

KONTROL POSISI MENGGUNAKAN FUZZY LOGIC UNTUK JARAK ELEKTRODA PADA ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

Muhammad Nadzir Shalahuddin^{*)}, Trias Andromeda dan Iwan Setiawan

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

^{*)}E-mail: mundzirs.co@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 dua variasi sistem kontrol fuzzy logic controller (FLC) yaitu: logika fuzzy matriks 3x3 dan fuzzy matriks 5x5. Hasil perancangan kedua sistem akan dibandingkan untuk mengetahui keandalannya pada sistem EDM. Dari hasil pengujian menunjukkan pengendalian menggunakan logika fuzzy matriks 5x5 lebih cepat dan lebih stabil menggerakkan elektroda menuju workpiece. Uji coba dilakukan pada kondisi gap awal 225 μm serta uji coba setpoint sistem dengan nilai setpoint 2V, 3,5V, dan 5V.

Kata kunci: gap, electrical discharge machining, logika fuzzy matriks 3x3, fuzzy matriks 5x5

Abstract

Electrical Discharge Machining (EDM) is a process of eroding workpieces by utilizing electrical discharges or sparks between electrodes and workpieces in dielectric fluid. To get the maximum erosion of the workpiece, the distance (gap) between the electrodes and the workpiece must 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 more than 100 μm then there will be no electric jump so no erosion occurs on the workpiece. Therefore, a method of setting the distance between the electrode and the workpiece is required to produce an optimal erosion. Control method used is two variation of control system fuzzy logic controller (FLC) that is: 3x3 matrix fuzzy logic and 5x5 matrix fuzzy logic. The design results of the two systems will be compared to find out the reliability of the EDM system. From the test results showed that the control using fuzzy logic 5x5 matrix faster and stab moving the electrode to the workpiece. The trials were carried out at the initial gap conditions of 225 μm and the system setpoint test with 2V, 3.5V, and 5V setpoint values.

Keywords: gap, electrical discharge machining, 3x3 matrix fuzzy logic, 5x5 matrix fuzzy logic

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

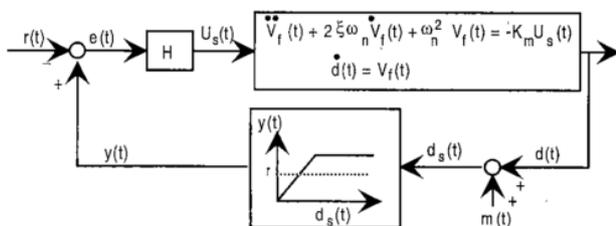
yang optimal. Celah antara elektroda dan benda kerja dinyatakan dengan jarak percikan (sparking gap) yang merupakan posisi elektroda saat terjadi loncatan bunga api listrik pada benda kerja. Pengaturan jarak elektroda dan benda kerja dapat dilakukan dengan mengatur motor servo sehingga dapat diperoleh 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 fuzzy matriks 3X3 dan fuzzy matriks 5X5 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*. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) merupakan suatu logika yang memiliki nilai kekaburan atau kesamaran (*fuzziness*) antara benar atau salah. Dalam *fuzzy* dikenal derajat keanggotaan yang memiliki rentang nilai 0 hingga 1. Berbeda dengan logika digital yang hanya memiliki dua nilai yaitu 1 atau 0. Logika *fuzzy* digunakan untuk menerjemahkan suatu besaran yang diekspresikan menggunakan bahasa (*linguistic*), misalkan cepat, lambat, dan berhenti. Logika *fuzzy* adalah suatu cara tepat untuk memetakan suatu ruang *input* kedalam suatu ruang *output* yang dinyatakan kedalam derajat keanggotaan. Oleh sebab itu sesuatu dapat dikatakan sebagian benar dan sebagian salah pada waktu yang sama. Hal ini memungkinkan logika *fuzzy* mampu menalar suatu proses secara bahasa (*linguistic*), sehingga dalam perancangan kendali tidak memerlukan persamaan matematis.

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

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

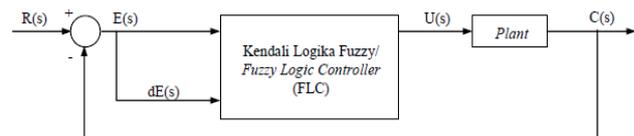
Nilai parameter dari persamaan di atas dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

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. Kontrol Logika Fuzzy

Dalam pendekatan kontrol berbasis logika fuzzy, masukan, keluaran, dan tanggapan kontrol dispesifikasikan sesuai dengan model matematika *plant* terhadap sistem kontrol yang pernah diterapkan terhadap *plant* tersebut. Prinsip dalam mendesain kontrol logika fuzzy adalah dengan mengatur parameter fungsi keanggotaan dan kaidah atur fuzzy [6]. Pada Gambar 2 memperlihatkan sistem kontrol kalang tertutup dengan pengendali logika fuzzy.



Gambar 2. Kontrol logika fuzzy pada sistem kalang tertutup.

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 Sistem Fuzzy Logic Controller Matriks 3X3

Dalam pengujian diberikan masukan sistem berupa sinyal step dengan nilai referensi tegangan 2V, 3,5V, dan 5 V dengan tuning variabel sinyal *output Fuzzy*. Pada pengujian kondisi jarak (*gap*) awal elektroda berada pada *gap* 225 μm di atas workpiece.

