



Received 00th January 20xx
Accepted 00th February 20xx
Published 00th March 20xx

Open Access

DOI: 10.35472/x0xx0000

Efek Variasi Suhu Menengah Pada Lapisan Anoda *Planar Solid Oxide Fuel Cell* dengan Metode Elemen Hingga

Ardika Satria ^{*a}, Deska Lismawenning^b, Acep Purqon^c

^a Affiliation of Author 1

^b Affiliation of Author 2

^c Affiliation of Author 3

* Corresponding E-mail: journal@itera.ac.id

Abstract: Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) is an energy resource that can replace the use of fossil fuels in Indonesia, because it is one of renewable energy that is low emission and low in carbon dioxide. At present the development of SOFC has increased in its use in the industry, especially in improving the design and selection of operating temperatures. SOFC at intermediate temperatures in the range of 600°, 700° and 800°C needs to be further examined to obtain an operating temperature with optimal electrochemical properties. The characteristics of electrochemical properties can be observed through a numerical simulation approach using the finite element method. Planar SOFC with anode support layer has TPB (Triple Phase Boundaries) area which can be extended by adding Gadolinium Doping Cerium (GDC) layer. The resulting characteristics can reduce ohmic losses, on the polarization curve. The value of the lost voltage on the polarization curve obtained is, 0.95-0.8 V for the region of activation losses, 0.8-0.6 V for the area of ohmic losses, 0.6-0.2 V for the area of chemical reaction displacement. The output power density tends to decrease with increasing temperature, but the polarization voltage increases so that the performance of SOFC with anode support layers can operate optimally. The maximum power density values obtained at each temperature are 2094,782; 1951,870; and 1838,557 W/m².

Keywords: Fuel Cell, SOFC, Polarization, Electrochemistry, Finite Element Method

Abstrak: *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) merupakan sumber daya energi yang dapat menggantikan penggunaan bahan bakar fosil di Indonesia, karena salah satu energi terbarukan yang ramah emisi dan rendah karbon dioksida. Saat ini pengembangan SOFC sudah mengalami peningkatan terhadap penggunaannya di industri, terutama peningkatan desain dan pemilihan suhu operasi. SOFC pada suhu menengah dalam rentang suhu 600°, 700° dan 800°C perlu ditinjau lebih lanjut untuk mendapatkan suhu operasi dengan sifat elektrokimia yang optimal. Karakteristik sifat elektrokimia dapat diamati melalui pendekatan simulasi numerik dengan menggunakan metode elemen hingga. *Planar* SOFC dengan lapisan pendukung anoda memiliki daerah TPB (*Triple Phase Boundaries*) yang dapat diperpanjang dengan penambahan lapisan *Gadolinium Doping Cerium* (GDC). Karakteristik yang dihasilkan dapat memperkecil *ohmic losses*, pada kurva polarisasi. Nilai tegangan hilang pada kurva polarisasi yang diperoleh adalah, 0,95-0,8 V untuk daerah *activation losses*, 0,8-0,6 V untuk daerah *ohmic losses*, 0,6-0,2 V untuk daerah perpindahan reaksi kimia. Densitas daya keluaran yang diperoleh cenderung menurun seiring meningkatnya suhu, tetapi tegangan polarisasi mengalami kenaikan sehingga kinerja SOFC dengan lapisan pendukung anoda dapat beroperasi dengan optimal. Nilai densitas daya maksimum yang diperoleh pada masing-masing suhu adalah 2094,782; 1951,870; dan 1838,557 W/m².

Kata Kunci : Sel Bahan Bakar, SOFC, Polarisasi, Elektrokimia, Metode Elemen Hingga

Pendahuluan

Energi merupakan salah satu kebutuhan fundamental yang berperan penting dalam menggerakkan roda perekonomian Indonesia, terutama pada kebutuhan konsumsi dan aktivitas produksi berbagai sektor industri [1]. Sumber daya alam yang

dapat menghasilkan energi di Indonesia sangat beragam, tetapi eksplorasi sumber daya energi cenderung lebih dominan pada energi fosil yang bersifat tidak terbarukan [2]. Hal ini bersamaan dengan meningkatnya konsumsi energi fosil dari tahun ke tahun yang mengakibatkan banyaknya sumur-sumur produksi kehabisan sumber daya. Belum lagi,

dampak lingkungan dari kendaraan bermotor berbahan bakar energi fosil, yang mana telah menyumbangkan sebagian besar emisi gas rumah kaca dan kandungan CO₂ di udara, hal ini menyebabkan Indonesia termasuk dalam 8 besar negara penyumbang emisi terbesar [3]. Kondisi tersebut mendorong pemerintah untuk meningkatkan peran energi terbarukan yang masih melimpah, dan terus berkomitmen untuk mengurangi emisi dan efek rumah kaca sekaligus melindungi roda perekonomian yang berdasarkan pada kebijakan energi nasional, yaitu bauran energi terbarukan ditargetkan paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan paling sedikit 31% pada tahun 2050 [4]. Realisasi tersebut sedikitnya telah dimulai, seperti percampuran biodiesel dan bioetanol pada bahan bakar fosil yang pencampurannya masing-masing dimulai dari 20% pada tahun 2019, hingga di targetkan mencapai 100% dan 85% pada tahun 2050 [4]. Namun, proses ini memerlukan dukungan teknologi yang didesain khusus agar dapat bekerja dengan maksimal untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan meminimalkan dampak emisi [5].

