

PERANCANGAN KENDALI LAJU ALIRAN HIDROGEN DAN OKSIGEN PADA SIMULATOR *SOLID OXIDE FUEL CELL* MENGGUNAKAN METODE KONTROL LOGIKA FUZZY

Andra Kurniahadi^{*)}, Sudjadi dan Darjat

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

^{*)}*E-mail: andra.kurniahadi@gmail.com*

Abstrak

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) adalah sel elektrokimia yang mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan cara mengoksidasi bahan bakarnya. SOFC mempunyai efisiensi yang tinggi dan sisa pembakaran yang bersih. Penelitian tentang SOFC semakin berkembang terutama dalam merancang kontroler yang tepat untuk mengatur tegangan keluaran karena sistem yang nonlinier, respon dinamis yang lambat dan batasan-batasan pengoperasian SOFC yang aman. Pada penelitian ini dirancang suatu simulator SOFC dengan kontroler laju aliran hidrogen dan oksigen. Perancangan simulator SOFC berdasarkan penelitian sebelumnya dan dirancang menggunakan komponen elektronika. Kontroler dirancang dengan menggunakan metode kontrol logika fuzzy Sugeno yang memiliki nilai tegas dalam penentuan sudut servo laju aliran H₂ dan O₂. Hasil pengujian diperoleh set point tegangan dapat dicapai yaitu rata-rata 334,73 volt dengan Δtekanan H₂-O₂ rata-rata dibawah batas aman yang disarankan yaitu 3602 Pa. Kontroler dapat memperbaiki tegangan keluaran dari simulator SOFC saat diberikan gangguan, tetapi Δtekanan H₂-O₂ melebihi batas aman 4000 Pa yang disarankan.

Kata kunci: hidrogen, oksigen, sel bahan bakar, kontroler logika fuzzy, solid oxide fuel cell

Abstract

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) is an electrochemical cell that converts chemical energy into electrical energy by oxidizing the fuel. SOFC has high efficiency and clean oxidation residue. The research of SOFC has grown rapidly especially on designing the right controller to control output voltage due to nonlinearity system, slow dynamic response, and safe SOFC operating restrictions. This research has designed a SOFC simulator with controller to control the flow rate of hydrogen and oxygen. This SOFC simulator was designed based on a model from previous research and built by using electronics component. Controller was designed by using fuzzy logic control with Sugeno method which has firm value in determining the servo angle that represent the flow rate of H₂ and O₂. The result shows that the output voltage can reach the set point with the average value is 334,73 volt. The average Δpressure of H₂-O₂ is 3602 Pa which is below the safety limit. Controller can fix the output voltage of SOFC simulator when disturbances were given, but Δpressure of H₂-O₂ still exceeds more than recommended value of pressure safety limit.

Keywords: hydrogen, oxygen, fuel cell, fuzzy logic controller, solid oxide fuel cell

1. Pendahuluan

SOFC merupakan perangkat pengubah energi elektrokimia gas menjadi listrik secara langsung yang berbasis material keramik. Jika gas yang digunakan dalam peralatan adalah gas hidrogen, maka akan menghasilkan produk buangan berupa uap air dan panas. Komponen utama SOFC adalah anoda, elektrolit, dan katoda yang dibuat dari material keramik dan beroperasi pada temperatur 500-1000°C [1]. Hidrogen (H₂) dialirkan ke bagian anoda pada SOFC, sedangkan pada katoda dialirkan oksigen (O₂) atau udara. SOFC menggunakan material keramik seperti Zirkonium

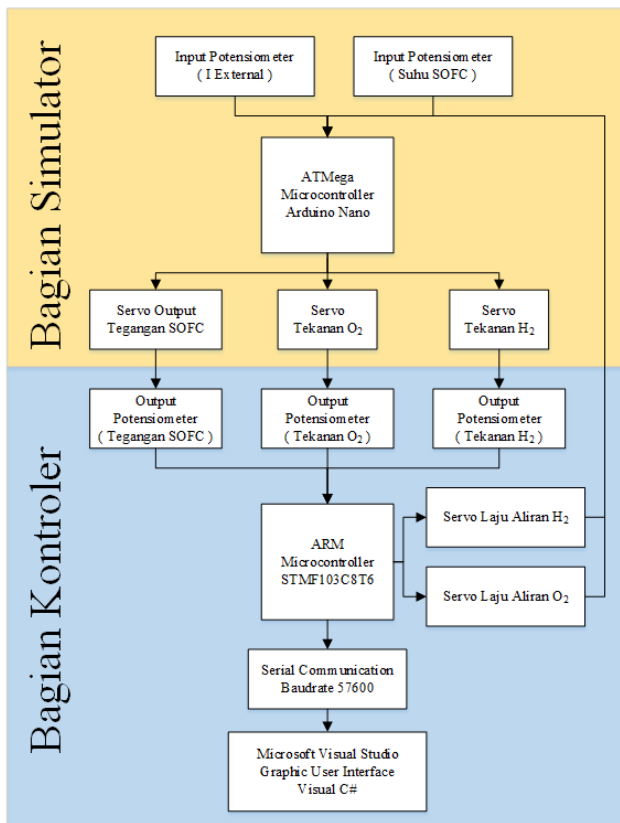
Oksida atau Kalsium Oksida sebagai elektrolit. Dengan adanya elektrolit, maka gas hidrogen tidak akan bercampur dengan oksigen. Apabila anoda dan katoda dihubungkan dengan sebuah penghantar listrik, maka akan terjadi aliran elektron dari anoda ke katoda sehingga reaksi kimia yang terjadi menghasilkan arus listrik. Elektron yang mengalir ke katoda akan bereaksi dengan ion positif dan oksigen pada sisi katoda membentuk air (H₂O) [2]. Masalah dari SOFC adalah pengontrolan laju aliran antara H₂ dan laju aliran O₂ dimana laju aliran antara kedua gas tersebut harus sesuai agar dapat menghasilkan tegangan keluaran dari SOFC yang optimal. Laju aliran yang tidak sesuai juga dapat mengakibatkan tekanan pada kedua gas tersebut

tidak sesuai dengan batas aman perbedaan tekanan antara kedua gas tersebut. Batas aman perbedaan tekanan H₂ dan O₂ adalah sebesar 4000 Pa. Sehingga harus dirancang suatu kontroler yang dapat mengatur laju aliran H₂ dan O₂ yang masuk ke dalam sel bahan bakar. Pengujian kontroler laju aliran H₂ dan O₂ dilakukan pada sebuah simulator SOFC. Simulator SOFC digunakan agar dapat melihat karakteristik dari kontroler laju aliran H₂ dan O₂ pada SOFC. Penggunaan simulator SOFC pada pengujian juga bertujuan agar mengurangi dampak akibat kesalahan apabila kontroler belum berhasil bekerja. Simulator SOFC dirancang berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Li Sun [3] dan Edwin [4]. Perancangan simulator SOFC diharapkan dapat memberikan karakteristik menyerupai *plant* yang sebenarnya sehingga kontroler laju aliran H₂ dan O₂ dapat diuji dengan baik.

