

Sel Bahan Bakar Oksida Padat Sebagai Sumber Energi Yang Ramah Lingkungan di Masa Pandemi COVID-19

Rihan Amila Putri¹, Atiek Rostika Noviyanti^{1*}

¹Departemen Kimia, FMIPA, Universitas Padjadjaran, Bandung, Indonesia

ABSTRAK

Virus corona jenis baru, COVID-19 (disebabkan oleh SARS-CoV-2) telah menyebar ke seluruh dunia. Kebutuhan untuk memenuhi daya untuk rumah sakit dan pusat kesehatan menjadi salah satu perhatian di masa pandemi saat ini. Kebutuhan daya ini dapat dipenuhi dengan memanfaatkan sel bahan bakar oksida padat (SOFC) yang menggunakan gas H₂ melalui proses elektrokimia untuk menghasilkan listrik dengan emisi rendah. SOFC memiliki efisiensi hingga 85%, menyediakan alternatif yang ramah lingkungan dan efisien untuk perangkat penghasil listrik. Komponen SOFC yang terdiri dari elektrolit dan elektrode yang memenuhi syarat dari berbagai aspek, diharapkan dapat menghasilkan sel dengan kinerja elektrokimia yang baik agar menghasilkan efisiensi yang tinggi ketika dikombinasikan dengan CHP, APU, atau UPS untuk menghasilkan daya yang dapat membantu dalam mengatasi pasokan listrik di rumah sakit dan pusat kesehatan pada masa pandemi COVID-19.

Kata Kunci: Anode; COVID-19; Elektrolit; Katode; SOFC.

ABSTRACT

COVID-19 (caused by SARS-CoV-2) has spread throughout the world. The need of power supply for hospitals are one of the concerns during pandemic. Power requirement can be fulfilled by SOFC through an electrochemical process to generate electricity. SOFC efficiency up to 85% which can be an alternative that providing an environmentally friendly (low emission) and efficient to generate electricity. SOFC components which fulfilled various aspects, are expected to produce good electrochemical performance in order to form high efficiency when combined with CHP, APU, or UPS to help overcoming the electricity supply in hospitals and health centre during the COVID-19 pandemic.

Keywords: Anode; Cathode; COVID-19; Electrolyte; SOFC

RECEIVED 28-01-2021

ACCEPTED 20-04-2021

ONLINE 20-05-2021

PENDAHULUAN

Human coronaviruses (HCoVs) telah lama dianggap sebagai patogen yang menyebabkan "common cold" (flu yang biasa terjadi) pada orang sehat. Namun pada abad ke-21 terdapat 2 jenis HCoVs yang sangat bersifat patogen yaitu *Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus* (SARS-CoV) yang muncul pada tahun 2003 dan *Middle East Respiratory Syndrome Coronavirus* (MERS-CoV) yang muncul pada tahun 2012 yang menyebabkan mortalitas yang tinggi (Nayak, Ghosh, Bhatta, & Gharti Magar, 2020). Pada bulan desember 2019, strain baru dari virus corona yang berasal dari pertama kali ditemukan di Wuhan, Provinsi Hubei, Cina yang telah menjadi pusat penyebaran kasus pneumonia dengan penyebab yang tidak teridentifikasi. Wabah penyakit ini berasal dari pasar makanan laut Huanan yang kemudian telah berkembang pesat mulai menyebar ke seluruh dunia. Virus corona baru yang disebabkan oleh *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2* (SARS-CoV-2) yang kemudian diidentifikasi sebagai penyebab wabah penyakit *Coronavirus Disease 2019/ COVID-19* (CO=Corona, VI=Virus, D=Disease dan 19=2019) (Ali & Alharbi, 2020).

