

## PERANCANGAN DAN REALISASI ALAT PENGGERAK KOIL UNTUK AUTOMASI INDUCED-CURRENT ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY

### DESIGN AND REALIZATION OF COIL MOVEMENT TOOLS FOR INDUCED- CURRENT ELECTRICAL IMPEDANCE TOMOGRAPHY AUTOMATION

Adityo Sandhy Putra <sup>1</sup>, Dudi Darmawan <sup>2</sup>, Reza Fauzi Iskandar <sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Prodi S1 Teknik Fisika, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Telkom

<sup>1</sup>[asputra@students.telkomuniversity.ac.id](mailto:asputra@students.telkomuniversity.ac.id), <sup>2</sup>[dudidw@telkomuniveristy.ac.id](mailto:dudidw@telkomuniveristy.ac.id),

<sup>3</sup>[rezafauzi@telkomuniversity.ac.id](mailto:rezafauzi@telkomuniversity.ac.id)

#### Abstrak

*Induced Current Electrical Impedance Tomography (ICEIT)* adalah salah satu teknik untuk melakukan rekonstruksi citra suatu objek tanpa melakukan kerusakan terhadap objek tersebut. Rekonstruksi citra dilakukan dengan cara memetakan distribusi konduktivitas internal dari objek. Karena itu perlu dilakukan pengukuran beda potensial pada tepi objek ketika terdapat arus listrik pada objek tersebut. Arus listrik pada objek dihasilkan dari medan magnet yang diinduksikan dari sebuah kumparan berarus. Untuk dapat menghasilkan pemetaan yang baik, maka induksi harus dilakukan pada beberapa bagian pada objek. Oleh sebab itu kumparan harus diposisikan di beberapa tempat saat pengukuran secara presisi. Pada penelitian ini dirancang suatu alat yang dapat menggerakkan kumparan secara otomatis ke beberapa titik induksi secara cepat dan presisi. Sehingga nantinya proses pemindahan koil tidak perlu memakan waktu lama dan proses pemetaan bisa berjalan lebih efisien. Dengan menggunakan sistem kontrol *proportional*, alat yang dirancang memiliki tingkat presisi sebesar 91% dan *settling time* sebesar 4.93 detik.

**Kata kunci :** ICEIT, tomografi, NDT, kontrol proporsional, presisi

#### Abstract

*Induced Current Electrical Impedance Tomography (ICEIT)* is one of several techniques for non-destructive image reconstruction of an object. The image reconstruction is done by mapping the internal conductivity of the object. Therefore it is necessary to measure the voltage of the object boundary with an amount of electrical current flowing in the object. The current in the object is generated from a magnetic field induced by a coil with current. In order to get a good mapping, the induction process must be occurred in several part of the object. Thus, the coil must be moved to several place in the measuring process. This research is focused on designing and building a tools that will be able to move the coil with precise and fast positioning so that the measuring process will be efficient. Using proportional control system, the designed tools has the precision up to 91% with 4.93 settling time.

**Keywords:** ICEIT, tomography, NDT, proportional control, precision

#### 1. Pendahuluan

*Induced Current Electrical Impedance Tomography (ICEIT)* adalah salah satu teknik pemeriksaan yang bersifat non destruktif. Artinya, ICEIT memungkinkan dilakukannya pengukuran tanpa merusak objek yang diukur [1]. Teknik ini merekonstruksi distribusi konduktivitas internal objek. Pemetaan dilakukan berdasarkan data beda potensial yang diukur antara elektroda-elektroda yang terpasang pada objek ketika arus listrik diinduksikan ke dalam objek tersebut melalui medan magnet.

Untuk dapat memeriksa objek secara keseluruhan maka proses induksi arus listrik harus dilakukan secara merata pada seluruh permukaan dan dilakukan berulang. Pada penelitian yang dilakukan oleh Purvis [2], penginduksian dilakukan menggunakan 3 buah koil yang menginduksikan medan magnet secara bergantian. Jika ICEIT dilakukan dengan menggunakan satu buah koil, maka akan diperlukan waktu yang lebih lama. Hal ini dikarenakan koil harus diposisikan berulang pada beberapa posisi. Selain itu, apabila koil diposisikan menggunakan tangan akan terdapat perbedaan antara posisi saat ini dan posisi sebelumnya yang diakibatkan oleh kesalahan manusia.