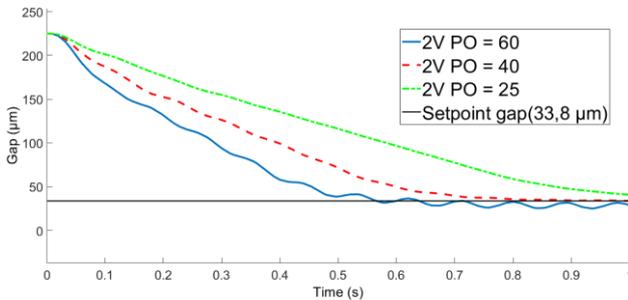
A. Tuning sinyal *output* variabel positif (PO)

Pengujian sinyal *output* variabel positif (PO) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $PO = 60$, $PO = 40$, dan $PO = 25$ pada konsisi sinyal *output* variabel negatif (NE) bernilai -8. Nilai sinyal *output* variabel positif (PO) menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke bawah. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal *output* variabel positif (PO) tersebut

yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal *output* variabel positif dengan hasil respon sistem yang baik.

- Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal *output* variabel positif.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat akan tetapi gerakan elektroda berosilasi seperti pada Gambar 3. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ yang dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

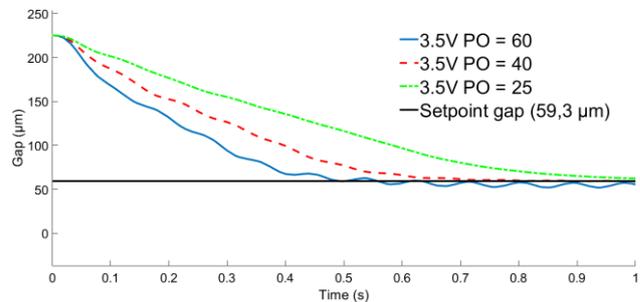
Tabel 2. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel positif.

Variabel Positif	$PO = 60$	$PO = 40$	$PO = 25$
Gap 100 μm (detik)	0,295	0,4	0,596
Overshoot (μm)	25,1	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif dengan nilai $PO = 60$, $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 2. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 33,8 μm . Sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif yang lain yaitu 0,295 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Akan tetapi jika menggunakan nilai $PO = 60$ menghasilkan gerakan elektroda yang berosilasi. Jika menggunakan nilai $PO = 60$ terjadi gerakan elektroda yang *overshoot* sejauh 25,1 μm pada 0,935 detik. Besar sinyal *output* variabel positif nilai $PO = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif nilai $PO = 25$ yaitu 0,4 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif nilai $PO = 25$ membutuhkan 0,596 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif nilai $PO = 40$ dan $PO = 25$ gerak elektroda yang dihasilkan tidak mengalami *overshoot*. Kedua respon sistem tersebut cenderung *smooth* tanpa *overshoot* yang signifikan.

- Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal *output* variabel positif.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat akan tetapi gerakan elektroda berosilasi seperti pada Gambar 4. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ yang dapat dilihat pada Tabel 3 berikut.

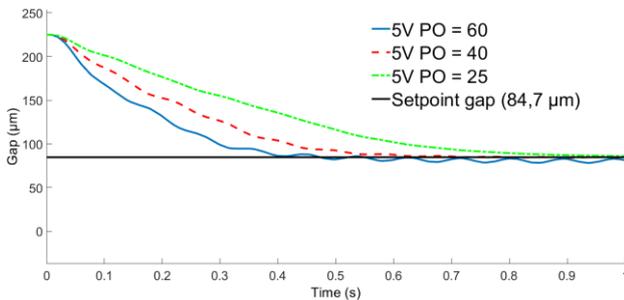
Tabel 3. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel positif.

Variabel Positif	$PO = 60$	$PO = 40$	$PO = 25$
Gap 100 μm (detik)	0,295	0,4	0,596
Overshoot (μm)	51,8	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif dengan nilai $PO = 60$, $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 3. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 59,3 μm . Sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif yang lain yaitu 0,295 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Akan tetapi jika menggunakan variabel positif $PO = 60$ menghasilkan gerakan elektroda yang berosilasi. Jika menggunakan variabel positif $PO = 60$ terjadi gerakan elektroda yang *overshoot* sejauh 51,8 μm pada 0,935 detik. Besar sinyal *output* variabel positif $PO = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif $PO = 25$ yaitu 0,4 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif $PO = 25$ membutuhkan 0,596 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif $PO = 40$ dan $PO = 25$ gerak elektroda yang dihasilkan tidak mengalami *overshoot*. Kedua respon sistem tersebut cenderung *smooth* tanpa *overshoot* yang signifikan.

- Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel positif.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat akan tetapi gerakan elektroda beresilasi seperti pada Gambar 3.3. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ yang dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel positif.

Variabel Positif	$PO = 60$	$PO = 40$	$PO = 25$
Gap 100 μm (detik)	0,3	0,42	0,62
Overshoot (μm)	78,1	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif dengan nilai $PO = 60$, $PO = 40$, dan $PO = 25$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 4. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 84,7 μm . Sinyal *output* variabel positif $PO = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif yang lain yaitu 0,295 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Akan tetapi jika menggunakan variabel positif $PO = 60$ menghasilkan gerakan elektroda yang beresilasi. Jika menggunakan variabel positif $PO = 60$ terjadi gerakan elektroda yang *overshoot* sejauh 78,1 μm pada 0,935 detik. Besar sinyal *output* variabel positif $PO = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif $PO = 25$ yaitu 0,4 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif $PO = 25$ membutuhkan 0,596 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif $PO = 40$ dan $PO = 25$ gerak elektroda yang dihasilkan tidak mengalami *overshoot*. Kedua respon sistem tersebut cenderung *smooth* tanpa *overshoot* yang signifikan. Dari pengujian sinyal *output* variabel positif (PO) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $PO = 60$, $PO = 40$, dan $PO = 25$ pada konsisi sinyal *output* variabel negatif (NE) bernilai -8

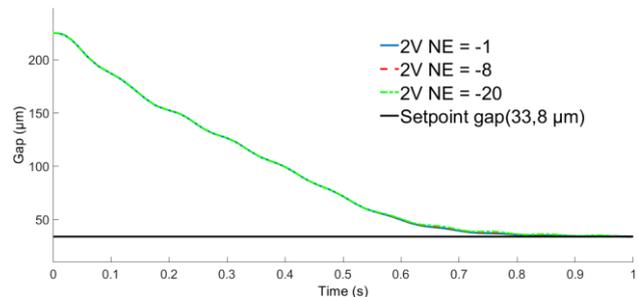
diperoleh nilai sinyal *output* variabel positif (PO) dengan hasil respon sistem yang paling baik adalah $PO = 40$.

