

PERANCANGAN SISTEM *SLIDING MODE CONTROL* UNTUK JARAK ELEKTRODA PADA *ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING*

Fachrian Zulhar^{*)}, Munawar Agus Riyadi, and Iwan Setiawan

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: fachrian.zulhar@gmail.com

Abstrak

Electrical Discharge Machining (EDM) merupakan proses mengikis benda kerja (*workpiece*) dengan memanfaatkan lompatan listrik (*electrical discharge* atau *spark*) diantara elektroda dan *workpiece* di dalam cairan dielektrik. Untuk mendapatkan hasil pengikisan benda kerja yang maksimal maka jarak (*gap*) antara elektroda dan benda kerja harus sangat dekat, atau berkisar antara 10 μm hingga 100 μm . Jika jarak antara elektroda dan benda kerja kurang dari 10 μm dan lebih dari 100 μm maka tidak akan terjadi lompatan listrik sehingga tidak terjadi pengikisan pada benda kerja. Oleh karena itu, perlu dilakukan sebuah metoda pengaturan jarak antara elektroda dan benda kerja untuk menghasilkan pengikisan yang optimal. Metode kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol *sliding mode*. Hasil perancangan sistem *sliding mode controller* akan dibandingkan sistem dengan kontroler optimasi PID yaitu *Differential Equation*. Dari hasil pengujian menunjukkan pengendalian menggunakan *sliding mode controller* lebih cepat menggerakkan elektroda menuju *workpiece* yaitu 0,0619 detik untuk gap 100 μm , sedangkan jika menggunakan kontroler PID dengan optimasi *Differential Equation* membutuhkan 0,155 detik untuk mencapai gap 100 μm . Setelah dianalisis melalui nilai rata-rata *integral area error* (IAE) kontroler *sliding mode* memiliki nilai yang lebih kecil daripada PID. Nilai rata-rata IAE dengan *sliding mode controller* adalah 0,443, sedangkan dengan kontrol optimasi PID adalah 0,5767.

Kata kunci: gap, electrical discharge machining, sliding mode controller

Abstract

Electrical Discharge Machining (EDM) is the process of eroding the workpiece (workpiece) by electrical discharge or spark between the electrode and the workpiece in a dielectric fluid. To get the maximum erosion of workpiece then the gap between the electrode and the workpiece to be very close, or ranging from 10 μm to 100 μm . If the distance between the electrode and the workpiece is less than 10 μm and over 100 μm there will not happen discharge of electricity so there is no erosion of the workpiece. The control method used is sliding mode control system. Results sliding mode controller system design will be compared the system use PID controller with Differential Equation optimization. From the test results show control use a sliding mode controller is faster moving electrode toward the workpieces requires 0.0619 seconds for a gap of 100 μm , whereas if system use a PID controller with optimization Differential Equation requires 0.155 seconds gap to reach 100 μm . Average value of integral area error (IAE) sliding mode controller has a smaller value than the PID. The average value of IAE with sliding mode controller is 0.443, while the PID controller is 0.5767.

Keywords: gap, electrical discharge machining, sliding mode controller

1. Pendahuluan

Electrical Discharge Machining (EDM) merupakan proses mengikis benda kerja (*workpiece*) dengan memanfaatkan lompatan listrik (*electrical discharge* atau *spark*) diantara elektroda dan *workpiece* di dalam cairan dielektrik [1]. Untuk mendapatkan hasil pengikisan benda kerja yang maksimal maka jarak (*gap*) antara elektroda dan benda kerja harus sangat dekat [2], atau berkisar antara 10 μm hingga 100 μm [3]. Jika jarak antara

elektroda dan benda kerja kurang dari 10 μm dan lebih dari 100 μm maka tidak akan terjadi lompatan listrik sehingga tidak terjadi pengikisan pada benda kerja. Oleh karena itu, perlu dilakukan sebuah metoda pengaturan jarak antara elektroda dan benda kerja untuk menghasilkan pengikisan yang optimal.