Untuk mengatasi masalah kecepatan pergerakan koil dan tingkat presisinya, pada penelitian ini dilakukan sebuah rancang bangun alat penggerak koil yang bersifat otomatis. Untuk mendapatkan pergerakan yang cepat maka diperlukan sistem dengan *settling time* sekecil mungkin. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Fanaei [3] sistem kontrol PID adalah yang tercepat dibandingkan dengan Fuzzy dan Fuzzy-PID. Karena itu, sistem kontrol PID pun dipilih untuk digunakan pada penelitian ini meskipun hasil percobaan nantinya menunjukkan bahwa kontrol

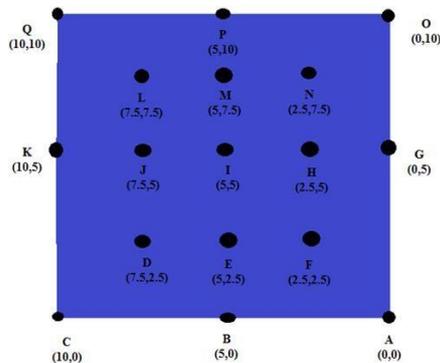
proporsional memberikan respon dengan *settling time* lebih cepat daripada PI dan PID.

Target dari penelitian ini adalah terciptanya suatu alat yang dapat menggerakkan koil secara cepat dan presisi. Dalam penelitian lebih lanjut, alat ini akan dapat digunakan untuk melakukan pengukuran ICEIT menggunakan sebuah koil yang diposisikan ke beberapa titik induksi.

## 2. Dasar Teori dan Metode Penelitian

### 2.1 Posisi Induksi

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh YustitiaPutri Indraswari [4], terdapat beberapa konfigurasi penempatan koil yang memperlihatkan distribusi medan magnet yang beragam. Konfigurasi-konfigurasi ini juga terbukti memiliki pengaruh terhadap kehomogenan medan magnet pada objek.



Gambar 1 Posisi induksi arus listrik

Secara keseluruhan terdapat beberapa konfigurasi dimana setiap konfigurasi merupakan gabungan dari beberapa titik yang akan menjadi jalur pergerakan koil.

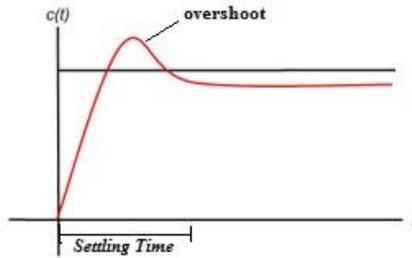
Tabel 1 Konfigurasi Posisi

Konfigurasi	Titik-Titik Yang Terlibat								
1K	I								
3K	I	H	N						
5KHV_25	H	I	E	J	M				
5KDG_25	F	I	N	L	D				
5KHV_50	G	I	P	K	B				
5KDG_50	A	I	C	Q	O				
9K_50	A	G	I	B	C	K	Q	P	O

Nama konfigurasi memiliki arti dimana angka pertama menunjukkan jumlah titik induksi. Sedangkan HV menandakan bahwa koil digerakkan secara horizontal dan vertikal. Sedangkan DG menandakan bahwa koil digerakkan secara diagonal. Angka 25 pada bagian belakang menandakan bahwa jarak antar titik induksi adalah 25% dari panjang sisi objek berada di dalam objek. Sedangkan angka 50 menunjukkan jarak antar titik adalah 50% dari panjang sisi objek.

### 2.3 Kontrol PID

Alat yang dibuat dalam penelitian ini harus memenuhi suatu kriteria dalam dinamika sistem yang menyatakan kecepatan respon untuk mencapai tujuan apabila input diberikan. Kriteria yang dimaksud adalah *Settling Time*, yaitu waktu yang dibutuhkan sistem untuk memberi respon dari nol sampai 98% nilai tunak. Selain kriteria utama tersebut, penulis juga memperhatikan bagaimana *overshoot* dapat dibuat sekecil mungkin sehingga tidak terjadi lonjakan ketika alat sedang digunakan.



Gambar 3. Respon sistem

Untuk mencapai karakteristik dinamik yang diharapkan, maka sebuah sistem kontrol PID digunakan. Penguat I (*integral*) bertujuan untuk mengurangi kesalahan alat pada kondisi *steady-state*. Sedangkan penguat D (*derivative*) adalah untuk memperkecil Settling Time sehingga alat dapat lebih cepat bergerak menuju kondisi tunak.

