

Nanang Setiawan

Mahasiswa S2
National Central University
Jurusan Teknik Mesin
nanang.engineer@gmail.com

Chung-Jen Tseng

Tenaga Pengajar (Dosen)
National Central University
Jurusan Teknik Mesin
cjtseng@cc.ncu.edu.tw

Chin Tien Shen

Mahasiswa S3
National Central University
Jurusan Teknik Mesin
tommy800515@gmail.com

ING Wardana

Tenaga Pengajar (Dosen)
Universitas Brawijaya
Jurusan Teknik Mesin
wardana@ub.ac.id

PENGARUH DOPING Cu TERHADAP KARAKTERISTIK MATERIAL ANODA $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY UNTUK PSOFC

The purpose of this study is to investigate the microstructure characteristics of the $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY anode. $Ni_{1-x}Cu_x$ and $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0.2}O_{3.5}$ (BCZY) powder were prepared by solid-state reaction with $Ni_{1-x}Cu_x$ /BCZY. The results of the $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY microstructure show an increase in the average particle size from 2.71 to 2.88 μm . Furthermore, the conductivity of $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY ($x = 0.1$) is lower than $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY ($x = 0$), this is associated with enhancement electron scattering, which correlates with large metal particle obtained.

Keywords: Nickel-Copper Alloy, Cermet Anode, Intermediate-Temperature Solid Oxide Fuel Cell (IT-SOFC), Solid State Reaction.

1. PENDAHULUAN

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) adalah pembangkit listrik yang sangat potensial dikarenakan memiliki efisiensi yang tinggi, fleksibilitas bahan bakar, penggunaan katalis yang murah, dan emisi pengotor yang rendah, yang mana kategori tersebut sangat penting untuk sistem konversi energi masa depan [1-2]. SOFC konvensional menggunakan prinsip transfer ion oksigen (O^{2-} -SOFC) dan beroperasi pada kisaran temperatur 800-1000 °C. Dengan temperatur yang sangat tinggi tersebut menyebabkan beberapa masalah seperti kerusakan material, *mechanical stress*, dan waktu *start-up* dan *shut-off* yang lama. Selain itu O^{2-} -SOFC juga menuntut penggunaan material yang mahal dan energi input yang sangat besar untuk memanaskan sistem sampai temperatur kerja yang ditetapkan. Beberapa faktor tersebut menjadi kendala penerapan O^{2-} -SOFC untuk skala komersial [3-4]. Dalam beberapa puluh tahun belakangan telah dikembangkan *proton conducting SOFC* (H^+ -SOFC atau PSOFC) yang dapat beroperasi pada temperatur yang relatif lebih rendah dari SOFC konvensional (450-650 °C) dan menghasilkan energi elektromagnetik yang tinggi [5-6]. Dibandingkan dengan SOFC konvensional, pengembangan ini memungkinkan untuk penggunaan material yang relatif lebih murah untuk interkoneksi, kontrol sintering elektrode yang lebih baik, interaksi elektrode dan elektrolit pun semakin bagus, dengan demikian bisa memperpanjang masa operasional SOFC. H^+ -SOFC juga memiliki konduktivitas proton yang tinggi, serta aktivasi energi yang rendah [2-3].

Struktur *anode supported* untuk SOFC diterima di dunia karena kemudahan penyalaan, sifat elektrokatalitik yang lebih baik, dan efisiensi yang lebih baik [7]. Di antara semua aditif sintering oksida logam, nikel adalah yang paling efektif dan telah umum digunakan dalam anoda *cermet* O^{2-} -SOFC atau H^+ -SOFC [2]. Membran komposit yang mengandung nikel dan konduktor proton padat $BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0.2}O_{3.5}$ (BCZY) dapat digunakan sebagai pemecah hidrogen tanpa elektrode atau sirkuit elektrikal eksternal, sehingga lebih menguntungkan dibandingkan sistem konvensional [8]. Akan tetapi salah satu kelemahan penggunaan nikel adalah terjadinya deposit karbon yang berakibat pada menurunnya performa *fuel cell* dengan penggunaan *syngas* dan CH_4 sebagai bahan bakar [13].

