

Rancang bangun sistem kontrol pada transformer rectifier untuk proteksi katodik arus tanding dengan beban dinamik

Farhan Ali Husaini, Rachmad Hartono

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pasundan
farhan.ali0771@gmail.com

Abstract

Corrosion to metal materials occurs when a metal is oxidized to an ion or metal oxide compound. One way to overcome the corrosion of metal structures is by using cathodic protection. Cathodic protection is a way to protect metal surfaces in contact with electrolytes in the form of soil or water by supplying DC (direct current) electric current to the protected metal. A protected steel structure is said to be cathodically protected if it has a polarization potential of at least -850mV to -1100mV against $\text{Cu} / \text{CuSO}_4$. The amount of electric current needed to achieve the polarization potential according to the cathodic protection criteria is influenced by the following factors; the surface area of the structure, the coating conditions of the structure, the temperature, the physical and chemical properties of the electrolyte, and the relative velocity of the structure with the electrolyte. This final project will design, manufacture, and test a control system on a transformer rectifier for impressed current cathodic protection to protect the structure's polarization potential. The Arduino UNO microcontroller uses a PID (Proportional-Integral-Derivative) control system. The test is carried out by varying the surface area of the cathode by adding a steel plate connected to the negative pole so that the protection current requirements also change (increase in size), so that the control will adjust the output voltage of the rectifier transformer to provide the required current so that the cathode potential remains at the setpoint value.

Keywords: Impressed Current, Cathodic Protection, PID Control System

Abstrak

Korosi pada material logam terjadi jika suatu logam teroksidasi menjadi ion atau senyawa oksida logamnya. Salah satu cara untuk menanggulangi korosi pada struktur logam yaitu dengan cara proteksi katodik. Proteksi katodik didefinisikan sebagai cara memproteksi permukaan logam yang kontak dengan elektrolit berupa tanah atau air dengan cara mensuplai arus listrik DC (arus listrik searah) ke logam yang hendak diproteksi. Struktur baja yang diproteksi dikatakan telah terproteksi secara katodik jika struktur memiliki potensial polarisasi sekurang kurangnya -850mV sampai -1100mV terhadap Cu/CuSO_4 . Besar arus listrik yang dibutuhkan untuk mencapai potensial polarisasi sesuai kriteria proteksi katodik dipengaruhi oleh beberapa faktor berikut; luas permukaan struktur, kondisi coating struktur, temperatur, sifat fisik dan kimia elektrolit, dan kecepatan relatif struktur dengan elektrolit. Dalam tugas akhir ini akan dilakukan perancangan, pembuatan, serta pengujian sistem kontrol pada transformer rectifier untuk proteksi katodik arus tanding agar potensial polarisasi struktur tetap berada pada kondisi terproteksi. Microcontroller yang digunakan merupakan Arduino UNO serta menggunakan sistem kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative). Pengujian dilakukan dengan cara memvariasikan luas permukaan katoda dengan menambahkan plat baja yang terhubung ke kutub negatif agar kebutuhan arus proteksi juga ikut berubah (bertambah besar), sehingga kontrol akan mengatur tegangan keluaran transformer rectifier untuk memberikan arus sesuai yang diperlukan agar potensial katoda tetap berada pada nilai setpoint.

Kata kunci: Proteksi Katodik Arus Tanding, Sistem Kontrol PID.

PENDAHULUAN

Korosi secara umum didefinisikan sebagai degradasi suatu material melalui interaksi lingkungan. Korosi pada material logam terjadi jika

suatu logam teroksidasi menjadi ion atau senyawa oksida logamnya. Pada dasarnya korosi pada logam merupakan reaksi elektrokimia yang terdiri dari reaksi oksidasi dan reduksi serta melibatkan pertukaran elektron antara anoda dan katoda. Anoda

akan mengalami reaksi oksidasi (korosi) sedangkan katoda akan mengalami reaksi reduksi. Dilihat dari arah arus listrik, logam yang terkorosi akan mengeluarkan arus listrik ke lingkungan (elektrolit).