Celah antara elektroda dan benda kerja dinyatakan dengan jarak percikan (*spark gap*) yang merupakan posisi elektroda saat terjadi loncatan bunga api listrik pada

benda kerja. Pengaturan jarak elektroda dan benda kerja dapat dilakukan dengan mengatur motor servo sehingga dapat diperoleh sparking gap sesuai yang diinginkan. Beberapa penelitian tentang jarak antara elektroda dan benda kerja bisa menjadi referensi dalam membuat sebuah perancangan jarak antara elektroda dan benda kerja pada EDM. Metode kontrol yang pernah digunakan pada penelitian sebelumnya adalah kontrol PID dengan optimasi *Particle Swarm Optimization* dan *Differential Evolution* [4].

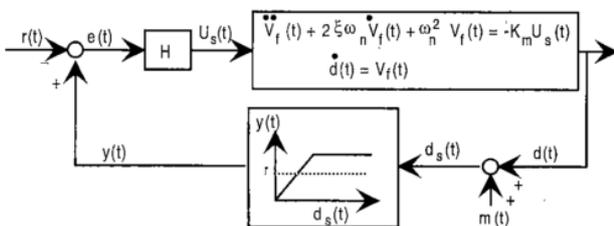
Pada penelitian akan dibahas perancangan simulasi kontroler sliding mode untuk pengaturan jarak antara elektroda dan benda kerja. Model matematika dalam penelitian ini adalah model matematika untuk motor servo dengan leadscrew yang dikembangkan oleh Yih-Fang Chang [5]. Proses EDM memiliki 2 sub sistem utama dalam pemodelannya yaitu model motor servo dan model *gap voltage*.

Sliding Mode Controller (SMC) merupakan sebuah kendali umpan balik pensaklaran berkecepatan tinggi (high speed switching feedback control) yang efektif dan kokoh dalam mengendalikan sistem linear maupun non-linear. Sistem kendali ini kokoh karena menyediakan sebuah metoda perancangan sistem yang tidak peka terhadap ketidakpastian parameter lingkungan dan gangguan dari luar.

2 Metode

2.1 Model *Electrical Discharge Machining*

Pemodelan *Electrical Discharge Machining* (EDM) yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada model yang dibuat oleh Y. F. Chang [5]. Model EDM disimulasikan berdasarkan dua sub sistem utama yaitu sistem servo dan proses EDM.



Gambar 1. Struktur pemodelan *Electrical Discharge Machining*

Persamaan-persamaan yang digunakan pada pemodelan EDM sesuai dengan Gambar 1 adalah sebagai berikut

- 1) $y(t) = Ld_s(t)$
- 2) $e(t) = y(t) - r(t)$
- 3) $U_s(t) = H(t) e(t)$
- 4) $\ddot{V}_f(t) + 2\xi\omega_n\dot{V}_f(t) + \omega_n^2 V_f(t) = -K_m U_s(t)$
- 5) $\dot{d}(t) = V_f(t)$
- 6) $d_s(t) = d(t) + m(t)$

Nilai parameter dari persamaan di atas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Parameter-parameter model sistem *spark ignition engine*

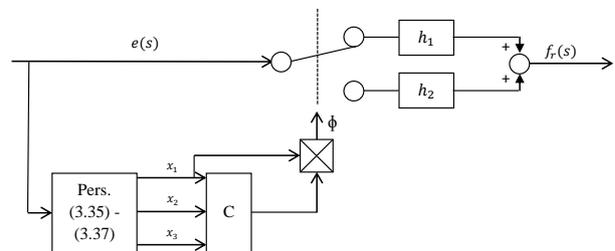
Parameter	Keterangan	Nilai Parameter
ζ	Redaman sistem servo	0,2
ω_n	Frekuensi alami sistem servo	66 rad/s
K_m	Konstanta sistem servo	43.560 rad ² μm/s ³
L	Gain karakteristik pulsa	0,059 V/μm
r	Referensi (setpoint)	5 V
V_{min}	Tegangan minimal	0 V
V_{max}	Tegangan maksimal	10 V

2.2 *Sliding Mode Controller*

Perancangan sistem *sliding mode controller* secara garis besar dinyatakan dalam persamaan berikut.

$$H = \begin{cases} h_1 \text{ ketika } x_1(t)[C_{11}x_1(t) + C_{12}x_2(t) + x_3(t)] \geq 0 \\ h_2 \text{ ketika } x_1(t)[C_{11}x_1(t) + C_{12}x_2(t) + x_3(t)] < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Gambar 2 merupakan implementasi dari persamaan 7 pada *Simulink* dengan pensaklaran gain.