Untuk mendapatkan konstanta penguatan  $K_p$  (proporsional),  $K_d$  (*derivative*), dan  $K_i$  (*integral*) pada penelitian ini menggunakan metode kedua Ziegler-Nichols. Metode kedua Ziegler-Nichols adalah metode untuk mencari konstanta  $K_p$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  dengan melakukan uji coba penguatan kritis  $K_{cr}$  pada alat hingga terjadi osilasi. Kemudian, periode osilasi akan dicatat untuk kemudian dilakukan perhitungan untuk menemukan *Time integral* ( $T_i$ ) dan *Time derivative* ( $T_d$ ).

Tabel 2 Aturan dalam metode kedua Ziegler-Nichols [5]

Tipe Kontroler	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_{cr}$	-	0
PI	$0.45 K_{cr}$	$1/1.2 P_{cr}$	0
PID	$0.6 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.125 P_{cr}$

Nilai  $K_p$  dan  $K_i$  kemudian dapat dicari sesuai dengan persamaan berikut.

$$K_i = K_p/T_i \tag{1}$$

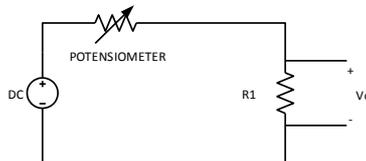
Sedangkan persamaan untuk  $K_d$  adalah sebagai berikut.

$$K_d = K_p T_d \tag{2}$$

Kemudian, setelah didapat konstanta  $K_p$ ,  $K_d$ , dan  $K_i$  akan dilakukan analisis kedudukan akar untuk mengetahui bagaimana respon sistem terhadap berbagai kemungkinan nilai konstanta yang ada pada jalur kedudukan akar.

**2.3 Sensor dan Aktuator**

Alat penggerak koil yang dirancang dalam penelitian ini membutuhkan sebuah sensor untuk menandakan adanya perpindahan posisi secara linier. Sensor yang digunakan sebagai sensor posisi pada penelitian ini adalah potensiometer linier dengan panjang 10 cm. Potensiometer ini kemudian disusun secara seri dengan suatu hambatan tetap  $R$  dan dihubungkan dengan sumber tegangan 5 volt. Kemudian, menggunakan prinsip pembagi tegangan rangkaian seri, sebuah tegangan keluaran akan diambil di antara potensiometer dan  $R$  sehingga nilai tegangan akan berubah bersamaan dengan berubahnya nilai hambatan potensiometer. Nilai tegangan ini kemudian akan diolah di dalam *microcontroller* dan dijadikan variabel posisi.

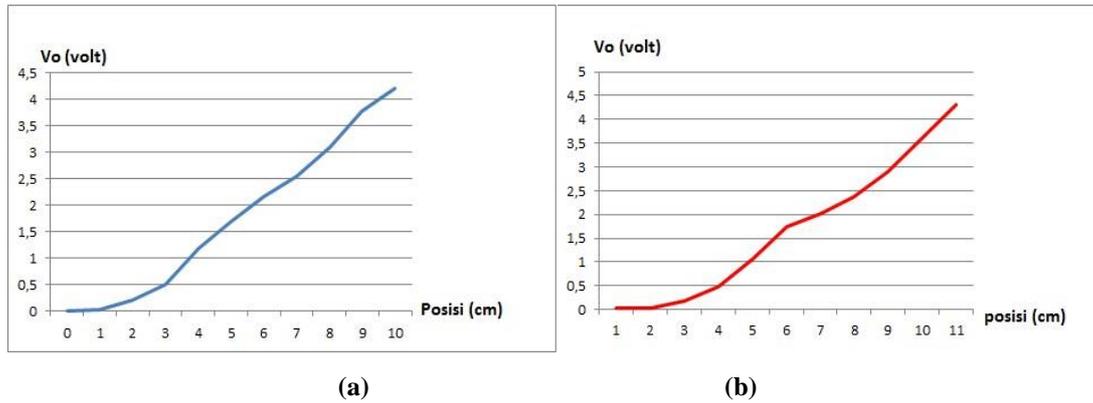


Gambar 5. Sensor potensiometer

Nilai tegangan keluaran vo adalah sesuai dengan persamaan berikut.

$$V_o = \{R_1 / (R_1 + \text{POTENSIOMETER})\} * V_{DC} \quad (3)$$

Hasil dari karakterisasi antara jarak dan tegangan dari rangkaian sensor adalah sebagai berikut.