Salah satu cara untuk menanggulangi korosi pada struktur logam yaitu dengan cara proteksi katodik. Proteksi katodik didefinisikan sebagai cara memproteksi permukaan logam yang kontak dengan elektrolit berupa tanah atau air dengan cara mensuplai arus listrik DC (arus listrik searah) ke logam yang hendak diproteksi, dimana arah arus listrik proteksi katodik berlawanan dengan arah arus listrik korosi. Proteksi katodik terdiri dari dua metode, yaitu metode anoda korban dan metode arus tanding. Proteksi katodik anoda korban merupakan proteksi katodik dengan cara menghubungkan logam yang akan diproteksi dengan logam yang lebih anodik. Proteksi katodik arus tanding merupakan sistem proteksi katodik yang dihubungkan dengan sumber daya DC eksternal, dimana katoda (struktur yang diproteksi) dihubungkan ke kutub negatif sedangkan anoda dihubungkan ke kutub positif sumber daya DC yang digunakan.

Struktur baja yang diproteksi dikatakan telah terproteksi secara katodik jika struktur memiliki potensial polarisasi sekurang kurangnya -800 mV terhadap Ag/AgCl atau -850 mV terhadap Cu/CuSO₄. Besarnya potensial polarisasi yang terjadi pada struktur yang diproteksi tergantung pada jumlah arus proteksi katodik yang diberikan. Besar arus listrik yang dibutuhkan untuk mencapai potensial polarisasi sesuai kriteria proteksi katodik dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu luas permukaan struktur, kondisi coating struktur, temperatur, sifat fisik dan kimia elektrolit, dan kecepatan relatif struktur dengan elektrolit. Kebutuhan arus listrik proteksi akan berubah jika beberapa faktor yang mempengaruhinya terjadi perubahan. Jika jumlah arus proteksi katodik yang diberikan terlalu besar dan potensial polarisasi lebih negatif dari -1100 mV terhadap Cu/CuSO₄, maka reaksi reduksi pada katoda dapat merusak lapisan coating struktur akibat produksi gas hidrogen (H₂) yang berlebihan. Pada proteksi katodik arus tanding, arus tersebut dapat diatur menggunakan unit power supply arus DC atau sering disebut transformer rectifier. Untuk itu diperlukan sistem kontrol yang dapat mengatur transformer rectifier agar nilai potensial polarisasi struktur tetap berada pada kondisi proteksi yaitu antara -850 mV sampai -1100 mV terhadap Cu/CuSO₄.

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan di atas, dapat dirumuskan masalah yang akan diselesaikan yaitu bagaimana cara menjaga nilai potensial polarisasi struktur berada pada kondisi proteksi yaitu antara -850 mV sampai -1100 mV terhadap Cu/CuSO₄.

KAJIAN PUSTAKA

Korosi

Korosi secara umum didefinisikan sebagai degradasi suatu material melalui interaksi lingkungan. Korosi pada material logam terjadi jika suatu logam teroksidasi menjadi ion atau senyawa oksida logamnya. Korosi yang biasa terjadi pada material engineering yang mendekati temperatur lingkungan terjadi pada lingkungan aqueous (mengandung air) dan merupakan reaksi elektrokimia. Lingkungan aqueous tersebut juga dapat disebut sebagai elektrolit. Pada kasus korosi yang terjadi dibawah tanah elektrolitnya merupakan tanah lembab. Proses korosi terdiri dari pelepasan elektron (oksidasi) logam dan konsumsi elektron oleh beberapa reaksi reduksi, seperti reduksi air dan oksigen. Reaksi oksidasi biasanya disebut reaksi anoda dan reaksi reduksi biasa disebut reaksi katoda. Kedua reaksi elektrokimia tersebut perlu agar terjadi korosi. Reaksi oksidasi mengakibatkan berkurangnya logam sedangkan reaksi reduksi berfungsi untuk mengkonsumsi elektron yang dilepaskan oleh reaksi oksidasi demi menjaga kenetralan muatan. Jika tidak, muatan negatif dengan jumlah besar akan timbul diantara logam dan elektrolit sehingga membuat proses korosi berhenti [1].