Gambar 2. Blok diagram *sliding mode controller*

3. Hasil dan Analisis

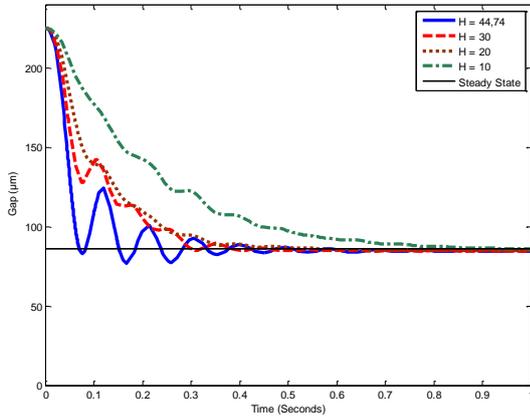
Bab ini akan membahas simulasi dan analisis hasil pengujian dari pemodelan sistem EDM *sliding mode controller*. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui performa sistem *sliding mode controller* yang dibandingkan dengan sistem kontrol PID terhadap posisi awal elektroda.

3.1 Respon pengujian *Sliding Mode Controller*

$$\dot{d}(t) = V_f(t) \quad (3.5)$$

Dalam pengujian diberikan masukan sistem berupa sinyal step dengan nilai referensi tegangan 5 V. Menurut syarat

kestabilan Routh-Hurwitz nilai gain K adalah $0 < K < 44,74$. Nilai maksimal gain K yaitu 44,74 maka pengujian untuk mendapatkan nilai H^+ menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $H=44,74$, $H=30$, $H=20$ dan $H=10$. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai H^+ tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai gain H^+ dengan hasil respon sistem yang paling baik.



Gambar 3. Pengujian gain positif

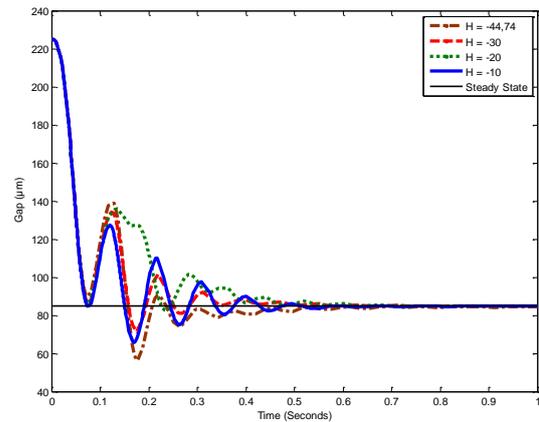
Respon sistem jika menggunakan gain $H=44,74$ akan menghasilkan respon yang cepat akan tetapi gerakan elektroda berosilasi seperti pada Gambar 3.

Tabel 2. Perbandingan respon gain H^+ sliding mode controller

Gain	$H = 44,74$	$H = 30$	$H = 20$	$H = 10$
Gap $100 \mu\text{m}$ (detik)	0,0616	0,214	0,241	0,441
Overshoot (μm)	72,6	-	-	-
IAE	0,4563	0,7073	0,8368	1,571

Tabel 2 menunjukkan jika menggunakan gain $H=30$, $H=20$ dan $H=10$ respon sistem cenderung smooth tanpa overshoot yang signifikan. Meskipun jika menggunakan nilai gain $H=44,74$ menghasilkan nilai IAE yang terkecil yaitu 0,4563, akan tetapi gerakan elektroda berosilasi.

Pengujian selanjutnya adalah menentukan nilai gain H^- menggunakan trial and error dengan nilai $H= -44,74$, $H= -30$, $H= -20$ dan $H= -10$.



