

Analisis Desain Push Pull Konverter pada Fuel Cell untuk Battery Charger Controller

Prima Dewi Permatasari^{1*}, Bagas Aprilliyanto¹, Firdaus Fhudoli Putra¹, Hendrik Elvian Gayuh Prasetya¹, Joke Pratilastiarso¹

¹Program Studi Sistem Pembangkit Energi, Departemen Teknik Mekanika dan Fluida, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Surabaya, Jawa Timur.

Informasi Artikel

Naskah Diterima : 29 Oktober 2024

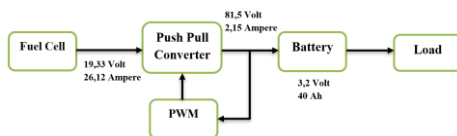
Direvisi : 6 Januari 2025

Disetujui : 14 Mei 2025

doi: 10.62870/setrum.v14i1.29347

*Korespondensi Penulis :
primadewi@pens.ac.id

Graphical abstract



Abstract

A fuel cell is a simple form of energy conversion technology that uses hydrogen as fuel to generate electricity. Additionally, it is useful as a battery charger that can be utilized in the automotive field. This study presents the modeling of a fuel cell and push-pull converter to achieve high power efficiency using MATLAB software. It integrates a fuel cell (BCS 500W PEM) and a push-pull converter with a lithium-ion (LiFePO₄) battery with a capacity of 40 Ah and a nominal voltage of 73.6 volts. In this experiment, the researchers varied the operating temperature of the fuel cell to 60°C (333K), 80°C (353K), and 100°C (373K), as well as the fuel cell hydrogen (H₂) pressure to 1 atm, 2 atm, and 3 atm. The battery system displays charging and discharging at the predetermined state of charge (SOC). The efficiency of the converter in power conversion is excellent 91,11%.

Keywords: Fuelcell, PushPull Konverter, Matlab Simulink, Battery LiFePO₄

Abstrak

Fuelcell adalah bentuk sederhana dari teknologi konversi energi yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar untuk menghasilkan listrik. Selain itu juga berguna sebagai pengisi baterai yang dapat digunakan dalam bidang otomotif. Penelitian ini menyajikan pemodelan fuelcell dan pushpull konverter untuk mendapatkan efisiensi daya yang tinggi dengan menggunakan software matlab simulink. Dan melakukan integrasi antara fuelcell (BCS 500W PEM) dan pushpull konverter dengan jenis baterai yang digunakan adalah lithium-ion (LiFePO₄) berkapasitas 40 Ah dan tegangan nominal 73,6 volt. Pada penelitian ini, memvariasikan temperature operasi fuelcell, yaitu 60°C = 333K, 80°C = 353K dan 100°C = 373K. Serta memvariasikan tekanan bahan bakar fuelcell (H₂) yaitu 1 atm, 2 atm, 3 atm. Sistem baterai menampilkan pengisian dan pengosongan pada SOC yang sudah ditentukan. Efisiensi konverter dalam konversi daya sangat baik 91,11%.

Kata kunci: Fuelcell, PushPull Konverter, Matlab Simulink, Baterai LiFePO₄

© 2025 Penerbit Jurusan Teknik Elektro UNTIRTA Press. All rights reserved.

1. PENDAHULUAN

Energi adalah salah satu kebutuhan utama dalam kehidupan manusia. Dengan adanya pertumbuhan manusia yang semakin meningkat menyebabkan permintaan energi semakin besar salah satunya adalah energi listrik, sedangkan pemasokan sumber energi listrik yang semakin menipis memicu manusia mengembangkan sumber energi alternatif untuk dijadikan sumber utama. Gas hidrogen adalah salah satu sumber energi alternatif yang sering digunakan karena harganya yang murah

dan mudah didapatkan. Pada gas hidrogen terdapat ion elektron yang menghasilkan energi listrik jika bereaksi dengan energi listrik dengan menggunakan alat Fuelcell untuk mewujudkan energi listrik [1].

Fuelcell adalah alat konversi energi elektrokimia mengubah hidrogen yang bereaksi dengan oksigen menjadi air, dengan bersamaan menghasilkan energi listrik dan panas dalam suatu prosesnya. Fuelcell merupakan suatu bentuk teknologi sederhana seperti baterai yang dapat diisi bahan bakar untuk mendapatkan energinya kembali, dalam hal ini yang menjadi bahan bakar adalah hidrogen. Keuntungan menggunakan Fuelcell sangat banyak yaitu memiliki efisiensi listrik dan efisiensi termis yang tinggi, kemungkinan terjadinya kerusakan (trouble) sangat minim atau jarang dengan jarak yang cukup lama, perawatan yang lebih ringan karena tidak ada bagian yang berputar, sedikitnya gas buang yang beracun bahkan dapat mencapai zero emission dan yang terakhir tidak bising [2].

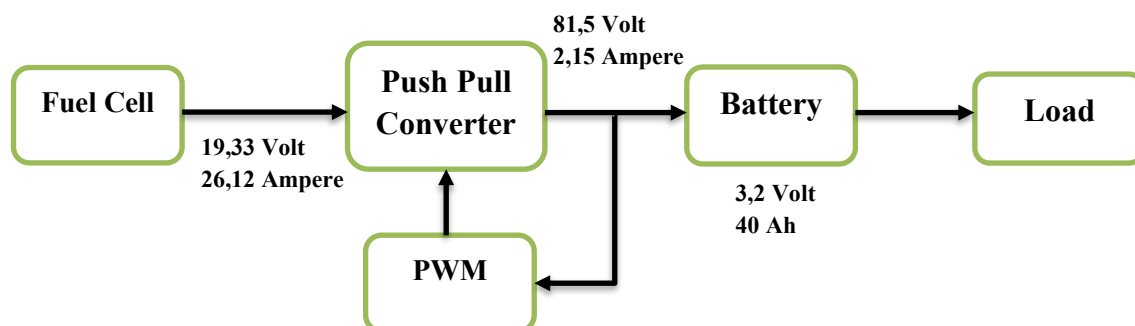
Ada enam jenis Fuel Cell yang digunakan sebagai elektrolit yang mampu menghantarkan proton, yaitu: *Alkaline Fuel Cell (AFC)*, *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*, *Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)*, *Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)*, *Solid Oxide fuel Cell (SOFC)*, dan *Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)*. Dari ke enam jenis ini memiliki karakteristik dan penggunaan yang berbeda – beda. Salah satunya, jenis Fuel Cell yang digunakan dalam penelitian ini yaitu jenis *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* yaitu dapat memberikan densitas daya yang tinggi mencapai 40 – 50% , mampu beroperasi pada temperatur rendah dan mempunyai kelebihan dalam hal berat dan volume dibandingkan dengan sel bahan bakar jenis lain. PEMFC menggunakan polimer padat sebagai elektrolit dan elektroda karbon berpori (*porous carbon electrodes*) yang mengandung katalis platina dan harganya relatif murah [3].

