bentuk yang kompleks yang sulit dikerjakan dengan metode konvensional.
6. Mampu digunakan untuk memotong benda kerja 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. Mesin ECM memiliki *time saving* yang lebih baik, dibanding mesin konvensional.
11. Proses pemesinan tidak bising (*smooth*).

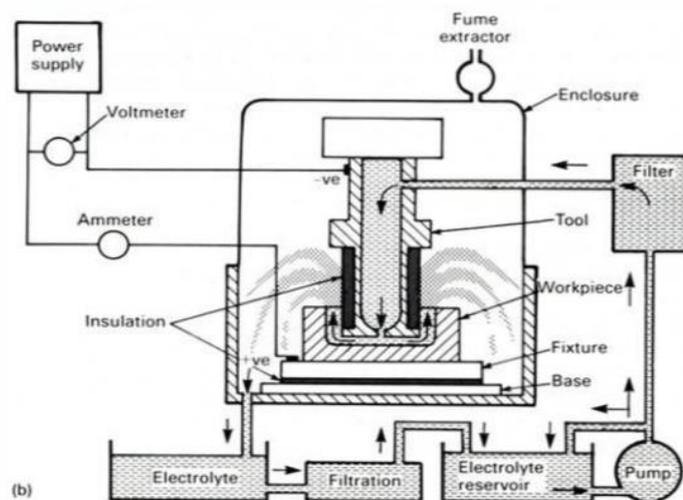
Di samping kelebihan tersebut, mesin ECM mempunyai kekurangan antara lain:

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

### **1.2.2. Prinsip Kerja pada *Electro Chemical Machining* (ECM)**

Prinsip mesin ECM (*Electrochemical Machining*) adalah proses pengerjaan material dengan cara pelarutan anodis (*anodic dissolution*) dari benda kerja yang bermuatan positif oleh lapisan cairan elektrolit yang mengalir melalui celah (*gap*) antara benda kerja dan pahat yang bermuatan negatif (katoda) seperti skema proses ECM Gambar 2.6. Benda kerja yang berfungsi sebagai anoda

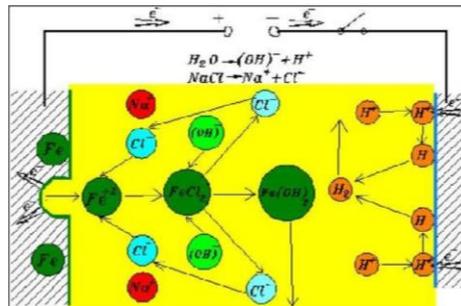
dihubungkan dengan sumber arus searah yang bermuatan positif (DC +) sedangkan pahat sebagai katoda dihubungkan dengan sumber arus searah yang bermuatan *electrode* (DC -) serta cairan elektrolit dialirkan diantara pahat dan benda kerja. Larutan elektrolit yang digunakan pada proses ECM diperlukan untuk terjadinya reaksi kimia pada permukaan benda kerja. Larutan elektrolit diberikan dengan cara disemprotkan atau di *flusing* diantara benda kerja dan *electrode* (pada *gap*) sehingga larutan elektrolit akan berfungsi sebagai media untuk membawa panas hasil reaksi dari daerah pengerjaan dan juga berfungsi untuk membawa geram yang dihasilkan keluar dari *gap* sehingga menghindari penempelan partikel - partikel geram hasil proses pengerjaan pada *electrode*.



Gambar 2.6. Skema proses kerja ECM (McGeough, 2005)

### 1.2.3. Reaksi Kimia Pada Proses *Electro Chemical Machining* (ECM)

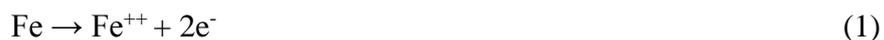
Reaksi elektrokimia pada proses ECM ditunjukkan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7. Diagram reaksi *elektrokimia* dari besi dengan elektrolit NaCl.  
(<http://www.unl.edu/nmrc/ecm1/ecm1.htm>)

1. Reaksi yang berlangsung pada anoda (benda kerja) yang dihubungkan pada polaritas positif merupakan proses oksidasi (pelepasan elektron) dan pembentukan gas oksigen.