*Corresponding author:

atiek.noviyanti@unpad.ac.id

Virus ini telah menyebar ke lebih dari 200 negara dan telah ditetapkan sebagai pandemik oleh *World Health Organization* (WHO) pada tanggal 11 Maret 2020 (Paules, Marston, & Fauci, 2020). Presiden Jokowi melaporkan pertama kalinya pada tanggal 2 Maret 2020 terdapat 2 kasus terkonfirmasi akibat COVID-19. Menurut Satuan Tugas Penanganan COVID-19 yang dikutip dari laman resmi covid19.go.id, kasus konfirmasi ini terus bertambah hingga pada tanggal 29 Desember 2020 terdapat 727.122 kasus terkonfirmasi dengan 596,783 orang sembuh dan 21,703 orang meninggal.

COVID-19 disebabkan oleh virus corona jenis baru, *severe acute respiratory syndrome coronavirus 2* (SARS-CoV-2) (Cao et al., 2020). Secara genetik, SARS-CoV dan SARS-CoV-2 80% homolog dimana keduanya termasuk ke dalam famili *Coronaviridae* dengan karakteristik struktur *envelope single-stranded* dan *positive-strand* RNA (Ciotti et al., 2019; Yi, Lagniton, Ye, Li, & Xu, 2020). SARS-CoV-2 memiliki empat protein struktural, yaitu protein *spike* (S), protein membran (M), protein *envelope* (E), dan protein nukleokapsid (N) yang terintegrasi ke dalam fosfolipid bilayer (Schoeman & Fielding, 2019). Protein S terdiri atas dua subunit fungsional, yaitu subunit s_1 yang bertanggung jawab dalam penempelan virus dengan reseptor pada permukaan sel inang melalui *reseptor-binding domain* (RBD) dan subunit s_2 yang bertanggung jawab dalam fusi membran virus dengan sel inang untuk memfasilitasi masuknya virus ke dalam sel inang (Guo et al., 2020).

Saat ini penyebaran COVID-19 dapat melalui kontak langsung (*droplet* dan transmisi antar manusia) dan kontak tidak langsung (objek yang terkontaminasi dan penularan *airborne*) (Liu et al., 2020). Penyebaran COVID-19 ini dapat dicegah dengan melakukan *physical distancing*, memakai masker, memperhatikan ventilasi ruangan, menggunakan disinfektan untuk membersihkan objek-objek terutama di toilet, selalu mencuci tangan menggunakan sabun dan air atau *hand sanitizer* (Lotfi, Hamblin, & Rezaei, 2020). Seiring bertambahnya angka kasus terkonfirmasi mengakibatkan tingginya jumlah pasien COVID-19. Akibat banyaknya pasien positif, rumah sakit dan pusat kesehatan harus berjuang lebih besar lagi karena setiap pasien kritis memerlukan ventilator buatan. Sehingga diperlukan suatu daya eksternal untuk menjaga seluruh peralatan rumah sakit yang membutuhkan listrik agar tetap berjalan sepanjang waktu (Afroze, Reza, Cheok, Taweekun, & Azad, 2020).

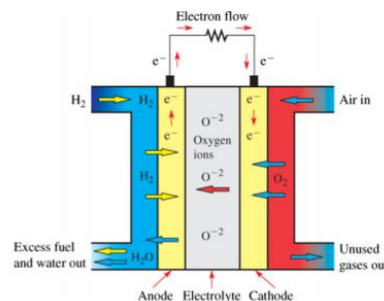
Sel bahan bakar dapat menjadi salah satu alternatif yang dapat mengubah reaksi kimia antara hidrogen dan oksigen menjadi listrik (Hossain, Hasanuzzaman, Rahim, & Ping, 2015). Hidrogen memiliki potensi yang sangat tinggi sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan. Dengan karakteristik yang menarik diantaranya hidrogen memiliki unit energi/massa tertinggi dari semua jenis bahan bakar (141.90 J/kg); ramah lingkungan, karena dari pembakarannya hanya menghasilkan uap air yang menunjukkan jumlah emisi karbonnya nol, memiliki *energy reserve factor* yang paling tinggi (1.00) dan faktor konversi menjadi listrik yang besar membuatnya menjadi bahan bakar terbaik dengan efisiensi yang tinggi. Sehingga diharapkan memainkan peran penting sebagai sumber energi di masa depan yang menjanjikan (Felseghi, Carcadea, Raboaca, TRUFIN, & Filote, 2019).