Fuelcell dengan jenis *Proton Exchange Membrane (PEM)* sudah banyak dimanfaatkan dalam bidang industri dan pembangkit. Salah satu contohnya yaitu penggunaan PEM dalam dunia otomotif digunakan sebagai bahan bakar dalam pembuatan mobil. Implementasi penelitian ini melakukan simulasi Fuel Cell menggunakan Converter untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi. Dimana konverter (konversi daya) adalah sistem semi konduktor daya yang difungsikan untuk meratakan (*rectifying*), inverting ataupun modulasi dari keluaran daya dari sebuah sumber energi AC atau DC. Pada penelitian ini digunakan jenis DC-DC Converter. Dimana DC – DC Converter ini memiliki banyak jenis, salah satunya yang peneliti gunakan yaitu jenis *PushPull Converter*. *PushPull Converter* adalah DC – DC yang menggunakan isolated yang artinya antara output dan input dipisahkan menggunakan trafo. Dimana *PushPull Converter* ini mampu menaikkan tegangan dengan rasio tegangan yang bisa menjaga efisiensinya terjaga dengan baik [4].

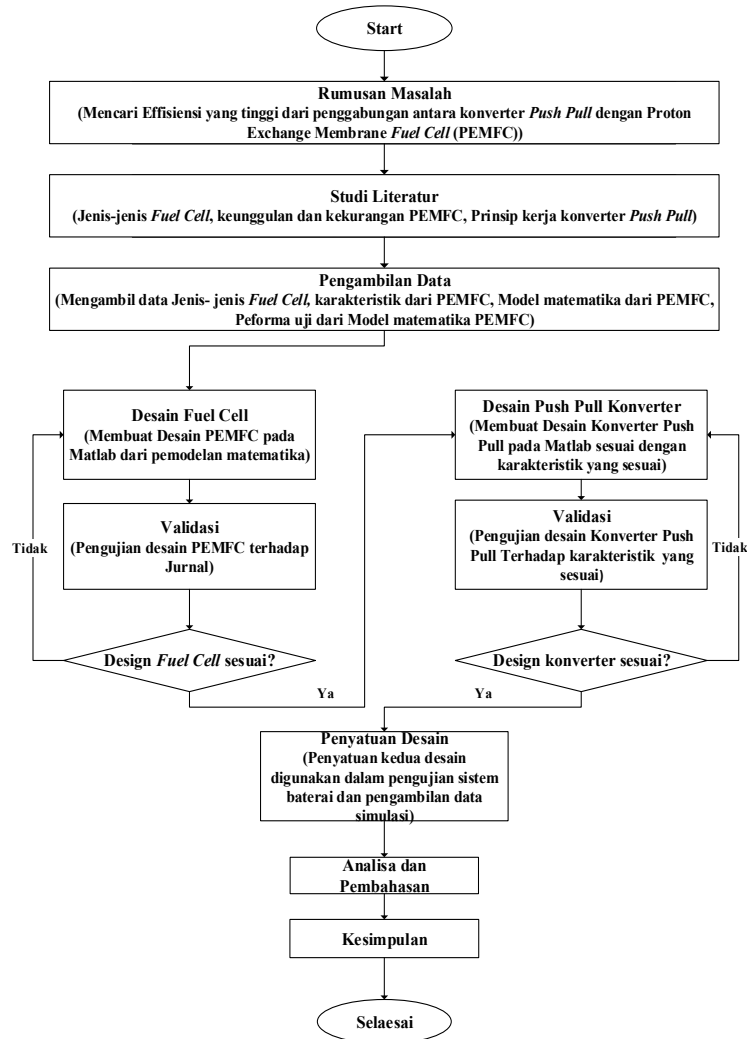
Dengan adanya Analisis Desain *PushPull Konverter* pada Fuelcell untuk Baterai Charger Controller dapat menghasilkan sistem sumber energi dengan performa yang baik dan dapat dimanfaatkan manusia sebagai sumber alternatif energi yang dibutuhkan salah satunya pada bidang otomotif kendaraan.

2. METODE

Penelitian ini merinci sistem hybrid sel bahan bakar PEM dengan baterai yang memberikan daya yang cukup untuk menangani beban, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Prinsip pengoperasian sistem adalah sebagai berikut:

Fuel Cell juga berfungsi untuk mengisi baterai dengan daya yang dibutuhkan. Ketika kebutuhan daya tinggi, Fuel Cell dikontrol untuk menghasilkan daya terukur, sementara baterai dilepaskan untuk memenuhi kebutuhan daya beban [5]. Dalam kerangka ini, Fuel Cell dikendalikan untuk beroperasi pada daya nominal 500W dan arus 26A. Tegangan dari sel bahan bakFuel Cell adalah 19V.

2.1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

Di lingkungan Simulink, tampilan kerangka crossover PEMFC 500W dengan baterai sudah terpasang. Karakteristik polarisasi PEMFC, yang menggambarkan perilaku arus dan tegangan yang dihasilkan dari tumpukan FC, dapat ditentukan tidak hanya melalui pengukuran eksperimental tetapi juga dengan membuat model Fuel Cell yang akurat [6].

Dalam penelitian ini, model ini juga digunakan untuk mensimulasikan perilaku kondisi dari PEMFC. Tegangan hasil penjumlahan dihitung secara matematis menggunakan persamaan berikut [6]:

$$\begin{aligned}
 V_{stack} &= N \cdot V_{FC} \\
 V_{FC} &= E_{Nerst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Keterangan :

V_{stack} = Tegangan keluaran stack

N = Jumlah sel yang membentuk stack.