Gambar 4 (a) Kurva Vo dan posisi sumbu x (b) Kurva Vo dan posisi sumbu y

Setelah sensor membaca posisi, maka nilai posisi itu akan dijadikan sebagai acuan untuk dibandingkan dengan posisi yang diinginkan dari masukan. Selisih nilai posisi itu akan diolah dalam sistem kontrol menjadi sejumlah tegangan yang diberikan kepada aktuator berupa motor DC 12 volt. Motor DC akan menarik *timing belt* dan putaran rotornya berubah menjadi gerak linier untuk menggerakkan coil.

### 3. Pembahasan

#### 3.1. Penentuan Konstanta Penguatan

Setelah dilakukan uji coba penguatan kritis pada sumbu x dan y didapatkan data sebagai berikut.

Tabel 3 Konstanta PID untuk masing-masing sumbu

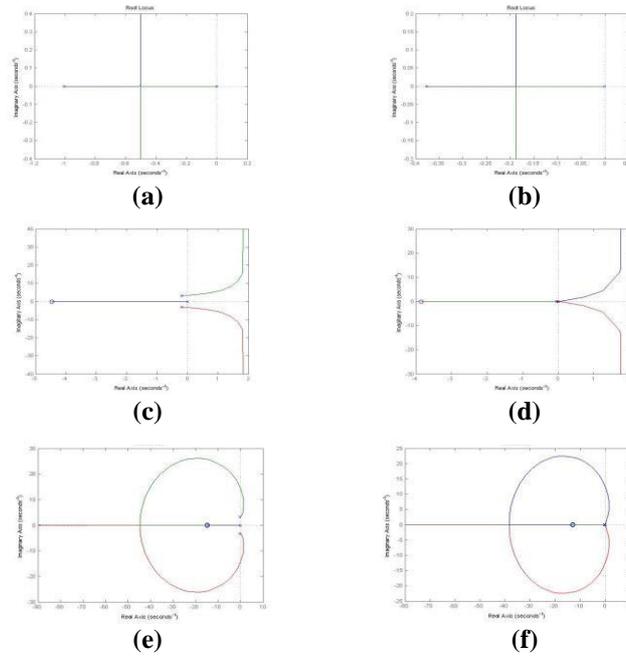
Sumbu	Type	Kcr	Kp	Pcr	Ti	Ki	Td	Kd
X	P	706	353	-	-	-	-	-
	PI		317.7	0.27	0.22	1417.25	-	-
	PID		423.6	0.27	0.13	3149.44	0.03	14.24
Y	P	470	235	-	-	-	-	-
	PI		211.5	0.31	0.26	813.46	-	-
	PID		282	0.31	0.16	1807.69	0.04	11

Kemudian, berdasarkan nilai masukan dan keluaran yang didapat dilakukan proses identifikasi fungsi transfer menggunakan *system identification* pada matlab 2012a. Dari hasil identifikasi didapatkan fungsi transfer sebagai berikut.

$$G(s) = \frac{0.27}{s^2 + 0.3776s + 0.0003} \quad (4)$$

$$G(s) = \frac{0.006}{s^2 + 1.005s + 1.195 \cdot 10^{-6}} \quad (5)$$

Dari fungsi transfer yang sudah didapat kemudian dilakukan analisis dengan melihat kedudukan akar ketika diberi penguatan P, PI, dan PID. Hasil dari analisis menunjukkan bahwa penambahan penguat Kd dan Ki akan membuat *pole* berada pada bidang sumbu real positif, yang menandakan bahwa sistem tidak stabil. Hal ini berlaku untuk sistem sumbu x dan sumbu y.