Adanya teknologi dalam sel bahan bakar, memungkinkan transisi energi yang aman dan sesuai dengan hasil yang ramah lingkungan juga hemat biaya (Nazir et al., 2020). Sel bahan bakar memiliki aplikasi potensial berupa penggantian baterai pada barang-barang konsumen dan komputer portabel, melalui gabungan panas dan daya skala perumahan/ *residential scale combined heat and power* (CHP), hingga pembangkit energi terdistribusi (Brandon & Parkes, 2016). Sel bahan bakar oksida padat/ *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC) menyediakan alternatif yang ramah lingkungan dan efisien untuk perangkat penghasil listrik konvensional (Kaur &

Singh, 2020), dan teknologi alternatif untuk menggantikan mesin pembakaran internal (Hwang, Tsai, Lo, & Sun, 2008).

SEL BAHAN BAKAR OKSIDA PADAT (SOFC)

Sel Bahan Bakar Oksida Padat (SOFC) merupakan perangkat elektrokimia yang dapat mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik, beroperasi pada suhu yang relatif tinggi yaitu sekitar 873-1.473K (600-1.200°C). SOFC memiliki daya tarik tersendiri karena memiliki efisiensi yang tinggi dalam pengkonversian energi (sekitar 85%), bahan bakar yang dapat diperbaharui dan menghasilkan emisi yang rendah sehingga bersifat ramah lingkungan (Bastidas, Tao, & Irvine, 2006; Ruiz-Morales, Marrero-López, Canales-Vázquez, & Irvine, 2011; Guerra, Lanzini, Leone, Santarelli, & Brandon, 2014; Su, Wang, Liu, Tadé, & Shao, 2015). Dalam sistem SOFC, terdapat berbagai bahan bakar yang dapat digunakan diantaranya H₂, CH₄, CO, hidrokarbon, biogas dll (Afroze, Karim, Cheok, Eriksson, & Azad, 2019). Sel bahan bakar oksida padat menggunakan elektrolit padat dan kedap gas untuk memisahkan bahan bakar di sisi anode sel bahan bakar dari udara di sisi katode. Pada gambar 1, ketika bahan bakar diumpankan ke anode, akan mengalami reaksi oksidasi dan melepaskan elektron ke sirkuit eksternal. Oksidan (baik udara atau oksigen murni) diumpankan ke katode, akan direduksi dan menerima elektron dari sirkuit eksternal. Aliran elektron di sekitar sirkuit eksternal menghasilkan listrik DC yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Ion oksida hasil reduksi kemudian mengalir melalui komponen elektrolit untuk bereaksi dengan ion positif atau molekul bahan bakar di anode untuk menghasilkan air dan/atau CO₂. Agar ion oksida dapat bergerak dalam material elektrolit dan reaksi katalitik berlangsung dengan cepat maka dibutuhkan suhu operasional yang sangat tinggi (1000°C) (Alaswad, Baroutaji, Rezk, Ramadan, & Olabi, 2020; Sammes et al., 2012)



Gambar 1. Prinsip Operasi SOFC (Alaswad et al., 2020)

Terdapat 3 komponen utama penyusun SOFC yaitu, elektrolit dan elektrode (katode dan anode).