B. Tuning sinyal output variabel negatif (NE)

Pengujian sinyal *output* variabel negatif (NE) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $NE = -1$, $NE = -8$, dan $NE = -20$ pada konsisi sinyal *output* variabel positif (PO) bernilai 40. Nilai sinyal *output* variabel negatif menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke atas menjauhi *workpiece*. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal *output* variabel negatif tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal *output* variabel negatif dengan hasil respon sistem yang baik.

- Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 6.



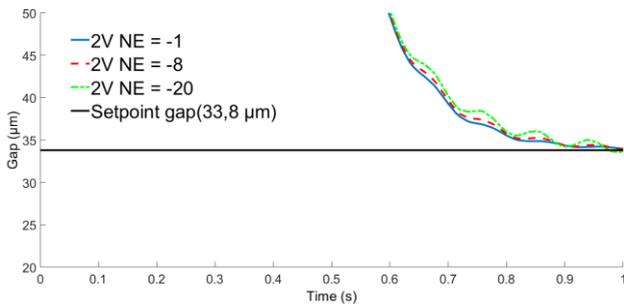
Gambar 6. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal *output* negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda. Ketiga variasi sinyal *output* negatif memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif	$NE = -1$	$NE = -8$	$NE = -20$
Gap 100 μm (detik)	0,4	0,4	0,4
Overshoot (μm)	-	-	33,5

Pengujian sinyal *output* variabel negatif memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif tidak memiliki *overshoot* yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,4 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Namun bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif berbeda. Gambar 7 menunjukkan respon sistem dengan variasi sinyal *output* variabel negatif dengan skala range lebih kecil.

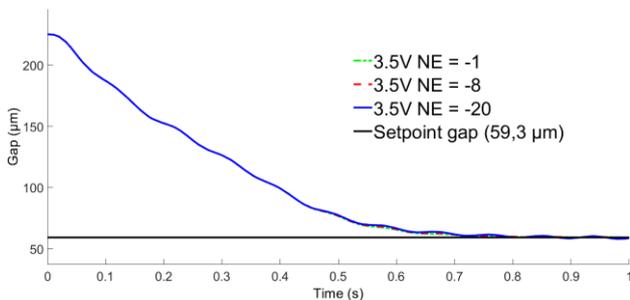


Gambar 7. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal *output* variabel negatif (NE) $NE = -1$ menghasilkan respon lebih *smooth* daripada sinyal *output* variabel negatif $NE = -8$ dan sinyal *output* variabel negatif $NE = -8$ menghasilkan respon lebih *smooth* daripada besar sinyal *output* variabel negatif $NE = -20$. Sehingga gerakan elektroda yang dihasilkan sinyal *output* variabel negatif $NE = -1$ dan $NE = -8$ tidak mengalami *overshoot* dari *gap steady state* 33,8 μm , sedangkan sinyal *output* variabel negatif $NE = -20$ menghasilkan respon sistem dengan gerakan elektroda berosilasi. *Overshoot* tertinggi tercatat 33,5 μm pada 0,993 detik.

- Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

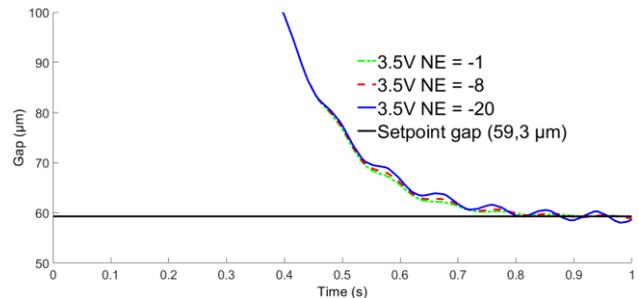
Sinyal *output* negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan Gambar 8. Ketiga variasi sinyal *output* negatif memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel negatif.

Variabel Negatif	$NE = -1$	$NE = -8$	$NE = -20$
Gap 100 μm (detik)	0,4	0,4	0,4
<i>Overshoot</i> (μm)	-	-	58,03

Pengujian sinyal *output* variabel negatif memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif tidak memiliki *overshoot* yang

menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,4 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Namun bila kita perjas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif berbeda. Gambar 9 menunjukkan respon sistem dengan variasi sinyal *output* variabel negatif dengan skala range lebih kecil.

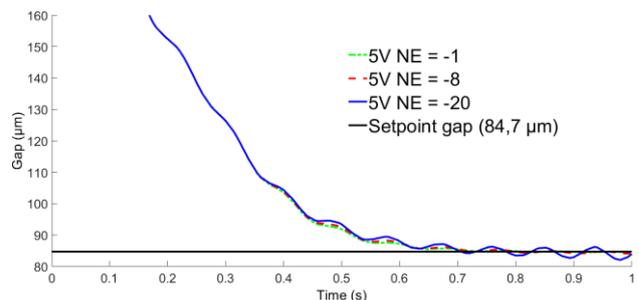


Gambar 9. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal *output* variabel negatif (NE) $NE = -1$ menghasilkan respon lebih *smooth* daripada sinyal *output* variabel negatif $NE = -8$ dan sinyal *output* variabel negatif $NE = -8$ menghasilkan respon lebih *smooth* daripada besar sinyal *output* variabel negatif $NE = -20$. Sehingga gerakan elektroda yang dihasilkan sinyal *output* variabel negatif $NE = -1$ dan $NE = -8$ tidak mengalami *overshoot* dari *gap steady state* 33,8 μm , sedangkan sinyal *output* variabel negatif $NE = -20$ menghasilkan respon sistem dengan gerakan elektroda berosilasi. *Overshoot* tertinggi tercatat 33,5 μm pada 0,98 detik.

- Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 10.



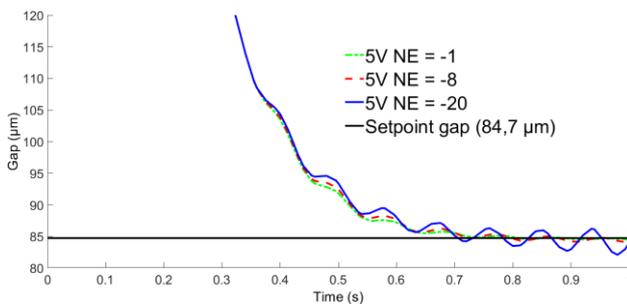
Gambar 10. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal *output* negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan Gambar 10. Ketiga variasi sinyal *output* negatif memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif	NE = -1	NE = -8	NE = -20
Gap 100 μm (detik)	0,42	0,42	0,43
Overshoot (μm)	84,4	84	82

Pengujian sinyal output variabel negatif memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif memiliki overshoot yang menghasilkan gerakan elektroda berosilasi. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif masing-masing memiliki kecepatan waktu yang berbeda untuk mencapai gap 100 μm . Pada besar sinyal output variabel negatif $NE = -1$ dan $NE = -8$ memerlukan 0,42 detik untuk mencapai gap 100 μm . Untuk besar sinyal output variabel negatif $NE = -20$ memerlukan 0,43 detik untuk mencapai gap 100 μm . Gambar lebih jelas dengan range yang lebih kecil untuk mengamati respon sistem ketiga variasi sinyal output variabel negatif yang berbeda. Gambar 11 menunjukkan respon sistem dengan variasi sinyal output variabel negatif dengan skala range lebih kecil.



Gambar 11. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal output variabel negatif (NE) $NE = -1$ menghasilkan respon lebih smooth daripada sinyal output variabel negatif $NE = -8$ dan sinyal output variabel negatif $NE = -8$ menghasilkan respon lebih smooth daripada besar sinyal output variabel negatif $NE = -20$. Namun gerakan elektroda yang dihasilkan sinyal output variabel negatif $NE = -1$ dan $NE = -8$ mengalami osilasi kecil overshoot tertinggi 84,4 μm dan 84 μm , sedangkan sinyal output variabel negatif $NE = -20$ menghasilkan respon sistem dengan gerakan elektroda berosilasi besar. Overshoot tertinggi tercatat 82 μm pada 0,98 detik. Dari pengujian sinyal output variabel negatif (NE) menggunakan tuning secara empiris dengan nilai $NE = -1$, $NE = -8$, dan $NE = -20$ pada konsisi sinyal output variabel positif (PO) bernilai -40 diperoleh nilai sinyal output variabel negatif (NE) dengan hasil respon sistem yang paling baik adalah $NE = -8$.

3.2. Pengujian Sistem Fuzzy Logic Controller Matriks 5 X 5

Dalam pengujian diberikan masukan sistem berupa sinyal step dengan nilai referensi tegangan 2V, 3,5V, dan 5 V

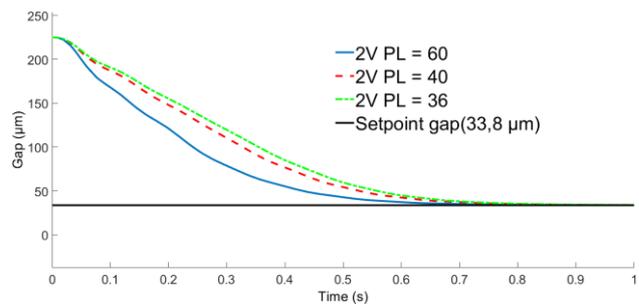
dengan tuning variabel sinyal output Fuzzy. Pada pengujian kondisi jarak (gap) awal elektroda berada pada gap 225 μm di atas workpiece.

A. Tuning sinyal output variabel positif besar (PL)

Pengujian sinyal output variabel positif besar (PL) menggunakan tuning secara empiris dengan nilai $PL = 60$, $PL = 40$ dan $PL = 36$ pada kondisi sinyal output variabel positif kecil $PS = 35$, variabel negatif kecil $NS = -4$, serta variabel negatif besar $NL = -8$. Nilai sinyal output variabel positif menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke bawah. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal output variabel positif tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal output variabel positif dengan hasil respon sistem yang baik.

▪ Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel positif besar.

Respon sistem jika menggunakan sinyal output variabel positif besar $PL = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat seperti pada Gambar 12. Sedangkan jika menggunakan sinyal output variabel positif $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan gerakan elektroda yang smooth dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal output variabel positif besar $PL = 60$. Pengujian sinyal output variabel positif besar dengan nilai $PL = 60$, $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan respon gap berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel PL.