Penggunaan material *alloy* pada anoda dapat menurunkan deposit karbon pada *fuel cell*, beberapa penelitian menunjukkan bahwa dengan menggabungkan Ni dan Cu, dengan prosentase Cu 0.5 wt% dapat secara efektif menurunkan kadar deposit karbon. Hal ini disebabkan karena interaksi elektron Cu dan CO sangat lemah. Namun dengan penambahan kadar Cu pada *alloy* dapat menurunkan performa *electrochemical fuel cell* [11,14]. Performa *electrochemical Ni-based* anoda bergantung pada mikrostruktur material anoda. Mikrostruktur sangat bergantung pada awal proses persiapan pembuatan powder dan saat proses pembentukan powder [8]. Temperatur dan lamanya proses kalsinasi dapat mengubah besar mikrostruktur partikel dan konduktivitas elektrik sehingga berpengaruh juga pada performa *fuel cell*. Secara umum, semakin tinggi konduktivitas anoda, maka performa *fuel cell* juga meningkat.

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari karakteristik mikrostruktur anoda dan sifat konduktifitasnya dengan melakukan doping Cu pada anoda Ni-BCZY sebagai solusi untuk permasalahan deposit karbon yang terjadi pada anoda Ni-BCZY. Pada penelitian ini, powder $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY ($x=0.0$ dan 0.1) disiapkan menggunakan metode *solid state reaction* (SSR). Hasil Analisa fase XRD, SEM, dan porositas juga ditampilkan. Konduktifitas elektrik diuji menggunakan metode *four probe DC*.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Pembuatan Anoda

Pada studi ini, powder $BaCe_{0.6}Zr_{0.2}Y_{0.2}O_3$ (BCZY) disintesis menggunakan metode *solid state reaction* (SSR). $BaCO_3$ (Sigma Aldrich, 99.9%), CeO_2 (Sigma Aldrich, 99.9%), Y_2O_3 (Alfa Aesar, 99%), dan ZrO_2 (Sigma Aldrich, 99.9%) diambil sesuai dengan rasio dan dicampur dengan metode *ball milling* selama 24 jam menggunakan Zr Ball dan ethanol untuk menghasilkan butiran powder yang halus. Langkah selanjutnya yaitu menguapkan ethanol agar tersisa powder kering dengan cara dipanaskan pada *hot plate*. Campuran powder kemudian di kalsinasi pada temperatur 1250 °C, kalsinasi dimaksudkan untuk menghilangkan senyawa pengotor dan oksida pada powder dengan temperatur di bawah titik leleh material. Setelah itu powder di *ball mill* lagi dengan ethanol dan Zr ball selama 24 jam agar butiran terdispersi secara merata. Setelah ethanol diuapkan, powder kemudian di meshing dengan ukuran 400 mesh.

Powder $Ni_{1-x}Cu_x$ ($x = 0.1$) atau $Ni_{0.9}Cu_{0.1}$ disiapkan menggunakan metode *solid state reaction* (SSR). NiO (Showa, 99.8%), CuO (Sigma Aldrich, 98%) diambil sesuai dengan rasio dan dicampur menggunakan metode *ball milling* 24 jam menggunakan Zr Ball dan ethanol. Langkah selanjutnya yaitu menguapkan ethanol agar tersisa powder kering dengan cara dipanaskan pada *hot plate*. Campuran powder kemudian di kalsinasi pada temperatur 700 °C selama 1.5 jam, kalsinasi dimaksudkan untuk menghilangkan senyawa pengotor dan oksida pada powder dengan temperatur di bawah titik leleh material. Setelah itu powder di *ball mill* lagi dengan ethanol dan Zr ball selama 24 jam agar butiran terdispersi secara merata. Setelah ethanol diuapkan, powder kemudian disiapkan untuk langkah selanjutnya.

Powder $Ni_{1-x}Cu_x$ - BCZY ($x = 0.0$) atau Ni-BCZY disiapkan menggunakan metode *solid state reaction* (SSR). NiO (Showa, 99.8%) dan BCZY diambil sesuai dengan rasio yaitu 60:40 wt% dan dicampur menggunakan metode *ball milling* 24 jam menggunakan Zr Ball dan ethanol. Langkah selanjutnya yaitu menguapkan ethanol agar tersisa powder kering dengan cara dipanaskan pada *hot plate*. Setelah itu powder di *ball mill* lagi dengan ethanol dan Zr ball selama 24 jam agar butiran terdispersi secara merata. Setelah ethanol diuapkan, powder kemudian disiapkan untuk langkah selanjutnya.