- a. Proses oksidasi yang merupakan pelarutan dari ion metal yang dalam hal ini baja di dalam cairan elektrolit (Proses *anode dissolution*).



- b. Proses pembentukan gas oksigen  $\text{O}_2$ .

Larutan bersifat asam:



Larutan bersifat basa:



- c. Reaksi yang berlangsung pada katoda (pahat) merupakan proses reduksi (penangkapan elektron) dan pembentukan gas hidrogen.

Proses reduksi yang terjadi pada ion-ion logam. Reaksi ion logam pada katoda dikelompokkan menjadi dua bagian :

- a. Ion-ion logam alkali, alkali tanah dan  $\text{Al}^{+3}$  tidak dapat direduksi dari larutan. Larutan yang direduksi adalah pelarut (air) dan terbentuklah gas hidrogen  $\text{H}_2$ .

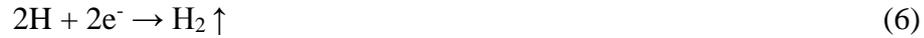


- b. Ion-ion logam lainnya yang tidak termasuk dari kelompok diatas akan mengalami reduksi.



Proses pembentukan gas hydrogen  $H_2$ .

Larutan bersifat asam :



Larutan bersifat basa :



Gas Chlor terjadi akibat rangkaian reaksi berikut ini :



Selanjutnya ion positif besi dan ion negatif hidroksil membentuk larutan yang disebut larutan anodis atau ferro hidroksida.



Larutan anodis ini bercampur dengan oksigen dan air membentuk ferrihidroksida (hidroksida besi) yang berupa endapan berwarna kecoklatan.



Selain itu juga terbentuk senyawa-senyawa berupa :  $FeCl$ ,  $FeCl(OH)$ , dan  $FeCl_3$ .

#### 1.2.4. Proses Ideal Pada ECM

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

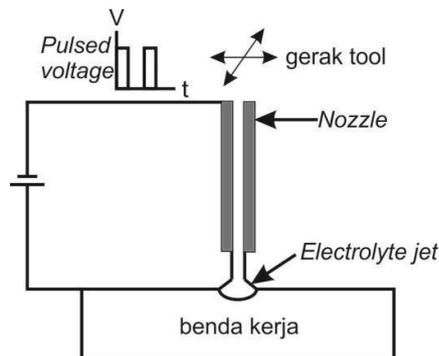
1. Hukum faraday mencakup seluruh proses pada celah (*gap*) antar elektroda dengan permukaan benda kerja.
2. Pergerakan ion serta transfer elektron yang mengakibatkan disolusi pada permukaan benda kerja.
3. Konduktivitas elektrik serta termal pada tengah - tengah *gap* bernilai konstan terhadap waktu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

### 1.2.5. Jenis *Electrochemical Machining* (ECM)

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

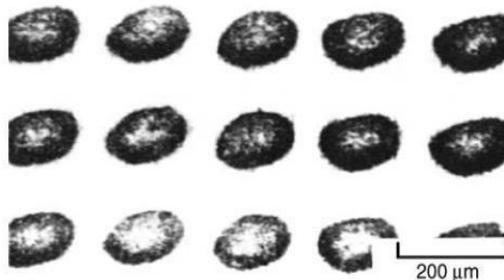
#### 1. *Micro-ECM*

Mesin *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 2.8. *Electrolyte Jet* (El-Hofy, 2005)

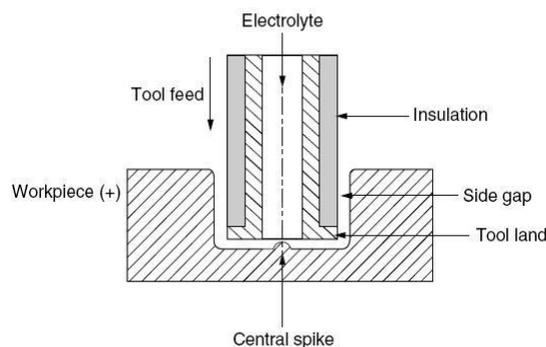
Pada *micro-ECM*, *tool* mikro yang digunakan merupakan *electrolyte jet* seperti pada Gambar 2.8 dimana benda kerja yang bergerak terhadap *tool*-nya. Jenis arus yang digunakan *micro-ECM* yaitu *pulse current* (arus kotak) yang dapat menghasilkan indentasi (cekungan) yang kecil saat pemesinan. Indentasi pada pemesinan mikro seperti pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Indentasi (cekungan) pada pemesinan mikro (Masuzawa dan Tonshof, 1997).