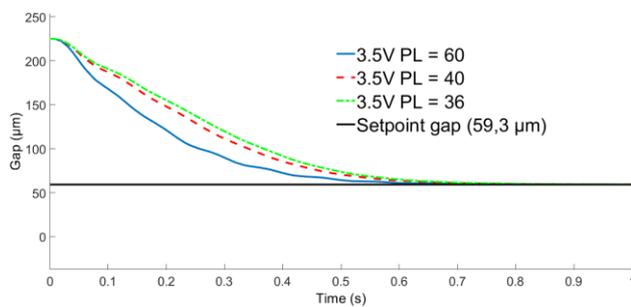
Variabel Positif besar	PL = 60	PL = 40	PL = 36
Gap 100 μm (detik)	0,254	0,333	0,356
Overshoot (μm)	-	-	-

Keseluruhan pengujian menghasilkan respon steady state jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 33,8 μm . Sinyal output variabel positif besar $PL = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif yang lain yaitu 0,254 detik untuk mencapai gap 100

μm . Besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ yaitu 0,333 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ membutuhkan 0,356 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ dan $PL = 36$ menghasilkan respon lebih lambat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 60$. Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif besar memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*.

▪ Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel positif besar.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PL = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat seperti pada Gambar 13. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif $PL = 60$. Pengujian sinyal *output* variabel positif dengan nilai $PL = 60$, $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 9. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel PL.

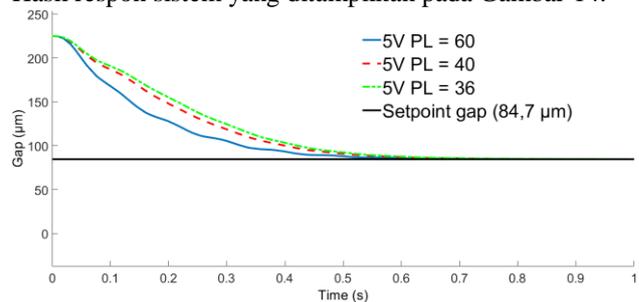
Variabel Positif Besar	$PL = 60$	$PL = 40$	$PL = 36$
Gap 100 μm (detik)	0,26	0,356	0,375
Overshoot (μm)	-	-	-

Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 59,8 μm . Sinyal *output* variabel positif besar $PL = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif besar yang lain yaitu 0,26 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ yaitu 0,356 detik

untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ membutuhkan 0,375 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ dan $PL = 36$ menghasilkan respon lebih lambat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 60$. Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif besar memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*.

▪ Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 14. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel positif besar.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PL = 60$ akan menghasilkan respon yang cepat seperti pada Gambar 14. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif $PL = 60$. Pengujian sinyal *output* variabel positif dengan nilai $PL = 60$, $PL = 40$, dan $PL = 36$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel PL.

Variabel Positif Besar	$PL = 60$	$PL = 40$	$PL = 36$
Gap 100 μm (detik)	0,333	0,412	0,44
Overshoot (μm)	-	-	-

Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 84,7 μm . Sinyal *output* variabel positif besar $PL = 60$ menghasilkan respon yang paling cepat dibandingkan kedua variabel positif besar yang lain yaitu 0,333 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ menghasilkan respon lebih cepat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ yaitu 0,412 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Sedangkan besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 36$ membutuhkan 0,44 detik untuk mencapai *gap* 100 μm . Pada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$ dan $PL = 36$

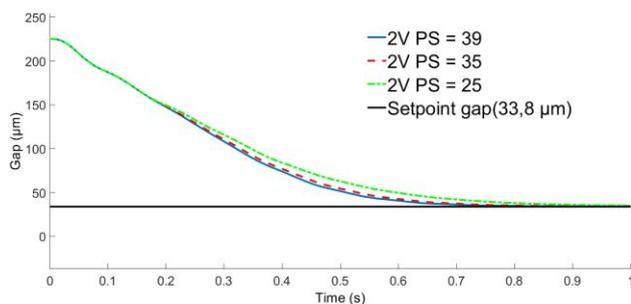
menghasilkan respon lebih lambat daripada besar sinyal *output* variabel positif besar $PL = 60$. Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif besar memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*. Dari pengujian sinyal *output* variabel positif besar (PL) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $PL = 60$, $PL = 40$, dan $PL = 36$ pada kondisi sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$, variabel negatif kecil $NS = -4$, serta variabel negatif besar $NL = -8$ diperoleh nilai sinyal *output* variabel positif (PO) dengan hasil respon sistem yang paling baik adalah $PL = 60$. Namun dalam percobaan gap, arus listrik, dan medan magnet digunakan nilai sinyal *output* variabel positif besar (PL) $PL = 40$ agar memiliki range variabel *input* yang sama dengan control logika *fuzzy* matriks 3X3 yaitu -8 hingga 40 volt.

B. *Tuning* sinyal *output* variabel positif besar (PS)

Pengujian sinyal *output* variabel positif kecil (PS) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $PS = 39$, $PS = 35$ dan $PS = 25$ pada kondisi sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$, variabel negatif kecil $NS = -4$, serta variabel negatif besar $NL = -8$. Nilai sinyal *output* variabel positif menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke bawah. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal *output* variabel positif tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal *output* variabel positif dengan hasil respon sistem yang baik.

- Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal *output* variabel positif kecil.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ akan menghasilkan respon yang cepat pada Gambar 15. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ yang dapat dilihat pada Tabel 11.

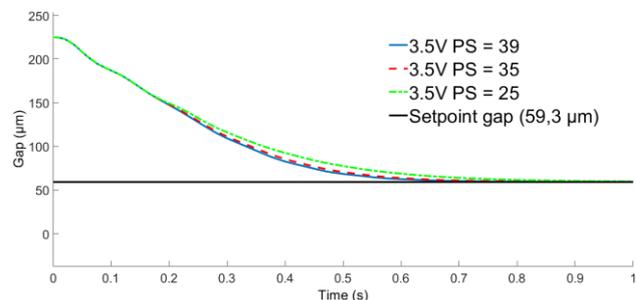
Tabel 11. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel PS.