Powder $Ni_{1-x}Cu_x$ - BCZY ($x = 0.1$) atau $Ni_{0.9}Cu_{0.1}$ - BCZY disiapkan menggunakan metode *solid state reaction* (SSR). atau $Ni_{0.9}Cu_{0.1}$ dan BCZY diambil sesuai dengan rasio yaitu 60:40 wt% dan dicampur menggunakan metode *ball milling* 24 jam menggunakan Zr Ball dan ethanol. Langkah selanjutnya yaitu menguapkan ethanol agar tersisa powder kering dengan cara dipanaskan pada *hot plate*. Setelah itu powder di *ball mill* lagi dengan ethanol dan Zr ball selama 24 jam agar butiran terdispersi secara merata. Setelah ethanol diuapkan, powder kemudian disiapkan untuk langkah selanjutnya.

Powder $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY ($x = 0.0$ dan 0.1) yang sudah di kalsinasi kemudian dipres menjadi bentuk pelet (diameter 10 mm dan tebal 1 mm) dan batang (panjang 30 mm, lebar 6 mm, dan tebal 1 mm) kemudian disintering pada temperatur 1450 °C. Sintering dimaksudkan untuk menghasilkan material yang padat. Setelah disintering, pelet dan batang tersebut kemudian di reduksi dengan hidrogen murni untuk menghilangkan senyawa oksida pada powder. Sampel dibuat untuk eksperimen ini, yaitu Ni-BCZY (N-BCZY), $(Ni_{0.9}Cu_{0.1}(0.5)$ -BCZY), dan $Ni_{0.9}Cu_{0.1}$ -BCZY dengan temperatur kalsinasi 700 °C selama 1.5 jam ($Ni_{0.9}Cu_{0.1}(1.5)$ -BCZY).

2.2 Karakterisasi Material

Karakter material diungkap dengan *X-Ray Diffraction* (XRD). XRD digunakan untuk mengidentifikasi fase kristal material pada kisaran 2θ antara 20° sampai 80° menggunakan radiasi Cu K α dan beroperasi pada 40kV dan 30mA, dengan *scan rate* 2°/menit. Mikrostruktur sample diamati menggunakan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FE-SEM, FEI Quanta 200F), gambar diamati pada permukaan sample untuk mengamati interaksi antar butir dan menghitung besar butir pada sampel. Porositas sample dihitung menggunakan metode pengukuran densitas Archimedes dan dihitung menggunakan persamaan 1 dan 2 [19]

$$P = \frac{W_w - W_d}{V \times D} \times 100\% \quad (1)$$

$$V = \frac{W_w - W_s}{D} \times 100\% \quad (2)$$

Dimana V adalah volume pelet, W_w adalah berat pelet yang jenuh air, W_s adalah suspensi pelet, W_d adalah berat kering pelet, D adalah densitas air, dan P adalah porositas pelet. Besar butir anoda dihitung menggunakan *software* ImageJ. Sample yang digunakan untuk uji XRD, porositas, dan SEM berbentuk pelet yang sudah disintering pada temperature 1450 °C selama 4 jam dan direduksi dengan hidrogen murni.

Konduktivitas elektrik sample diukur pada kisaran temperatur 400 sampai 800 °C dengan udara yang tereduksi H_2 menggunakan *presicion milliohm meter* (MO-2013). Sample yang digunakan untuk uji konduktivitas berbentuk batang yang sudah disintering pada temperatur 1450 °C selama 4 jam dan direduksi dengan hidrogen murni untuk menghilangkan senyawa pada powder.