## 2. *Electro Chemical Drilling (ECDR)*

Diameter yang dihasilkan *Electro Chemical Drilling (ECDR)* berkisar antara 1 sampai 2 mm dan laju pemakanan 1 sampai 5 mm/menit seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. *Tool* elektroda yang digunakan ECDR merupakan elektroda jenis *tubular* (pipa). Larutan elektrolit kemudian dipompakan melalui tengah *tool* serta keluar melalui celah (*gap*) antara *tool* dan benda kerja.

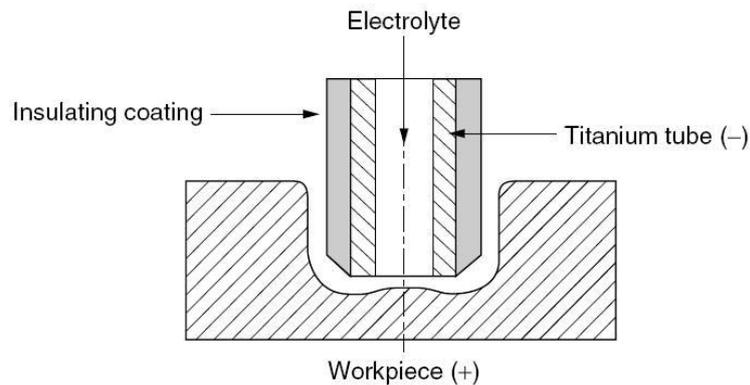


Gambar 2.10. Konfigurasi ECDR (El-Hofy, 2005).

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

## 3. *Shaped Tube Electrolytic Machining (STEM)*

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



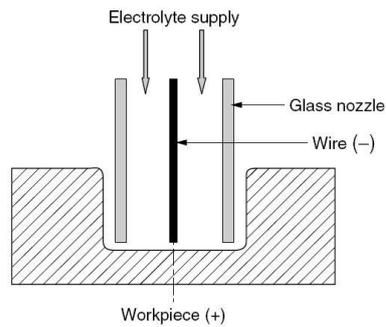
Gambar 2.11. Skema STEM (El-Hofy, 2005).

Sistem konfigurasi pemesinan STEM merupakan sama dengan ECM, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 di atas. Namun sistem harus tahan terhadap asam (*acid resistant*), kekakuan tidak tinggi, dan mempunyai *power supply* dengan polaritas yang dapat diubah secara periodic karena proses pemesinan 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*.

#### 4. *Electrostream (Capillary) Drilling*

*Electrostream (Capillary) Drilling* adalah pengembangan dengan 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 yaitu *glass nozzle* (diameter 0.025-0.50 mm).

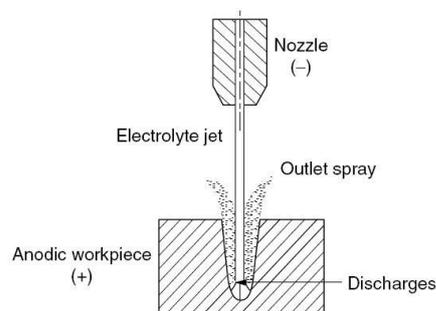
Dalam mengkonduksikan arus pemesinan menuju elektrolit, digunakan kawat platina yang terpasang di dalam *glass nozzle*. Skema *Electrostream (Capillary) Drilling* dapat ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12. 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 mampu dicapai menggunakan *electrostream (Capillary) Drilling*. Proses pemesinannya seperti pada Gambar 2.13 dimana *nozzle* berperan sebagai katodenya.