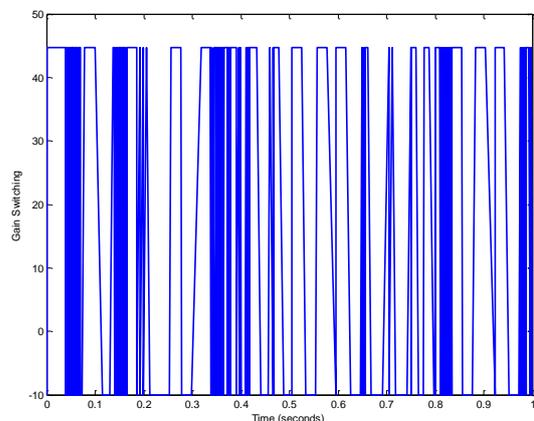
Gambar 4. Pengujian gain negatif

Nilai gain H^- dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan Gambar 4.

Tabel 3. Perbandingan respon gain H^- sliding mode controller

	$H = -44,74$	$H = -30$	$H = -20$	$H = -10$
Gap $100 \mu\text{m}$ (detik)	0,0628	0,062	0,0619	0,0617
Overshoot (μm)	59	66,2	76,2	85,1
Undershoot (μm)	152	141	136	124
IAE	1,169	0,5823	0,623	0,4854

Tabel 3 menunjukkan Nilai gain $H= -10$ menghasilkan respon yang paling baik meskipun gerakan elektroda berosilasi akan tetapi tidak terlalu signifikan dan membutuhkan 0,0617 detik untuk mencapai gap $100 \mu\text{m}$. Elektroda bergerak turun sejauh $65,8 \mu\text{m}$ pada 0,17 detik dan bergerak naik sejauh $127 \mu\text{m}$ pada 0,12 detik.

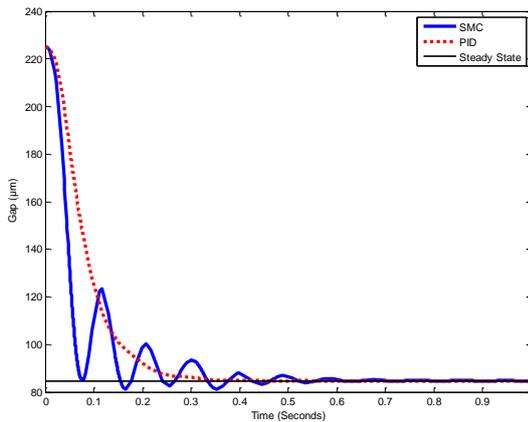


Gambar 5. Gain Switching

Gambar 5 merupakan gain *switching* sesuai dengan persamaan 7. Pensaklaran gain $H^+=44,74$ dan $H^- = -10$ terjadi selama pengujian berlangsung.

3.2 Pengujian *Electrical Discharge Machining*

Berikut ini merupakan pengujian untuk mendapatkan respon *gap*, arus listrik, medan listrik dan *gap voltage* pada saat proses pemesinan berlangsung.



Gambar 6. Perbandingan respon gap

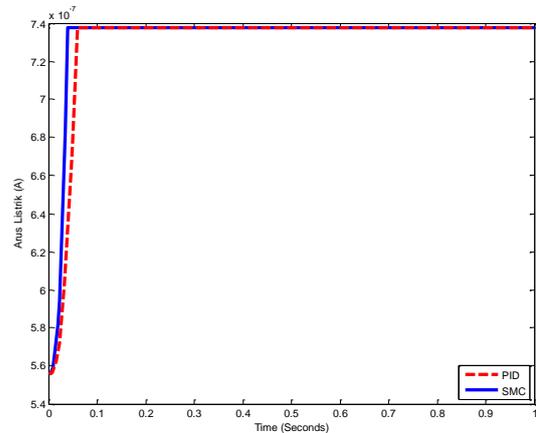
Jika sistem menggunakan kontrol optimasi PID menghasilkan gerakan elektroda yang smooth tanpa adanya osilasi seperti pada Gambar 6.

Tabel 4. Perbandingan respon gap EDM

Kontroler	PID Optimal	SMC
Gap 100 µm (detik)	0,155	0,0619
Undershoot (µm)	-	124
Overshoot (µm)	-	81,3

Tabel 4 menunjukkan respon kontroler SMC memiliki selisih waktu 0,0931 detik lebih cepat dibanding kontrol optimasi PID untuk menghasilkan gap 100

µm.