V_{FC} = Tegangan keluaran sel bahan bakar;

E_{Nerst} = Tegangan output yang dihasilkan oleh setiap bagian dari sel bahan bakar dalam Termodinamika.

V_{act} = Kerugian aktivasi

V_{ohmic} = Kerugian Ohm

V_{con} = Hilangnya konsentrasi

Dimana Energi Potensial Nerst pada temperature standar (25°C) dan temperature kerja di bawah 100°C dihitung menggunakan (2).

$$E_{Nerst} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T - 298.15) + 4.31 \times 10^{-5} T [\ln (P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln (P_{O_2})] \quad (2)$$

Keterangan :

T = Temperatur Sel (°K)

P_{H_2} = Tekanan Parsial Hidrogen

P_{O_2} = Tekanan Parsial Oksigen

Kerugian tegangan akibat berlakunya rangkaian antara dua terminal, anoda dan katoda, dihitung secara numerik sebagai berikut:

$$V_{act} = -[\xi_1 + (\xi_2 \times T) + (\xi_3 \times \ln (CO_2)) + (\xi_4 \times T \times \ln(I_{FC}))] \quad (3)$$

Keterangan :

$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ = Koefisien parametrik untuk setiap model sel

CO_2 = Tingkat konsentrasi oksigen dalam katoda

I_{FC} = Arus sel bahan bakar

Kerugian tegangan ohmik akibat hambatan lapisan elektrolit dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{ohmic} = I_{FC} \times (RM + RC) \quad (4)$$

Keterangan :

RM = Koefisien resistansi membran

RC = Konstanta koefisien resistensi terhadap transfer proton melalui membran.

Dimana,

$$RM = \rho M \times (L/A) \quad (5)$$

Keterangan :

ρM = Resistivasi spesifik membran terhadap aliran elektron

L = Ketebalan membran

Bagian akhir dari rugi tegangan akibat variasi konsentrasi reaktan V_{con} dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{con} = -b \cdot \ln(1 - (J/J_{maks})) \quad (6)$$

Keterangan :

B = Variabel konstan tergantung pada jenis sel dan status kerjanya

J = Kerapatan sel saat ini

J_{max} = Kerapatan arus maximum

Dari formulasi model PEMFC di atas, koefisien parametrik yang dapat disesuaikan ξ_1, ξ_2, ξ_3 , dan ξ_4 mencerminkan dimensi geometris dan jenis material komponen sel bahan bakar [7].

Tabel 1. Parameter PEMFC yang tidak diketahui minimum dan maksimum yang diperbolehkan

Parameter	Minimum	Maksimum
ξ_1	-1,1997	-0,8532
ξ_2	0,0008	0,006
ξ_3	$3,6 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-5}$
ξ_4	$-2,6 \times 10^{-4}$	$-9,54 \times 10^{-5}$
λ	10	23
RC	0,0001	0,0008

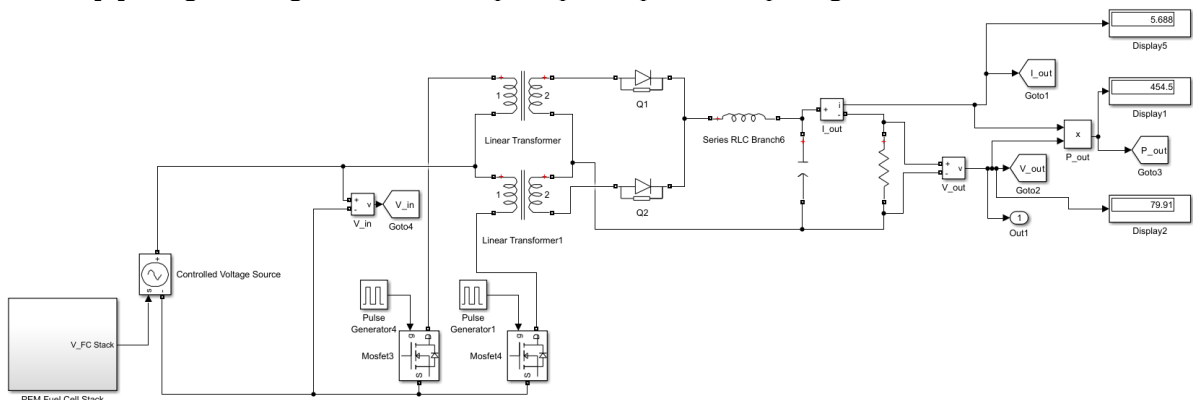
Tabel 2. Spesifikasi tumpukan PEMFC yang dipelajari

PEM	Satuan	BCS 500W	AVIST A SR 12 PEM	stack
Jumlah terjual (Nsel)	-	32	48	24
Elektroda daerah efektif (A)	Cm^2	64	62,5	27
Ketebalan membran (L)	μm	178	25	127
Rapat arus maks (J_{maks})	Bu/Cm^2	469	672	860
tekanan parsial hidrogen (PH_2)	ATM	1	1,47628	1
Tekanan parsial oksigen (PO_2)	ATM	0,2095	0,2095	1
Temperature (T)	K	333	323	343,15

Peneliti memvariasikan parameter PEM menggunakan data minimum dan maksimum serta memanfaatkan spesifikasi tipe PEM BCS 500W. Investigasi yang dilakukan dapat digunakan untuk membuat demonstrasi numerik sel bahan bakar film perdagangan proton untuk analisis simulasi sistem lebih lanjut.

2.2. Prinsip Konverter *Pushpull*

Konverter *Pushpull* adalah konverter DC-DC yang menggunakan transformator untuk mengubah level tegangan DC yang diperlukan dan menyediakan isolasi galvanik pada beban. Ini terdiri dari dua transistor yang bertindak sebagai saklar. Aturan kerja rangkaian konverter push-pull didasarkan pada pengoperasian masing-masing saklar dengan analisa rangkaian pada saat saklar tertutup dan terbuka [8]. Diagram rangkaian konverter push-pull dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



Gambar 3 Konverter Pushpull

Pada rangkaian konverter push-pull di atas, terdapat tiga kondisi pengoperasian. Pertama, ketika saklar Q1 hidup dan Q2 mati, kemudian ketika saklar Q2 hidup dan Q1 mati, dan terakhir ketika saklar Q1 dan Q2 keduanya mati.

