

PENENTUAN WAKTU OPTIMAL *ELECTROCHEMICAL MACHINING* PADA PEMBUATAN PLAT PEMBENTUK *MULTILAYERED MICROFILTERS*

Sakir^{1*}, Andi Sudiarso², Muslim Mahardika³

¹Jurusan Ilmu dan Teknologi Pangan, Universitas Halu Oleo, Kendari, Indonesia

^{2,3}Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Email: sakir.bani@yahoo.co.id

ABSTRAK

Electrochemical Machining (ECM) merupakan salah satu alternatif permesinan yang dapat digunakan pada pembuatan plat pembentuk *multilayered microfilters*. Penggunaan metode ECM sendiri dipilih sebagai suatu metode pemessinan material karena dapat melakukan pemessinan pada produk *micromachining* yang berukuran kecil dan memiliki struktur yang kompleks yang tidak bisa dilakukan pada mesin konvensional karena material yang terlalu getas, kuat, kecil, atau dapat menimbulkan tegangan sisa bila menggunakan pemessinan konvensional. Dalam penelitian ini menggunakan material *stainless steel* 204 sedangkan elektroda yang digunakan adalah *die sinking* berbahan *stainless steel* 204. Pada pembuatan plat pembentuk *multilayered microfilters* kegiatan yang dilakukan adalah analisis mengenai pengaruh tegangan yang digunakan (6, 10, dan 14 Volt) dan *working gap* (4, 5, dan 6 mm), dengan replikasi sebanyak tiga kali menggunakan pendekatan *full factorial design* dan metode pemessinan ECM statis. Respon yang diuji dalam penelitian ini diantaranya *Material Removal Rate* (MRR) dan *overcut*. Berdasarkan hasil penelitian diperoleh rata-rata MRR tertinggi pada tegangan 20 Volt dengan *working gap* sebesar 4 mm sebesar $17,949 \times 10^{-4}$ g/s, sementara untuk nilai MRR terendah diperoleh pada konsentrasi tegangan 6 Volt dengan nilai *working gap* 6 mm yaitu sebesar $4,878 \times 10^{-4}$ g/s. Sedangkan rata-rata *overcut* tertinggi diperoleh pada tegangan 14 Volt dengan *working gap* 4 mm yaitu sebesar 0,4010 mm, sedangkan nilai rata-rata *overcut* terendah diperoleh pada tegangan 6 Volt dengan *working gap* 6 mm yaitu sebesar 0,1200 mm. Berdasarkan hasil validasi perbandingan yang telah dilakukan, rata-rata validasi *overcut* pada tegangan 8 Volt dan *working gap* 4,5 mm yaitu sebesar 0,076 mm sedangkan *overcut* terkecil pada tegangan 8 Volt dan *working gap* sebesar 5,5 mm yaitu sebesar 0,061 mm. Berdasarkan validasi diperoleh waktu pemessinan optimal yaitu pada tegangan 12 volt dengan *working gap* 4,5 mm sebesar 546 detik.

Kata kunci: *Electrochemical machining, multilayered microfilters, material removal rate, overcut*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan mesin non-konvensional dalam hal ini *electrochemical machining* telah memberikan kontribusi yang besar bukan hanya dalam dunia manufaktur tetapi juga dalam dunia medis. Pemanfaatan ECM dalam dunia medis khususnya dalam bidang biomaterial, salah satunya dalam pembuatan *multilayered microfilters* untuk proses dialisis (Gudan Miki, 2009). Kebutuhan akan *multilayered microfilters* semakin meningkat dengan meningkatnya jumlah penderita gagal ginjal di dunia. *Multilayered microfilters* berfungsi untuk memisahkan kotoran seperti *urea, uric acid*, dan *creatine* dari kandungan darah (Gu dan Miki, 2009).

Beberapa proses pemessinan non-konvensional seperti *Electro Discharge Machining* (EDM), *Laser Beam Machining* (LBM), *Electron Beam Machining* (EBM), dan lain-lain dapat mengakibatkan distorsi termal pada permukaan hasil pemessinan.

Electrochemical Machining (ECM) merupakan alternatif untuk melakukan pemessinan pada benda kerja berukuran kecil dan memiliki struktur yang kompleks tanpa mengakibatkan dampak termal pada benda kerja (Bhattacharya, 2002).