Teknologi alternatif seperti *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) dapat diterapkan dalam berbagai sektor industri di Indonesia karena sumber bioenergi yang mudah didapatkan dan berbiaya murah [6]. SOFC merupakan sel elektrokimia yang dapat menghasilkan listrik dari reaksi hidrogen dengan oksigen pada rentang suhu 450°-1000°C [7]. Reaksi elektrokimia tersebut berlangsung di kedua elektroda SOFC pada zona yang dikenal sebagai batas tiga fase atau *Triple Phase Boundaries* (TPB). Penambahan bahan elektrolit ke dalam lapisan elektroda SOFC telah meningkatkan panjang area TPB dan juga menunjang kinerja sel [8], seperti penambahan samarium didoping serium (Sm doping Ce atau SDC) dan gadolinium didoping serium (Gd doping Ce atau GDC) dapat menaikkan konduktivitas ion oksida yang relatif lebih tinggi dibandingkan bahan konvensional [9]. Penelitian Jiang dkk. [10], membuktikan bahwa untuk mengurangi suhu operasi pada anoda NiO-YSZ dilakukan penambahan SDC [10]. Sementara itu menurut Zhang dkk. [11], memberikan infiltrasi pada anoda NiO-YSZ dengan SDC dapat meningkatkan densitas daya sebesar 60% dan penurunan area resistansi spesifik hingga 47% pada suhu 700° C [11]. Timurklutuk dkk. [8], menambahkan lapisan GDC di antara lapisan fungsional Ni-YSZ yang dapat mengubah beberapa

zona mati TPB pada anoda SOFC menjadi daerah yang aktif untuk meminimalkan terjadinya retakan dan meningkatkan kinerja sel dan mengubah beberapa zona mati TPB pada anoda SOFC menjadi daerah yang aktif [8]. Pada penelitian Amar [12], menunjukkan bahwa ukuran ketebalan lapisan pendukung pada elektrolit dapat dilakukan secara komputasi dengan menggabungkan konduktivitas material lapisan pendukung [12].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut untuk memperhitungkan kinerja sel terhadap sifat elektrokimia pada suhu operasi menengah (*Intermediate Temperature*, 600° – 800° C) dan potensi gradien termal yang besar saat diberi penambahan bahan elektrolit di lapisan anoda. Pengujian tersebut dibutuhkan untuk melihat sifat elektrokimia terutama pada struktur anoda dengan lapisan pendukung. Lapisan pendukung yang dimaksud adalah meningkatkan kinerja elektroda dengan membuat struktur anoda lebih tebal dari lapisan lainnya. Tantangan seperti degradasi dan retak material pada zona TPB memerlukan biaya operasi yang tinggi, terutama dipengaruhi oleh pengurangan efisiensi saat percobaan pada struktur sel juga menjadi masalah kompleks yang telah menghasilkan ruang yang berkesinambungan pada desain dan proses yang optimal. Oleh karena itu, dibutuhkan pemodelan numerik yang dapat merepresentasikan kinerja SOFC yang optimal. Pada penelitian ini, penulis melakukan studi sifat elektrokimia melalui pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga (*Finite Element Method*, FEM) terhadap SOFC berstruktur *planar* dengan lapisan pendukung anoda yang diberi tambahan lapisan GDC (*Gadolinium Doping Cerium*) pada suhu 600°, 700° dan 800° C. Sifat elektrokimia pada suhu menengah sangat menarik untuk diteliti lebih rinci karena diperlukan pendekatan yang optimal untuk mendapatkan desain yang maksimal agar dapat memenuhi kebutuhan teknologi energi yang berkelanjutan.

Metode

Geometri *planar* atau lempeng digunakan pada penelitian ini. *Planar* SOFC dengan lapisan pendukung anoda ditunjukkan pada Gambar 1. Proses yang berlangsung pada SOFC dapat dijelaskan melalui model fisisnya yaitu distribusi arus, perpindahan konsentrasi kimia, dan aliran reaksi dalam

media berpori. Pemodelan numerik SOFC tentu mengandung proses yang kompleks sehingga diperlukan asumsi yang dapat menggambarkan model numerik SOFC. Asumsi yang dibuat adalah sebagai berikut:

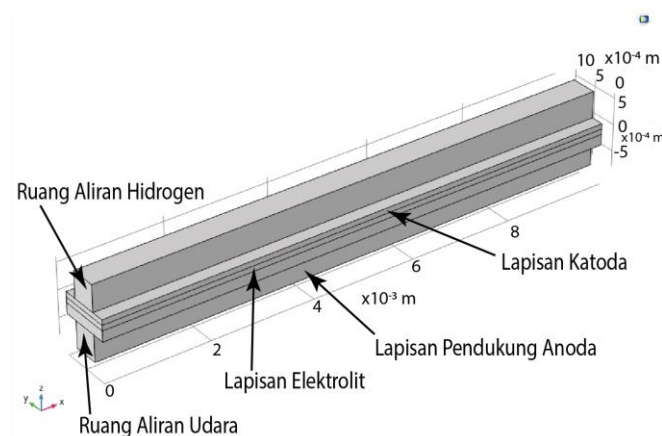
1. Campuran gas yang digunakan di asumsikan dalam keadaan ideal.
2. Reaksi elektrokimia terjadi pada batas lapisan elektroda.
3. Pori dalam elektroda diasumsikan isotropik (seragam) dan makro homogen.
4. Elektrolit diasumsikan kedap terhadap perpindahan massa.
5. Pemanasan Ohmik pada interkoneksi diabaikan, dan diasumsikan konduktor ideal.
6. Tegangan SOFC sama dengan perbedaan tegangan antara anoda dan katoda.
7. Perpindahan panas yang melewati mekanisme radiasi diabaikan pada interkoneksi.
8. Lapisan GDC dan lapisan fungsional digabung dengan satu nilai konduktivitas.

Tabel 1. Parameter umum.

No.	Parameter	Nilai
1	Tekanan ruang	1 atm
2	Temperatur	600°, 700°, 800° C
3	Specific surface area, anoda	$1 \times 10^{-9} \text{ 1/m}$ [14]
4	Specific surface area, katoda	$1 \times 10^{-9} \text{ 1/m}$ [14]
5	Viskositas udara	$3 \times 10^{-5} \text{ Pa.s}$ [15]
6	Porositas	0,4 [8]
7	Permeabilitas elektroda	$1 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ [16]
8	Pertukaran densitas arus, anoda	$0,1 \text{ A/m}^2$
9	Pertukaran densitas arus, katoda	$0,01 \text{ A/m}^2$
10	Konduktivitas elektrolit	5 S/m [8]
11	Konduktivitas elektroda	1000 S/m [8]
12	Referensi difusi	$3,16 \times 10^{-8}$ [14]

Tabel 2. Dimensi sel.

Komponen	Lebar (m)	Tinggi (m)
Ruang Aliran Hidrogen	5×10^{-4}	5×10^{-4}
Anoda	10×10^{-4}	$0,2 \times 10^{-3}$
Elektrolit	10×10^{-4}	$0,15 \times 10^{-3}$
Katoda	10×10^{-4}	$0,17 \times 10^{-3}$



Gambar 1. Geometri model.

Masing-masing parameter fisis ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 yaitu, parameter umum dan dimensi sel. Pada pemodelan ini dilakukan variasi suhu 600°, 700° dan 800°C. Lapisan pendukung anoda dibuat lebih tebal untuk mengoptimalkan kinerja SOFC dengan daerah TPB yang lebih luas. Sedangkan porositas pada model ini adalah 40%. Struktur ini juga memungkinkan elastisitas yang lebih besar dari seluruh kinerja sel, terutama pada suhu yang lebih tinggi [13].

Reaksi Elektrokimia atau Distribusi Arus

Proses transfer muatan yang terjadi pada SOFC terdiri dari transfer muatan elektronik dan muatan ionik. Muatan elektron dan ion oksigen yang masuk melalui lapisan anoda merupakan proses konduksi. Sedangkan pada lapisan pendukung anoda proses konduksi terjadi karena distribusi elektron. Kemudian dengan katoda yang lebih tipis, kedua elektron dan ion oksigen dapat menyebabkan proses konduksi yang lebih baik. Pada lapisan elektrolit distribusi muatan hanya terjadi pada ion oksigen, karena lapisan elektrolit tidak menghantarkan partikel konduksi dengan baik. Konservasi muatan elektronik dan ionik dapat di ekspresikan pada persamaan berikut (1) dan (2).

$$\nabla \cdot i_{el} = Q_s \quad (1)$$

$$\nabla \cdot i_{io} = Q_s \quad (2)$$

i_{el} dan i_{io} merupakan densitas lokal elektronik dan ionik. Berdasarkan hukum Ohm densitas arus dapat dirumuskan dalam persamaan (3) dan (4).

$$i_{el} = -\sigma_{el}^{eff} \nabla \phi_{el} \quad (3)$$

$$i_{io} = -\sigma_{io}^{eff} \nabla \phi_{io} \quad (4)$$

ϕ_{el} dan ϕ_{io} merupakan potensial listrik dari fase elektronik dan ionik. σ_{el}^{eff} dan σ_{io}^{eff} merupakan konduktivitas efektif dari muatan elektronik dan ionik, yang mana bergantung pada karakteristik pori mikro struktur elektroda yaitu:

$$\sigma_{el}^{eff} = \phi_{el} \left(\frac{1-\varepsilon}{\tau} \right) \sigma_{el} \quad (5)$$

$$\sigma_{io}^{eff} = (1 - \phi_{el}) \left(\frac{1-\varepsilon}{\tau} \right) \sigma_{io} \quad (6)$$