2. Metode

2.1. Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras meliputi perancangan simulator SOFC dan perancangan kontroler laju aliran H₂ dan O₂ SOFC. Gambar 1 merupakan diagram blok perancangan perangkat keras secara umum.



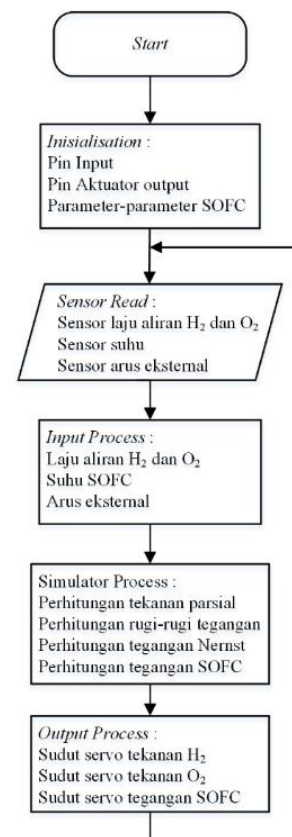
Gambar 1. Diagram blok perancangan perangkat keras

Perancangan perangkat keras dimulai dari masukan ke bagian simulator berupa nilai laju aliran H₂ dan O₂, nilai arus eksternal, dan nilai suhu. Sistem mikrokontroler

arduino akan mengolah nilai *input* dan akan menghasilkan nilai keluaran berupa nilai tegangan SOFC, nilai tekanan H₂, dan nilai tekanan O₂. Nilai keluaran tegangan SOFC, tekanan H₂, dan tekanan O₂ akan diteruskan ke bagian kontroler. Hasil dari proses pada mikrokontroler STM32F103C8T6 adalah nilai laju aliran H₂ dan O₂ yang kemudian diumpankan ke bagian simulator. STM32F103C8T6 juga akan mengirimkan data ke perangkat lunak akuisisi data dengan metode *data parsing*. Tampilan pada perangkat lunak akuisisi data adalah grafik dan tabel.

2.2. Perancangan Algoritma Sistem

2.2.1. Algoritma Simulator SOFC



Gambar 2. Diagram alir simulasi SOFC

Gambar 2 merupakan diagram alir untuk algoritma kerja sistem simulator. Tahapan-tahapan pada diagram alir diuraikan sebagai berikut :

1. Inisialisasi *port input* yang digunakan sebagai *input* dan *port aktuator output* yang digunakan sebagai *output*. Kemudian inisialisasi nilai-nilai parameter dari model SOFC.
2. Baca nilai laju aliran H₂, laju aliran O₂, arus eksternal SOFC, dan suhu SOFC.
3. Proses masukan yang diperoleh dari 4 *input* yaitu laju aliran H₂, laju aliran O₂, arus eksternal SOFC, dan suhu SOFC.

4. Kalkulasi tekanan parsial, rugi-rugi tegangan, tegangan Nernst, dan tegangan SOFC.
5. Nilai parameter tekanan parsial H_2 , tekanan parsial O_2 , dan tegangan SOFC diperoleh. Kalkulasi nilai untuk sudut servo. Nilai keluaran yang dihasilkan dibagi dengan nilai maksimal dari keluaran tersebut kemudian dikalikan dengan sudut 180 derajat. Nilai yang dihasilkan berupa sudut untuk tekanan H_2 , tekanan O_2 , dan tegangan SOFC.
6. Aktuasi motor servo berdasarkan nilai sudut yang telah diperoleh.
7. Sistem kembali melakukan *loop* setelah tahap 1-6 selesai dilakukan.

2.2.2. Algoritma Kontroler Laju Aliran



Gambar 3. Diagram alir kontroler laju aliran H_2 dan O_2

Gambar 3 merupakan diagram alir untuk algoritma sistem kontrol. Tahapan-tahapan pada diagram alir adalah sebagai berikut :

1. Inisialisasi *port* sensor yang digunakan sebagai *input port* aktuator yang digunakan sebagai *output*. Kemudian membaca nilai set point yang telah diberikan.
2. Baca nilai tegangan SOFC, laju aliran H_2 , laju aliran O_2 , tekanan H_2 , tekanan O_2 , dan suhu SOFC.
3. Proses masukan yang diperoleh dari dua *input* yaitu tegangan SOFC dan arus eksternal SOFC yang diberikan. Kalkulasi nilai set point tegangan dengan

hasil keluaran tegangan SOFC. Sehingga diperoleh dari selisih keduanya nilai *error*. Sedangkan nilai $\Delta error$ diperoleh dari selisih nilai *error* aktual dengan *error* sebelumnya.

4. *Error* dan $\Delta error$ diklasifikasikan dan diolah dengan menggunakan metode *fuzzy logic* dengan membership function dan *rule base* yang telah ditentukan.
5. Kalkulasi nilai pembobotan rata-rata melalui metode weighted of average diantaranya yaitu untuk laju aliran H_2 dan laju aliran O_2 yang berupa sudut servo.
6. Aktuasi aktuator berdasarkan nilai sudut servo yang telah diperoleh sebelumnya.
7. Kirim data-data dari *input* maupun *output* dari simulator SOFC menuju graphic user interface visual C# pada personal computer dengan menggunakan USB TTL CH340.
8. Sistem kembali melakukan *loop* setelah tahap 1-7 selesai dilakukan.