Pencegahan Korosi

Secara keseluruhan metode dalam pencegahan korosi dibagi menjadi dua, lapisan pelindung (coating), dan proteksi katodik. Coating digunakan untuk membentuk lapisan isolator yang bersifat kontinu pada permukaan logam yang diproteksi. Coating berfungsi untuk memisahkan logam dengan elektrolit (menghindari kontak logam dengan elektrolit) dan untuk memberi hambatan listrik yang tinggi sehingga reaksi elektrokimia tidak terjadi secara langsung. Pada kenyataannya, semua coating terdapat lubang yang terbentuk selama pengaplikasian, pengangkutan, atau pemasangan coating pada struktur. Lubang pada coating juga dapat timbul akibat degradasi coating, tekanan tanah, atau pergerakan struktur didalam tanah. Degradasi coating dapat mengakibatkan pengelupasan coating struktur, sehingga struktur terekspos ke lingkungan di dalam tanah. Bagian

yang terkelupas coating-nya dapat mengakibatkan korosi pada pipa dibawah tanah, meskipun coating melindungi sebagian besar permukaan pipa. Oleh karena itu, jarang pipa bawah tanah menggunakan coating tanpa proteksi katodik. Fungsi utama coating pada pipa atau struktur lainnya yang terproteksi katodik yaitu untuk mengurangi luas permukaan yang terekspos dengan tanah (elektrolit), sehingga mengurangi kebutuhan arus proteksi katodik logam yang diproteksi [1].

Salah satu definisi dari proteksi katodik merupakan teknik untuk mengurangi laju korosi pada permukaan logam dengan cara membuat logam yang ingin diproteksi sebagai katoda dalam sel elektrokimia. Cara ini diperoleh dengan merubah potensial logam yang ingin diproteksi ke arah negatif dengan menggunakan sumber daya eksternal (disebut sebagai proteksi katodik arus tanding) atau dengan menggunakan anoda korban. Pada sistem proteksi katodik arus tanding, arus listrik dialirkan ke struktur menggunakan power supply dengan menggunakan anoda yang dikubur didalam tanah. Pada sistem proteksi katodik anoda korban, hubungan galvanik antara material anoda korban seperti zinc atau magnesium dengan baja digunakan untuk memenuhi kebutuhan arus proteksi katodik [1].

Proteksi Katodik

Berdasarkan penjelasan diatas, menjadi jelas bahwa laju korosi dapat dikurangi jika setiap bagian permukaan logam yang tidak dilindungi coating pada struktur dapat menerima arus. Hal tersebut yang dilakukan dalam proteksi katodik. Arus searah (DC) dipaksakan mengalir ke seluruh permukaan struktur untuk merubah potensial struktur ke arah negatif, membuat laju korosi pada logam menurun [1].

Kriteria Proteksi Katodik

Kriteria proteksi katodik meliputi memiliki potensial polarisasi sekurang kurangnya -850mV diukur terhadap reference cell Cu/CuSO_4 (CSE) atau -800mV diukur terhadap Ag/AgCl . Jika arus listrik yang diberikan ke struktur (katoda) kurang maka potensial struktur akan kurang negatif dari -850mV (CSE) atau dikatakan belum terproteksi. Sebaliknya jika arus listrik yang diberikan terlalu berlebih akan mengakibatkan terjadinya over proteksi yang dapat berdampak pada rusaknya coating (cathodic disbondment). Sebagai rule of thumb, potential yang lebih negatif dari -1100mV (CSE) harus dihindari untuk meminimalisir proses degradasi coating. Faktor-faktor yang

mempengaruhi kebutuhan arus proteksi katodik yaitu: Temperatur, konsentrasis oksigen, pergerakan relatif elektrolit dengan elektroda, dan pH elektrolit.

Proteksi katodik menggunakan sebuah pengontrol potensial otomatis dengan transformer yang digerakkan oleh motor telah diterapkan pada pipa baja sirkulasi air laut. Kontrol ini mengatur secara otomatis jumlah arus yang dibutuhkan pada pipa untuk menjaga potensial proteksi dalam toleransi $\pm 5\text{mV}$ di bawah kondisi dimana kecepatan dan tahanan jenis air laut berubah terhadap waktu. Hasil dari pengujian telah memperlihatkan bahwa kehandalan dari kontrol potensial otomatis dipengaruhi oleh penempatan dari elektroda referensi dan nilai setting potensial [7]. Berdasarkan latar belakang masalah diatas, tujuan dari penelitian ini yaitu merancang bangun sistem kontrol otomatis pada transformer rectifier untuk proteksi katodik arus tanding.