Untuk membuat plat pembentuk *microfilter* dibutuhkan sebuah proses pemessinan yang tepat guna. Penggunaan mesin konvensional dikenal memiliki tingkat ketelitian, ketepatan, fleksibilitas, dan kapasitas yang tinggi. Namun kenyataannya pemessinan menggunakan mesin konvensional tidak bisa diterapkan dalam proses pembuatan *microfilter* yang memiliki ukuran kecil dengan ketebalan benda kerja hanya 0,3 mm. Hal tersebut dikarenakan keterbatasan alat potong pada mesin konvensional untuk membuat pola yang diinginkan pada *microfilter* ini. Penggunaan mesin non konvensional yang mengarah pada penggunaan *Electrochemical*

Machining menjadi alternatif untuk mengatasi kelemahan pada mesin konvensional dalam proses pembuatan *microfilter* (Nugroho, 2013).

Material yang digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan plat pembentuk *multilayeredmicrofilters* biasanya menggunakan bahan berupa titanium, namun ada pula yang menggunakan *stainless steel* tipe 316L. Prihandana dkk., pada tahun 2013 telah membuat *microfilter* dengan proses *electropolishing* menggunakan material benda kerja *stainless steel* 316L sebagai anoda dan material titanium sebagai katodanya, sementara itu lapisan membran PES dibuat menggunakan *polyestersulfonepolyvinylpyrrolidone* (PES PVP). Penggunaan material *stainless steel* 204 didasarkan pada ketahanan material tersebut terhadap korosi yang mungkin terjadi akibat pemakaian elektrolit NaCl yang sangat bersifat korosif. Sedangkan penggunaan elektroda biasanya terbuat dari batang kuningan didasarkan pada pencekam pada mesin serta konduktivitas kuningan sebagai bahan yang sangat baik dalam menghantarkan arus listrik (Setianingsih, 2014).

Proses ECM menggunakan larutan elektrolit yang tidak berbahaya dan dapat menghasilkan produk dengan bentuk yang kompleks (Gu dan Miki, 2009), di mana produk yang dihasilkan diproses tanpa kontak dan pengaruh panas (Wolters, 2010). Selain itu, ECM digunakan untuk memproses berbagai jenis material yang bersifat konduktor listrik. Proses ECM didasarkan pada proses *anodic dissolution* dalam elektrolisis (Tlusty, 2000), proses tersebut menggunakan prinsip Faraday yaitu jika ada dua logam elektroda direndam dalam larutan elektrolit dan dihubungkan dengan sumber arus DC, maka partikel logam akan terlepas dari *anode* dan kemudian akan melekat ke *cathode*. Aliran elektrolit yang cukup kuat akan mencegah partikel logam melekat pada *cathode* dan akan membuang partikel-partikel tersebut dari area pemesinan.

Menurut Mc. Geough (1988) *electrochemical machining* dalam proses pemesinan yang dilakukannya sangat tergantung pada proses penghapusan atom dari permukaan benda kerja. Proses penghapusan atom dari permukaan benda kerja inilah yang dikenal dengan *Material Removal Rate* (MRR). Cirilo dkk., (2006) telah mempelajari *material removal rate* (MRR), *surface roughness*,

dan *overcut* pada pemesinan menggunakan ECM dengan benda kerja SAE-XEV F *Valve Steel* (baja untuk katup mesin pembakaran dalam). Parameter yang diubah dalam penelitian ini adalah *feedrate*, elektrolit, laju aliran elektrolit, dan *voltage*. Hasil percobaan menunjukkan bahwa parameter *feedrate* yang paling mempengaruhi besarnya MRR. Hasil percobaan juga menunjukkan bahwa pemesinan menggunakan Natrium Nitrat (NaNO_3) hasilnya lebih bagus dibanding pemesinan menggunakan Natrium Klorida (NaCl) apabila dilihat dari *surface roughness* dan *overcut*. Sedangkan menurut Sudiarso dkk., (2012) mengatakan bahwa benda kerja kuningan memiliki MRR paling besar dibanding benda kerja kuningan dan aluminium 1100. Hasil lain yang didapat dari penelitian ini menunjukkan bahwa benda kerja dengan material *stainless steel* memiliki *overcut* paling kecil dibanding benda kerja dengan bahan kuningan dan aluminium 1100.