Variabel Positif Kecil	$PS = 39$	$PS = 35$	$PS = 25$
Gap 100 μm (detik)	0,333	0,333	0,356
Overshoot (μm)	-	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif kecil dengan nilai $PS = 39$, $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan respon gap berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 11. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu 33,8 μm . Sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 25$ menghasilkan respon yang lambat dibandingkan kedua variabel positif kecil yang lain yaitu 0,356 detik untuk mencapai gap 100 μm . Besar sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ dan $PS = 35$ menghasilkan respon yang sama cepat yaitu 0,333 detik untuk mencapai gap 100 μm . Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif kecil memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*.

- Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal *output* variabel positif kecil.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ akan menghasilkan respon yang cepat pada Gambar 16. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ yang dapat dilihat pada Tabel 12.

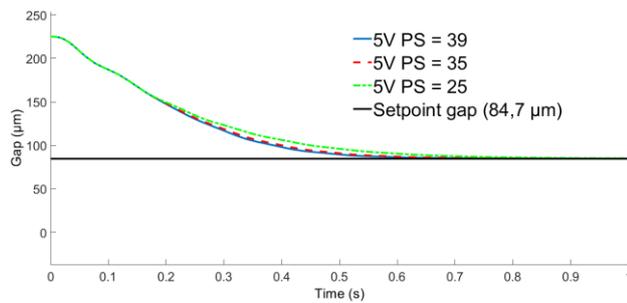
Tabel 12. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel PS.

Variabel Positif Kecil	$PS = 39$	$PS = 35$	$PS = 25$
Gap 100 μm (detik)	0,333	0,356	0,375
Overshoot (μm)	-	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif kecil dengan nilai $PS = 39$, $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 12. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu $59,3 \mu\text{m}$. Sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ menghasilkan respon yang cepat dibandingkan kedua variabel positif kecil yang lain yaitu $0,333$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Sedangkan Besar sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$ menghasilkan respon yang lebih dibandingkan variabel positif kecil $PS = 25$ yaitu $0,356$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 25$ memerlukan $0,375$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif kecil memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*.

- Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 17.



Gambar 17. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel positif kecil.

Respon sistem jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ akan menghasilkan respon yang cepat pada Gambar 17. Sedangkan jika menggunakan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan gerakan elektroda yang *smooth* dengan respon yang lebih lambat dibandingkan dengan sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ yang dapat dilihat pada Tabel 13.

Tabel 13. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel PS.

Variabel Positif Kecil	$PS = 39$	$PS = 35$	$PS = 25$
Gap $100 \mu\text{m}$ (detik)	0,397	0,412	0,457
Overshoot (μm)	-	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel positif kecil dengan nilai $PS = 39$, $PS = 35$, dan $PS = 25$ menghasilkan respon *gap* berbeda yang ditunjukkan pada Tabel 13. Keseluruhan pengujian menghasilkan respon *steady state* jarak antara elektroda dan benda kerja yaitu $84,7 \mu\text{m}$. Sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 39$ menghasilkan respon yang

cepat dibandingkan kedua variabel positif kecil yang lain yaitu $0,397$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Sedangkan Besar sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 35$ menghasilkan respon yang lebih cepat dibandingkan variabel positif kecil $PS = 25$ yaitu $0,412$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Sinyal *output* variabel positif kecil $PS = 25$ memerlukan $0,457$ detik untuk mencapai *gap* $100 \mu\text{m}$. Gerak elektroda yang dihasilkan ketiga variasi sinyal *output* variabel positif kecil memiliki respon sistem cenderung *smooth* tanpa *overshoot*.

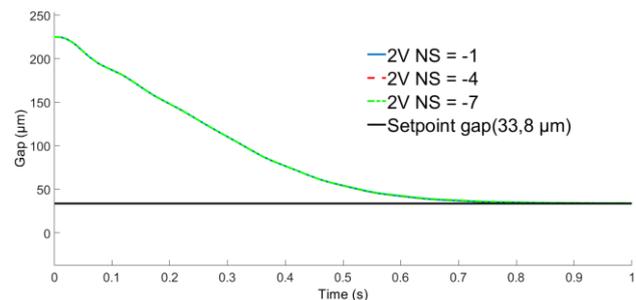
Dari pengujian sinyal *output* variabel positif kecil (PS) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $PS = 39$, $PS = 35$, dan $PS = 25$ pada kondisi sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$, variabel negatif kecil $NS = -4$, serta variabel negatif besar $NL = -8$ diperoleh nilai sinyal *output* variabel positif (PS) dengan hasil respon sistem yang paling baik adalah $PS = 39$. Namun dalam percobaan *gap*, arus listrik, dan medan magnet digunakan nilai sinyal *output* variabel positif kecil (PS) $PS = 35$.

C. Tuning sinyal output variabel negatif (NS)

Pengujian sinyal *output* variabel negatif kecil (NS) menggunakan *tuning* secara empiris dengan nilai $NS = -1$, $NS = -4$, dan $NS = -7$ pada kondisi sinyal *output* variabel positif besar $PL = 40$, variabel positif kecil $PS = 35$, serta variabel negatif besar $NL = -8$. Nilai sinyal *output* variabel negatif kecil menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke bawah. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal *output* variabel negatif tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal *output* variabel negatif kecil dengan hasil respon sistem yang baik

- Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 18.



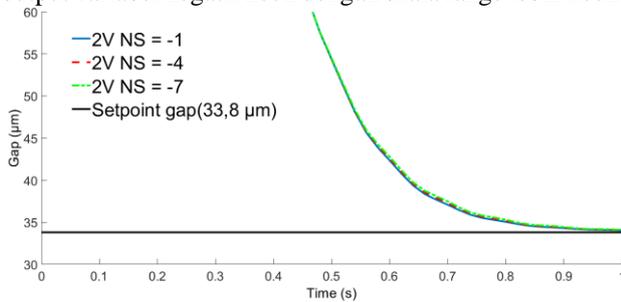
Gambar 18. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal *output* gain negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan Gambar 18 menunjukkan ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 14 berikut.