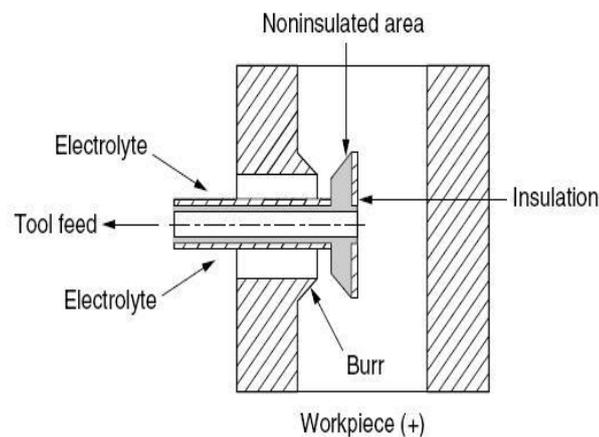


Gambar 2.13. *Electro Chemical Jet Drilling* (El-Hofy, 2005).

Khusus *Electrochemical Jet Drilling*, besar tegangan listrik yang digunakan adalah 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)*

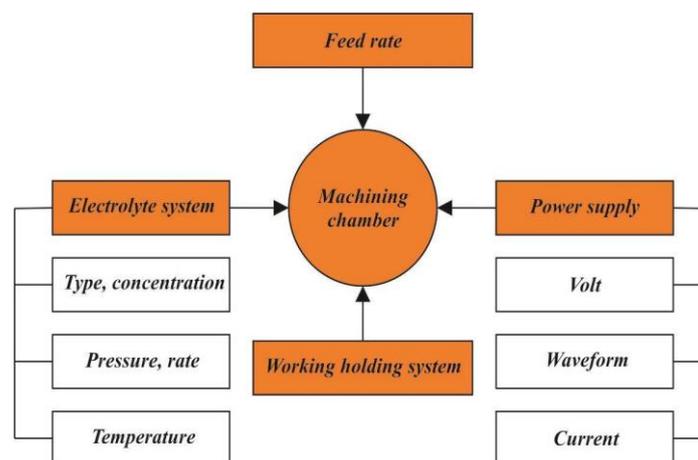
*Electro Chemical Deburring (ECDB)* digunakan untuk menghilangkan *burr* hasil dari proses pengeboran. *Burr* adalah sisa material yang tidak dibutuhkan pada bagian komponen mesin sebagai hasil dari proses manufaktur serta perlu untuk dihilangkan. Mekanisme *deburring* pada ECDB diperlihatkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14. Mekanisme ECDB (El-Hofy, 2005).

### 1.2.6. Peralatan *Electro Chemical Machining (ECM)*

Komponen utama pada mesin ECM terdiri dari sistem kontrol pemakanan, sistem elektrolit, *power supply*, dan dudukan benda kerja seperti yang diperlihatkan Gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15. Komponen sistem pada ECM (Prasetya, 2014).

#### 1. *Power Supply*

*Power supply regulated* adalah *power supply* yang dapat menjaga kestabilan tegangan serta arus listrik meskipun terdapat perubahan atau variasi pada beban atau sumber listrik (Tegangan dan Arus *Input*), sedangkan *power supply unregulated* merupakan *power supply* tegangan ataupun arus listriknya

mampu berubah ketika beban berubah atau sumber listriknya mengalami perubahan. *Power supply unregulated* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki spesifikasi berikut ini:

- a. Tegangan masukan AC 230 V 50 HZ.
- b. Tegangan keluaran 0 - 60 V DC.
- c. Arus keluaran  $\max \geq 30$  A dan  $\text{rated} \leq 26$  A.
- d. *Ripple and Noise*  $\leq 1\%$ .
- e. *Current limit protect and overheat protection*.
- f. *Reading Accuracy voltage*:  $\pm 0.5\% + 2$  digit and *current* :  $\pm 3\% + 5$  digit.
- g. *Operating environment temperature* :  $0 - 40^{\circ} \text{C}$  and *Relative humidity* :  $< 90\%$ .
- h. *Operating time* : 8 hours (continuous).

## 2. Elektrolit

Fungsi utama dari elektrolit pada proses pemesinan ECM adalah:

- a. Membuat kondisi *anodic dissolution* pada material benda kerja.
- b. Mengonduksikan arus pemesinan ECM.
- c. Menghilangkan *debris* hasil reaksi dari proses pemesinan ECM.
- d. Memindahkan panas (*dissipation*) yang dihasilkan oleh proses pemesinan.
- e. Mempertahankan suhu supaya tetap konstan.