2. METODE (Times New Roman 12)

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap dikarenakan percobaan dilakukan secara acak kepada unit-unit eksperimen serta dilakukan dalam skala laboratorium sehingga kondisi lingkungan dianggap homogen. Selain itu penelitian ini juga bertujuan untuk mengetahui kemungkinan adanya hubungan sebab akibat antar variabel dalam penelitian. Banyaknya replikasi didapatkan dengan menggunakan rumus Federer (1995) yang dapat dilihat pada Persamaan berikut.

$$(T - 1) \times (n - 1) \geq 15 \quad (1)$$

Keterangan:

T = jumlah perlakuan
 n = jumlah replikasi

Setiap kombinasi akan dilakukan replikasi sebanyak 3 kali dengan tujuan *repeatability* untuk mengestimasi kesalahan eksperimental, meningkatkan tingkat kepresisian hasil, dan menghindari *degree of freedom* yang bernilai 0 pada saat uji ANOVA.

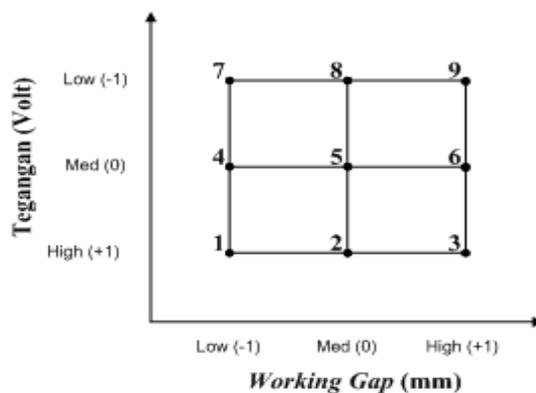
Dari hasil studi pendahuluan diketahui berbagai parameter yang mempengaruhi proses ECM, kemudian untuk lebih memfokuskan objek penelitian, maka digunakan 2 parameter yang akan

diuji pada proses ECM tersebut. Tegangan dan *working gap* menjadi 2 parameter yang diuji. Dikarenakan hanya terdapat 2 parameter yang terlibat selama percobaan, maka pendekatan yang digunakan adalah *full factorial design* dan untuk memastikan kepresisian hasil (*repeatability*) maka dilakukan 3 kali replikasi. Hasil percobaan tersebut akan dicatat sebagai nilai *outcome* dari masing-masing kombinasi. Karena ada 3 kali replikasi, maka nantinya nilai tersebut akan dicari rata-ratanya sebagai respon dari masing-masing kombinasi.

Setelah melakukan eksperimen pendahulu, maka dalam penelitian selanjutnya digunakan 2 faktor berbeda dengan masing-masing faktor menggunakan 3 level berbeda sebagai eksperimen desain yang dijelaskan lebih lanjut pada Tabel 1. Tujuan akhir dari eksperimen ini yaitu mampu mencari waktu optimal dari setiap permesinan dengan melihat nilai maksimal dari nilai *Material Removal Rate* (MRR) dan nilai minimal dari *overcut*. Dengan menggunakan eksperimen desain ini didapatkan 9 jenis perlakuan yang menyatakan hubungan antar 2 faktor eksperimen desain seperti yang dijelaskan oleh Gambar 1.