METODE PENELITIAN

Metode Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram alur metode penelitian untuk perancangan dan pengujian sistem kontrol. Penelitian dimulai dari studi literatur. eneliti melakukan kajian literatur untuk memahami teori dan penelitian sebelumnya terkait sistem kontrol. Merancang sistem kontrol sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi desain. Menyiapkan komponen yang dibutuhkan untuk pembuatan sistem kontrol. Melakukan implementasi atau perakitan sistem kontrol. Melakukan uji coba terhadap sistem kontrol yang telah dibuat. Mengevaluasi apakah sistem kontrol sudah memenuhi kriteria desain yang telah ditetapkan: Jika tidak sesuai, kembali ke tahap perancangan sistem kontrol untuk perbaikan. Jika sesuai, lanjut ke tahap berikutnya. Menganalisis data dari hasil pengujian untuk mendapatkan kesimpulan. Menyimpulkan hasil penelitian berdasarkan analisis data.

Perancangan Transformer Rectifier Proteksi Katodik

Transformer Rectifier (TR) untuk proteksi katodik adalah perangkat yang digunakan untuk menyediakan arus listrik DC dalam sistem proteksi katodik (Cathodic Protection, CP). Proteksi katodik adalah metode untuk mencegah korosi pada struktur logam yang terendam atau tertanam, seperti pipa bawah tanah, tangki penyimpanan, dan struktur laut (offshore platforms).

Komponen utama dan Fungsinya

Transformer berfungsi menurunkan tegangan AC 220V atau 380V ke tegangan yang sesuai untuk sistem proteksi katodik (misalnya, 24V AC atau 48V AC). Rectifier (Penyearah Dioda) mengubah tegangan AC yang diturunkan oleh transformator menjadi DC untuk digunakan dalam proteksi katodik. Control & Monitoring System mengatur arus dan tegangan keluaran sesuai dengan kebutuhan proteksi katodik dan memantau performa sistem. Output DC untuk proteksi katodik mengalirkan arus DC ke struktur logam yang akan dilindungi dari korosi.

Cara Kerja

Sumber listrik AC masuk ke transformer dan diturunkan tegangannya. Rectifier mengubah tegangan AC menjadi DC. Arus DC dialirkan ke anoda dalam sistem proteksi katodik. Elektron mengalir ke struktur logam yang dilindungi (katoda), mencegah reaksi oksidasi (korosi).

Aplikasi

Pipa bawah tanah dan bawah laut, tangki penyimpanan minyak dan gas Struktur jembatan dan dermaga, Kapal dan platform lepas pantai.

Perangkat ini memastikan bahwa struktur logam tetap aman dari korosi, memperpanjang umur operasionalnya, dan mengurangi biaya perawatan serta penggantian.

Dalam perancangan rangkaian transformer rectifier diperlukan perancangan sistem proteksi katodik agar didapat spesifikasi minimal komponen yang akan digunakan. Dalam perancangan sistem proteksi katodik perlu diketahui luas permukaan katoda serta lingkungan (elektrolit) pada sistem proteksi katodik yang digunakan untuk menentukan jumlah keperluan arus proteksi. Luas permukaan katoda yang digunakan dalam sistem proteksi katodik arus tanding dapat dilihat pada tabel 4.



Gambar 1. Flowchart rancang bangun sistem kontrol tansformer rectifier proteksi katodik arus tanding

Tabel 1. Luas permukaan katoda

No.	Panjang (cm)	Lebar (cm)	$L=P \times L \times 2$ (cm ²)	Luas (m ²)	Luas Kumulatif (m ²)
1	26,6	13,5	718,2	0,07182	0,07182
2	26,1	13,5	704,7	0,07047	0,14229
3	26,6	13,5	718,2	0,07182	0,21411
4	24,6	13,5	664,2	0,06642	0,28053
5	27,4	13,5	739,8	0,07398	0,35451
6	25,8	13,5	696,6	0,06966	0,42417
7	24,6	13,5	664,2	0,06642	0,49059
8	27,2	13,5	734,4	0,07344	0,56403
9	26,1	13,5	704,7	0,07047	0,63450
10	27,1	13,5	731,7	0,07317	0,70767

Total kebutuhan arus proteksi katodik ditentukan oleh persamaan-persamaan berikut:

$$I_t = iA(1 - \eta_c)$$

Luas Permukaan Anoda:

$$A_A = \frac{I_t}{C_A}$$

Tahanan Anoda:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\log_e \frac{4L}{d} - 1 \right)$$