2.3. Perancangan Sistem Proses Simulator SOFC

Perancangan *prototype* simulator SOFC berdasar pada penelitian Edwin Julian [4] dan Li Sun [3]. Nilai-nilai parameter dalam perancangan diasumsikan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter-parameter simulator SOFC

Parameter	Keterangan	Nilai	Satuan
T	Suhu mutlak	1273	K
F	Konstanta Faraday	96487	C/mol
R	Konstanta gas universal	8,314	J/(mol K)
E_0	Tegangan ideal	1,1443	volt
N_c	Jumlah sel	384	-
K_r	Konstanta <i>plant</i>	$0,996 \times 10^{-3}$	-
K_{H_2}	Konstanta molar katup hidrogen	$8,43 \times 10^{-6}$	mol/(detik Pa)
K_{H_2O}	Konstanta molar katup air	$2,77 \times 10^{-6}$	mol/(detik Pa)
K_{O_2}	Konstanta molar katup oksigen	$2,49 \times 10^{-5}$	mol/(detik pa)
τ_{H_2}	Tanggapan waktu aliran hidrogen	26,1	detik
τ_{H_2O}	Tanggapan waktu aliran air	78,3	detik
τ_{O_2}	Tanggapan waktu aliran oksigen	2,91	detik
r_{H-O}	Rasio aliran hidrogen-oksigen	1,145	-
r	<i>Ohmic loss</i>	0,126	ohm
τ_f	Tanggapan waktu prosesor bahan bakar	5	detik
α	Konstanta tafel	0,05	-
β	Slop tafel	0,11	-
I_L	Batas kerapatan arus	800	A

Proses simulator dimulai dari kalkulasi nilai tekanan parsial H_2 , H_2O , dan O_2 [3]. Kalkulasi nilai tekanan parsial

H₂ berdasarkan nilai laju aliran H₂ yang diberikan pada simulator dilakukan dengan menggunakan persamaan 1.

$$p_{H_2.o} = \frac{1/K_{H_2}}{1+\tau_{H_2}s} (q_{H_2.o} - 2K_r I) \quad (1)$$

Dimisalkan,

$$x = p_{H_2.o}; k1 = 1/K_{H_2}; u = q_{H_2.o} - 2K_r I$$

Persamaan 1 ditransformasibalikan dan kemudian didiskretkan dengan metode *backward difference* agar nilai dari persamaan tekanan parsial H₂ dapat diperoleh berdasarkan perubahan waktu seperti pada persamaan 2.

$$x(k) = A \cdot x(k-1) + B \cdot u(k) \quad (2)$$

$$A = \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{\tau_{H_2}}\right)} \quad B = \frac{T \cdot k1}{\tau_{H_2} \cdot \left(1 + \frac{T}{\tau_{H_2}}\right)}$$

Persamaan 3 merupakan persamaan untuk mengkalkulasi nilai tekanan parsial dari H₂O.

$$p_{H_2O.o} = \frac{1/K_{H_2O}}{1+\tau_{H_2O}s} K_r I \quad (3)$$

Dimisalkan,

$$y = p_{H_2O.o}; k2 = 1/K_{H_2O}; v = 2K_r I$$

Persamaan 3 ditransformasibalikan dan kemudian didiskretkan dengan metode *backward difference* agar nilai dari persamaan tekanan parsial H₂O dapat diperoleh berdasarkan perubahan waktu seperti pada persamaan 4.

$$y(k) = C \cdot y(k-1) + D \cdot v(k) \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{\tau_{H_2O}}\right)} \quad D = \frac{T \cdot k2}{\tau_{H_2O} \cdot \left(1 + \frac{T}{\tau_{H_2O}}\right)}$$

Persamaan 5 merupakan persamaan untuk mengkalkulasi nilai tekanan parsial dari O₂.

$$p_{O_2.o} = \frac{1/K_{O_2}}{1+\tau_{O_2}s} (q_{O_2.o} - K_r I) \quad (5)$$

Dimisalkan,

$$z = p_{O_2.o}; k3 = 1/K_{O_2}; w = q_{O_2.o} - K_r I$$

Persamaan 5 ditransformasibalikan dan kemudian didiskretkan dengan metode *backward difference* agar nilai dari persamaan tekanan parsial O₂ dapat diperoleh berdasarkan perubahan waktu seperti pada persamaan 6.

$$z(k) = E \cdot z(k-1) + F \cdot w(k) \quad (6)$$

$$E = \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{\tau_{O_2}}\right)} \quad F = \frac{T \cdot k3}{\tau_{O_2} \cdot \left(1 + \frac{T}{\tau_{O_2}}\right)}$$

Nilai tegangan keluaran simulator SOFC memiliki rugi-rugi tegangan. Kalkulasi rugi-rugi tegangan terdiri dari V_{ohmic} , V_{act} , dan V_{conc} [5]. Perhitungan matematis rugi-rugi tegangan tersebut dinyatakan oleh persamaan 7, 8, dan 9.

$$V_{ohmic} = I \times R_{ohmic} \quad (7)$$

$$V_{act} = \alpha + \beta \ln I \quad (8)$$

$$V_{conc} = \frac{-RT}{2F} \ln \left(1 - \frac{I}{I_L}\right) \quad (9)$$

Tegangan keluaran SOFC dapat dikalkulasikan dengan menggunakan persamaan 10 [3]:

$$V_{dc} = E_{cell} - V_{ohm} - V_{act} - V_{conc} \quad (10)$$

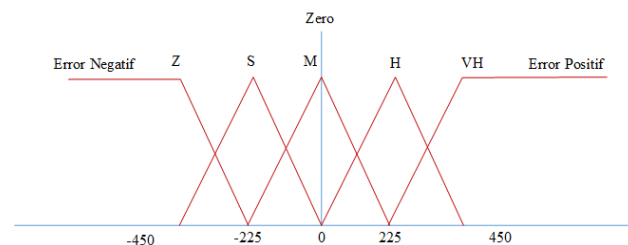
E_{cell} adalah persamaan tegangan Nernst seperti pada persamaan 11 [3]:

$$E_{cell} = N_{cell} \left(E_o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{p_{H_2O} (p_{O_2.o}/101325)^{0.5}}{p_{H_2O_o}} \right) \quad (11)$$

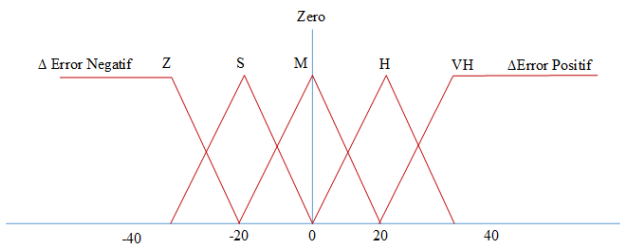
2.4. Rancangan Fuzzy Logic Controller (FLC)

2.4.1. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi FLC memiliki masukan berupa *error* dan $\Delta error$ dari pembacaan nilai tegangan keluaran SOFC terhadap *set point* [6]. *Set point* yang digunakan adalah 333 volt. Fungsi keanggotaan *error* dan $\Delta error$ digambarkan dalam grafik himpunan keanggotaan pada Gambar 4 dan Gambar 5. Batas nilai himpunan keanggotaan *error* diperoleh dari nilai tegangan maksimal yang dapat dihasilkan oleh simulator SOFC saat laju aliran H₂ dan O₂ mencapai 1 mol/s. Batas nilai himpunan keanggotaan $\Delta error$ diperoleh dari perubahan nilai *error* yang paling sering terjadi.