Tabel 1. Pemberian kode faktor dan level dan level penelitian

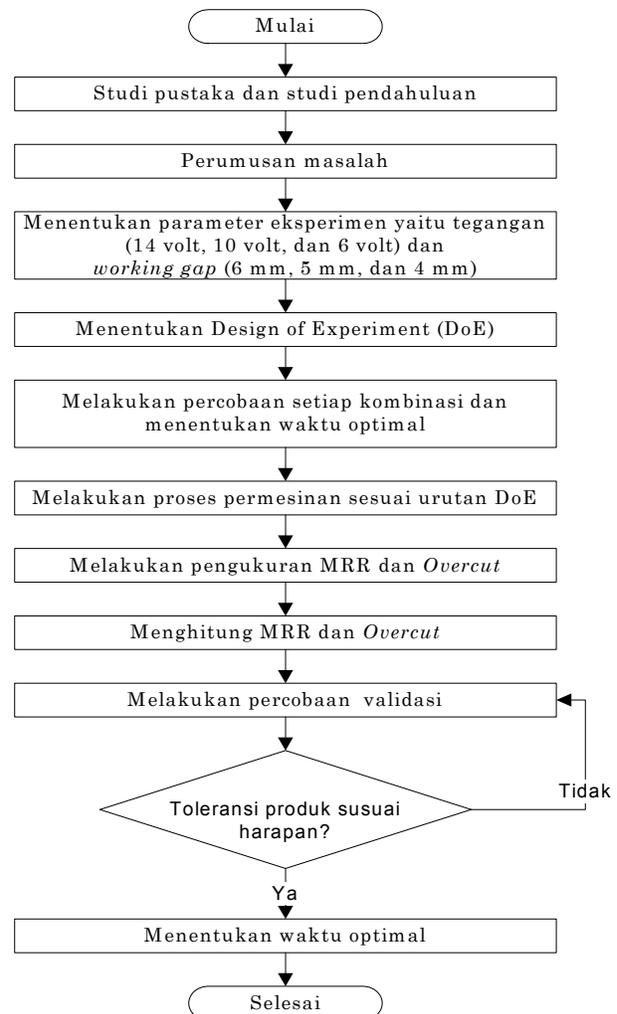
| Faktor | Level | | |
|------------------|-------|----|------|
| | (+1) | 0 | (-1) |
| Tegangan (Volt) | 6 | 10 | 14 |
| Working Gap (mm) | 4 | 5 | 6 |



Gambar 1. Hubungan antar 2 faktor eksperimen desain

Untuk memenuhi asumsi dasar penelitian, menghindari bias, meminimalisasi kesalahan sistematis (*systematical error*), serta memperkecil korelasi antar perlakuan, maka digunakan model Rancangan Acak Lengkap (RAL) tiga replikasi (*blocks*) menggunakan *software Minitab* dengan *constraint* parameter konsentrasi diganti setelah dilakukan tiga kali eksperimen (dengan alasan pertimbangan biaya dan efisiensi penggunaan NaCl). Rancangan penelitian ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tahapan-tahapan penelitian terangkum menjadi sebuah diagram alir penelitian seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Tabel 2. Rancangan penelitian

| No. Run | Blok | Tegangan | Working Gap |
|---------|------|----------|-------------|
| 1 | 1 | -1 | -1 |
| 2 | 1 | -1 | 0 |
| 3 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | 1 | -1 | -1 |
| 5 | 1 | -1 | 0 |
| 6 | 1 | -1 | 1 |
| 7 | 1 | -1 | -1 |
| 8 | 1 | -1 | 0 |
| 9 | 1 | -1 | 1 |
| 10 | 1 | 0 | -1 |
| 11 | 1 | 0 | 0 |
| 12 | 1 | 0 | 1 |
| 13 | 1 | 0 | -1 |
| 14 | 1 | 0 | 0 |
| 15 | 1 | 0 | 1 |
| 16 | 1 | 0 | -1 |
| 17 | 1 | 0 | 0 |
| 18 | 1 | 0 | 1 |
| 19 | 1 | 1 | -1 |
| 20 | 1 | 1 | 0 |
| 21 | 1 | 1 | 1 |
| 22 | 1 | 1 | -1 |
| 23 | 1 | 1 | 0 |
| 24 | 1 | 1 | 1 |
| 25 | 1 | 1 | -1 |
| 26 | 1 | 1 | 0 |
| 27 | 1 | 1 | 1 |

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah urutan percobaan dalam pengambilan data diperoleh maka selanjutnya setiap *run order* bisa dilakukan proses pemesinan, untuk kemudian dianalisis lebih lanjut dengan mengetahui nilai *Material Removal Rate* (MRR), dan *Overcut* (OC) yang dihasilkan.

Analisis MRR

Tabel 3 mendeskripsikan rangkuman hasil perhitungan MRR pada penelitian yang telah dilakukan.