Tabel 14. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif Kecil	NS = -1	NS = -4	NS = -7
Gap 100 μm (detik)	0,336	0,336	0,336
Overshoot (μm)	-	-	-

Pengujian sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil tidak memiliki overshoot yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,336 detik untuk mencapai gap 100 μm . Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil sedikit berbeda. Berikut ini adalah respon sistem dengan variasi sinyal output variabel negatif kecil dengan skala range lebih kecil.

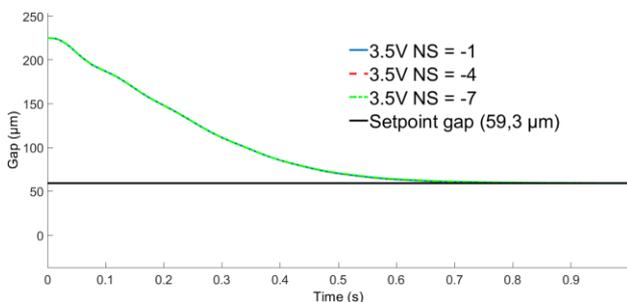


Gambar 19. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal output variabel negatif kecil $NS = -1, NS = -4$, dan $NS = -7$ menghasilkan respon yang smooth tanpa mengalami overshoot dari gap steady state 33,8 μm , ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,336 detik untuk mencapai gap 100 μm .

- Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 20.



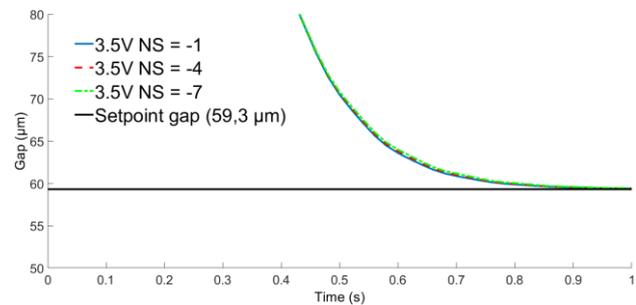
Gambar 20. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal output gain negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan. Gambar 20 menunjukkan ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 15 berikut.

Tabel 15. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif Kecil	NS = -1	NS = -4	NS = -7
Gap 100 μm (detik)	0,357	0,357	0,357
Overshoot (μm)	-	-	-

Pengujian sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil tidak memiliki overshoot yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,357 detik untuk mencapai gap 100 μm . Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil sedikit berbeda. Berikut ini adalah respon sistem dengan variasi sinyal output variabel negatif kecil dengan skala range lebih kecil.



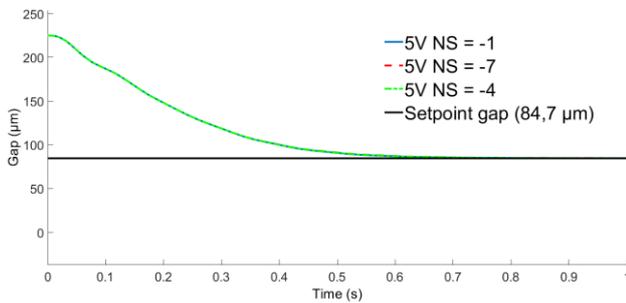
Gambar 21. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal output variabel negatif kecil $NS = -1, NS = -4$, dan $NS = -7$ menghasilkan respon yang smooth tanpa mengalami overshoot dari gap steady state 59,3 μm , ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil kecil sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,357 detik untuk mencapai gap 100 μm .

- Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 22.

Sinyal output gain negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan Gambar 22 menunjukkan ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 16 berikut.

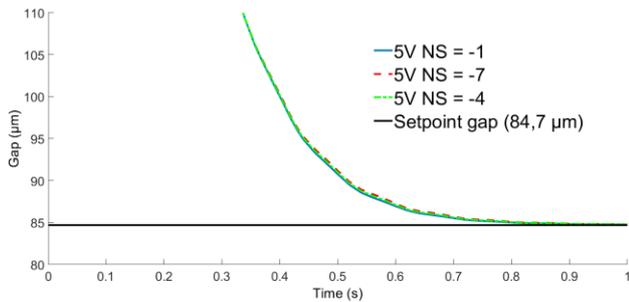


Gambar 22. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Tabel 16. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif Kecil	NS = -1	NS = -4	NS = -7
Gap 100 µm (detik)	0,417	0,417	0,417
Overshoot (µm)	-	-	-

Pengujian sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil tidak memiliki overshoot yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,417 detik untuk mencapai gap 100 µm. Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil sedikit berbeda yang dapat dilihat pada Gambar 23 berikut.



Gambar 23. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif pada range kecil.

Besar sinyal output variabel negatif kecil $NS = -1, NS = -4$, dan $NL = -7$ menghasilkan respon yang smooth tanpa mengalami overshoot dari gap steady state 84,7 µm, ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,357 detik untuk mencapai gap 100 µm.