2.1.1 Kondisi saat saklar Q1 hidup dan Q2 mati:

Ketika saklar Q1 aktif, belitan primer V_{p1} akan menerima arus dari V_s . Dengan demikian, nilai V_{p1} akan sama dengan V_s . Akibatnya, tegangan primer sama dengan tegangan sumber positif. Dengan cara ini, dioda D2 akan dialihkan ke satu sisi dan dioda D1 akan dialihkan ke satu sisi. Pada saat itu, arus akan mengalir melalui dioda D1 ke induktor keluaran, kapasitor, dan beban [8].

$$V_{p1} = V_s \quad (7)$$

Menurut prinsip kerja trafo, dimana kumparan primer menginduksi kumparan sekundernya, maka:

$$V_{s1} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (8)$$

$$V_{s2} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (9)$$

$$V_{p2} = V_s \quad (10)$$

$$V_{Q2} = 2 \times V_s \quad (11)$$

Dioda D1 dibias maju dan dioda D2 dibias terbalik, sehingga:

$$V_{s2} = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (12)$$

$$V_L = V_x - V_o = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (13)$$

Dengan asumsi tegangan keluaran konstan, tegangan induktor konstan, sehingga arus meningkat secara linier dalam induktor. Perubahan arus pada induktor adalah:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L} \quad (14)$$

Dengan demikian, nilai Delta i_L pada saat saklar ditutup dapat diperoleh sebagai berikut:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L} \times DT \quad (15)$$

2.1.2 Kondisi saat saklar Q2 hidup dan Q1 mati :

Saat saklar Q2 aktif, belitan primer V_{p2} akan menerima arus dari V_s . Dengan demikian, nilai V_{p1} akan sama dengan V_s negatif. Akibatnya, tegangan primer sama dengan tegangan sumber negatif. Dengan cara ini, dioda D2 akan dialihkan ke satu sisi dan dioda D1 akan dialihkan ke satu sisi [8]. Pada saat itu, arus akan mengalir melalui dioda D2 ke induktor keluaran, kapasitor, dan beban.

$$V_{p2} = -V_s \quad (16)$$

$$V_{p1} = -V_s \quad (17)$$

Menurut prinsip kerja trafo, dimana kumparan primer menginduksi kumparan sekundernya, maka:

$$V_{s1} = -V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (18)$$

$$V_{s2} = -V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (19)$$

$$V_{Q1} = 2 \times V_s \quad (20)$$

Dioda D2 dibias maju dan dioda D1 dibias terbalik, sehingga:

$$V_{s2} = -V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) \quad (21)$$

$$V_L = V_x - V_o = V_s \times \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o \quad (22)$$

Dengan asumsi tegangan keluaran konstan, tegangan induktor konstan, sehingga arus meningkat secara linier dalam induktor. Perubahan arus pada induktor adalah:

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L} \quad (23)$$

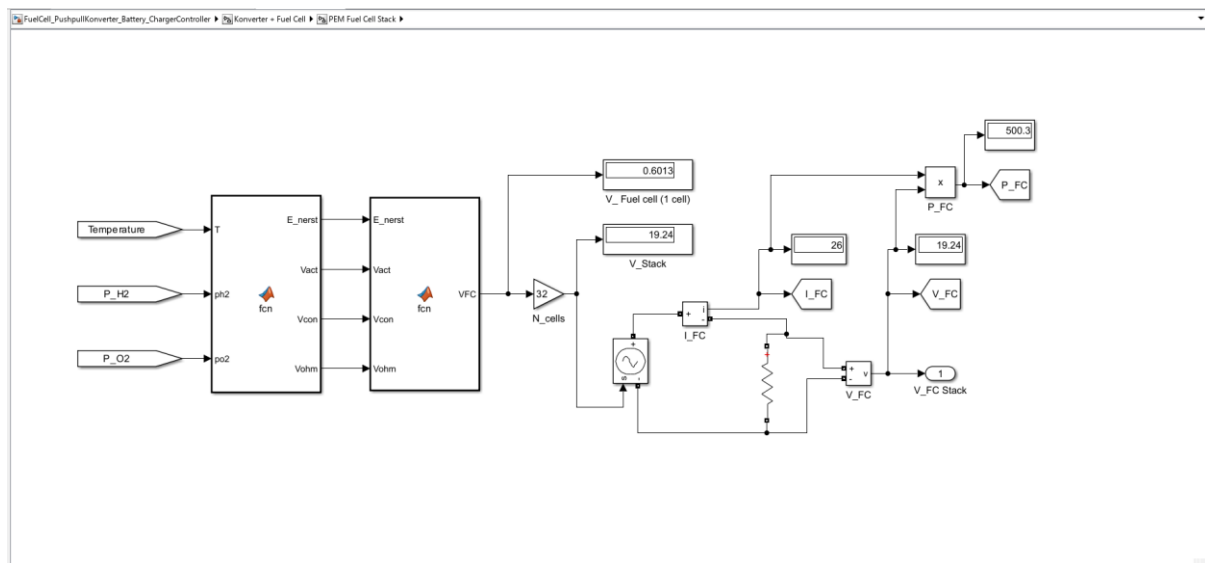
Dengan demikian, nilai Delta i_L pada saat saklar ditutup dapat diperoleh sebagai berikut:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p}\right) - V_o}{L} \times DT \quad (24)$$