Elektrolit yang biasa digunakan yaitu Natrium Klorida (NaCl), Natrium Nitrat ( $\text{NaNO}_3$ ), dan Natrium Hidroksida (NaOH) seperti pada Tabel 2.1. Pengoperasian mesin ECM menggunakan campuran elektrolit yang disesuaikan dengan kebutuhan.

Tabel 2.1 Elektrolit dan laju pemesinan berbagai benda kerja  
(*Metals Handbook*, 1989)

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

### 3. *Tool* elektroda

*Tool* elektroda pada pemesinan mesin ECM harus tahan terhadap karat untuk waktu yang lama serta dapat menghantarkan listrik. Material yang digunakan sebaiknya bersifat anti korosi, mempunyai konduktivitas termal dan konduktivitas listrik yang baik, serta mudah dilakukan pemesinan sesuai geometri yang dibutuhkan. Akurasi *dimensional* dan *surface finish* pada *tool elektrode* berpengaruh langsung terhadap akurasi serta *surface finish* benda kerja. Alumunium, kuningan, tembaga, karbon, perak, *stainless steel*, dan monel merupakan material yang biasa digunakan sebagai *elektrode* pada pemesinan ECM. Adapun material *tool elektrode* yang digunakan dalam penelitian ini adalah kuningan.

Kuningan adalah gabungan dari tembaga dan seng dengan kadar bervariasi antara 10% - 40%. Semakin tinggi kadar seng maka akan semakin kuat kuningan tersebut. Kuningan mempunyai dua tipe struktur kristal yang

berbeda. Kuningan alfa adalah larutan padat dari tembaga dan seng dengan struktur kristal *Free Centered Cubic* (FCC). Sistem tembaga seng mempunyai struktur tersebut dengan kandungan seng mencapai 38%. Dengan kandungan seng yang lebih tinggi, struktur beta adalah *Body Centered Cubic* (BCC) mulai terbentuk. Kuningan dengan kandungan seng mendekati 40% bisa mempunyai struktur alfa dan beta, tetapi sekitar 50% struktur seng yaitu seluruhnya beta. Sifat struktur alfa dan beta sangat berbeda satu sama lain. Kuningan alfa dengan kandungan seng yang tinggi (~30%) disebut kuningan kuning. Kuningan beta paling umum dengan komposisi 60% tembaga – 40% seng disebut logam Muntz 24. Banyak kuningan terdiri dari beberapa elemen paduan yaitu alumunium, timah, nikel dan arsenik untuk tujuan tertentu. *Tool elektrode* yang dipakai dapat dilihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. *Tool* kuningan.

#### 4. Benda kerja (*workpiece*)

Benda kerja mesin ECM yang digunakan haruslah bisa menghantarkan listrik (konduktor). Beda potensial yang terkandung dalam unsur benda kerja sangat menentukan terciptanya efisiensi arus dalam proses pemesinan. Kereaktifan unsur benda kerja juga menjadi salah satu faktor yang mampu mempengaruhi hasil pemesinan pada benda kerja. Selain itu, benda kerja yang diproses dengan pemesinan ECM merupakan benda kerja yang bersifat mampu mendapat perlakuan panas (Feriyanata, 2015).

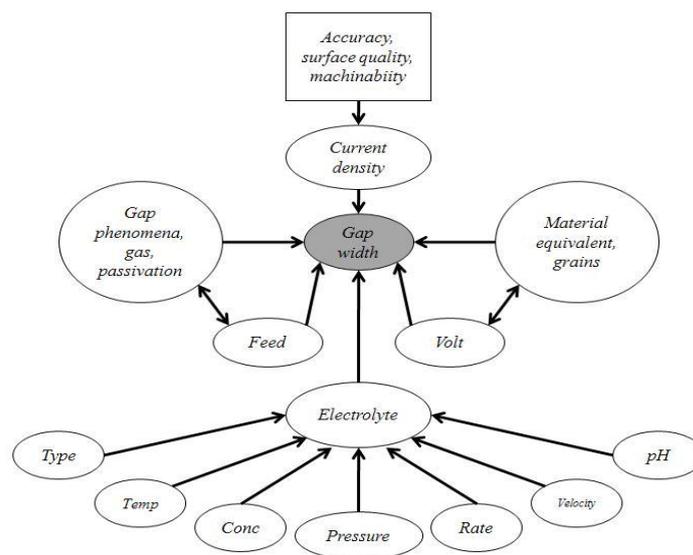
#### 1.2.7. Akurasi *Electrochemical Machining* (ECM)

Akurasi pada proses pemesinan ECM tergantung pada densitas arus yang

dipengaruhi oleh:

1. Material ekivalen dan *voltage gap*.
2. *Feed rate* dan pasivasi.
3. Properti elektrolit seperti laju, pH, temperatur, konsentrasi, *pressure*, tipe, dan kecepatan.