Tabel 3 menunjukkan bahwa rata-rata MRR tertinggi diperoleh pada tegangan 20 Volt dengan *working gap* sebesar 4 mm yang memiliki nilai MRR sebesar $17,949 \times 10^{-4}$ g/s, sementara untuk nilai MRR terendah diperoleh pada tegangan 6 Volt dengan *working gap* 6 mm yaitu sebesar $4,878 \times 10^{-4}$ g/s.

Tabel 3. Rangkuman respon MRR

| Faktor | | Respon MRR (10^{-4} g/s) | | | | Arus Permesinan (A) |
|-----------------|------------------|-----------------------------|--------|--------|-----------|---------------------|
| Tegangan (Volt) | Working Gap (mm) | R1 | R2 | R3 | Rata-rata | |
| 14 | 6 | 15,128 | 13,846 | 14,359 | 14,444 | 8,9 |
| | 5 | 17,188 | 18,750 | 16,250 | 17,396 | |
| | 4 | 18,154 | 16,923 | 18,769 | 17,949 | |
| 10 | 6 | 8,112 | 7,817 | 7,670 | 7,866 | 6,8 |
| | 5 | 9,649 | 9,474 | 10,351 | 9,825 | |
| | 4 | 11,135 | 10,921 | 12,206 | 11,420 | |
| 6 | 6 | 4,962 | 4,794 | 4,878 | 4,878 | 3,4 |
| | 5 | 5,945 | 6,157 | 6,582 | 6,228 | |
| | 4 | 7,702 | 6,566 | 5,934 | 6,734 | |

Nilai MRR dipengaruhi oleh beberapa faktor berat atom/ unsur, valensi, arus yang mengalir, serta waktu permesinan. Setelah nilai MRR dari hasil eksperimen diketahui, maka selanjutnya dilakukan validasi pada hasil pengukuran dengan membandingkan nilai MRR_{eksperimen} dengan MRR_{teoritis}. Hasil perhitungan MRR_{eksperimen} dikatakan valid apabila nilai MRR_{eksperimen} berada di bawah MRR_{teoritis}. Hal ini disebabkan karena perhitungan

MRR_{teoritis} menggunakan efisiensi arus 100% sedangkan pada eksperimen efisiensi arus yang mengalir selama proses permesinan berfluktuasi.

terdiri dari 18% chromium, 8,5% manganese, 5% nickel, dan sisanya adalah iron atau Fe.

Berikut merupakan contoh perhitungan MRR_{teoritis} pada Stainless Steel 204 (SS).

Langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung electrochemical equivalent. Nilai valensi unsur yang lebih dari satu diasumsikan sama dengan dua (2) dan mengikuti perhitungan sebagai berikut.

$$E_a = \left(\frac{A}{Z}\right)_a = \frac{100}{\sum_{i=1}^n x_i \left(\frac{z_i}{A_i}\right)}$$

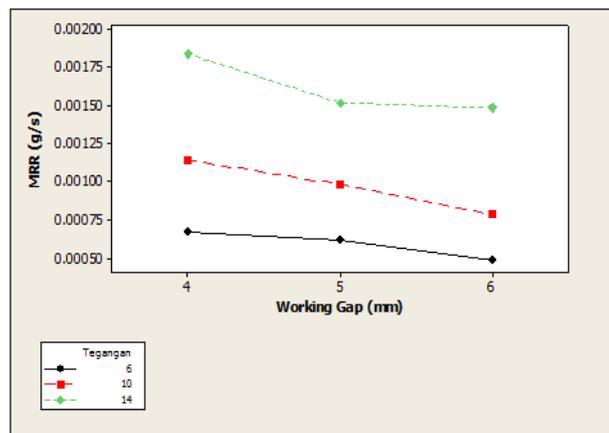
$$E_{SS} = \left(\frac{A}{Z}\right)_{SS} = \frac{100}{\left[X_{Cr} \left(\frac{Z_{Cr}}{A_{Cr}}\right) + X_{Mn} \left(\frac{Z_{Mn}}{A_{Mn}}\right) + X_{Ni} \left(\frac{Z_{Ni}}{A_{Ni}}\right) + X_{Fe} \left(\frac{Z_{Fe}}{A_{Fe}}\right) \right]}$$