3. HASIL

3.1 Model sel bahan bakar

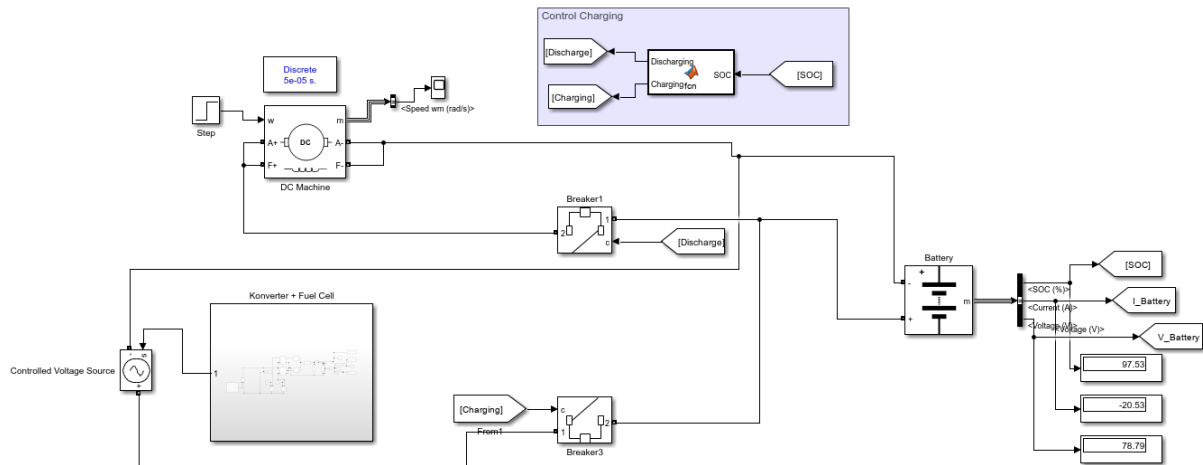
Pemodelan sel bahan bakar direncanakan berdasarkan kondisi keadaan dan kondisi tegangan luluh. Pemodelan sel bahan bakar dengan menggunakan simulink ditunjukkan pada Gambar 4 untuk menggambarkan kondisi fuelcell. Tumpukan sel bahan bakar memiliki 32 sel. Kontrol nyatanya adalah sekitar 500W dan arus terbesar adalah 26-30 A.



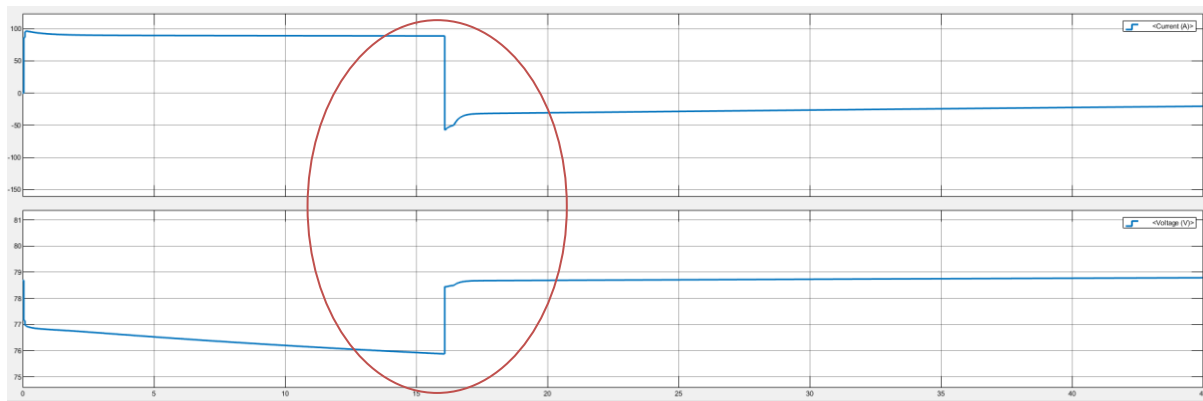
Gambar 4. Model Fuel Cell in Simulink

3.2 Pengisian Daya Kontrol Baterai

Pengisi daya baterai dapat menjalankan fungsi status pengisian daya (SOC), yang berguna saat mengisi daya baterai partikel litium.



Gambar 5. Model pengisi daya kontrol baterai



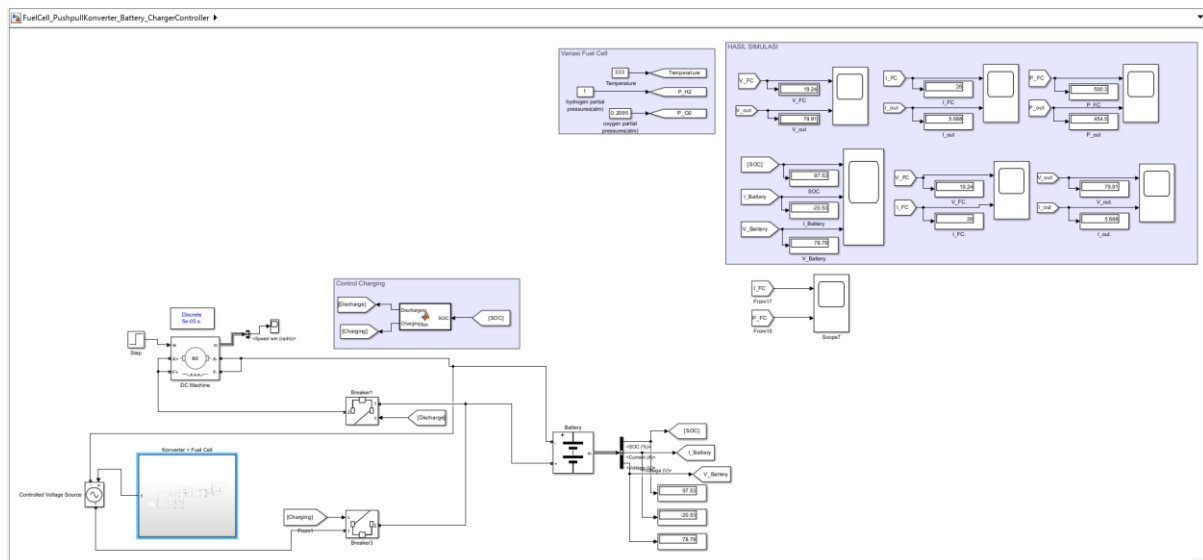
Gambar 6. Grafik Output baterai saat Charging & Discharging

Gambar 6. menunjukkan proses pengosongan dan pengisian baterai dengan kapasitas baterai 40Ah. Dari kurva tegangan pengisian bahwa respon tegangan merupakan proses yang dinamis. Tegangan mencapai nilai akhir 83,45V dengan arus pengisian meningkat seiring perubahan temperature, rata-rata antara 5,02 - 6,7 A.