ELEKTROLIT

Ciri khas dari SOFC yaitu menggunakan material keramik yang memiliki sifat *ion-conducting* sebagai elektrolit dan hanya dengan memiliki 2 fase operasi yaitu gas dan padatan (Alaswad et al., 2020). Elektrolit ini dapat menjadi media penghantar proton (H⁺) atau ion oksida (O²⁻) (Hussain & Yangping, 2020). Elektrolit yang dihasilkan sebaiknya berbentuk lapisan tipis untuk mengurangi kehilangan ohmik (*ohmic losses*), dan memiliki nilai koefisien ekspansi termal (TEC) yang dekat dengan anode dan katode (Alaswad et al., 2020). Syarat agar suatu material dapat menjadi elektrolit dalam SOFC diantaranya (Hussain & Yangping, 2020): a) Material elektrolit harus memiliki tingkat konduktivitas oksida, ion, atau proton yang lebih tinggi (konduktivitas yang diinginkan adalah 0,01–0,1 S/cm untuk ketebalan elektrolit 1–100 μm) agar tidak mengalami kehilangan ohmik (*ohmic losses*); b) Konduktivitas elektronik dari elektrolit

harus rendah agar tidak menyebabkan kebocoran O_2 dan kehilangan tegangan yang besar (*voltage losses*) tanpa menghasilkan daya yang mencukupi; c) Memiliki kekuatan mekanik yang tinggi; d) Memiliki stabilitas termal yang baik; e) Memiliki stabilitas kimia, fasa, dimensi, dan morfologi; dan f) Biaya rendah dan fabrikasi mudah.

Material elektrolit dalam SOFC berdasarkan strukturnya dapat dibagi menjadi 2 kelompok utama; *fluorite-structured electrolytes* dan *perovskites-structured electrolytes* (Alaswad et al., 2020). Struktur fluorit, merupakan susunan kation kubik berpusat muka (*face-centered cubic*) dengan anion menempati semua situs tetrahedral, memiliki struktur terbuka dengan rongga interstisial yang membantu dalam difusi ion dengan cepat. *Yttria-Stabilized-Zirconia* (YSZ) merupakan material elektrolit berstruktur fluorit yang disukai oleh sebagian besar elektrode. Umumnya, pada suhu kurang dari 1200°C , zirkonia secara kimiawi menjadi inert terhadap gas reaktan SOFC (Huang & Goodenough, 2009a). Meskipun YSZ memiliki sifat mekanik, kelistrikan yang baik, dan merupakan bahan elektrolit paling umum yang diproduksi oleh semua pengembang sel bahan bakar, suhu kerja yang tinggi dari elektrolit ini dianggap sebagai kelemahan utama yang membatasi aplikasi SOFC secara komersial. Selain YSZ, terdapat CeO_2 (*lower valent cation-doped ceria materials*) dan $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ (*Bismuth oxide-doped based materials*) yang memiliki struktur fluorit. Keduanya menarik perhatian pada SOFC suhu menengah; CeO_2 dari ceria yang terdoping gadolinium yang beroperasi pada rentang $500\text{-}700^\circ\text{C}$ memiliki nilai konduktivitas ion-oksigen lebih tinggi dari YSZ (ditambah ceria yang terdoping ini, inert terhadap elektrode dan tidak membentuk fase baru pada permukaan/*interface* yang dapat menghambat transportasi ion oksida) dan $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3$ dapat beroperasi pada rentang suhu mendekati 600°C dan diketahui memiliki konduktivitas ionik hampir tiga kali lebih tinggi dari elektrolit konvensional berbasis zirkonia. Namun jenis elektrolit ini mudah tereduksi di atmosfer pada anode, yang membuat jenis elektrolit ini memiliki keterbatasan untuk aplikasi SOFC yang lebih luas (Alaswad et al., 2020).