Gambar 4. Himpunan keanggotaan masukan *error fuzzy*



Gambar 5. Himpunan keanggotaan masukan $\Delta error$ fuzzy

2.4.2. Basis Aturan

Basis aturan FLC laju aliran H_2 dan O_2 dirancang menyesuaikan dengan karakteristik dari simulator SOFC dan keluaran yang diharapkan sebagai keluaran sudut untuk motor servo. Servo dikopel dengan tahanan variabel pada rangkaian pembagi tegangan yang menghasilkan tegangan keluaran 0-5 volt. Tegangan keluaran dari rangkaian pembagi tegangan diteruskan untuk pembacaan ADC pada mikrokontroler untuk merepresentasikan nilai laju aliran H_2 dan O_2 .

Tabel 2. Basis aturan sudut servo nilai laju aliran H_2

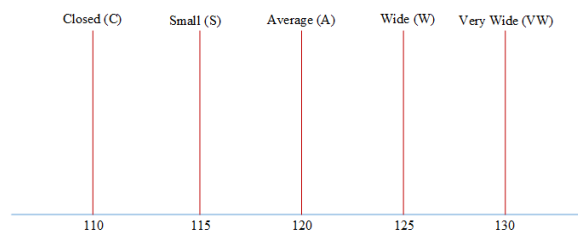
$\Delta Error$	Error	Error Negatif		Zero	Error Positif	
		Z	S	M	H	VH
$\Delta Error$ Negatif	Z	C	S	A	S	C
	S	S	A	VW	A	S
Zero	M	VW	VW	VW	VW	VW
$\Delta Error$ Positif	H	S	A	VW	A	S
	VH	C	S	A	S	C

Tabel 3. Basis aturan sudut servo nilai laju aliran O_2

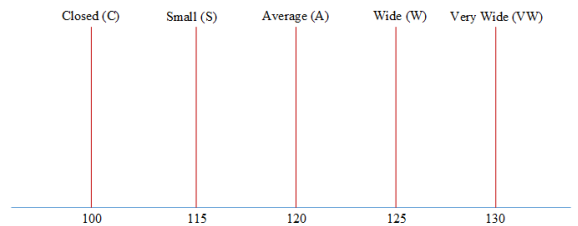
$\Delta Error$	Error	Error Negatif		Zero	Error Positif	
		Z	S	M	H	VH
$\Delta Error$ Negatif	Z	C	S	A	S	C
	S	S	A	VW	A	S
Zero	M	VW	VW	VW	VW	VW
$\Delta Error$ Positif	H	S	A	VW	A	S
	VH	C	S	A	S	C

2.4.3. Singleton

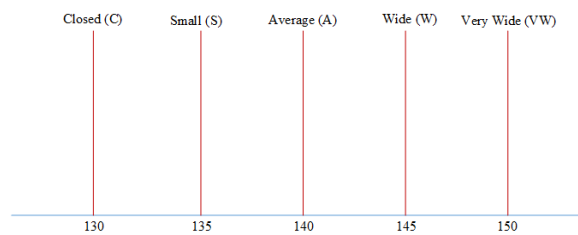
Singleton pada penelitian ini merupakan nilai nyata yang digunakan untuk menghasilkan keluaran dari FLC laju aliran H_2 dan O_2 berupa sudut-sudut servo. Digunakan 6 buah singleton. 3 buah singleton untuk servo laju aliran H_2 dan 3 buah untuk servo laju aliran O_2 . Singleton yang digunakan kontroler laju aliran H_2 dan O_2 pada SOFC adalah sebagai berikut :



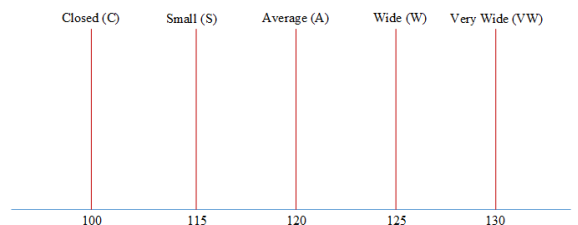
Gambar 6. Singleton sudut servo laju aliran H_2



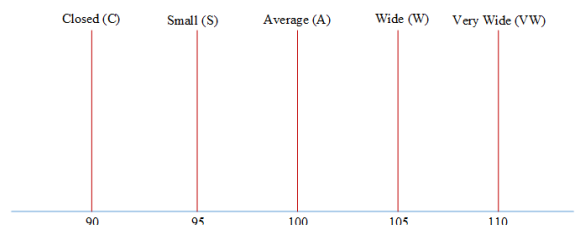
Gambar 7. Singleton 2 sudut servo laju aliran H_2



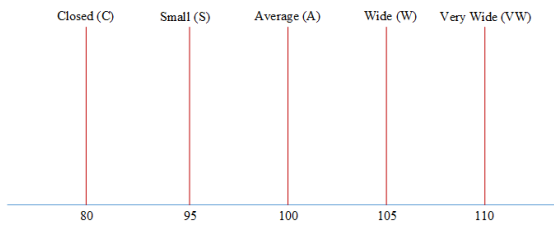
Gambar 8. Singleton 3 sudut servo laju aliran H_2



Gambar 9. Singleton 1 sudut servo laju aliran O_2



Gambar 10. Singleton 2 sudut servo laju aliran O_2



Gambar 11. Singleton 3 sudut servo laju aliran O₂

Penggunaan singleton adalah sebagai berikut :

1. Jika arus eksternal 300 A gunakan *singleton 1*.
2. Jika arus eksternal lebih kecil dari 300 A gunakan *singleton 2*.
3. Jika arus eksternal lebih besar dari 300 A gunakan *singleton 3*.