3.3 Operasi Sistem

Dengan menggunakan contoh sel bahan bakar yang telah ditentukan, seluruh kerangka diaktualisasikan pada Simulink seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Prinsip pengoperasian sistem adalah sebagai berikut:

- Proses startup sistem:
Saat sistem dinyalakan, baterai diperlukan untuk membantu sistem karena karakteristik pengaktifan sel bahan bakar yang lambat. Setelah sel bahan bakar dapat beroperasi dengan stabil, pengontrol akan mengaktifkan sel bahan bakar ke dalam sistem, yang akan mengatur keseluruhan sistem.
- Proses pengisian baterai:
Proses pengisian baterai sebagai berikut: saat baterai habis, SOC akan otomatis berkurang hingga mencapai batas SOC kontrol, memicu proses pengisian untuk memastikan mencapai SOC tertentu. Arus tersebut akan mengisi baterai hingga terisi penuh.



Gambar 7. Sistem yang dibangun pada simulink

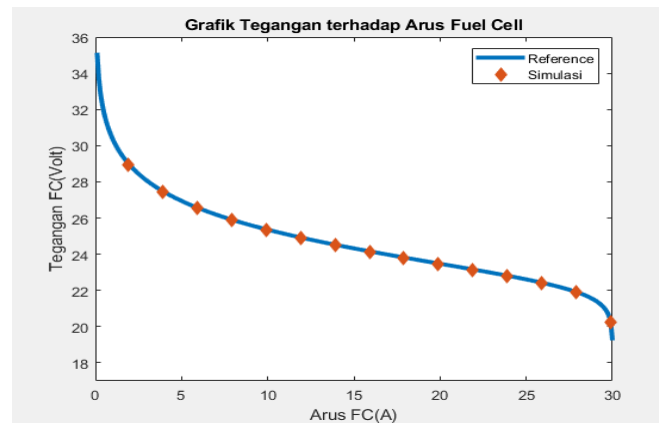
3.4 Tes kondisi

Dalam sistem divariasikan 3 variabel: temperature (333K, 353K, 373K), tekanan hidrogen (1 atm, 2 atm, 3 atm), tekanan udara (0,2095 atm, 0,5 atm, 1 atm). Konverter push-pull akan mengubah tegangan keluaran menjadi sekitar 83,45 v dengan arus kurang lebih 5,02 – 6,7 A dengan efisiensi yang tinggi

3.5 Hasil dan Diskusi

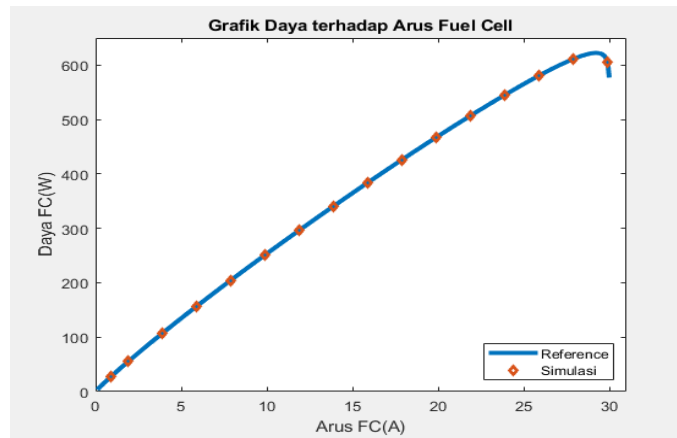
3.5.1 Hasil Pemodelan sel bahan bakar PEM

Pada Gambar 8 dan 9 merupakan grafik tegangan terhadap arus dari hasil pengujian pemodelan fuelcell berdasarkan referensi dengan menggunakan Matlab Simulink.



Gambar 8. Grafik tegangan terhadap arus Fuelcell

Grafik polarisasi ini menunjukkan bahwa tegangan sel bahan bakar menurun seiring dengan peningkatan arus. Pada arus rendah (1A-5A), penurunan tegangan terjadi dengan cepat, menunjukkan hilangnya tegangan aktivasi. Pada arus tinggi, penurunan tegangan lebih lambat dan stabil, yang diindikasikan sebagai hilangnya tegangan ohmik dan konsentrasi. Grafik polarisasi ini sudah mendekati grafik polarisasi jurnal referensi.



Gambar 9. Grafik daya terhadap arus Fuelcell

Grafik polarisasi daya terhadap arus menunjukkan bahwa daya sel bahan bakar meningkat seiring dengan peningkatan arus. Ketika arus meningkat hingga kinerja puncak tercapai, daya yang dihasilkan sel bahan bakar juga meningkat. Setelah nilai puncak tercapai, arus terus meningkat, namun daya mulai berkurang. Hal ini disebabkan oleh penurunan tegangan yang signifikan pada arus tinggi (rentang konsentrasi). Daya puncak menunjukkan titik operasi optimal di mana sel bahan bakar mencapai kinerja maksimum. Pada titik ini, kombinasi arus dan tegangan menghasilkan keluaran daya maksimum.

Hasil pengujian pemodelan FuelCell dengan menggunakan simulink, didapatkan hasil data pada Tabel 3 yaitu :

Tabel 3 Data hasil simulasi dari sel bahan bakar

Fuelcell			
Temperatur (K)	Vcell (V)	Icell (A)	Pcell (W)
333	19,24	26	500,24
353	19,33	26,12	504,90
373	19,41	26,23	509,12
Fuelcell			
P H ₂ (atm)	Vcell (V)	Icell (A)	Pcell (W)
1	19,24	26	500,24
2	19,56	26,43	516,97
3	19,75	26,68	526,93

Berdasarkan hasil data yang diperoleh menggunakan variasi temperature 333K dihasilkan Vcell 19,24 volt dan Icell = 26 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 500,24 watt. Pada temperature 353K dihasilkan Vcell 19,33 volt dan Icell = 26,12 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 504,90 watt. Pada temperature 373K dihasilkan Vcell 19,341 volt dan Icell = 26,23 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 509,12 watt. Ini menandakan semakin tinggi temperature fuel cell maka akan terjadi kenaikan pada daya.

Berdasarkan hasil data yang diperoleh menggunakan variasi tekanan H₂ sebesar 1 atm dihasilkan Vcell 19,24 volt dan Icell = 26 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 500,24 watt. Pada tekanan H₂ sebesar 2 atm dihasilkan Vcell 19,56 volt dan Icell = 26,43 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 516,97 watt. Pada tekanan H₂ sebesar 3 atm dihasilkan Vcell 19,75 volt dan Icell = 26,68 A dengan daya output yang dihasilkan sebesar 526,93 watt. Ini menandakan semakin tinggi temperature fuel cell maka akan terjadi kenaikan pada daya. Hal ini untuk mengetahui karakteristik hubungan Vcell dan Icell dengan potensial yang didapat yang ditunjukkan dengan Gambar

8 dimana arus keluaran PEM menggambarkan penggunaan gas hasil dari reaksi elektrolisis. Sedangkan Gambar 9 semakin besar arus yang diberikan daya yang dihasilkan semakin meningkat.