Struktur non-fluorit seperti *perovskites* memiliki potensi yang baik untuk material elektrolit dalam SOFC. Perovskite memiliki rumus ABX_3 , dimana A & B mewakili kation logam dan X adalah anion penyeimbang muatan yang biasanya diisi oleh oksigen. Karena dalam SOFC menggunakan oksida padat sebagai elektrolit, maka oksida perovskite ini dapat dijelaskan dengan rumus ABO_3 dimana pada situs A diisi oleh kation berupa unsur tanah jarang, alkali, atau alkali tanah, dan logam transisinya berada pada situs B. Kation situs-B adalah koordinasi dari 6 atom oksigen dalam bentuk oktahedral *corner-sharing* (Schlom, Chen, Pan, Schmehl, & Zurbuchen, 2008). Struktur perovskite ABO_3 kubik ideal atau aristotipe kubik (kelompok ruang $\text{Pm}3\text{m}$) (King & Woodward, 2010). Kation B terletak di sudut dan kation A di tengah sel satuan. Oksigen ditempatkan di pusat dua belas tepi kubus yang menghasilkan *string* oktahedral BO_6 yang berbagi sudut yang memanjang tanpa batas dalam tiga dimensi. Bilangan koordinasi kation situs A dan B masing-masing adalah 12 dan 6. Jari-jari ion kation situs-A mendekati anion satu sehingga ion bermuatan rendah yang besar dari logam alkali, alkali tanah dan logam tanah jarang dapat berfungsi sebagai kation A. Kation situs-B biasanya mewakili ion logam transisi berukuran sedang. Meskipun beberapa senyawa memiliki struktur kubik yang ideal, banyak oksida memiliki varian yang sedikit terdistorsi dengan simetri yang lebih rendah (misalnya, heksagonal atau ortorombik) (Kuterbekov, 2018).

Bahan perovskite LaGaO_3 yang didoping oleh Mn dan Sr merupakan salah satu material elektrolit yang efisien dalam SOFC suhu menengah (IT-SOFC). Doping Sr dan Mn berfungsi untuk membentuk $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Ga}_{1-y}\text{Mg}_y\text{O}_{3-\delta}$ / LSGM dimana Sr ditambahkan ke situs La dan Mg ke situs Ga yang membuat kedua dopan menghasilkan kekosongan oksida untuk mengkompensasi valensi yang rendah (Hussain & Yangping, 2020; Morales, Roa, Tartaj, &

Segarra, 2016). Substitusi ion logam pada situs A dan B dalam perovskite LSGM berdampak pada konduktivitas ioniknya. Diantara ion yang mengisi pada situs A, substitusi Sr menghasilkan konduktivitas ionik tertinggi. Menurut prinsip distorsi kisi minimum, doping dengan Sr menghasilkan konduktivitas ionik yang lebih tinggi daripada Ca dan Ba, karena Sr memberikan mobilitas ion oksigen maksimum. Sedangkan substitusi pada situs B yaitu substitusi parsial Ga di LSGM oleh logam transisi (Cr, Mn, Fe, Co dan Ni) merupakan metode yang efisien untuk memodifikasi sifat listrik LSGM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konduksi elektron dan lubang masing-masing dapat ditingkatkan dengan doping Ni atau Mn & Cr dan Fe atau Co dari sampel LSGM yang terdoping memiliki konduktivitas ion oksida yang lebih tinggi. Di antara semua kation logam transisi yang diperiksa, doping kobalt adalah yang paling efektif untuk meningkatkan konduktivitas ion oksida (Morales *et al.*, 2016). Dalam penelitian Wang (2004), melaporkan bahwa penambahan Co meningkatkan konduktivitas ionik dan konduktivitas elektronik, yang efektif dalam meminimalkan tidak hanya resistansi ohmik (R) elektrolit, tetapi juga overpotensial dari anode dan katode.

Sehingga secara umum, konduktivitas ion LSGM lebih tinggi daripada YSZ atau bahan berbasis ceria dan agak lebih rendah dari elektrolit berbasis Bi_2O_3 . Namun dengan mempertimbangkan konduktivitas elektronik dan ketidakstabilan termal yang diamati pada elektrolit berbasis Bi_2O_3 , material LSGM adalah material elektrolit yang sangat menjanjikan untuk SOFC dalam hal konduktivitas ionik dengan tetap memperhatikan aspek kompatibilitas kimia dengan elektrode (Alaswad *et al.*, 2020).