2.4.4. Defuzzifikasi

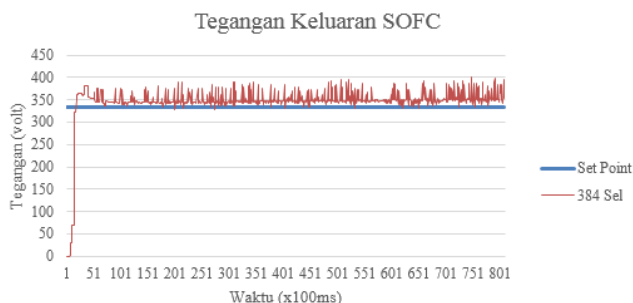
Defuzzifikasi menggunakan metode *weighted of average* dengan menjumlahkan tiap bobot dengan nilai keluaran yang dihasilkan, kemudian dibagi dengan jumlah bobot [7].

$$Z_{wa} = \sum_{n=1}^{n=25} \frac{Z_n W_n}{W_n} \quad (12)$$

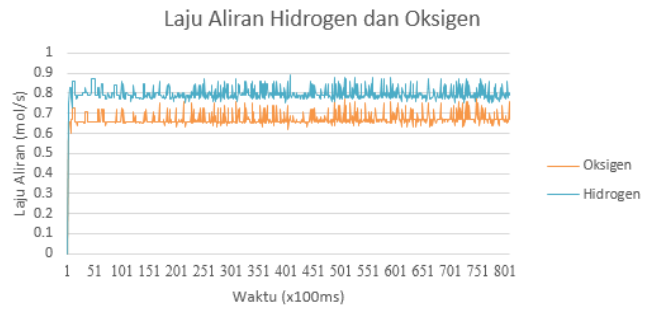
3. Hasil dan Analisis

3.1. Pengujian Simulator Tanpa Kontroler

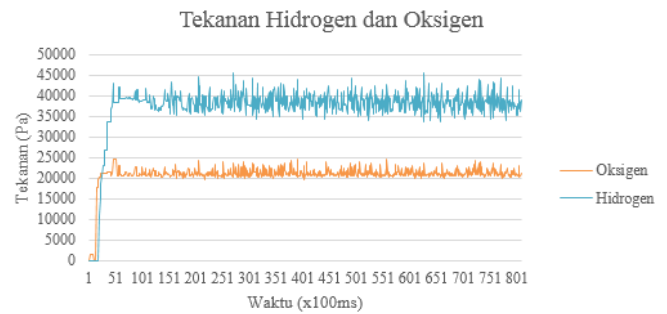
Simulator SOFC diuji dengan nilai arus eksternal 300 A dan nilai suhu 1000K. Nilai laju aliran diberikan di atas 0,7 mol/s untuk H₂ dan 0,6 mol/s untuk O₂. Grafik nilai tegangan keluaran SOFC ditampilkan pada Gambar 12. Grafik nilai laju aliran H₂ dan O₂ ditampilkan pada Gambar 13. Grafik nilai tekanan H₂ dan O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 14. Grafik nilai Δtekanan H₂-O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 15.



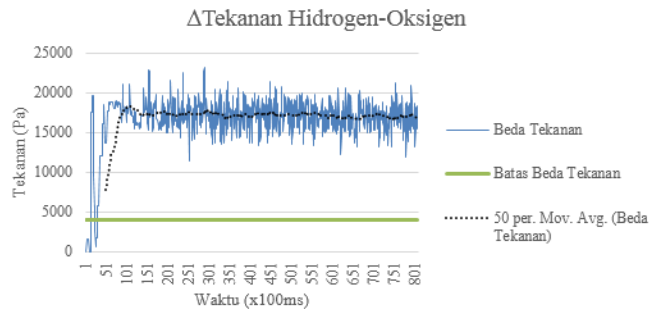
Gambar 12. Grafik tegangan keluaran SOFC tak terkontrol



Gambar 13. Grafik laju aliran SOFC tak terkontrol



Gambar 14. Grafik tekanan SOFC tak terkontrol



Gambar 15. Grafik Δtekanan H₂-O₂ SOFC tak terkontrol

Tabel 4. Nilai rata-rata hasil pengujian tak terkontrol

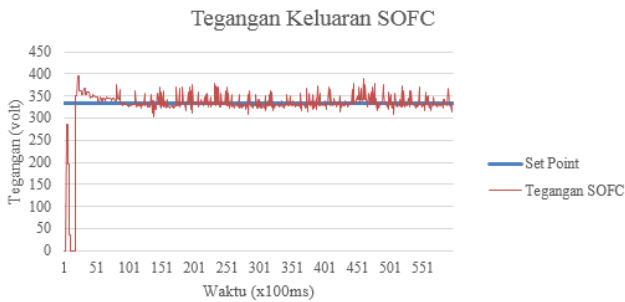
Parameter	Rata-rata
Tegangan keluaran SOFC (volt)	352,09
Laju Aliran O ₂ (mol/s)	0,67
Laju Aliran H ₂ (mol/s)	0,79
Tekanan O ₂ (Pa)	21141
Tekanan H ₂ (Pa)	38306
ΔTekanan H ₂ -O ₂ (Pa)	17122

Nilai rata-rata dari hasil pengujian dirangkum pada Tabel 4. Nilai rata-rata tegangan keluaran SOFC belum mencapai *set point* 333 volt. Nilai Δtekanan H₂-O₂ melebihi batas aman 4000 Pa. Nilai laju aliran H₂ dan O₂ adalah 0,79 dan 0,67 mol/s.

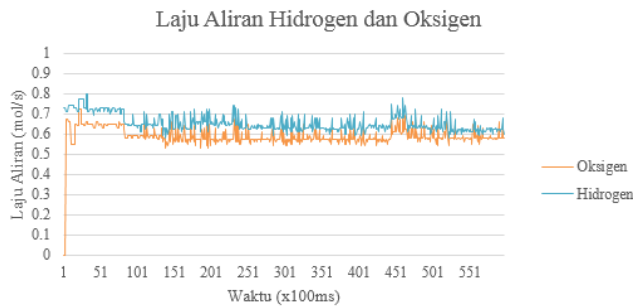
3.2. Pengujian Simulator dengan Kontroler

3.2.1. Pengujian Tanpa Gangguan

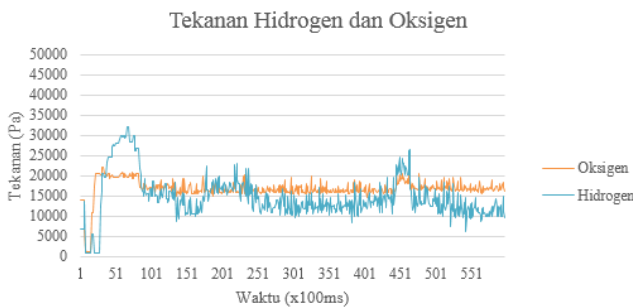
Simulator SOFC diuji menggunakan kontroler dengan nilai arus eksternal 300 A dan nilai suhu 1000K. Grafik nilai tegangan keluaran SOFC ditampilkan pada Gambar 16. Grafik nilai laju aliran H₂ dan O₂ ditampilkan pada Gambar 17. Grafik nilai tekanan H₂ dan O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 18. Grafik nilai Δtekanan H₂-O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 19.