Pengujian penelitian ini menggambarkan simulasi yang mendekati skenario dunia nyata. Berdasarkan kerugian-kerugian mengenai analisis saat ini pada Fuel Cell, terlihat dari keseluruhan pemodelan bahwa persentase kesalahan atau error yang dihasilkan antara data simulasi dengan data secara teori.

$$\begin{aligned}\text{Persentase Kesalahan} &= (\text{Data Eksperimen} - \text{Data Teoritis}) / \text{Data Eksperimen} \\ &= (500,24 - 500) / 500,24 \\ &= 0,04\%\end{aligned}$$

3.5.2 Hasil integrasi loop antara sel bahan bakar dan konverter pushpull

Tabel 4. Hasil loop antara sel bahan bakar dan konverter pushpull (variasi temperature)

Integrasi Openloop Fuelcell dan Pushpull			
Temperature (K)	Vfc (V)	Ifc (A)	Pfc (W)
333	19,24	26	500,24
353	19,33	26,12	504,90
373	19,41	26,23	509,12
Vout Pp (V)	Iout Pp (A)	Pout Pp(W)	Eff. Pushpull Konverter (%)
80,02	5,696	455,79	91,12
80,38	5,721	459,85	91,08
80,73	5,746	463,87	91,11

Pada percobaan variasi temperature ini dihasilkan tegangan ouput pushpull berkisar antara 80,02 volt – 80,73 volt dimana tegangan ini masih aman untuk digunakan dalam mencharging battery dengan spesifikasi 12 V dengan kapasitas 40Ah. Batas tegangan dalam mencharging adalah 83,95 volt. Nilai ini didapat dari datasheet constan voltage yang digunakan sebesar 3.65 volt dan rangkaian ini terdiri dari 23 cell baterai yang dirangkai seri sehingga CV sebesar 83,95 volt.

Tabel 5. Hasil integrasi loop antara sel bahan bakar dan konverter pushpull (variasi tekanan hidrogen)

Integrasi Openloop Fuelcell dan Pushpull			
P H ₂ (atm)	Vfc (V)	Ifc (A)	Pfc (W)
1	19,24	26	500,24
2	19,56	26,43	516,97
3	19,75	26,68	526,93
Vout Pp (V)	Iout Pp (A)	Pout Pp(W)	Eff. Pushpull Konverter (%)
80,02	5,696	455,79	91,12
81,36	5,791	471,16	91,14
82,14	5,846	480,19	91,13

Pada percobaan variasi tekanan hidrogen ini, tegangan ouput pushpull berkisar antara 80,02 volt – 82,14 volt.

Dari variasi temperatur ini menghasilkan tegangan yang besar dan arus yang kecil pada keluaran fuelcell sehingga mempengaruhi keluaran pushpull. Hal ini dikarenakan tegangan fuelcell dipengaruhi oleh parameter temperatur dan tekanan yang dipengaruhi dari Enerst dan Vact menghasilkan daya yang besar dengan meningkatnya temperatur dan perubahan tekanan hidrogen yang diberikan. Pemodelan fuelcell ini digabungkan dengan power konverter jenis Pushpull untuk menaikkan tegangan dengan rasio tegangan yang dapat menjaga efisiensinya baik. Efisiensi yang dihasilkan dari integrasi ini menghasilkan efisiensi yang cukup baik yaitu 91,08% - 91,14%. Dengan efisiensi yang dihasilkan ini sesuai dengan teori bahwa Pushpull konverter dapat menaikkan tegangan [9].

Tabel 6. Pengujian konverter dengan variasi tegangan

V_{in}	V_{out}	I_{in}	I_{out}	Rasio Peningkatan Tegangan	error (%)
11	45,52	28,46	3,24	4,1382	0,856
12	49,71	31,06	3,53	4,1425	0,751
13	53,90	33,67	3,83	4,1462	0,662
14	58,09	38,27	4,13	4,1493	0,586
15	62,27	38,88	4,43	4,1513	0,536
16	68,48	41,48	4,73	4,2800	0,448
17	70,65	44,09	5,03	4,1559	0,426
18	74,83	46,70	5,36	4,1572	0,394
19	79,20	49,30	5,62	4,1684	0,124
20	83,21	51,91	5,92	4,1605	0,315

Pada pengujian ini dilakukan sepuluh variasi tegangan untuk memvalidasi dan mengetahui presentase error rangkaian konverter. Konverter digunakan sebagai step up tegangan dari 19 volt ke 83,95 volt sebagai pengisi tegangan dari baterai, sehingga diperlukan rasio peningkatan tegangan sebesar 4,1736. Misalnya pada tegangan masuk sebesar 19 volt dihasilkan tegangan keluar sebesar 79,20 volt, didapat rasio yang bekerja sebesar 4,1684. Pada variasi 19 volt didapatkan presentase error dibawah 1% hal ini menunjukkan rangkaian konverter sesuai dengan yang diharapkan.

$$\begin{aligned}
 \text{Presentase Error} &= |\text{Nilai Rasio Eksperimen} - \text{Nilai Rasio Teori}| / \text{Nilai Rasio Eksperimen} \\
 &= |4,1684 - 4,1736| / 4,1684 \\
 &= 0,124\%
 \end{aligned}$$

3.5.3 Hasil kontrol tegangan output pushpull konverter

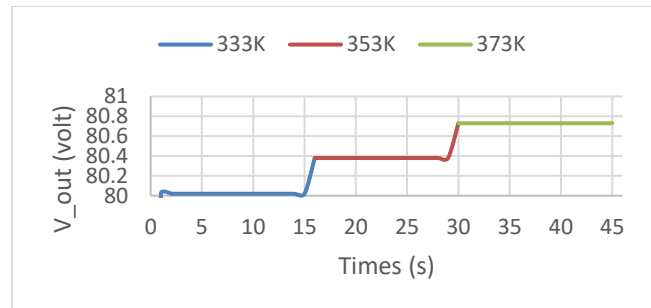
Dalam perhitungan teori dengan nilai komponen tersebut seharusnya didapatkan nilai tegangan keluaran sebesar 83,95 dengan kuat arus sebesar 5,956 A [10]. Tetapi pada Tabel 3 dan 44 dihasilkan tegangan keluaran sebesar 80,02 – 82,14 volt dengan kuat arus 5,696 – 5,846 A. Pengujian ini menggambarkan simulasi yang memiliki kemampuan mendekati kondisi sebenarnya.