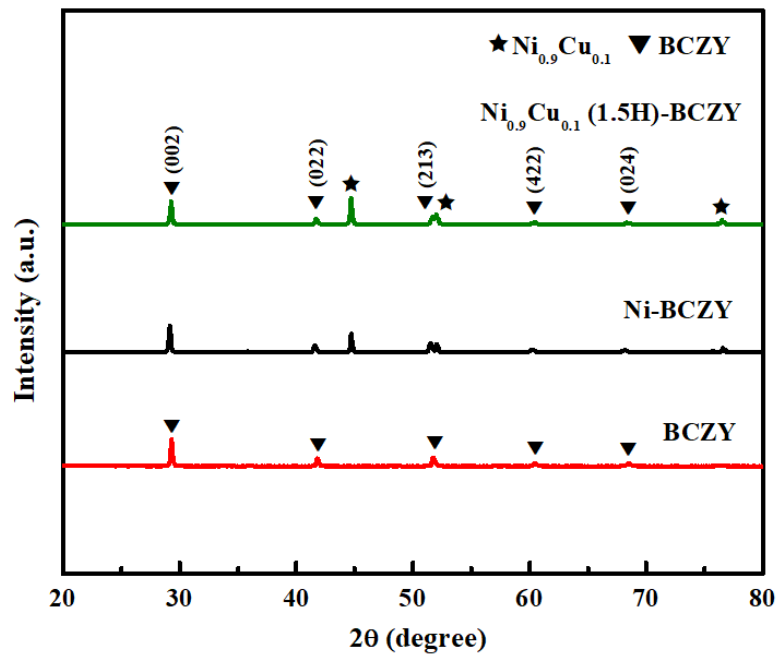
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil XRD

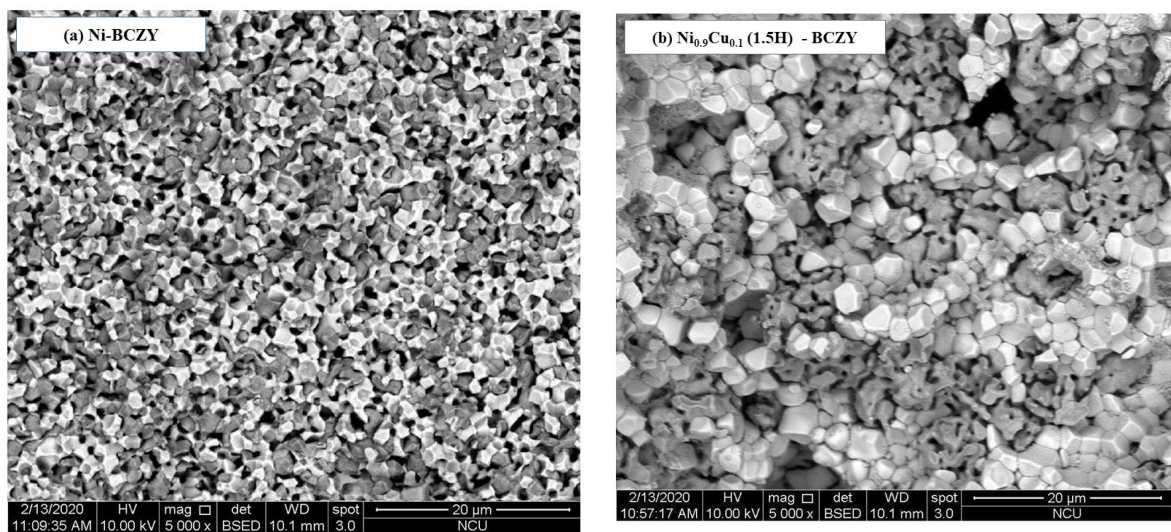
Pola XRD pada gambar 1 menunjukkan hasil scan BCZY murni hasil sintesis, setelah diidentifikasi puncak elektrolit BCZY terdiri dari (002), (022), (213), (422), dan (024). Pola tersebut memperlihatkan fase BCZY murni dengan struktur *perovskite orthorhombic* seperti laporan sebelumnya [17]. Pola XRD Ni-BCZY juga ditampilkan untuk perbandingan. Senyawa oksida NiO dan CuO yang digunakan sebagai material awal berhasil tereduksi menjadi Ni dan Cu. Pada NiCu puncak XRD dari Ni (111) bergeser ke sudut yang lebih rendah dari 44.72° menjadi 44.68° dengan penambahan Cu sebesar $x = 0.1$. Ini dikarenakan radius atom Cu (0.72 Å) yang lebih besar dari Ni (0.69 Å) [11]. Pola XRD juga menunjukkan struktur *single* fase FCC dan tidak terlihat adanya material pengotor pada $Ni_{1-x}Cu_x$ -BCZY.