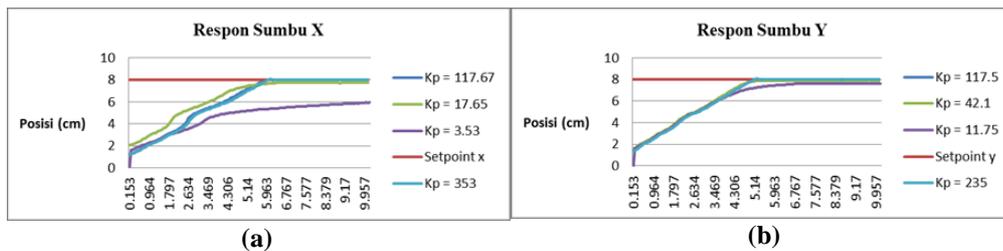
**Gambar 5** Kedudukan akar untuk pengontrol (a) P sumbu x (b) P sumbu y (c) PI untuk sumbu x (d) PI untuk sumbu y (e) PID sumbu x (f) PID sumbu y

Dari hasil analisis kedudukan akar kemudian dilakukan uji coba beberapa nilai penguat  $K_p$  hingga didapat nilai dengan respon sistem optimal. Beberapa nilai  $K_p$  yang diujicobakan diambil berdasarkan kedudukan akar yang dihasilkan yakni akar pada sumbu real, akar pada titik berangkat, dan akar pada bidang kompleks.

**Tabel 4** Konstanta  $K_p$  untuk masing-masing sumbu dengan posisi pole yang berbeda

Nilai	Sumbu x	Sumbu y	Posisi pole
$K_{p1}$	3.53	11.75	Sumbu real
$K_{p2}$	17.65	42.1	Break-away point
$K_{p3}$	117.67	117.5	Bidang kompleks menuju tak hingga
$K_{p4}$	353	235	Bidang kompleks menuju tak hingga

Hasil dari uji coba terhadap empat nilai  $K_p$  untuk masing-masing sumbu adalah sebagai berikut.



**Gambar 6** Respon sumbu x dan sumbu y untuk nilai  $K_p$  hasil analisis kedudukan akar.

Karakteristik dinamik dari sistem untuk masing-masing nilai  $K_p$  adalah sebagai berikut.

**Tabel 5 Nilai karakteristik dinamik untuk beberapa nilai Kp.**

Parameter	Nilai Kp							
	Sumbu x				Sumbu y			
	3.53	17.65	117.67	353	11.75	42.1	117.5	235
Error Steady-state (cm)	2.06	0.28	0	0.01	0.37	0.08	0	0.01
%Overshoot	0	0	0.12	0.87	0	0	0	0.62
Settling Time (s)	>10	>10	5.61	6.49	>10	>10	4.78	5.27

Nilai Kp 117.67 pada sumbu x terlihat memberikan *settling time* terkecil untuk sumbu x dan 117.5 untuk sumbu y. Hal ini berarti bahwa pada nilai penguat tersebut, sistem akan mencapai posisi yang diinginkan lebih cepat daripada nilai penguatan lainnya.

### 3.2. Penentuan Jalur Konfigurasi Tercepat

Sesuai dengan penggunaannya untuk ICEIT, maka alat harus mampu bergerak pada jalur tertentu yang merupakan jalur titik induksi dengan berbagai konfigurasi. Selanjutnya dilakukan permutasi untuk dapat mengetahui berbagai kemungkinan jalur pergerakan. Permutasi dilakukan dengan persamaan  $n!$  ( $n$  faktorial) dengan  $n$  adalah jumlah titik yang terlibat dalam pengukuran. Hasil dari permutasi adalah sebagai berikut.

**Tabel 6 Jumlah kemungkinan jalur**

Konfigurasi	Jumlah Jalur
1K	1
3K	6
5KHV_25	120
5KDG_25	120
5KHV_50	120
5KDG_50	120
9K_50	362880

Dari semua kemungkinan jalur yang ada kemudian dilakukan perhitungan matematis untuk mengetahui jalur mana yang memiliki jarak tempuh paling kecil untuk setiap konfigurasi dengan titik berangkat terdekat dari titik (0,0). Hasil dari perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi 3K hanya memiliki 1 kemungkinan jalur yang terpendek, 5KDG\_25, 5KDG\_50, dan 9K memiliki 16 jalur, sedangkan 5KHV\_25 dan 5KHV\_50 memiliki 16 jalur dengan jarak yang sama-sama terpendek di masing-masing konfigurasinya.

Jalur-jalur yang telah diidentifikasi sebagai jalur terpendek kemudian diuji coba secara langsung pada alat. Lalu dilakukan pencatatan waktu untuk mengetahui jalur tercepat pada kondisi nyata. Pencatatan waktu dilakukan dengan menggunakan *stopwatch* dan *counter* dari *microcontroller*.