$$E_{SS} = \left(\frac{A}{Z}\right)_{SS} = \frac{100}{\left[18 \left(\frac{2}{51,99}\right) + 8,5 \left(\frac{2}{54,94}\right) + 5 \left(\frac{2}{58,7}\right) + 68,5 \left(\frac{2}{55,8}\right) \right]}$$

$$E_{SS} = 27,585 \text{ g.}$$

Tabel 4. Perbandingan MRR_{Eksperimen} dengan MRR_{Teoritis}

| No | Tegangan (Volt) | Arus Permesinan Maksimum (A) | MRR _{Teoritis} Maksimum (×10 ⁻⁴ g/s) | MRR _{Eksperimen} Maksimum (×10 ⁻⁴ g/s) |
|----|-----------------|------------------------------|----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| 1 | 14 | 8,9 | 25,441 | 18,769 |
| 2 | 10 | 6,8 | 19,438 | 12,206 |
| 3 | 6 | 3,4 | 9,719 | 7,702 |



Gambar 3. Grafik perbandingan nilai MRR

Arus maksimal yang mengalir saat permesinan Stainless Steel 204 adalah 8,9 A dan efisiensi arus diasumsikan mencapai 100%, maka nilai maksimum MRR mengikuti perhitungan berikut.

$$MRR = \frac{\eta \cdot I \cdot E_a}{F}$$

$$MRR = \frac{1 \times 8,9 \text{ A} \times 27,585}{96500 \text{ As}}$$

$$MRR = 25,441 \times 10^{-4} \text{ g/s}$$

Adapun rangkuman hasil perhitungan $MRR_{teoritis}$ dan $MRR_{Eksperimen}$ (Tabel 4)

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan hasil bahwa untuk tegangan yang digunakan, nilai $MRR_{eksperimen}$ maksimum kurang dari $MRR_{teoritis}$ maksimum. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai $MRR_{eksperimen}$ sudah valid, karena dalam perhitungan $MRR_{teoritis}$ digunakan asumsi efisiensi arus 100%. Sementara dalam eksperimen, efisiensi arus fluktuatif dan tidak konstan 100%.

Gambar 3 menunjukkan pengaruh antara faktor tegangan yang digunakan dan *working gap* terhadap respon MRR. Untuk setiap tegangan yang digunakan, semakin tinggi tegangan yang digunakan maka MRR akan semakin meningkat sedangkan untuk factor *working gap* yang digunakan dalam proses permesina nilai MRR akan menurun.

Analisis Overcut

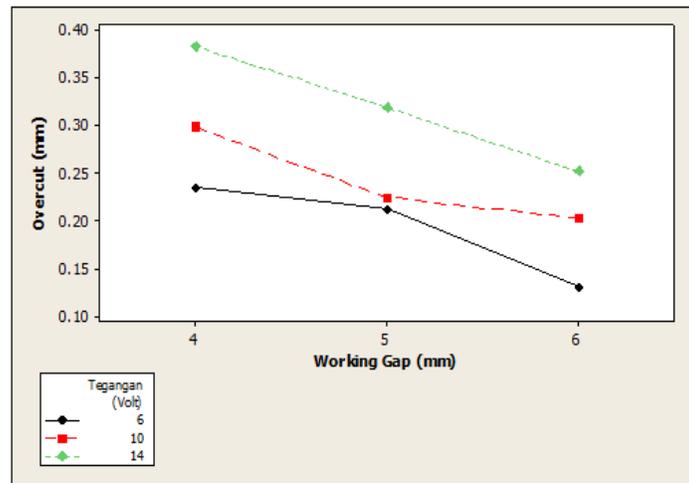
Overcut merupakan salah satu tolak ukur untuk menentukan kualitas hasil permesinan ECM karena

berhubungan langsung dengan tingkat akurasi dimensi dari benda kerja yang dihasilkan. *Overcut* umumnya terjadi karena pengaruh pergerakan elektrolit dan pengisolasian elektrode. Pada penelitian ini, cairan elektrolit disemprotkan tegak lurus tepat di daerah pemakanan dan isolasi dilakukan pada sisi-sisi elektrode yang tidak berhadapan langsung dengan benda kerja untuk memfokuskan aliran arus sehingga dampak *overcut* dapat diminimalisasi. Tabel 5 menunjukkan rangkuman hasil pengukuran *overcut* yang terjadi pada benda kerja selama proses permesinan ECM yang diukur menggunakan mikroskop digital dinolite.