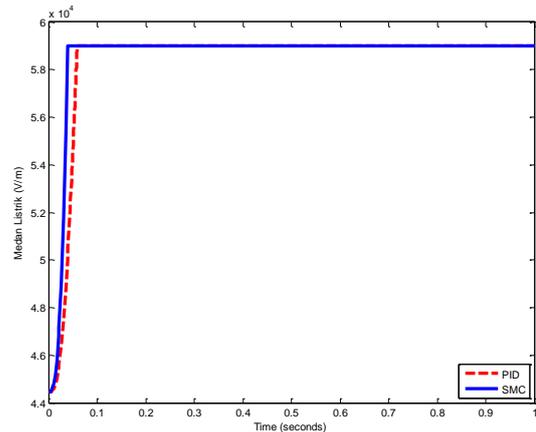
Gambar 7. Perbandingan respon arus listrik

Sistem EDM dengan kontrol optimasi PID mengalirkan arus listrik lebih lambat dibandingkan dengan sliding mode controller sesuai dengan Gambar 7.

Tabel 5. Perbandingan respon arus listrik

Kontroler	PID Optimal	SMC
Arus listrik (A)	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$2,46 \cdot 10^{-3}$
Rise Time (detik)	0,0591	0,0388

Tabel 5 menunjukkan selisih 0,0203 detik lebih cepat jika sistem menggunakan *sliding mode controller* karena respon gap yang paling cepat.



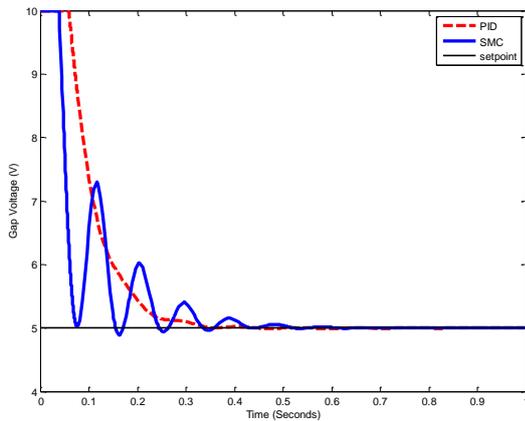
Gambar 8. Perbandingan respon medan listrik

Dengan kontrol optimasi PID menghasilkan respon medan listrik yang berbeda dengan sliding mode controller yang ditunjukkan pada Gambar 8.

Tabel 6. Perbandingan respon medan listrik

Kontroler	PID Optimal	SMC
Medan listrik (V/ μm)	$5,9.10^4$	$5,9.10^4$
Rise Time (detik)	0,0591	0,0388

Tabel 6 menunjukkan sistem menggunakan *sliding mode controller* memiliki respon medan listrik 0,0203 detik lebih cepat dibandingkan kontrol optimasi PID.



Gambar 9. Respon Gap Voltage

Respon *gap voltage* pada EDM yang menggunakan *sliding mode controller* lebih cepat terjadinya *voltage drop* seperti pada Gambar 9.

Tabel 7. Perbandingan respon *gap voltage*

Kontroler	PID Optimal	SMC
Waktu tunda ionisasi (detik)	0,0591	0,0388
Rise Time (detik)	0,194	0,155
Overshoot (V)	-	4,8
Undershoot (V)	-	7,29
IAE	0,5767	0,443

Tabel 7 menunjukkan Kontroler *sliding mode controller* memiliki selisih respon waktu tunda 0,0203 lebih cepat dibanding PID meskipun menghasilkan respon *gap voltage* yang berosilasi.

3.3 Respon Pengujian Sistem EDM Dengan Variasi Posisi Awal Elektroda

Pengujian sistem Electrical Discharge Machining meliputi respon *gap*, respon arus listrik, respon medan listrik, dan respon *gap voltage* dengan variasi posisi awal elektroda yaitu 125 μm dan 300 μm .

Tabel 8. Perbandingan respon *gap* dengan variasi posisi awal elektroda

Posisi Awal	125 μm		300 μm	
	PID Optimal	SMC	PID Optimal	SMC
Gap 100 μm (detik)	0,0546	0,0435	0,208	0,15
Undershoot (μm)	93,9	95,4	88,7	98,3
Overshoot (μm)	82,1	8,38	83,1	81,5

Keseluruhan pengujian menghasilkan respon steady state jarak elektroda terhadap benda kerja yaitu 84,7 μm . Tabel 8 menunjukkan gerakan elektroda menuju benda kerja dengan kontrol optimasi PID dan *sliding mode controller* dengan variasi posisi awal elektroda 125 μm dan 300 μm .