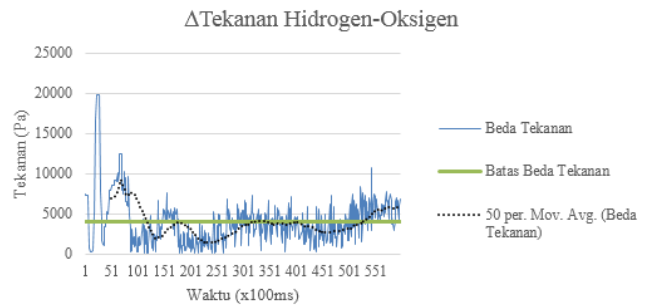
Gambar 16. Grafik tegangan keluaran SOFC terkontrol



Gambar 17. Grafik laju aliran SOFC terkontrol



Gambar 18. Grafik tekanan SOFC terkontrol



Gambar 19. Grafik Δtekanan H₂-O₂ SOFC terkontrol

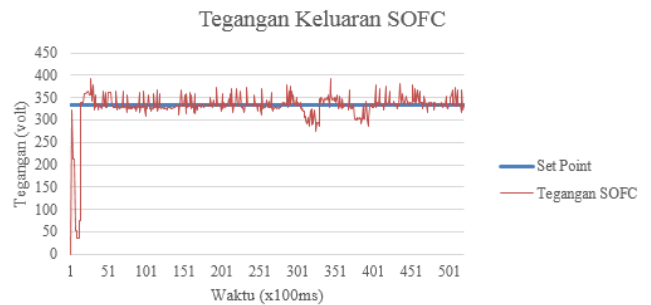
Tabel 5. Nilai rata-rata hasil pengujian tanpa gangguan

Parameter	Rata-rata
Tegangan keluaran SOFC (volt)	334,73
Laju Aliran O ₂ (mol/s)	0,58
Laju Aliran H ₂ (mol/s)	0,64
Tekanan O ₂ (Pa)	16734
Tekanan H ₂ (Pa)	13774
ΔTekanan H ₂ -O ₂ (Pa)	3602

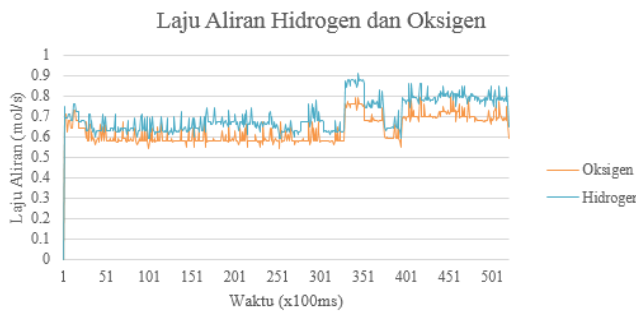
Nilai rata-rata dari hasil pengujian dirangkum pada Tabel 5. Nilai rata-rata tegangan keluaran SOFC sudah mencapai *set point* 333 volt. Nilai Δtekanan H₂-O₂ tidak melebihi batas aman 4000 Pa. Nilai laju aliran H₂ dan O₂ adalah 0,64 dan 0,58 mol/s.

3.2.1. Pengujian dengan Gangguan Negatif

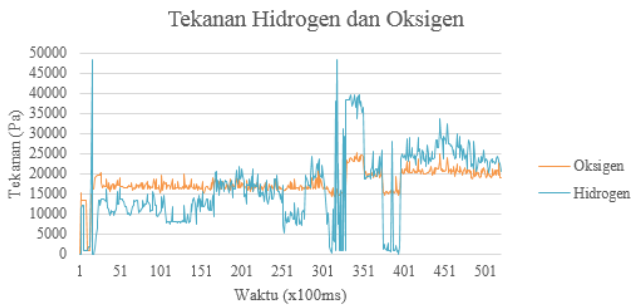
Pengujian simulator SOFC dengan gangguan negatif adalah pengujian yang pada waktu ke-30000 ms diberikan gangguan berupa arus eksternal yang diperbesar hingga sekitar 340 A, sehingga tegangan keluaran SOFC akan menjadi turun hingga sekitar 300 volt. Grafik nilai tegangan keluaran SOFC ditampilkan pada Gambar 20. Grafik nilai laju aliran H₂ dan O₂ ditampilkan pada Gambar 21. Grafik nilai tekanan H₂ dan O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 22. Grafik nilai Δtekanan H₂-O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 23.



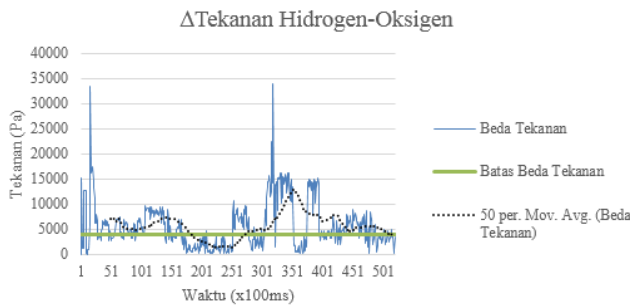
Gambar 20. Grafik tegangan keluaran SOFC terkontrol dengan gangguan negatif



Gambar 21. Grafik laju aliran SOFC terkontrol dengan gangguan negatif



Gambar 22. Grafik tekanan SOFC terkontrol dengan gangguan negatif



Gambar 23. Grafik Δtekanan H₂-O₂ SOFC terkontrol dengan gangguan negatif

Tabel 6. Nilai rata-rata hasil Pengujian dengan gangguan negatif

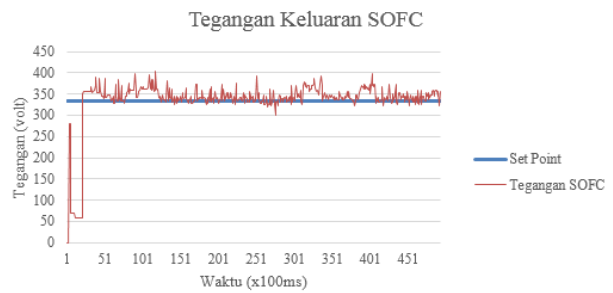
Parameter	Rata-rata
Tegangan keluaran SOFC (volt)	332,72
Laju Aliran O ₂ (mol/s)	0,68
Laju Aliran H ₂ (mol/s)	0,76
Tekanan O ₂ (Pa)	19588
Tekanan H ₂ (Pa)	21858
ΔTekanan H ₂ -O ₂ (Pa)	6782,3