Tegangan Keluaran Transformer Rectifier:

$$V_{TR} = I_{TR} \times R$$

Kapasitas Daya Transformer Rectifier:

$$P_{TR} = V_{TR} I_{TR}$$

Data yang diketahui:

$$i = 0,150 \text{ A/m}^2$$

$$A = 0,70767 \text{ m}^2$$

$$\eta_c = 0$$

$$C_A = 410 \text{ A/m}^2$$

$$\rho = 30 \text{ ohm.cm}$$

$$I_{TR} = 5 \text{ Ampere}$$

Data Hasil Perhitungan:

$$d = ((0,15+0,3) \times 2) / \pi = 0,287 \text{ cm}$$

$$L = 2,872 \text{ cm}$$

Dari perhitungan yang telah dilakukan ditetapkan kapasitas catu daya adalah sebagai berikut: Tegangan keluaran maksimum adalah 25 volt DC, arus keluaran maksimum adalah 5 ampere DC, sumber tegangan adalah 220 volt AC, 1 phase, 50 Hz, dan kapasitas daya sebesar 125 Watt.

Tabel 2. Spesifikasi komponen transformer rectifier

No.	Komponen	Spesifikasi
1	Variac	Daya 500 watts V: 0-240 VAC
2	Transformer Stepdown	5 ampere tegangan 220V / 50 V
3	Dioda Bridge	Full wave bridge, 20 ampere
4	Kapasitor	4700µF 35V

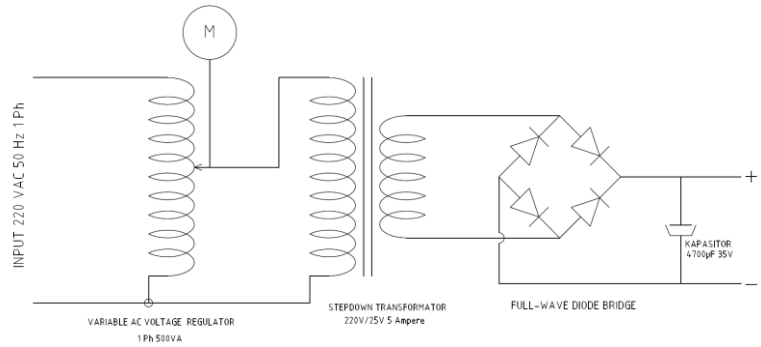
komponen-komponen tersebut dirangkai menjadi transformer rectifier yang hasil rangkaiannya dapat dilihat pada gambar 2. Gambar tersebut merupakan rangkaian power supply dengan penyearah gelombang penuh (full-wave rectifier) yang mengubah tegangan AC 220V menjadi DC 25V. Berikut adalah penjelasan komponennya: Input 220V AC 50Hz 1Ph, sumber tegangan listrik 1 fase 220V AC sebagai input utama, variable AC Voltage Regulator (1Ph 500VA), sebuah regulator tegangan AC variabel yang digunakan untuk mengatur besarnya tegangan yang masuk ke transformator, step-down transformer (220V/25V, 5A), transformator penurun tegangan yang mengubah 220V AC menjadi 25V AC dengan kapasitas arus 5A, full-wave diode bridge, jembatan dioda (bridge rectifier) yang menyearahkan tegangan AC 25V menjadi DC 25V dengan memanfaatkan empat dioda untuk menghasilkan penyearahan gelombang penuh, kapasitor (4700µF 35V), kapasitor elektrolit berfungsi sebagai filter untuk menghaluskan tegangan DC yang keluar dari rangkaian penyearah, mengurangi riak (ripple voltage), output 0–25V DC

Tegangan DC 25V yang stabil sebagai keluaran, yang dapat digunakan untuk memberi daya pada perangkat elektronik atau sistem kelistrikan lainnya. Secara keseluruhan, rangkaian ini digunakan untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil dari sumber AC 220V, dengan kemungkinan pengaturan tegangan melalui variable AC regulator.