ϕ_{el} merupakan fraksi volume dari konduktivitas elektronik σ_{el} dan σ_{io} merupakan konduktivitas elektronik dan ionik. ε adalah porositas dan τ adalah difusi dalam pori (*tortuosity*), terdapat standar korelasi yang berhubungan antara *tortuosity* dan porositas dinyatakan pada Millington-Quirk : $\tau = \varepsilon^{1/3}$. Pada lapisan fungsional anoda, sumber distribusi arus dapat dinyatakan dengan persamaan (7) dan pada katoda ditunjukkan persamaan (8).

$$Q_{el} = -Q_{io} = -i_a \quad (7)$$

$$Q_{el} = -Q_{io} = -i_c \quad (8)$$

Kemudian batas bawah dari anoda yang digunakan adalah *electric ground*. Lalu batas atas dari katoda dinyatakan dalam tegangan keluaran ϕ_{el} . Kondisi batas pada transfer muatan elektronik dan ionik diatur dalam kondisi isolasi termal dengan V_{cell} merupakan tegangan polarisasi, sehingga $\phi_{el} = V_{cell}$.

Pada proses reaksi elektrokimia dapat dimodulkan dengan distribusi arus, yang dapat dinyatakan pada persamaan Butler Volmer. Masing-masing i_a dan i_c merupakan densitas volumetrik arus yang terjadi karena reaksi oksidasi H_2 dan reduksi O_2 , ditunjukkan pada persamaan (9) dan (10). $i_{0,o2}$ dan $i_{0,o2}$ merupakan kuantitas referensi pertukaran densitas untuk H_2 dan O_2 pada konsentrasi referensi $c_{h2\ ref}$ dan $c_{o2\ ref}$. c_{h2} merupakan konsentrasi molar pada hidrogen, c_{h2o} adalah konsentrasi molar air, c_t adalah total konsentrasi spesies.

$$i_{0a} = i_{0,h2} \left(\frac{c_{h2}}{c_{h2\ ref}} \exp \frac{0.5F\eta_{act}}{RT} \right) \quad (9)$$

$$- \left(\frac{c_{h2o}}{c_{h2o\ ref}} \exp \frac{-1.5F\eta_{act}}{RT} \right)$$

$$i_{0c} = i_{0,o2} \left(\frac{c_{o2}}{c_{o2\ ref}} \exp \frac{3.5F\eta_{act}}{RT} \right) \quad (10)$$

$$- \left(\frac{c_t}{c_{o2\ ref}} \exp \frac{0.5F\eta_{act}}{RT} \right)$$

Kemudian F adalah konstanta faraday, R adalah konstanta gas ideal, T adalah temperatur dan η merupakan *overvoltage* atau *overpotential* yang dapat ditunjukkan pada persamaan (11) pada anoda dan (12) pada katoda.

$$\eta_{act,a} = (\phi_{el} - \phi_{io}) - E_{eq,a} \quad (11)$$

$$\eta_{act,c} = E_{eq,c} - (\phi_{el} - \phi_{io}) \quad (12)$$

E_{eq} , merupakan perbedaan potensial kesetimbangan anoda dan katoda, kemudian dapat dirumuskan pada persamaan (13) dan (14).

$$E_{eq,a} = \frac{R_g T}{2F} \ln \frac{p_{H2O}}{p_{H2}} \quad (13)$$

$$E_{eq,c} = E_0 + \frac{R_g T}{2F} \ln \frac{p_{O2}}{p_{atm}} \quad (14)$$

Perpindahan Kimia

Proses perpindahan massa dari setiap spesimen dalam sebuah proses reaksi yang terdiri dari pencampuran gas, yaitu jumlah spesimen $i = 1, \dots, Q$ dan jumlah reaksi $j = 1 \dots N$, maka dapat digunakan persamaan (15).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho w_i) + \nabla \cdot (\rho w_i u) = -\nabla \cdot j_i + R_i \quad (15)$$

ρ adalah densitas campuran gas, w_i adalah fraksi massa, j adalah fluks relatif pada massa kecepatan rata-rata, dan R merupakan kecepatan gas. Kemudian dapat digunakan persamaan konservasi massa untuk merepresentasikan proses reaksi yang ditunjukkan pada persamaan (16).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (16)$$

dengan asumsi

$$\sum_{i=1}^Q w_i = 1 \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^Q j_i = 1 \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^Q R_i = 1 \quad (19)$$

sehingga persamaan (16) menjadi

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} (w_i) + \rho (\nabla \cdot u) w_i = -\nabla \cdot j_i + R_i \quad (20)$$

dari persamaan (20) didapat fraksi massa masing-masing spesimen yaitu

$$w_Q = 1 - \sum_{i=1}^{Q-1} w_i \quad (21)$$

sehingga didapat persamaan umum Maxwell-Stefan yang ditunjukkan pada persamaan (22) di bawah ini.

$$\begin{aligned} & \rho \frac{\partial}{\partial t} (w_i) + \rho (\nabla \cdot u) w_i \\ &= \nabla \cdot \left(\rho \omega_i \sum_k D_{ik} d_k + D_i^T \frac{\nabla T}{T} \right) \\ &+ R_i \end{aligned} \quad (22)$$