3.2 Morfologi

Gambar 2 memperlihatkan mikrostruktur permukaan sample. Porositas dan ukuran butir tertera pada tabel 1. Butir BCZY dengan warna cerah dan alloy berwarna kegelapan. Semua gambar menunjukkan butir BCZY dan *alloy* terlihat padat dengan celah antar butir yang kecil. Tabel 1 menunjukkan dengan penambahan Cu 0.1 wt% dapat secara signifikan menambah besar butir dari 0.85 µm dan besar butir 2.88 µm pada sample $Ni_{0.9}Cu_{0.1}(1.5)$ -BCZY. Hal ini dikarenakan doping Cu pada Ni-BCZY akan menurunkan titik leleh *alloy* dan meningkatkan temperatur sintering material, sehingga ukuran butir *alloy* lebih besar, ini juga berdampak pada butir BCZY, terlihat butiran BCZY semakin besar dengan penambahan Cu. Selain itu, seiring dengan bertambahnya temperatur kalsinasi, butir *alloy* semakin besar, hal ini menyebabkan celah antar butir mengecil dan berakibat pada nilai porositas yang semakin rendah. Hal tersebut adalah efek yang tidak diharapkan karena dengan porositas yang semakin rendah akan memperkecil area yang aktif untuk oksidasi bahan bakar fuel cell. Besar rata-rata partikel anoda Ni-BCZY, dan $Ni_{0.9}Cu_{0.1}(1.5)$ -BCZY masing-masing adalah 0.85, 2.71, dan 2.88 µm. Metode Archimedes digunakan untuk mengukur porositas masing-masing anoda, yaitu: 21, 20, dan 19 % seperti yang ditunjukkan dalam tabel 1. Secara umum, semakin besar pori-pori pada anoda dapat meningkatkan transport gas melalui elektroda, sedangkan dengan pori-pori yang kecil akan menambah area permukaan untuk penyerapan dan pelepasan gas dengan bertambah banyaknya permukaan aktif sebagai katalis untuk terjadinya reaksi [12].



Gambar 1: Pola XRD untuk Nikel (JCPDS 87-0712), BCZY, dan $\text{Ni}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}(1.5)\text{-BCZY}$.



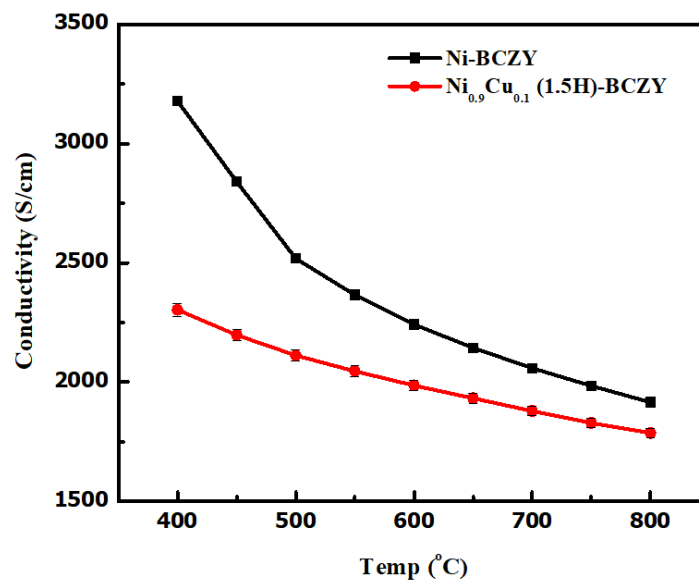
Gambar 2: Morfologi permukaan menggunakan SEM dari (a) Ni-BCZY dan (b) $\text{Ni}_{0.9}\text{Cu}_{0.1}(1.5)\text{-BCZY}$. Semua sampel disintering pada temperatur 1450 °C selama 4 jam dan direduksi dengan H_2 .

Tabel 1. Porositas dan besar butir rata-rata untuk N-BCZY, Ni_{0.9}Cu_{0.1}(0.5)-BCZY, dan Ni_{0.9}Cu_{0.1}(1.5)-BCZY.