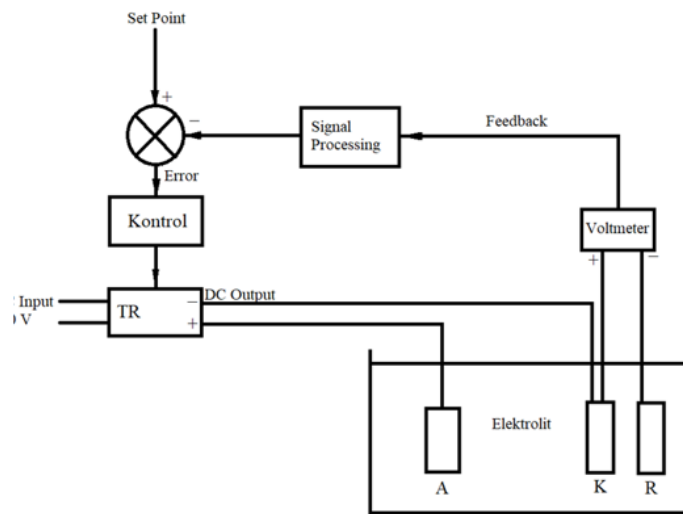
Perancangan

Rangkaian sistem kontrol transformer rectifier proteksi katodik adalah komponen elektronika yang berfungsi untuk menggerakkan motor DC untuk menggeser kontak pada variac, sehingga merubah tegangan DC. Sistem kontrol transformer rectifier dapat dilihat pada gambar 3. Keterangan: TR: Transformer Rectifier, A: Anoda, K: Katoda, R: Reference Cell.

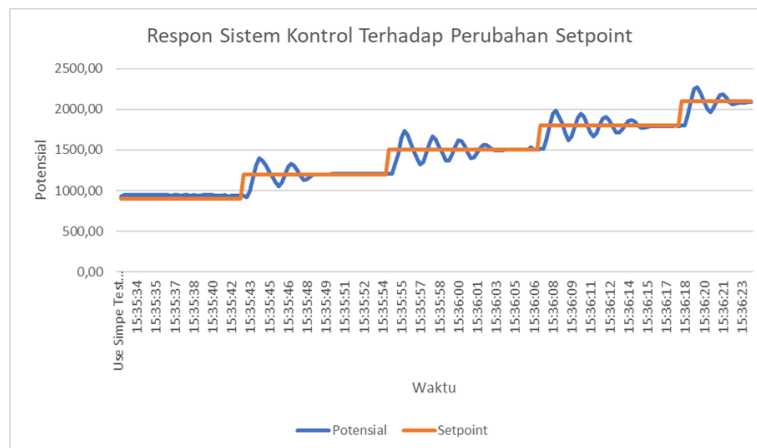
Komponen sistem kontrol transformer rectifier terdiri dari: Driver Motor DC LN298N, mikrokontroler Arduino UNO, keypad 4x4, LCD I2C, power supply DC 12 V 3 Ampere, motor DC 12V 25 Watt, limit switch, LED.



Gambar 2. Rangkaian transformer rectifier



Gambar 3. Sistem kontrol transformer rectifier proteksi katodik



Gambar 4. Grafik respon sistem kontrol terhadap perubahan setpoint

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Sistem Kontrol Terhadap Perubahan Setpoint

Pengujian ini berfungsi untuk mengetahui kecepatan respon sistem kontrol terhadap

perubahan setting nilai potensial, dimana data hasil pengujian direkam secara langsung ke excel berupa nilai potensial terhadap waktu.

Dari grafik tersebut didapatkan waktu sistem kontrol untuk menyesuaikan potensial terhadap setpoint.

Kecepatan Respon = Perubahan Setpoint/(Waktu Penyesuaian Rata-rata)=300 mV/7 detik=42,65 mV/detik

Pengujian Sistem Kontrol Terhadap Perubahan Luas Permukaan Katoda

Pengujian ini berfungsi untuk menguji respon sistem kontrol terhadap perubahan beban (luas permukaan katoda).

Dari hasil pengujian pada setpoint -900mV dapat dilihat bahwa error terbesar yaitu sebesar 10,46 mV dan error rata-rata sebesar 5,375mV. Dari hasil pengujian pada setpoint -1000mV dapat dilihat bahwa error terbesar yaitu sebesar 11,73 mV dan error rata-rata sebesar 4,884mV. Dari hasil pengujian pada setpoint -1100mV dapat dilihat bahwa error terbesar yaitu sebesar 10,07 mV dan error rata-rata sebesar 3,966mV.