Posisi awal elektroda 125 μm jika menggunakan kontrol optimasi PID membutuhkan waktu 0,0546 detik untuk mencapai *gap* 100 μm , sedangkan jika menggunakan *sliding mode controller* membutuhkan 0,0435 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Kontrol optimasi PID menghasilkan respon *gap* dengan *undershoot* 93,9 μm pada 0,14 detik dan *overshoot* 82,1 μm pada 0,202 detik. *Sliding mode controller* menghasilkan respon *gap* dengan *undershoot* 95,4 μm pada 0,105 detik dan *overshoot* 83,8 μm pada 0,337 detik.

Posisi awal elektroda 300 μm jika menggunakan kontrol optimasi PID membutuhkan waktu 0,208 detik untuk mencapai *gap* 100 μm , sedangkan jika menggunakan *sliding mode controller* membutuhkan 0,15 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Dengan kontrol optimasi PID menghasilkan respon *gap* dengan *undershoot* 88,7 μm pada 0,37 detik dan *overshoot* 83,1 μm pada 0,437 detik. Dengan *sliding mode controller* menghasilkan respon *gap* dengan *undershoot* 98,3 μm pada 0,36 detik.

Tabel 9. Perbandingan respon arus listrik dengan variasi posisi awal elektroda

Posisi Awal	125 μm		300 μm	
	PID Optimal	SMC	PID Optimal	SMC
Arus listrik (A)	$2,46.10^{-3}$	$2,46.10^{-3}$	$2,46.10^{-3}$	$2,46.10^{-3}$
Rise Time (detik)	0	0	0,137	0,0616

Pengujian arus listrik yang mengalir dari elektroda menuju benda kerja memiliki karakteristik respon seperti pada Tabel 9. Arus listrik yang mengalir dari elektroda menuju benda kerja yaitu $2,46.10^{-3}$ A. Hal tersebut terjadi karena jarak elektroda dan benda kerja yang sangat dekat sehingga rangkaian listrik pada sistem EDM menjadi tertutup.

Tabel 9. Perbandingan respon medan listrik dengan variasi posisi awal elektroda

Posisi Awal	125 μm		300 μm	
	PID Optimal	SMC	PID Optimal	SMC
Medan listrik (V/ μm)	$5,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$	$5,9 \cdot 10^4$
Rise Time (detik)	0	0	0,137	0,0616

Pengujian medan listrik pada cairan dielektrik memiliki karakteristik respon seperti pada Tabel 9. Medan listrik yang timbul di antara elektroda dan benda kerja yaitu $5,9 \cdot 10^4$ V/ μm .

Tabel 10. Perbandingan respon gap voltage dengan variasi posisi awal elektroda

Posisi Awal	125 μm		300 μm	
	PID Optimal	SMC	PID Optimal	SMC
Waktu tunda ionisasi (detik)	0	0	0,137	0,0615
Rise Time (detik)	0,179	0,228	0,311	0,169
Overshoot (V)	4,84	4,95	4,9	4,81
Undershoot (V)	5,54	5,63	5,23	5,8
IAE	0,1739	0,1517	0,9653	0,5852

Keseluruhan pengujian menghasilkan respon gap voltage yang berbeda antara posisi elektroda 125 μm dan 300 μm yang ditunjukkan pada Tabel 10.

Posisi awal elektroda 125 μm jika menggunakan kontrol optimasi PID maupun sliding mode controller terjadi voltage drop pada $t = 0$ detik. Respon gap voltage dengan kontrol optimasi PID membutuhkan 0,179 detik untuk mencapai tegangan referensi 5 V, sedangkan jika menggunakan sliding mode controller membutuhkan waktu 0,228 detik untuk mencapai tegangan referensi. Kontrol optimasi PID menghasilkan respon gap voltage dengan undershoot 5,54 V pada 0,14 detik dan overshoot 4,84 V pada 0,202 detik. Sliding mode controller menghasilkan respon gap voltage dengan undershoot 5,63 V pada 0,105 detik dan overshoot 5,8 V pada 0,22 detik.