**Tabel 7 Jalur tercepat untuk setiap konfigurasi**

Konfigurasi	Titik Induksi									Waktu stopwatch	Waktu Counter
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
3K	I	H	N							7.54	7.47
5KHV_25	E	I	H	M	J					12.84	12.89
5KDG_25	F	N	I	L	D					14.77	15.37
5KHV_50	G	B	I	P	K					18.03	18.87
5KDG_50	A	I	O	Q	C					21.56	22.25
9K_50	A	G	O	P	I	B	C	K	Q	26.01	29.36

### 3.2. Hasil Uji Coba Presisi

Uji coba dilakukan dengan menggerakkan koil sesuai dengan konfigurasi yang telah tersedia. Titik yang dijadikan acuan untuk menghitung presisi adalah titik akhir dari tap konfigurasi. Dengan gerakan dilakukan secara berulang sebanyak lima kali untuk tiap konfigurasi, didapatlah nilai presisi sebagai berikut.

**Tabel 8 Nilai presisi setiap konfigurasi**

No	Konfigurasi	Presisi x	Presisi y
1	3K	100%	99%
2	5KHV_25	100%	100%
3	5KDG_25	99%	99%
4	5KHV_50	99%	98%
5	5KDG_50	100%	90%
6	9K	91%	99%

Selain melakukan uji coba presisi pada konfigurasi juga dilakukan uji coba pada titik-titik sepanjang sumbu x dan sumbu y. Hasil dari uji coba tersebut adalah sebagai berikut.

**Tabel 9 Tingkat Presisi Berdasarkan Titik Koordinat**

No	Titik		Presisi x	Presisi y
	X	y		
1	0	0	100%	100%
2	1	1	91%	100%
3	2	2	95%	95%
4	3	3	97%	96%
5	4	4	100%	100%
6	5	5	98%	98%
7	6	6	98%	98%
8	7	7	97%	98%
9	8	8	99%	99%
10	9	9	100%	100%
11	10	10	99%	99%

#### 4. Kesimpulan

Pada analisis kedudukan akar didapati hasil bahwa sistem kontrol P lebih baik dibandingkan dengan PI dan PID. Ini dapat dilihat dari analisis kedudukan akar yang menyatakan bahwa posisi *pole* akan tetap berada pada bidang kompleks apabila diberikan penguat  $K_p$ . Kemudian, nilai  $K_p$  yang dipilih berdasarkan kedudukan akar pada sumbu real, titik berangkat, dan bidang kompleks memberikan respon berbeda-beda. Dari respon berbeda tersebut didapat sebuah nilai yang dianggap optimal, yaitu 117.65 untuk sumbu x dan 117.5 untuk sumbu y. Nilai tersebut memberikan *settling time* lebih cepat dibanding  $K_p$  lainnya namun menghasilkan *overshoot* yang kecil. Dengan menggunakan nilai  $K_p$  ini, nilai presisi sistem untuk konfigurasi memiliki nilai terendah 91% pada konfigurasi 9K dan untuk presisi per titik terkecil adalah juga 91% yaitu pada titik  $x = 1$  cm. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat memperbaiki nilai presisi dan menghasilkan respon yang lebih cepat dengan menggunakan jenis motor *stepper* atau pun dengan menggunakan sistem kontrol yang berbeda.

#### Daftar Pustaka:

- [1] Berndt, M. L. 2001. "Non-destructive Testing Methods for Geothermal Piping", Research Report for Office of Wind and Geothermal Technologies, U.S. Department of Energy.
- [2] Purvis W.R.; Tozer, R.C. ; Freeston, I. L. 1990 "Impedance Imaging Using Induced Currents." IEE Proceedings, Vol.140 no 2.
- [3] Esfandyari M.; Fanaei, M. A. 2010. "Comparision between classic PID,fuzzy and fuzzy PID controllers", 13th Iranian National Chemical Engineering Congress & 1st International Regional Chemical and Petroleum Engineering.
- [4] Indraswari, Y.I. 2015 "Studi Penentuan Konfigurasi Sistem Induksi Pada Induced Current Electrical Impedance Tomography (ICEIT)," Telkom University.
- [5] Ogata, K. 2003 "System Dynamics 4th Edition," New Jersey, Pearson Education, Inc.