SAMPEL	POROSITAS	BESAR BUTIR (µm)
N-BCZY	21	0.85
Ni _{0.9} Cu _{0.1} (1.5)-BCZY	19	2.88

3.3 Pengukuran Konduktivitas Elektrik

Gambar 3 menunjukkan dengan penambahan Cu 10 at% menurunkan konduktivitas pada sample. Doping Cu ke Ni mengurangi konduktivitas karena Cu memiliki aktivitas katalitik yang lebih rendah daripada Ni [14] dan meningkatnya perpencaran elektron yang berkorelasi dengan besar partikel *alloy* [18] yang ditunjukkan pada tabel 1. Hal ini dikarenakan temperatur sintering yang lebih rendah dan ukuran partikel yang lebih kecil. Seperti ditunjukkan pada gambar, tren grafik konduktivitas konsisten dengan analisa SEM.



Gambar 3: Hasil pengukuran konduktivitas elektrikal untuk Ni-BCZY dan Ni_{0.9}Cu_{0.1}(1.5)-BCZY.

4. KESIMPULAN

Cu berhasil didoping pada anoda Ni-BCZY menjadi Ni_{1-x}Cu_x-BCZY. Dengan doping Cu pada Ni-BCZY, nilai konduktivitas menjadi rendah. Hal ini diakibatkan Cu memiliki aktivitas katalitik yang lebih rendah dari Ni dan meningkatnya persebaran elektron yang berkorelasi dengan besar partikel *alloy*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] C.J. TSENG, J.K. CHANG, I.M. HUNG, K.R. LEE, S.W. LEE, "BaZr_{0.2}Ce_{0.8-x}Y_xO_{3-δ} solid oxide fuel cell electrolyte synthesized by sol-gel combined with composition exchange method", *Int. J. Hydrogen Energy*, v. 39, n. 26, pp. 14434-14440, Sep. 2014.
- [2] K.R. LEE, C.J. TSENG, S.C. JANG, J.C. LIN, K.W. WANG, J.K. CHANG, T.C. CHEN, S.W. LEE, "Fabrication of anode-supported thin BCZY electrolyte protonic fuel cells using NiO sintering aid", *Int. J. Hydrogen Energy*, v. 44, n. 42, pp. 23784-23792, Sep. 2019.
- [3] C.T. SHEN, Y.H. LEE, K. XIE, C.P. YEN, J.W. JHUANG, K.R. LEE, S.W. LEE, C.J. TSENG, "Correlation between microstructure and catalytic and mechanical properties during redox cycling for Ni-BCY and Ni-BCZY composites", *Ceram Int*, v. 43, n. 1, pp. S671-S674, Aug. 2017.
- [4] B. PRANOTO, C.J. TSENG, ING. WARDANA, "Analisis Pemodelan Sistem Hibrid Proton Conducting Solid Oxide Fuel Cell (pSOFC) – Turbin Gas Mikro Pada Matlab-Simulink." *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 7, n. 1, pp. 27-32, 2016.