Terdapat waktu tunda ionisasi 0,137 detik jika sistem menggunakan kontrol optimasi PID dan 0,0615 detik jika sistem menggunakan sliding mode controller. Respon gap voltage dengan kontrol optimasi PID membutuhkan 0,311 detik untuk mencapai tegangan referensi 5 V, sedangkan jika menggunakan sliding mode controller membutuhkan

waktu 0,169 detik untuk mencapai tegangan referensi. Kontrol optimasi PID menghasilkan respon gap voltage dengan undershoot 5,23 V pada 0,369 detik dan overshoot 4,9 V pada 0,43 detik. Sliding mode controller menghasilkan respon gap voltage dengan undershoot 5,8 V pada 0,22 detik dan overshoot 4,81 V pada 0,22 detik. Sliding mode controller menghasilkan nilai IAE lebih kecil dibandingkan dengan kontrol optimasi PID dengan nilai 0,1517 dengan posisi awal elektroda 125 μm dan 0,5852 dengan posisi awal elektroda 300 μm .

4. Kesimpulan

Pengujian sistem EDM dengan mengontrol gap atau jarak elektroda terhadap benda kerja mempengaruhi hasil respon medan listrik, arus listrik dan gap voltage. Sliding mode controller dengan nilai gain $H^+ = 44,74$ dan $H^- = -10$ menghasilkan respon gap paling baik dibanding dengan nilai empiris yang lain. Pengujian sistem secara keseluruhan untuk sistem dengan kontroler PID dapat mempercepat respon gap yaitu 0,155 detik untuk mencapai keadaan steady state 84,7 μm . Sedangkan sistem dengan sliding mode controller membutuhkan waktu 0,0619 detik untuk mencapai keadaan steady state 84,7 μm . Pengujian sistem secara keseluruhan dengan kontroler PID maupun sliding mode controller adalah baik. Respon sistem dengan kontrol sliding mode controller memiliki hasil yang lebih cepat jika dibandingkan dengan sistem menggunakan kontroler PID meskipun gerakan elektroda beresilasi. Sistem dengan kontrol sliding mode controller memiliki nilai IAE terkecil yaitu 0,443 dibandingkan sistem dengan PID memiliki nilai IAE sebesar 0,5767. Posisi awal elektroda 125 μm menyebabkan terjadinya proses discharge saat $t = 0$ detik karena jarak elektroda terhadap benda kerja sangat dekat, sedangkan jika posisi awal elektroda 300 μm menyebabkan bertambahnya waktu tunda proses discharge.

Referensi

- [1] E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*. USA, 2001.
- [2] Y. F. Chang, "Mixed H_2/H_∞ Optimization Approach to Gap Control on EDM," *Control Eng. Pract.*, vol. 13, no. 1, pp. 95–104, 2005.
- [3] A. Yahya and C. D. Manning, "Modelling, Simulation and Controller Design for Electro Discharge Machine System," *System*, no. 2, pp. 21–23, 2003.
- [4] T. Andromeda, A. Yahya, S. Samion, A. Baharom, and N. L. Hashim, "Differential Evolution For Optimization of PID Gain in Electrical Discharge Machining Control System," *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, vol. 37, no. 3, pp. 293–301, 2013.
- [5] Y. F. Chang, "VSS Controller Design for Gap Control of EDM," *JSME Int. J.*, vol. 45, pp. 712–

721, 2002.

- [6] B. Fleming, *The EDM How-To Book*. Fleming Publications, 1990.
- [7] R. A. DeCarlo, S. H. Zak, and G. P. Matthews, "Variable Structure Control of Nonlinear Multivariable Systems : A Tutorial," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 3, pp. 212–232, 1988.
- [8] C. Wong and S. Chang, "Parameter Selection in the Sliding Mode Control Design Using Genetic Algorithms," *Science (80-.)*, vol. 1, no. 2, pp. 115–122, 1998.
- [9] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. USA: Prentice Hall, 2010.
- [10] Honeywell, "Dielectric Constant Table," 2011.