Parameter yang mempengaruhi akurasi pada pemesinan ECM diperlihatkan pada Gambar 2.17 berikut:



Gambar 2.17. Parameter yang mempengaruhi akurasi pada ECM  
(El-Hofy, 2005)

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

### 1.2.8. Perancangan Mesin

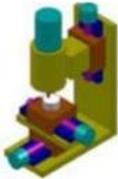
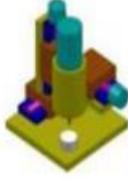
Mesin adalah kombinasi dari tujuan umum tertentu dan elemen tujuan khusus yang dapat mengirimkan daya (gerakan) dengan cara yang terkontrol serta mampu melakukan beberapa pekerjaan yang berguna (Kovacevic, 2012). Proses

manufaktur menjelaskan tentang segala aktifitas manusia dalam berinteraksi dengan mesin untuk menghasilkan suatu produk. Proses manufaktur meliputi tahap perancangan, pembuatan, dan pengujian terhadap produk yang dibuat. Menurut Kovacevic (2012), dalam mendesain sebuah mesin perlu mempertimbangkan beberapa kriteria mekanikal, sebagai berikut:

1. Kekuatan (*strength*), sebuah komponen tidak boleh mengalami kegagalan atau deformasi residual karena dampak dari gaya yang diterima.
2. Kekakuan (*rigidity*), kekakuan merupakan kemampuan untuk menahan deformasi yang diakibatkan oleh gaya yang bekerja. Kekakuan yang tepat diperlukan untuk memastikan mesin mampu beroperasi secara efektif.
3. Ketahanan aus (*wear resistance*), keausan merupakan faktor penting yang dapat mengakibatkan kegagalan dari sebuah mesin.
4. Ketahanan termal (*heat resistance*), keausan sebuah mesin biasanya terjadi karena mesin tersebut tidak mampu menahan panas yang timbul akibat gesekan antar *part*. Pelumasan yang baik dibutuhkan untuk menjaga kestabilan suhu.
5. Ketahanan getaran (*resistance to vibration*), kemampuan mesin untuk dioperasikan dalam kecepatan serta beban tertentu untuk menghasilkan produk yang berkualitas. Jika mesin tidak dapat menahan getaran yang terjadi maka akan berdampak pada kepresisian produk yang dihasilkan.

Scneider (2010) mengemukakan bahwa dalam mendesain sebuah mesin, perlu diperhatikan beberapa aspek mengenai sisi kesimetrisannya, sambungan antara *part*, serta letak *axis* seperti yang diperlihatkan pada Tabel 2.3. Pada tabel tersebut dapat dilihat desain mesin yang mempunyai nilai simetris, desain kontruksi, ukuran, serta sambungan antar *part* yang baik di beri tanda (+), kurang baik di beri tanda (-) dan yang sedang di beri tanda (0).

Tabel 2.2. Jenis struktur pergerakan mesin. (Scneider, 2010)

Simetri	Desain Kontruksi	Ukuran	Sambungan	Desain mesin
+	+	0	+	
0	-	-	0	
0	+	+	0	
-	+	+	-	

\*) Keterangan: (+) = baik, (-) = Kurang, (0) = Sedang

### 1.2.9. Bahan Perancangan

Sifat mekanik bahan adalah satu hal yang sangat penting dan harus dipertimbangkan dalam merancang suatu alat atau mesin. Adapun sifat mekanik bahan yang harus dipertimbangkan adalah sebagai berikut:

#### 1. Elastisitas

Dalam memilih material logam untuk pembuatan rangka mesin, yang harus diperhatikan yaitu sifat-sifat material, antara lain kekuatan (*strength*), keliatan (*ductility*), kekerasan (*hardness*), dan kekuatan lelah (*fatigue strength*). Sifat mekanik material dapat didefinisikan sebagai ukuran kemampuan

material untuk menahan gaya atau tegangan. Pada saat menahan beban, struktur molekul berada dalam keseimbangan. Gaya luar pada proses penarikan tekanan, pemotongan, penempaan, pengecoran dan pembengkokan mengakibatkan material mengalami tegangan. Hampir semua benda teknik memiliki sifat elastisitas. Apabila gaya dari luar menghasilkan perubahan bentuk (*deformation*) kemudian gaya tersebut dilepas, maka kembali ke bentuk semula, hal tersebut terjadi karena elastisitas bahan.

## 2. Deformasi

Deformasi terjadi bila material mengalami gaya. Selama deformasi, material menyerap energi sebagai akibat adanya gaya yang bekerja sepanjang deformasi. Sekecil apapun gaya yang bekerja, maka benda akan mengalami perubahan bentuk dan ukuran. Perubahan ukuran secara fisik ini disebut sebagai deformasi. Deformasi ada dua macam, adalah deformasi elastis dan deformasi plastis. Deformasi elastis merupakan deformasi yang terjadi akibat adanya beban yang jika beban ditiadakan, maka material akan kembali seperti ukuran dan bentuk semula, sedangkan deformasi plastis yaitu deformasi yang bersifat permanen jika bebannya dilepas maka material tidak kembali seperti ukuran dan bentuk semula.

## 3. *Yield Point*

Jika beban yang bekerja pada material diteruskan hingga diluar batas elastis akan terjadi perpanjangan atau perpendekan permanen secara tiba – tiba. Kekuatan luluh merupakan harga tegangan terendah dimana material mulai mengalami deformasi plastis. Ini disebut *yield point* atau batas luluh dimana regangan meningkat sekalipun tiada peningkatan tegangan (hanya terjadi pada baja lunak). Setelah melewati titik ini, material tidak akan kembali ke bentuk semula, atau material sedang berada dalam daerah plastis. Oleh karena itu didefinisikan kekuatan luluh (*yield point*).

## 4. Kekuatan Tarik

Kekuatan tarik yaitu kemampuan beban menahan atau menerima beban atau tegangan tarik sampai putus. Kekuatan tarik suatu material dapat ditetapkan dengan membagi gaya maksimal dengan luas penampang mula.

#### 5. Keuletan

Menyatakan energi yang diabsorpsi (diserap) oleh suatu material sampai titik patah.

#### 6. Kekerasan

Kekerasan adalah adanya daya tahan suatu bahan (permukaan bahan) terhadap penetrasi/identasi (pemasukan dan penusukan) bahan lain yang lebih keras dengan bentuk tertentu di bawah pengaruh gaya tertentu.

Pada perancangan mesin ECM ini bahan yang akan digunakan untuk membuat rangka mesin adalah Akrilik yang banyak tersedia di pasaran. Akrilik memiliki sifat-sifat penting yang membuat material ini banyak digunakan diberbagai bidang. Salah satunya akrilik bersifat ringan, tahan terhadap korosi, dengan berat jenis rendah ( $1.18 \text{ gr/cm}^3$ ) yang hanya setengah dari berat jenis *aluminium alloy* ( $2.7 \text{ gr/cm}^3$ ).

Sifat-sifat penting akrilik lainnya antara lain:

1. Bening dan transparan.
2. Kuat, lentur, tahan lama dan anti korosi.
3. Aman untuk makanan (*food safe*), karena tidak mungkin berkembangnya mikroorganisme.
4. Dapat dibuat menjadi berbagai kategori bentuk yang sangat berbagai macam.
5. Memiliki berat yang lebih ringan dari aluminium pejal.
6. Harga relatif murah dari aluminium pejal.
7. Tahan terhadap cuaca luar area.
8. 100 % bisa didaur ulang.
9. Tahan pada reaksi bahan kimia dibanding dengan sebagian besar bahan plastik lainnya.
10. Ramah lingkungan dan tidak mengandung racun.
11. Mudah dibersihkan dan dirawat.