- [5] E. FABBRI, A. D'EPFANIO, E.D. BARTOLOMEO, S. LICOCIA, E. TRAVERSA, "Tailoring the chemical stability of Ba(Ce_{0.8-x}Zr_x)Y_{0.2}O_{3-d} protonic conductors for intermediate temperature solid oxide fuel cells (IT-SOFCs)", *Solid State Ion*, v. 179, n. 15-16, pp. 558-564, Jun. 2008.
- [6] G. CHEN, Y. LUO, W. SUN, H. LIU, Y. DING, Y. LI, S. GENG, K. YU, G. LIU, "Electrochemical performance of a new structured low temperature SOFC with BZY electrolyte", *Int J Hydrogen Energy*, v. 43, n. 28, pp. 12765-12772, Jul. 2018.
- [7] J.W FERGUS. "Electrolytes for solid oxide fuel cells". *J Power Sources*, v. 162, n. 1, pp. 30-40, Nov. 2006.
- [8] L. YAN, W. SUN, L. BI, S. FANG, Z. TAO, W. LIU, "Influence of fabrication process of Ni-BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0.2}O₃₋₁ cermet on the hydrogen permeation performance", v. 508, pp. L5-L8, Aug. 2010.
- [9] R. KONAR, J. MUKHOPADHYAY, A.D. SHARMA, R. N. BASU, "Synthesis of Cu-YSZ and Ni-Cu-YSZ cermets by a novel electroless technique for use as solid oxide fuel cell anode: Application potentiality towards fuel flexibility in biogas atmosphere". *Int J Hydrogen Energy*, v. 41, n. 2, pp. 1151-1160, Jan. 2015
- [10] H. TU, U. STIMMING, "Advances, aging mechanisms and lifetime in solid oxide fuel cells". *J Power Sources*, v. 127, n. 1-2, pp. 284-293, Mar. 2004.
- [11] M. MIYAKE, S. MATSUMOTO, M. IWAMI, S. NISHIMOTO, Y. KAMESHIMA, "Electrochemical performances of Ni_{1-x}Cu_x/SDC cermet anodes for intermediate-temperature SOFCs using syngas fuel", *Int. J. Hydrogen Energy*, v. 41, n. 31, pp. 13625-13631, Aug. 2016.
- [12] Z. C. WANG, S. Q. WANG, S. Y. JIAO, W. J. WENG, K. CHENG, B. QIAN, H. L. YU, Y.M. CHAO, "A hierarchical porous microstructure for improving long-term stability of Ni_{1-x}Cu_x/SDC anode-supported IT-SOFCs fueled with dry methane", *J. Alloys Compd.*, v. 702, pp. 186-192, Apr. 2017.
- [13] H. KIM, C. LU, W. L. WORRELL, J. M. VOHS, R. J. GORTE, "Cu-Ni cermet anodes for direct oxidation of methane in solid-oxide fuel cells", *J. Electrochem. Soc.*, v. 149, n. 3, pp. A247-A250, Jan. 2002.
- [14] Z. XIE, C. R. XIA, M. Y. ZHANG, W. ZHU, H. T. WANG, "Ni_{1-x}Cu_x alloy-based anodes for low-temperature solid oxide fuel cells with biomass-produced gas as fuel", *J. Power Source*, v. 161, n. 2, pp. 1056-1061, Oct. 2006.
- [15] Y. KALINCI, I. DINCER. "Analysis and Performance Assessment of NH₃ and H₂ Fed SOFC with Proton-Conducting Electrolyte." *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 43, no. 11, pp. 5795-5807. Mar. 2018
- [16] G. C. DING, T. GAN, J. YU, P. LI, X. L. YAO, N. J. HOU, L. J. FAN, Y. C. ZHAO, Y. D. LI, "Carbon-resistant Ni_{1-x}Cu_x-Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{1.9} anode for solid oxide fuel cells fed with methanol", *Catal. Today*, v. 298, pp. 250-257, Dec. 2017.
- [17] J. LAGAeva, D. MEDVEDEV, A. DEMIN, P. TSIKARAS, "Insights on thermal and transport features of BaCe_{0.8-x}Zr_xY_{0.2}O_{3-d} proton-conducting materials", *J Power Sources*, v. 278, pp. 436-444, Mar. 2015.
- [18] C. M. GRGICAK, M. M. PAKULSKA, J. S. O'BRIEN, J. B. GIORGI, "Synergistic effects of Ni_{1-x}Cu_x-YSZ and Ni_{1-x}Cu_x-YSZ alloyed cermet SOFC anodes for oxidation of hydrogen and methane fuels containing H₂S", *J Power Sources*, v. 183, n. 1, pp. 26-33, Aug. 2008.
- [19] Standard Test Method for Water Absorption, ASTM, pp. C373-C388, 2006.
- [20] K. WEI, X. WANG, R. A. BUDIMAN, J. KANG, B. LIN, F. ZHOU, Y. LING, "Progress in Ni-based anode materials for direct hydrocarbon solid oxide fuel cells", *J Mater. Sci.*, v. 53, pp. 8747-8765, Mar. 2018.
- [21] L. YAN, W. P. SUN, L. BI, J. KANG, S. FANG, Z. TAO, W. LIU, "Influence of fabrication process of Ni-BaCe_{0.7}Zr_{0.1}Y_{0.2}O₃₋₁ cermet on the hydrogen permeation performance", *J. Alloys Compd.*, v. 508, n. 1, pp. L5-L8, Oct. 2010.

- [22] N. K. HOA, H. A. RAHMAN, M. R. SOMALU, “Effects of NiO loading and pre-calcination temperature on NiO-SDCC composite anode powder for low-Temperature solid oxide fuel cells”, *Ceramics Silikat*, v. 62, n. 1, pp. 50-58, Jan. 2010.