D_i^T adalah koefisien difusi termal, d_k adalah difusi pada spesimen k, dan D_{ik} merupakan knudsen difusi. d_k dapat ditunjukkan pada persamaan (23) dan x_k merupakan fraksi mol yang ditunjukkan pada persamaan (24).

$$d_k = \nabla x_k + \frac{1}{p_A} [x_k - \omega_k] \nabla p_A \quad (23)$$

$$x_k = \frac{\omega_k}{M_k} M_n, M_n = \left(\sum_i \frac{\omega_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (24)$$

Pada elektroda sumber atau kecepatan reaksi masing-masing adalah

$$R_{H_2} = -\frac{i_a M_{H_2}}{2F} \quad (25)$$

$$R_{H_2O} = \frac{i_a M_{H_2O}}{2F} \quad (26)$$

$$R_{O_2} = \frac{i_c M_{O_2}}{4F} \quad (27)$$

i_a dan i_c merupakan densitas arus, sedangkan M adalah massa molar masing-masing unsur H_2 , H_2O dan O_2 .

Aliran Fluida

Persamaan Brinkman digunakan untuk mendeskripsikan aliran fluida selama SOFC sedang beroperasi. Kuantitas utama yang terlibat dalam proses ini adalah kecepatan dan tekanan. Kemudian melalui persamaan Navier-Stokes dapat dideskripsikan aliran fluida yang *incompressible*. Kombinasi persamaan tersebut sangat baik dalam menjelaskan aliran fluida pada lapisan berpori, seperti pada elektroda. Persamaan kontinuitas dinyatakan pada persamaan (3.28).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (28)$$

Kemudian persamaan Navier-Stokes ditunjukkan pada persamaan (29).

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \cdot u \nabla \cdot u &= -\nabla p \\ &+ \nabla \cdot \left(\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) \right. \\ &\left. - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right) + F \end{aligned} \quad (29)$$

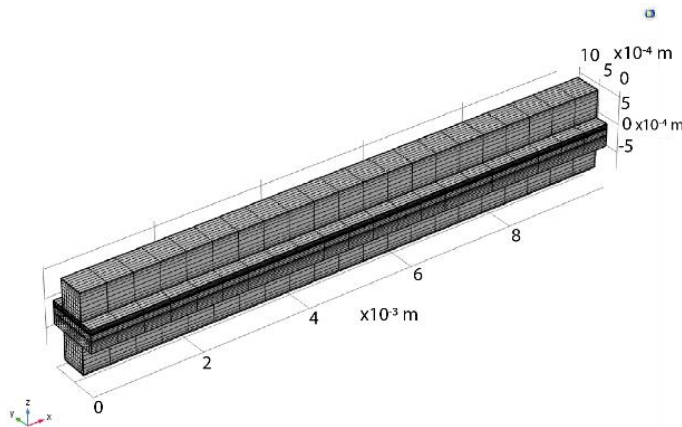
$\rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \cdot u \nabla \cdot u$ adalah gaya inisial, ∇p merupakan tekanan, $\nabla \cdot \left(\mu (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot u) I \right)$ adalah viskositas, dan F merupakan gaya luar. Sementara itu untuk tekanan bebas, $\rho \nabla \cdot u = 0$. Untuk merepresentasikan aliran fluida dalam pori, dapat dinyatakan oleh persamaan Brinkman yang ditunjukkan pada persamaan (30). ε adalah porositas pada material, Q_{br} adalah opsional sumber untuk adanya kemungkinan adanya deposit massa, biasanya $\rho \nabla \cdot u = Q_{br}$

$$\frac{\rho}{\varepsilon}((u \cdot \nabla) \frac{u}{\varepsilon_p} = \nabla \cdot \left[-pI + \frac{\mu}{\varepsilon} (\nabla u + (\nabla u)^T) \right. \\ \left. - \frac{2\mu}{3\varepsilon} (\nabla \cdot u)I \right] \\ - \left(\mu \kappa^{-1} + \beta_F |u| + \frac{Q_{br}}{\varepsilon^2} \right) u \\ + F \quad (30)$$

Sedangkan κ merupakan permeabilitas yang dinyatakan oleh parameter umum dari persamaan Konzeny – Charman yang ditunjukkan pada persamaan (31) [17], di mana d_p merupakan diameter pori.

$$\kappa = \frac{\varepsilon d_p^2}{72\tau(1 - \varepsilon)^2} \quad (31)$$

Semua persamaan diferensial parsial (PDP) akan diselesaikan secara numerik, sehingga menghasilkan model simulasi yang berdasarkan masukan model parameter. Distribusi *mesh* pada simulasi ini pada geometri dibagi menjadi 21 segmen dan setiap segmen terdiri 8 elemen yang ditunjukkan pada Gambar 2. Kemudian komputasi diselesaikan melalui *solver stationary linear*, PARDISO. Simulasi pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak COMSOL *Multiphysics* 5.5.