Tabel 7. Pengujian konverter dengan variasi tegangan

Temperature		
V_{out} Pp	V_{out} SP	Presentase Error
80,02	83,95	0,049112722
80,38	83,95	0,044414033
80,73	83,95	0,03988604
Tekanan Hidrogen (H_2)		
V_{out} Pp	V_{out} SP	Presentase Error
80,02	83,95	0,049112722
81,36	83,95	0,031833825
82,14	83,95	0,022035549

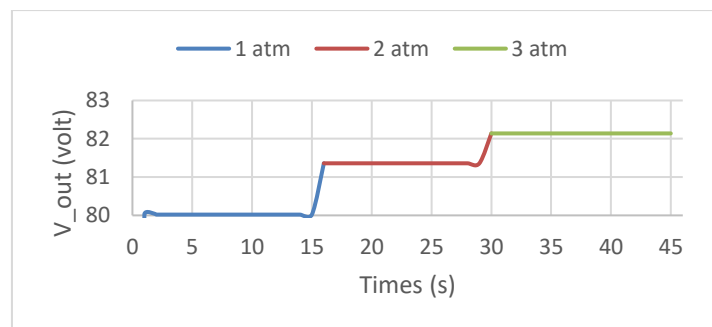
Berdasarkan rugi - rugi pada konverter pushpull dari keseluruhan pemodelan didapatkan presentase error yang dihasilkan yaitu data eksperimen dan data teori. Presentase error pada V_{out} variasi temperature 333K sebesar:

$$\begin{aligned}\text{Presentase Error} &= |\text{Data Eksperimen} - \text{Data Teori}| / \text{Data Eksperimen} \\ &= |80.02 - 83.95| / 80.02 \\ &= 0.049112\end{aligned}$$



Gambar 10. Hasil Grafik Tegangan output Pushpull Konverter (variasi temperature)

Dengan variasi temperature dan tekanan hidrogen pada fuelcell dapat mempengaruhi tegangan keluaran fuelcell sehingga perlu adanya konverter Pushpull untuk mengontrol sekaligus menaikkan tegangan agar tegangan keluaran tidak melebihi 83,95 volt. Hal ini dikarenakan output Pushpull ini dapat mempengaruhi arus yang keluar sebagai control charger baterai.



Gambar 11. Hasil Grafik Tegangan output Pushpull Konverte (variasi tekanan H₂)

Tegangan yang lebih tinggi dari tegangan nominal ini digunakan untuk memastikan agar arus pengisian mengalir kedalam baterai, mengatasi resistansi internal baterai, memastikan baterai terisi penuh sesuai kapasitas maksimalnya.

Hasil grafik menunjukkan sudah mencapai steady, pada percobaan temperature dan tekanan hidrogen dengan rata-rata presentase error sebesar 3,94% . Dengan presentase error yang kecil ini menunjukkan simulasi pushpull konverter mendekati referensi.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan analisa perancangan Push-Pull Converter pada Fuel Cell untuk Battery Charger Controller, dapat disimpulkan bahwa: Pemodelan fuel cells jenis BCS 500W PEMFCs dengan karakteristik yang sesuai dengan membangun model matematika, mampu menghasilkan daya output sebesar 500,24 watt dengan presentase eror 0,4%. Pemodelan Pushpull Converter mampu menjaga effisiensinya terjaga dengan baik dengan rata-rata sebesar 91,11%. Pemodelan kontrol dari Pushpull konverter sudah mencapai steady state dengan rata-rata presentase error 3,94%.

REFERENSI

- [1] B. Ibrahim, P. Suptijah, dan ZN Adjani, “Kinerja Sel Bahan Bakar Mikroba untuk Menghasilkan Bioelektrik Menggunakan Berbagai Jenis Elektroda pada Air Limbah Pengolahan Ikan,” *J Pengolah Has Perikan Indones*, vol. 20, tidak. 2, hal. 296, Agustus 2017.
- [2] K. Fuel Cell dari Tinjauan Material dan Daya Keluaran Sulisty, “Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XV (SNTTM XV) Bandung, 5-6 Oktober 2016 MT-020.”
- [3] H. Suhada, “Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Abad 21,” 2001.[Online].Tersedia:<http://puslit.petra.ac.id/journals/mechanical/92>
- [4] X. Kong dan AM Khambadkone, “Analisis dan penerapan efisiensi tinggi, konverter jembatan penuh arus yang disisipkan untuk sistem sel bahan bakar,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, tidak. 2, hal. 543– 550, Maret 2007, doi: 10.1109/TPEL.2006.889985.
- [5] H. Ma dan F. Widiarsa, “FUEL CELL SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF PENGISI BATERAI DENGAN PENGENDALI PANAS,” 2016.
- [6] AS Menesy, HM Sultan, A. Korashy, FA Banakhr, MG Ashmawy, dan S. Kamel, “Ekstraksi Parameter Efektif Model Tumpukan Sel Bahan Bakar Membran Elektrolit Polimer Berbeda Menggunakan Algoritma Optimasi Ekosistem Buatan yang Dimodifikasi,” *IEEE Access*, vol.8, hal.3189231909, 2020.
- [7] H. Ma dan F. Widiarsa, “FUEL CELL SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK ALTERNATIF PENGISI BATERAI DENGAN PENGENDALI PANAS,” 2016.
- [8] “Panduan Desain Konverter Daya DC/DC PushPull Bergeser Fase,” 2014. [Online]. Tersedia: www.ti.com
- [9] Ji-Z. Chen, “Penerapan Konverter Pushpull Efisiensi Tinggi,” *Engineering*, vol. 03, tidak. 04, hal.331–339, 2011.
- [10] E. Baghaz et al., “Study and design of a Pushpull DC/DC power converter,” *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 31–45, 2019.