Berdasarkan Tabel 5, nilai rata-rata *overcut* tertinggi diperoleh pada tegangan 14 volt dengan *working gap* 4 mm yaitu sebesar 0,401 mm, sedangkan nilai rata-rata *overcut* terendah diperoleh pada tegangan 6 volt dengan *working gap* 6 mm yaitu sebesar 0,120 mm.

Tabel 5. Rangkuman Respon *Overcut*

| Faktor | | Respon <i>Overcut</i> (mm) | | | | Total Average |
|-----------------|-------------------------|----------------------------|-------|-------|---------|---------------|
| Tegangan (Volt) | <i>Working Gap</i> (mm) | R1 | R2 | R3 | Average | |
| 14 | 6 | 0,225 | 0,224 | 0,305 | 0,251 | 0.317 |
| | 5 | 0,314 | 0,257 | 0,385 | 0,318 | |
| | 4 | 0,401 | 0,345 | 0,401 | 0,382 | |
| 10 | 6 | 0,168 | 0,184 | 0,257 | 0,203 | 0.242 |
| | 5 | 0,240 | 0,191 | 0,243 | 0,225 | |
| | 4 | 0,265 | 0,249 | 0,381 | 0,298 | |
| 6 | 6 | 0,152 | 0,120 | 0,120 | 0,131 | 0.193 |
| | 5 | 0,184 | 0,193 | 0,258 | 0,212 | |
| | 4 | 0,136 | 0,249 | 0,321 | 0,235 | |

Gambar 4. Perbandingan nilai *overcut*

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai *overcut* tertinggi terdapat pada tegangan 14 volt dan nilai *overcut* terendah terdapat pada tegangan 6 volt. Berdasarkan grafik di atas, dapat diketahui bahwa tingkat *working gap* memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap nilai *overcut*. Semakin kecil *working gap* maka semakin besar nilai *overcut*.

Setelah melakukan perhitungan MRR dan *Overcut*, perlu dilakukan validasi. Validasi dilakukan dengan melakukan percobaan kembali dengan parameter yang sama dengan percobaan ketika pengambilan data. Percobaan yang dilakukan dengan mengambil nilai di antara masing-masing faktor, dalam proses validasi ini tegangan yang digunakan yaitu 8 volt dan 12 volt sedangkan *working gap* yang digunakan

yaitu 4,5 mm dan 5,5 mm. Penentuan waktu permesinan optimal dari masing-masing kombinasi dilakukan dengan *trial and error*.

Tabel 6 berikut merupakan rincian pengukuran waktu optimal (riil) hasil validasi.

Setelah melakukan percobaan untuk validasi dengan *trial and error* maka dilakukan pengukuran *overcut* untuk memastikan bahwa hasil validasi ini sesuai dengan standar toleransi yaitu sebesar 0,1 mm. Pengukuran *overcut* dilakukan pada lima bagian yang berbeda pada setiap benda kerja hasil validasi. Tabel 7 berikut merupakan rincian pengukuran *overcut* hasil validasi.

Tabel 6. Rincian pengukuran waktu optimal (riil) hasil validasi

| No | Tegangan (Volt) | Working Gap (mm) | Arus (Ampere) | Waktu Riil (detik) |
|----|-----------------|------------------|---------------|--------------------|
| 1 | 12 | 5,5 | 6,5 | 618 |
| 2 | 12 | 4,5 | 7,5 | 546 |
| 3 | 8 | 5,5 | 3,5 | 648 |
| 4 | 8 | 4,5 | 4,6 | 641 |

Tabel 7. Rincian Pengukuran *Overcut* Hasil Validasi

| Tegangan (Volt) | Working Gap (mm) | Bag 1 (mm) | Bag 2 (mm) | Bag 3 (mm) | Bag 4 (mm) | Bag 5 (mm) | Arus (Ampere) | Rata-rata (mm) |
|-----------------|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------|----------------|
| 12 | 5.5 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.038 | 6.5 | 0.068 |
| 12 | 4.5 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.038 | 7.5 | 0.068 |
| 8 | 5.5 | 0.038 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.038 | 3.5 | 0.061 |
| 8 | 4.5 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 0.076 | 4.6 | 0.076 |