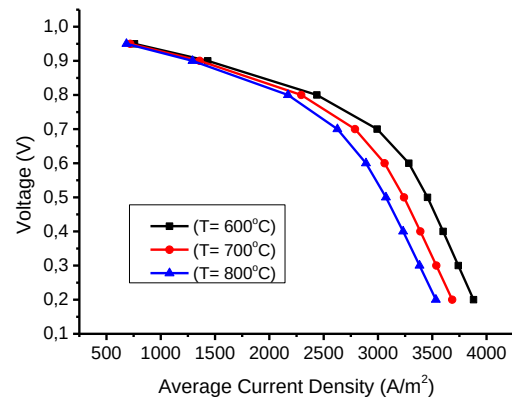
Gambar 2. Mesh Model

Results And Discussion

Hasil simulasi menjelaskan beberapa sifat elektrokimia yang dapat di analisis melalui grafik seperti kurva polarisasi untuk mendapatkan kinerja SOFC yang optimal, densitas daya untuk melihat pengaruh

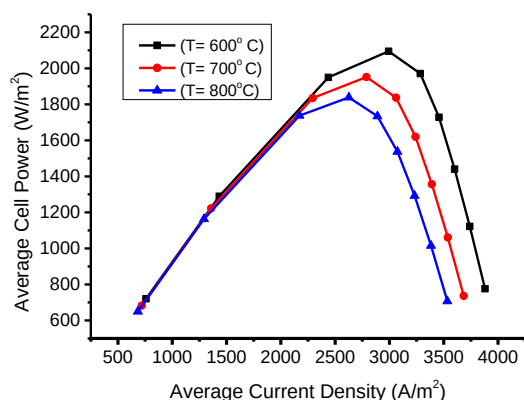
parameter yang diberikan, dan rata-rata densitas arus dengan tegangan polarisasi yang merepresentasikan densitas arus yang mengalir selama beroperasi. Perubahan pada suhu 600°, 700° dan 800°C memberikan karakteristik kurva yang berbeda, sehingga didapat perbandingan sifat elektrokimia.

Pada Gambar 3 menunjukkan kurva polarisasi yang dihasilkan pada perubahan suhu. Kurva polarisasi yang didapat menjelaskan bahwa terdapat *activation losses* yang kurang optimal seiring dengan meningkatnya densitas arus. *Ohmic losses* yang diperoleh berdasarkan Gambar 3 menunjukkan bahwa semakin suhu bertambah maka ohmic losses akan semakin berkurang. Sedangkan perpindahan kimia atau *concentration losses* terjadi sangat cepat sehingga reaksi elektrokimia yang berlangsung menghasilkan kinerja SOFC yang sudah optimal.



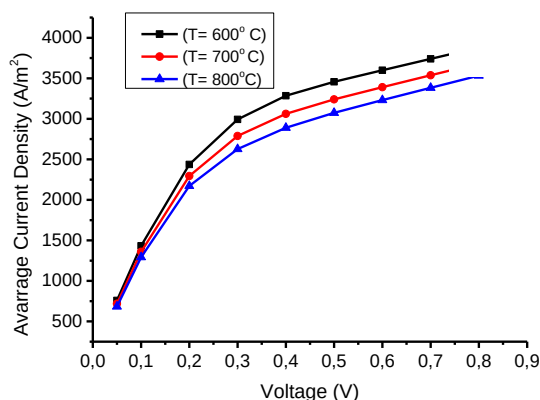
Gambar 3. Kurva Polarisasi pada suhu 600°, 700° dan 800°C.

Pada Gambar 4 menunjukkan densitas daya yang dihasilkan pada perubahan suhu. Densitas daya maksimum yang diperoleh pada masing-masing suhu adalah 2094,782; 1951,870; dan 1838,557 W/m². Densitas daya dihasilkan dipengaruhi oleh suhu karena berkaitan pada densitas arus yang mengalir. Sehingga pemilihan parameter bahan pada elektroda dan elektrolit akan menentukan nilai densitas daya [11]. beberapa parameter yang harus dipertimbangkan untuk menaikkan densitas daya pada penelitian ini, yaitu [18], konduktivitas ionik dan ketebalan elektrolit, nilai pertukaran arus pada elektroda, dan area permukaan spesifik pada katoda.



Gambar 4. Kurva densitas daya pada suhu 600°, 700° dan 800°C.

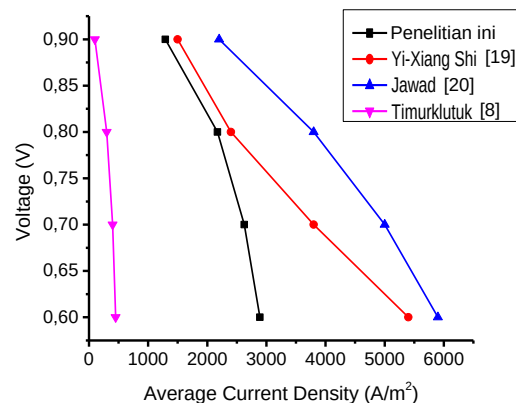
Pada Gambar 3 menunjukkan densitas arus yang bertambah seiring dengan naiknya tegangan. Perubahan dari 0,7-0,8 V menunjukkan perlu adanya penambahan lapisan pendukung yang dapat meningkatkan lagi distribusi densitas arus.