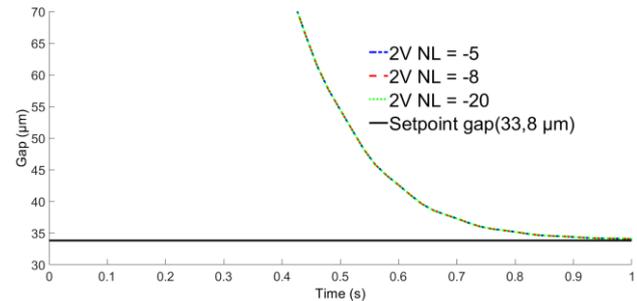
D. Tuning sinyal output variabel negatif besar (NL)

Pengujian sinyal output variabel negatif besar (NL) menggunakan tuning secara empiris dengan nilai $NL = -5$, $NL = -8$ dan $NL = -20$ pada kondisi sinyal output variabel positif besar $PL = 40$, positif kecil $PS = 35$,

serta negatif kecil $NS = -4$. Nilai sinyal output gain negatif menghasilkan respon gerakan elektroda menuju ke bawah. Tujuan pengujian terhadap ketiga nilai sinyal output variabel r gatif besar tersebut yaitu untuk mendapatkan nilai sinyal output variabel positif dengan hasil respon sistem yang baik.

▪ Tegangan referensi 2V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 24.



Gambar 24. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal output gain negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan. Gambar 24 menunjukkan ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 17 berikut.

Tabel 17. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

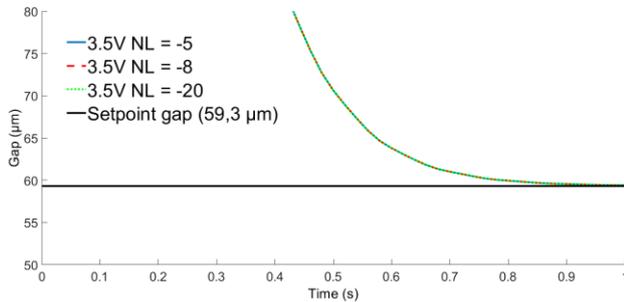
Variabel Negatif Besar	NL = -5	NL = -8	NL = -20
Gap 100 µm (detik)	0,336	0,336	0,336
Overshoot (µm)	-	-	-

Pengujian sinyal output variabel negatif besar memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal output variabel negatif besar tidak memiliki overshoot yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,336 detik untuk mencapai gap 100 µm. Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal output variabel negatif besar sedikit berbeda.

▪ Tegangan referensi 3,5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 25.

Sinyal output gain negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan. Gambar 25 menunjukkan ketiga variasi sinyal output variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 18 berikut.



Gambar 25. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

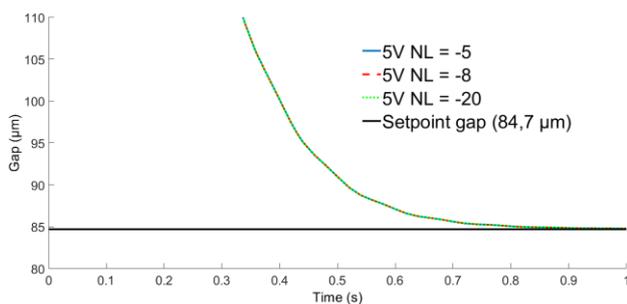
Tabel 18. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal output variabel negatif.

Variabel Negatif Besar	NL = -5	NL = -8	NL = -20
Gap 100 µm (detik)	0,357	0,357	0,357
Overshoot (µm)	-	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel negatif besar memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif besar tidak memiliki *overshoot* yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,357 detik untuk mencapai *gap* 100 µm. Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif besar sedikit berbeda.

- Tegangan referensi 5V

Hasil respon sistem yang ditampilkan pada Gambar 26.



Gambar 26. Perbandingan respon gap dengan variasi sinyal output variabel negatif.

Sinyal *output gain* negatif dapat mengurangi osilasi gerakan elektroda yang ditunjukkan . Gambar 26 menunjukkan ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif kecil memiliki kesamaan respon sistem yang dapat dilihat pada Tabel 19 berikut.

Tabel 19. Perbandingan respon sistem EDM terhadap perubahan sinyal *output* variabel negatif.

Variabel Negatif Besar	NL = -5	NL = -8	NL = -20
Gap 100 µm (detik)	0,42	0,42	0,43
Overshoot (µm)	-	-	-

Pengujian sinyal *output* variabel negatif besar memiliki kesamaan karakteristik respon sistem. Ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif besar tidak memiliki *overshoot* yang menghasilkan gerakan elektroda yang halus serta sama-sama memiliki kecepatan waktu 0,357 detik untuk mencapai *gap* 100 µm. Bila kita perjelas dengan range yang lebih kecil kita akan dapatkan respon sistem ketiga variasi sinyal *output* variabel negatif besar sedikit berbeda.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan pengujian sistem EDM dengan mengontrol gap atau jarak elektroda terhadap benda kerja mempengaruhi hasil respon medan listrik, arus listrik dan gap voltage. Secara keseluruhan respon sistem yang paling bagus untuk sistem EDM adalah fuzzy dengan matriks 5X5. Pengujian sistem menggunakan kontrol logika fuzzy dimana interval range error dan deltaerror yang digunakan yaitu pada interval error [-2 8] dengan interval [-8 8] serta output kontrol fuzzy pada interval [-8 40] yang mengacu pada penelitian Y.F. Chang untuk gain proporsional dengan respon paling baik diterapkan pada sistem EDM, yaitu memiliki range -8 hingga 40 volt.. Variasi nilai referensi gap setpoint menunjukkan kebenaran model linier proses EDM yang dibuat oleh Y.F. Chang. Semakin besar nilai referensi gap setpoint maka semakin besar jarak (gap) elektroda terhadap workpiece. Hasil pengujian *tuning* sinyal *output* variabel negatif besar (NL) memiliki hasil respon yang sama pada tiap variasi *setpoint* dikarenakan kontrol logika *fuzzy* dalam prosesnya tidak terjadi *offset* yang besar terhadap *setpoint* artinya variabel *input error* tidak pernah berada pada nilai dibawah 0.

Referensi

- [1]. E. C. Jameson, *Electrical Discharge Machining*. USA, 2001.
- [2]. Y. F. Chang, "Mixed H2/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.