Tabel 3. Data hasil pengujian pada setpoint -900mV

No.	Plat	Luas Permukaan Katoda (m ²)	Potensial (-mV)	error (mV)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)
1	1	0,07182	894,43	5,57	2,29	46
2	1 - 2	0,14229	904,2	4,2	2,62	56
3	1 - 3	0,21411	909,09	9,09	2,94	68
4	1 - 4	0,28053	894,43	5,57	3,27	80
5	1 - 5	0,35451	894,43	5,57	3,68	88
6	1 - 6	0,42417	894,43	5,57	4,06	94
7	1 - 7	0,49059	909,09	9,09	4,45	100
8	1 - 8	0,56403	904,2	4,2	5,32	108
9	1 - 9	0,6345	889,54	10,46	6,36	122
10	1 - 10	0,70767	889,54	10,46	7,42	130

Tabel 4. Data hasil pengujian pada setpoint -1000mV

No.	Plat	Luas Permukaan Katoda (m ²)	Potensial (-mV)	error (mV)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)
1	1	0,07182	992,18	7,82	3,09	60
2	1 - 2	0,14229	1001,96	1,96	3,34	72
3	1 - 3	0,21411	992,18	7,82	3,54	82
4	1 - 4	0,28053	997,07	2,93	3,76	94
5	1 - 5	0,35451	997,07	2,93	4,11	100
6	1 - 6	0,42417	1006,84	6,84	4,39	108
7	1 - 7	0,49059	1001,96	1,96	4,65	116
8	1 - 8	0,56403	1001,96	1,96	6,02	138
9	1 - 9	0,63450	997,07	2,93	7,81	172
10	1 - 10	0,70767	1011,73	11,73	9,23	184

Tabel 5. Data hasil pengujian pada setpoint -1100mV

No.	Plat	Luas Permukaan Katoda (m ²)	Potensial (-mV)	error (mV)	Tegangan Output (V)	Arus Output (mA)
1	1	0,07182	1099,71	0,29	3,81	80
2	1 - 2	0,14229	1094,82	5,18	3,91	90
3	1 - 3	0,21411	1099,71	0,29	4,12	100
4	1 - 4	0,28053	1104,59	4,59	4,23	112
5	1 - 5	0,35451	1099,71	0,29	4,33	116
6	1 - 6	0,42417	1089,93	10,07	4,72	122
7	1 - 7	0,49059	1109,48	9,48	4,95	126
8	1 - 8	0,56403	1104,59	4,59	8,01	152
9	1 - 9	0,6345	1099,71	0,29	9,89	178
10	1 - 10	0,70767	1104,59	4,59	13,25	206

KESIMPULAN

Dari hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol pada transformer rectifier untuk proteksi katodik arus tanding mampu memberikan

pengaturan potensial katoda sesuai setpoint dengan error maksimal sebesar 11,73 mV dengan kecepatan respon rata-rata sebesar 42,65 mV per detik dan sistem kontrol sudah mampu menjaga katoda dari serangan korosi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Peabody, Control of Pipeline Corrosion, Houston, Texas: NACE Press, 2001.
- [2] J. Paul Guyer, An Introduction to Cathodic Protection, Woodcliff: CED Press, 2009.
- [3] DNV, Recommended Practice RP B401 Cathodic Protection Design, United States: DNV AS, 1993.
- [4] N. Internasional, CP2-Cathodic Protection Course Manual, United States: NACE Press, 2008.
- [5] M. Banzi and M. Shiloh, Getting Started with Arduino, Sebastopol: OTS Press, 2014.
- [6] Sinuarduino, "mengenai arduino software IDE," [Online]. Available: <https://www.sinuarduino.com/artikel/mengenai-arduino-software-ide.html>. (Diakses pada 21 Mei 2021).
- [7] T. Kobayashi, H. Nakauchi, Y. Kanda, K. Osato and H. Togano, "Cathodic Protection of Piping System by Automatic Control," Vol. 13, No. 10/11, vol. 13, no. 10-11, pp. 25-29, 2009.
- [8] Polsri, "Motor DC," [Online]. Available: <http://polsri.ac.id/repository/BAB-II-LA.pdf>. (Diakses pada 21 Mei 2021).
- [9] J. Edy, "BAB 2," Perpustakaan FT UNRAM, [Online]. Available: <http://perpusft.unram.ac.id/repository/BAB2.pdf>. (Diakses pada 21 Mei 2021).
- [10] MathWorks, "PID Control," MathWorks, Inc, 22 Mei 2018. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/discovery/pid-control.html>. (Diakses pada 21 Mei 2021).