Gambar 5. Rata-rata densitas arus dengan tegangan polarisasi pada suhu 600°, 700° dan 800°C.

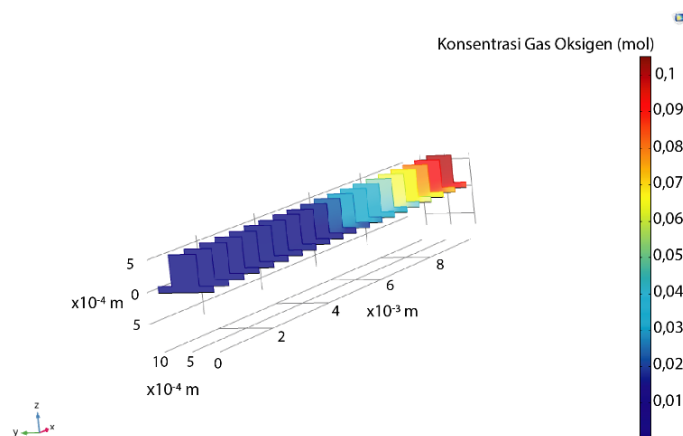
Kemudian dilakukan perbandingan model pada suhu 800°C dengan eksperimen sebelumnya yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil simulasi dengan penelitian Timurklutuk [8], Yi-Xiang Shi [19] dan Jawad [20] menunjukkan distribusi densitas arus yang semakin meningkat. Sehingga model pada penelitian ini telah menunjukkan hasil yang efisien pada suhu 800°C dari pada model Timurklutuk [8]. Sedangkan pada model Yi-Xiang Shi [19] dan Jawad [20] mempunyai model dengan

elektrolit lebih tipis dari pada tebal elektrolit yang digunakan pada penelitian ini.



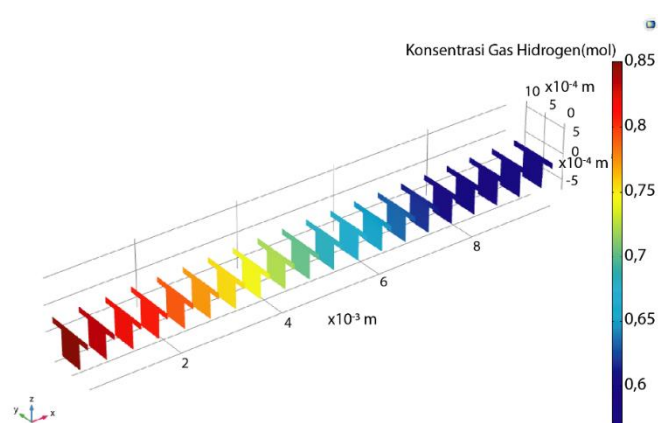
Gambar 6. Perbandingan hasil simulasi dengan model sebelumnya.

Pada Gambar 5 dan 6 menunjukkan fraksi mol pada oksigen dan hidrogen. Distribusi konsentrasi oksigen yang dihasilkan pada Gambar 5 merupakan konsentrasi oksigen pada tegangan 0,5 V. Warna merah memberikan representasi konsentrasi oksigen yang besar. Kemudian menurun di sepanjang aliran pada proses reaksi elektrokimia.



Gambar 7. Distribusi konsentrasi oksigen.

Pada Gambar 6 menunjukkan representasi distribusi konsentrasi hidrogen di sepanjang ruang aliran bahan bakar dengan tegangan 0,5 V. Warna merah menunjukkan konsentrasi yang tinggi hingga warna biru memperlihatkan pembentukan produk berupa uap air.



Gambar 8. Distribusi konsentrasi hidrogen.

Kesimpulan

Pada penelitian ini telah dikembangkan permodelan SOFC dengan lapisan pendukung anoda dengan GDC dan berstruktur planar melalui metode elemen hingga. Kurva tegangan terhadap densitas arus yang dihasilkan menunjukkan kurva polarisasi yang optimal tetapi dengan *activation losses* yang kurang maksimal. Nilai tegangan hilang pada suhu 600°C, 700°C, dan 800°C masing-masing *activation losses*, *ohmic losses* dan perpindahan elektrokimia adalah 0,95-0,8 V; 0,8-0,6 V; dan 0,6-0,2 V. Pengaruh variasi suhu menengah telah memberikan efek yang baik pada konduktivitas elektroda dan elektrolit. Pada kurva polarisasi menunjukkan bahwa terdapat *ohmic losses* yang berkurang, reaksi perpindahan kimia semakin cepat. Kemudian pada densitas daya didapat hasil terhadap perubahan suhu menunjukkan proses yang kurang optimal karena di pengaruhi oleh parameter konduktivitas ionik pada elektrolit, ketebalan elektrolit, nilai pertukaran arus pada elektroda dan area permukaan spesifik katoda. Nilai densitas daya maksimum pada masing-masing suhu adalah 2094,782; 1951,870; dan 1838,557 W/m². Sedangkan pada rata-rata densitas arus dengan tegangan polarisasi menunjukkan bahwa semakin meningkatnya suhu maka semakin menurun tetapi tetap menaikkan distribusi densitas arus pada lapisan anoda. Perbandingan di antara rentang suhu menengah menunjukkan bahwa pada suhu 800°C sifat elektrokimia yang dihasilkan lebih baik yang ditunjukkan pada kurva polarisasi yang optimal. Pada penelitian maupun studi