Nilai rata-rata dari hasil pengujian dirangkum pada Tabel 6. Nilai rata-rata tegangan keluaran SOFC dapat memperbaiki kembali menuju *set point* 333 volt. Nilai

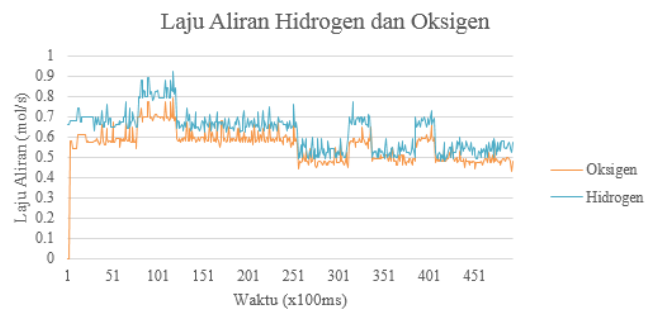
Δtekanan H₂-O₂ melebihi batas aman 4000 Pa. Nilai laju aliran H₂ dan O₂ adalah 0,76 dan 0,68 mol/s.

3.2.1. Pengujian dengan Gangguan Positif

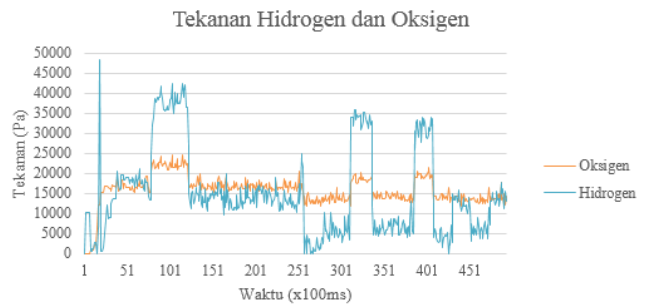
Pengujian simulator SOFC dengan gangguan positif adalah pengujian yang pada waktu ke-30000 ms diberikan gangguan berupa arus eksternal yang diperkecil hingga sekitar 260 A, sehingga tegangan keluaran SOFC akan menjadi naik hingga sekitar 380 volt. Grafik nilai tegangan keluaran SOFC ditampilkan pada Gambar 24. Grafik nilai laju aliran H₂ dan O₂ ditampilkan pada Gambar 25. Grafik nilai tekanan H₂ dan O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 26. Grafik nilai Δtekanan H₂-O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 27.



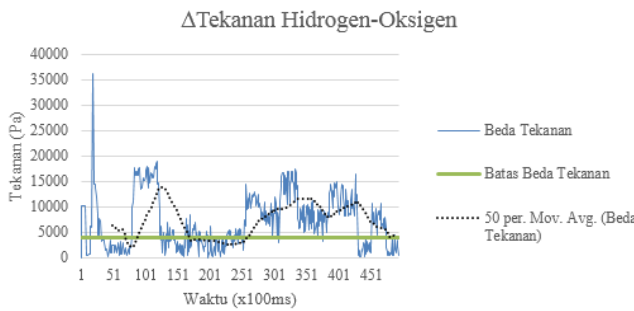
Gambar 24. Grafik tegangan keluaran SOFC terkontrol dengan gangguan positif



Gambar 25. Grafik laju aliran SOFC terkontrol dengan gangguan positif



Gambar 26. Grafik tekanan SOFC terkontrol dengan gangguan positif



Gambar 27. Grafik Δtekanan H₂-O₂ SOFC terkontrol dengan gangguan positif

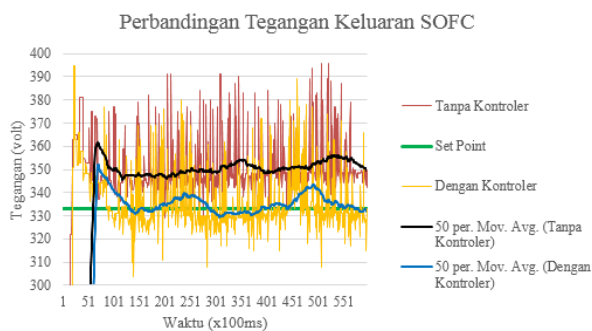
Tabel 7. Nilai rata-rata hasil pengujian dengan gangguan positif

Parameter	Rata-rata
Tegangan keluaran SOFC (volt)	348,58
Laju Aliran O ₂ (mol/s)	0,51
Laju Aliran H ₂ (mol/s)	0,56
Tekanan O ₂ (Pa)	15041
Tekanan H ₂ (Pa)	13908
ΔTekanan H ₂ -O ₂ (Pa)	8178,6

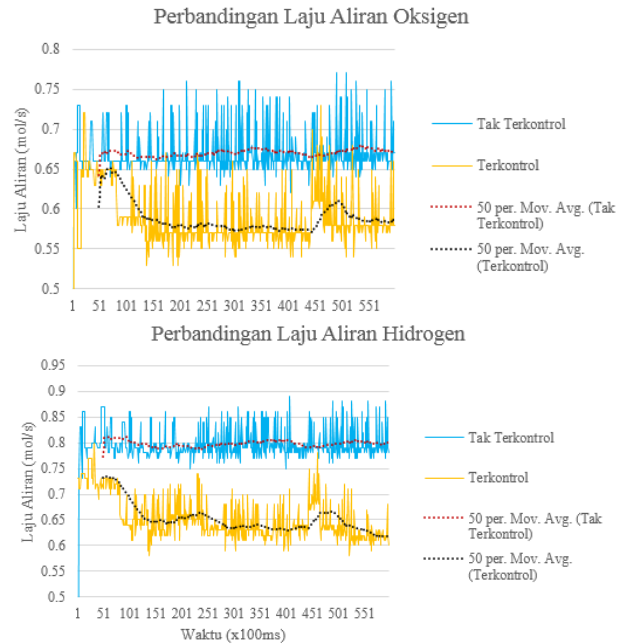
Nilai rata-rata dari hasil pengujian dirangkum pada Tabel 7. Nilai rata-rata tegangan keluaran SOFC tidak dapat memperbaiki kembali menuju *set point* 333 volt. Nilai Δtekanan H₂-O₂ melebihi batas aman 4000 Pa. Nilai laju aliran H₂ dan O₂ adalah 0,56 dan 0,51 mol/s.