Tabel 1. Substitusi ion logam dalam perovskite LSGM (Morales *et al.*, 2016).

| Situs A | | Situs B | |
|-------------------------------------|---|---|---|
| La | Sr | Ga | Mg |
| Tanah Jarang: Nd, Pr, Sm, Gd, Y, Yb | Alkali Tanah: Ca, Ba Ion monovalent: K | Allovalen: Ti, Nb, Ta Ion Trivalen: Al, In, Sc | Logam Transisi: V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn |

ELEKTRODE

Material elektrode yang digunakan dalam SOFC harus kompatibel satu sama lain dan memiliki kemampuan siklus yang baik selama penyalaan dan pemadaman. Pada suhu yang lebih tinggi di SOFC, diperlukan studi bahan elektrode seperti komposit dan sermet untuk meningkatkan kompatibilitas termal dan kimia dalam reaksi sel. Karakteristik utama untuk bahan elektrode SOFC diantaranya (Sarfaz, Raza, Mirzaeian, Abbas, & Raza, 2020): a) Aktivitas katalitik yang baik dan konduktivitas listrik yang lebih tinggi; b) Stabilitas ekspansi termal (TEC) yang efisien; c) Kompatibilitas kimia antara elektrode dan elektrolit pada suhu pengoperasian; d) Tahan lama pada suhu yang lebih tinggi (kekuatan mekanis yang baik); e) Fleksibel terhadap berbagai bahan bakar; dan f) *Coking-resistance* yang rendah dan biaya rendah.

Anode: Peran anode dalam SOFC adalah menyediakan situs untuk reaksi elektrokimia antara bahan bakar gas dan ion oksida yang dikirim oleh elektrolit sehingga perlu memiliki aktivitas katalitik dan sifat konduktivitas listrik untuk memungkinkan oksidasi bahan bakar dan pengumpulan arus (Alaswad *et al.*, 2020). Pemilihan material anode bergantung pada kinerja elektrokimia, struktur mikro, dan fabrikasi sel. Kinerja material anode tergantung pada dua faktor; 1) Luas permukaan yang tinggi pada *triple phase boundary* (TPB) untuk memaksimalkan reaksi anodik, dan 2) Mikrostruktur berpori yang menonjol untuk memfasilitasi transportasi gas dengan cepat dan reaksi produk samping (Hussain & Yangping, 2020).

Awalnya logam mulia seperti platina, dan digunakan sebagai bahan anode karena aktivitas elektro-katalitiknya yang sangat baik. Namun, harga yang tinggi dan daya tahan yang rendah dari anode selama pengoperasian SOFC membuat para peneliti mencari material alternatif untuk aplikasi anode. *Porous Ni/YSZ cermet* dapat dianggap sebagai anode yang paling umum digunakan untuk SOFC suhu tinggi. Anode ini relatif murah, merupakan konduktor listrik yang baik, stabilitas kimia yang baik pada suhu tinggi, ketahanan korosi yang tinggi terhadap bahan bakar, dan juga memiliki TEC yang mendekati elektrolit YSZ. Selain itu, struktur berpori dari anode ini memberikan permeasi yang sangat efektif untuk bahan bakar gas. Secara umum konduktivitas listrik cenderung meningkat dengan meningkatnya rasio kandungan dan ukuran nikel. Meskipun sifat Ni/YSZ cermet yang sangat baik sebagai anode untuk SOFC dengan elektrolit YSZ, terdapat potensi terjadinya degradasi jangka panjang akibat oksidasi Ni ketika terjadi campuran metana (CH_4) dan uap air (H_2O) digunakan sebagai bahan bakar (Alaswad et al., 2020). Selain material YSZ, baru-baru ini terdapat material nanokomposit Ni-GDC yang menarik perhatian karena dianggap dapat menggantikan material YSZ (Hussain & Yangping, 2020). Baik nanokomposit NiO dan GDC dalam bentuk komposit menunjukkan kestabilan yang baik dalam suhu yang tinggi. NiO berperan sebagai katalis yang baik pada aktivasi oksigen dan mempunyai konduktivitas elektrik yang baik, dimana GDC10 berperan sebagai matriks untuk mendukung katalis dan mencegah terjadinya aglomerasi pada suhu operasi. Anode komposit Ni-GDC merupakan anode yang ideal yang cocok dengan elektrolit GDC pada rentang operasi suhu rendah (Chavan et al., 2012).