berikutnya sebaiknya memberikan variasi ketebalan pada lapisan GDC di dalam lapisan anoda sehingga mendapatkan densitas daya yang meningkat.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada Bapak Acep Purqon, Ibu Deska Lismawenning, Bapak Abdul Rajak dan Bapak Mahardika Yoga yang telah memberikan arahan dan bimbingan hingga selesainya penulisan laporan ini.

Referensi

- [1] D. S. Priyarsono, M. Tambunan, dan M. Firdaus, "Perkembangan Konsumsi dan Penyediaan Energi dalam Perekonomian Indonesia," *IJAE (Jurnal Ilmu Ekon. Pertan. Indones.)*, 2010.
- [2] M. Boaro dan A. S. Aricò, *Advances in Medium and High Temperature Solid Oxide Fuel Cell Technology*. 2017.
- [3] T. Damassa, T. Fransen, B. Haya, M. Ge, K. Pjeczka, dan D. K. Ross, "Menginterpretasikan INDC: Menilai Transparansi Target Emisi Gas Rumah Kaca Pasca 2020 dari 8 Negara Penyumbang Emisi Terbesar".
- [4] ESDM, "Indonesia Energy Out Look 2019," *J. Chem. Inf. Model.*, 2019.
- [5] N. P. Brandon, E. Ruiz-Trejo, dan P. Boldrin, *Solid Oxide Fuel Cell Lifetime and Reliability: Critical Challenges in Fuel Cells*. 2017.
- [6] J. Milewski, K. Świrski, M. Santarelli, dan P. Leone, "Advanced methods of solid oxide fuel cell modeling," *Green Energy Technol.*, 2014.
- [7] L. Shu, J. Sunarso, S. S. Hashim, J. Mao, W. Zhou, dan F. Liang, "Advanced perovskite anodes for solid oxide fuel cells: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*. 2019.
- [8] B. Timurkutluk, S. Dokuyucu, dan S. Onbilgin, "Novel structured anode-supported solid oxide fuel cells with porous GDC interlayers," *Ceram. Int.*, 2020.
- [9] T. Z. Sholkappier, H. Kurokawa, C. P. Jacobson, S. J. Visco, dan L. C. De Jonghe, "Nanostructured solid oxide fuel cell electrodes," *Nano Lett.*, 2007.
- [10] S. P. Jiang, Y. Y. Duan, dan J. G. Love, "Fabrication of High-Performance Ni/Y[_{sub}2]O[_{sub}3]-ZrO[_{sub}2] Cermet Anodes of Solid Oxide Fuel Cells by Ion Impregnation," *J. Electrochem. Soc.*, 2002.
- [11] L. Zhang, J. Gao, M. Liu, dan C. Xia, "Effect of impregnation of Sm-doped CeO₂ in NiO/YSZ anode substrate prepared by gelcasting for tubular solid oxide fuel cell," *J. Alloys Compd.*, 2009.
- [12] A. Aman, R. Gentile, Y. Chen, Y. Xu, X. Huang, dan N. Orlovskaya, "Numerical Simulation of Electrolyte-Supported Planar Button Solid Oxide Fuel Cells with Layered Electrolytes," *ECS Meet. Abstr.*, 2014.
- [13] K. Sasaki et al., "H[_{sub}2]S Poisoning of Solid Oxide Fuel Cells," *J.*

Electrochem. Soc., 2006.

- [14] Z. Wang, K. Sun, S. Shen, N. Zhang, J. Qiao, dan P. Xu, "Preparation of YSZ thin films for intermediate temperature solid oxide fuel cells by dip-coating method," *J. Memb. Sci.*, 2008.
- [15] A. Hamnett, "The components of an electrochemical cell," in *Handbook of Fuel Cells*, 2010.
- [16] R. Bove dan S. Ubertini, "Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results," *J. Power Sources*, 2006.
- [17] A. E. Richards, M. G. McNeeley, R. J. Kee, dan N. P. Sullivan, "Gas transport and internal-reforming chemistry in Ni-YSZ and ferritic-steel supports for solid-oxide fuel cells," *J. Power Sources*, 2011.
- [18] E. Perry Murray, T. Tsai, dan S. A. Barnett, "A direct-methane fuel cell with a ceria-based anode," *Nature*, 1999.
- [19] Y. Shi et al., "A general approach for electrochemical impedance spectroscopy simulation using transient mechanistic SOFC Model," *Ecs Trans.*, 2007.
- [20] J. Hussain, R. Ali, M. N. Akhtar, M. H. Jaffery, I. Shakir, dan R. Raza, "Modeling and simulation of planar SOFC to study the electrochemical properties," *Curr. Appl. Phys.*, 2020.