3.4. Perbandingan Pengujian Tak Terkontrol dengan Pengujian Terkontrol

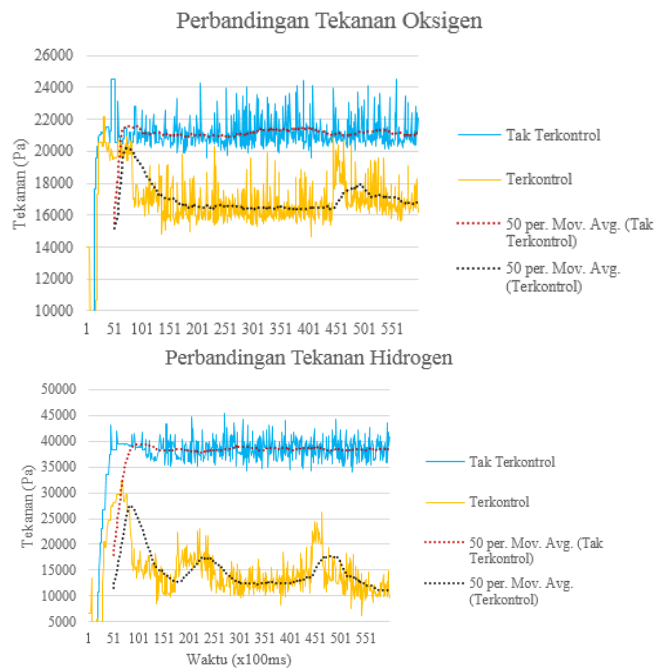
Perbandingan grafik nilai tegangan keluaran SOFC tak terkontrol dan terkontrol ditampilkan pada Gambar 28. Grafik nilai laju aliran H₂ dan O₂ ditampilkan pada Gambar 29. Grafik nilai tekanan H₂ dan O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 30. Grafik nilai Δtekanan H₂-O₂ pada SOFC ditampilkan pada Gambar 31.



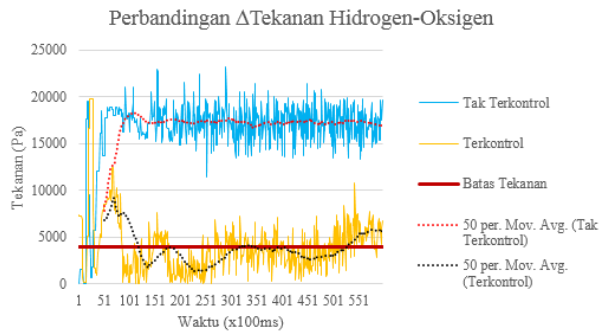
Gambar 28. Grafik perbandingan tegangan keluaran SOFC tak terkontrol dengan terkontrol



Gambar 29. Grafik perbandingan laju aliran SOFC tak terkontrol dengan terkontrol



Gambar 30. Grafik perbandingan tekanan SOFC tak terkontrol dengan terkontrol



Gambar 31. Grafik perbandingan Δ tekanan H₂-O₂ SOFC tak terkontrol dengan terkontrol

Perbandingan nilai rata-rata keluaran pada pengujian tanpa menggunakan kontroler dan dengan menggunakan kontroler dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Parameter-parameter simulator SOFC

Parameter	Tak Terkontrol	Terkontrol
Tegangan keluaran SOFC (volt)	343,32	334,73
Laju Aliran O ₂ (mol/s)	0,66	0,58
Laju Aliran H ₂ (mol/s)	0,79	0,64
Tekanan O ₂ (Pa)	20678	16734
Tekanan H ₂ (Pa)	36777	13774
Δ Tekanan H ₂ -O ₂ (Pa)	16541	3602

Nilai rata-rata tegangan keluaran SOFC dapat diperbaiki oleh kontroler menuju *set point* 333 volt dari 343,32 volt menjadi 334,73 volt. Nilai Δ tekanan H₂-O₂ dapat dikendalikan agar tidak melebihi batas aman 4000 Pa yaitu dari 16541 Pa menjadi 3602 Pa. Nilai laju aliran H₂ dan O₂ yang dihasilkan pada pengujian tak terkontrol adalah 0,79 dan 0,66 mol/s kemudian dapat dikendalikan menjadi 0,64 dan 0,58 mol/s.

4. Kesimpulan

Simulator SOFC dan kontroler laju aliran H₂ dan O₂ berhasil dirancang dengan cukup baik. Kontroler dapat memperbaiki nilai tegangan keluaran SOFC menuju *set point* 333 volt, yaitu dari nilai tegangan tanpa kontroler 343,32 volt menjadi 334,73 volt dengan nilai *error* sebesar 1,73 volt. Nilai beda tekanan antara H₂ dan O₂ pada simulator SOFC juga dapat dijaga agar tidak melebihi batas aman 4000 Pa. Namun kontroler belum dapat mengatas gangguan negatif dan gangguan positif yang diberikan, yaitu pada saat arus eksternal diperbesar dan diperkecil dari nilai normalnya.

Referensi

- [1] H. Y. Wolf Vielstich and H. A. Gasteiger, *Handbook of Fuel Cells Fundamental Technology and Applications*. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009.
- [2] L. M, L. ME, B. K, A. F, and C. Y, *Rational SOFC Material Design: New Advances and Tools*, Rev 14. Mat Today Invited, 2011.
- [3] L. Sun, D. Li, G. Wu, K. Y. Lee, and Y. Xue, "A Practical Compound Controller Design for Solid Oxide Fuel Cells," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 30, pp. 445–449, 2015.
- [4] E. Julian and A. Triwiyatno, "PERANCANGAN KONTROLER ADAPTIF PID PADA SISTEM SOLID OXIDE FUEL CELL," *J. Tugas Akhir Dep. Tek. Elektro Fak. Tek. Univ. Diponegoro*, pp. 1–7, 2017.
- [5] C. Wang, "Modeling and Control of Hybrid," *Theses Diss. Mont. State Univ.*, vol. 13, no. 5, pp. 399–419, 2006.
- [6] C. C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I," *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. 20, no. 2, pp. 404–418, 1990.
- [7] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. 2004.
- [8] Y. Zhu and K. Tomsovic, "Development of models for analyzing the load-following performance of microturbines and fuel cells," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 62, no. 1, pp. 1–11, 2002.