Katode: Katode berperan sebagai pembawa elektron dari sirkuit eksternal ke lokasi pemberian ion dan pengangkutan ion O_2 ke antarmuka elektrolit (Abdalla et al., 2018). Dalam Kuterbekov (2018), untuk menghasilkan katoda yang baik memiliki karakteristik: a) Konduktivitas elektronik yang tinggi (sebaiknya lebih dari 100 S/cm); b) Minimum atau tidak ada ketidaksesuaian antara nilai TEC katoda dan komponen sel lainnya, seperti, elektrolit, dan bahan interkoneksi; c) Kompatibilitas kimia yang baik antar komponen; d) Porositas yang cukup untuk memungkinkan difusi cepat gas O_2 ; e) Konduktivitas ion oksida tinggi; f) Stabilitas yang baik di bawah atmosfer pengoksidasi selama fabrikasi dan juga operasi; g) Aktivitas katalitik yang tinggi selama reaksi reduksi oksigen (nilai resistansi polarisasi R_p yang diinginkan kurang dari $0,15 \Omega \times \text{cm}^2$; dan h) Harga yang terjangkau.

Hussain & Yangping (2020) telah menjelaskan material yang biasa digunakan sebagai katode dalam SOFC salah satunya yaitu sistem katode berstruktur oksida perovskite. Oksida perovskite ABO_3 memiliki sifat unik, dimana konduktivitas dari material berstruktur perovskite tergantung pada distorsi struktur, contohnya doping ion dari unsur tanah jarang (yang menyebabkan peningkatan distorsi karena jari-jari dari kation unsur tanah jarang berkurang). Suhu dari unsur transisi ke logam biasanya meningkat yang berarti unsur yang memiliki jari-jari yang besar pada unsur tanah jarang seperti La, Ce dan Pr memiliki konduktivitas tertinggi dalam perovskite ABO_3 . Pemilihan bahan katode jenis perovskite berdasarkan oksida logam transisi pada variasi bilangan oksidasi. Semakin tinggi bilangan oksidasi dari 3d ke 4d kemudian 5d pada baris tabel periodik, artinya semakin tinggi konduktivitas kation dari 4d dan 5d dalam keadaan oksidasi yang rendah seperti niobium, sedangkan unsur yang berada dalam 3d seperti LaTiO_3 tidak stabil pada lingkungan oksidatif katode gas (Istomin & Antipov, 2013). Koefisien ekspansi termal (TEC) merupakan salah satu parameter penting pada pemilihan material katode, karena ketidaksesuaian nilai TEC pada komponen sel akan menyebabkan kerusakan sel. Nilai TEC ini bergantung pada transisi magnetik dan elektronik, dan pada bahan perovskite ditentukan oleh perilaku termal dari BO_6 yang berhubungan dengan kemiringan oktahedral, distorsi, dan ikatan antara kation B dengan anion sekitarnya (Tilley, 2016).