### 1.2.10. *Software* Perancangan

Pekerjaan perancangan adalah proses yang sangat rumit serta memerlukan waktu yang panjang untuk menyelesaikan satu perancangan pada saat aplikasi perancangan belum berkembang. Proses perancangan dikerjakan secara manual menggunakan pensil kemudian digambar ulang menggunakan tinta supaya tahan lama. Namun pada zaman ini, sudah banyak berkembang aplikasi-aplikasi untuk perancangan mesin atau yang sering kita sebut dengan CAD (*Computer Aided Design*) seperti:

1. Solidworks
2. Pro/ENGINEER
3. AutoCAD
4. Autodesk Inventor
5. Catia
6. Unigraphics
7. ZWCAD
8. Dan masih banyak lainnya.

*Software* yang akan penulis gunakan dalam perancangan ini yaitu *software Solidworks*. *Solidworks* merupakan salah satu *software* CAD (*Computer Aided Design*) 3D yang dikembangkan oleh *Solidworks Corporation* yang sekarang sudah diakuisisi oleh *Dassault Systèmes*. Seperti yang diketahui bahwa *Dassault Systèmes* yaitu *company* yang mengeluarkan *the most powerfull CAD software*, *Catia*. Meski di bawah *company* yang sama, *Solidworks* dan *Catia* tetaplah *software* yang berbeda. *Solidworks* berfungsi untuk merancang *part* pemesinan atau susunan *part* pemesinan yang berupa *assembling* dengan tampilan 3D untuk mempresentasikan *part* sebelum real *part*-nya dibuat atau tampilan 2D (*drawing*) untuk gambar proses pemesinan.

Setiap *software* atau aplikasi yang ada, pasti mempunyai kelebihan dan kekurangan, berikut adalah kelebihan dan kekurangan *software Solidworks* yang menjadi pertimbangan penulis menjadikan *Solidworks* sebagai *software* perancangan mesin ECM *single axis*.

Kelebihan *software Solidworks*:

1. Mudah untuk digunakan.
2. *Solidworks* mempunyai perhitungan material yang luas.
3. Banyak referensi maupun tutorial yang tersedia di internet maupun di buku.
4. Penggambaran 3D sangat baik dan rendernya lebih realistis, di atas *Autodesk*.
5. Satu *package* cukup lengkap modulnya selain *simulation*, juga terdapat *piping, electrical, plastics* dan *molding*.
6. Sangat *aplikatif* dan mudah untuk digabung dengan *software* analisa yang lain, semisal *Ansys*.
7. Penggambaran detail *drawing 2D, annotation, section, thickness, 3D View*, cukup mudah serta secara otomatis dapat dilakukan tanpa membuat satu demi satu.
8. Tampilan/*Graphic User Interface (GUI)*-nya *user-friendly, feature* nya tampak lebih menarik.
9. Relatif lebih ringan *run* di komputer dengan *memory* komputer yang tidak terlalu besar. *Compare to Pro/Engineer* dan *Catia*.
10. Dapat membuat *sketch* apa saja di *solidwork*. *Constraint*-nya tidak seketat di *Pro/Engineer*.
11. Dapat menyediakan sketsa 2D yang dapat di *upgrade* menjadi bentuk 3D.
12. Proses penggunaan *Solidworks* lebih cepat dibandingkan *vendor-vendor software CAD* lain yang lebih dulu ada.
13. *Solidworks* membantu mendesain produk lebih cepat, lebih baik, waktu yang singkat, dan biaya yang lebih rendah.
14. *Solidworks* dilengkapi *render engine* yang cukup mumpuni bahkan sejajar dengan *V-ray* pada *3Ds Max*.

Kekurangan *software Solidworks*:

1. Membutuhkan spesifikasi komputer yang besar sekitar 6GB, belum termasuk ketika simulasi dan render.
2. Membutuhkan *graphic card* minimum sekelas spesifikasi untuk *gamers*,

akan tetapi yang direkomendasikan yaitu lebih tinggi dari sekedar *gamers*, sekelas NVIDIA Quadro, atau *ATI Firepro*.

3. Minimum 4 GB RAM.
4. Dalam hal simulasi, masih disarankan kepada *Ansys* atau *Catia* yang *high end*, karena level dari *Solidworks* ini sebatas *mid end*.
5. *Maximum* panjang lebar garis adalah 1000 m.