Dari Tabel 7 terlihat bahwa dari setiap percobaan untuk validasi *overcut* telah memenuhi standar toleransi produk yaitu sebesar 0,1 mm. Rata-rata *overcut* untuk masing-masing percobaan adalah masing-masing untuk tegangan 12 volt dengan *working gap* 5,5 mm sebesar 0,068 mm, tegangan 12 volt dengan *working gap* 4,5 mm sebesar 0,068 mm, tegangan 8 volt dengan *working gap* 5,5 mm sebesar 0,061 mm, dan tegangan 8 volt dengan *working gap* 4,5 mm sebesar 0,076 mm.

Berdasarkan hasil validasi diatas diperoleh bahwa *overcut* pada masing-masing bagian yang diukur telah sesuai dengan standar toleransi yaitu 0.1 mm. Dari *trial and error* yang dilakukan pada validasi diperoleh waktu optimal yaitu pada tegangan 12 volt dengan *working gap* 4,5 mm sebesar 546 detik.

4. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan terlihat bahwa tegangan dan *working gap* memberikan pengaruh terhadap penentuan waktu optimal dari masing-masing proses permesinan. Semakin tinggi tegangan (6, 10, dan 14 volt) yang digunakan maka akan semakin cepat waktu permesinan, sedangkan *working gap* memberikan kontribusi yang signifikan pula, semakin tinggi *working gap* (4, 5, dan 6 mm) maka akan semakin banyak waktu permesinan yang dibutuhkan. Berdasarkan hasil validasi diatas diperoleh bahwa *overcut* pada masing-masing bagian yang diukur telah sesuai dengan standar toleransi yaitu 0.1 mm. Berdasarkan *trial and error* yang dilakukan pada validasi diperoleh waktu permesinan optimal yaitu pada tegangan 12 volt dengan *working gap* 4,5 mm sebesar 546 detik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bhattacharyya, B., Mitra, S., dan Boro, K., A., 2002, *Electrochemical Machining: New Possibilities for Micromachining, Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 2, No. 18, pp. 283-289.
- [2] Cirilo, J., Malaquias, E., dan Bacci, M., 2006, *Intervening Variables in Electrochemical Machining, Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 1, No. 179, page 92-96.
- [3] Gu, Y., dan Miki, N., 2009, *Multilayered microfilters Using A Nanoporous PES Membrane and Applicable As The Dialyzer of A Wearable Artificial Kidney*, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 156-163.
- [4] McGeough, J.A., 1988, *Advanced Methods of Machining*, Chapman and Hall Ltd, London.
- [5] Nugroho, Y.B., 2013, *Pembuatan CNC ECM serta Pengujian Permesinan Pada Pembuatan Multi-Layered Microfilter Dengan Benda Kerja SS 204 Terisolasi*, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [6] Prihandana, G.S., Mahardika, M., Nishinaka, Y., Ito, H., Kanno, Y., dan Miki, N., 2013, *Electropolishing of Microchannels and its Application to Dialysis System*, *Procedia CIRP*, Vol. 1, No. 5, pp. 164-168.
- [7] Setianingsih, E., 2014, *Otomasi Pemotongan Koin Material Implan Menggunakan Programmable Logic Controller (PLC) pada Mesin Non-Konvensional Electrochemical Machining (ECM)*, Skripsi, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [8] Sudiarso, A., Ramdhani, N.L.F., dan Mahardika, M., 2012, *Material Removal Rate*

on *Electrochemical Machining of Brass, Stainless Steel, and Aluminium using Brass Electrodes*, *International Multi-Conference on Trends in Engineering and Technology (IMTET 2012)*, pp. 32-35, ISAET, ISBN:978-93-82242-19-2, Bangkok.

[9] Tlustý, G., 2000, *Manufacturing Processes and Equipment*, Prentice-Hall, Inc., New York.

[10] Wolters, H., 2010, *Electrochemical Machining, A non-conventional metal machining technology*, http://www.mikrocentrum.nl/assets/Themadagen/SIG/Electrochemical-Machining-nov_16th_2010.pdf, diakses online pada 15 Oktober 2014.