Umumnya, jenis material yang digunakan sebagai katode bergantung pada jenis elektrolit yang digunakan untuk suatu sistem pada SOFC. Pada SOFC suhu 700-900°C dan menggunakan elektrolit berbasis ZrO₂, oksida perovskite berbasis LaMnO₃ sering digunakan sebagai bahan katode (Jacobson, 2010). Meskipun bahan katode ini memiliki konduktivitas listrik dan aktivitas elektrolitik yang lebih rendah dibandingkan oksida perovskite berbasis LaCoO₃, LaMnO₃ dianggap sebagai katode yang disukai melalui pertimbangan dari konduktivitas listrik, reaktivitas kimia, aktivitas elektrokatalitik dan koefisien muai panasnya. LaCoO₃ lebih reaktif dengan ZrO₂ dan memiliki nilai TEC yang lebih tinggi daripada ZrO₂ yang terdoping (Huang & J. B. Goodenough, 2009; Alaswad *et al.*, 2020). Selain itu LaMnO₃ biasanya didoping dengan stronsium (Sr) untuk membentuk Lantanum Stronsium Manganit (LSM), meningkatkan konduktivitas elektronik dan menurunkan reaktivitas dengan elektrolit berbasis YSZ (Alaswad *et al.*, 2020; Sun, Hui, & Roller, 2010). Oksida perovskite berbasis kobalt, LaCoO₃ dapat menjadi bahan katode yang efektif untuk SOFC berbasis elektrolit CeO₂ yang beroperasi pada suhu rendah (500-700°C), karena diperlukan material katode dengan sifat katalitik yang tinggi (Alaswad *et al.*, 2020; Jacobson, 2010; Sun *et al.*, 2010). Terdapat pula oksida perovskite berbasis besi, LaFeO₃ yang biasanya didoping dengan Sr, Al dan Ni. Oksida perovskite jenis ini dapat digunakan sebagai material katode dengan elektrolit YSZ, karena memiliki nilai TEC yang mendekati (Alaswad *et al.*, 2020; Lu *et al.*, 2016).

SOFC SEBAGAI SEL BAHAN BAKAR RAMAH LINGKUNGAN DI MASA PANDEMIK COVID-19

Energi hidrogen merupakan sumber energi baru yang dapat menyuplai listrik yang bersifat ramah lingkungan (*greenway*). Hidrogen hanya menghasilkan air saat digunakan dalam sel bahan bakar dan mudah diperoleh. Di bumi, hidrogen alami berasal dari air, hanya beberapa teknik yang dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen, dan metode yang paling umum yaitu melalui proses termal dari reformasi gas alam (*natural-gas reforming*). Selain itu, hidrogen juga dapat diturunkan dari hidrolisis dan elektrolisis, dimana ½ mol O₂ dan 1 mol H₂ diproduksi dengan mengambil H₂O dan sekitar 4,6 MW/kta umpan H₂ (Abd Aziz, Baharuddin, Somalu, & Muchtar, 2020; Hosseini & Wahid, 2016).

Menurut studi penelitian, SOFC menunjukkan efisiensi yang tinggi. Meskipun beroperasi pada suhu tinggi, kemampuan untuk memastikan listrik yang dihasilkan tinggi menjadi keuntungan dari jenis sel bahan bakar ini. Setiap keluaran sel tunggal dapat mencapai hingga 100 kW. SOFC tidak memiliki bagian yang bergerak, sehingga menjadikan perangkat yang bebas dari kebisingan (*noise-free*). Ketika tidak ada perangkat bergerak, itu juga membuat SOFC menjadi perangkat bebas getaran (*vibration-free*). Perangkat yang bebas kebisingan dan getaran ini sering kali menawarkan perawatan yang rendah dalam jangka waktu yang lama (Abd Aziz *et al.*, 2020). Dibandingkan dengan sel bahan bakar lain, SOFC lebih fleksibel sebagai sel bahan bakar karena dapat mereformasi bahan bakar hidrokarbon secara internal, dan mentolerir beberapa tingkat pengotor bahan bakar fosil yang umum, dengan memanfaatkan suhu operasi yang sangat tinggi. Kontaminan yang mengandung belerang, seperti H₂S, lebih sedikit ditoleransi tetapi dapat ditangani dengan menggunakan metode desulfurisasi yang telah tersedia (Alaswad *et al.*, 2020).

Penggunaan suhu tinggi pada SOFC saat beroperasi, dapat memungkinkan kombinasi siklus gabungan yang mempunyai efisiensi tinggi seperti SOFC/turbin gas/turbin uap. SOFC telah dianggap sangat sesuai jika dibutuhkan untuk mendapatkan tenaga listrik untuk mendapatkan efisiensi tinggi, dari gas alam. Gas buang suhu tinggi dari SOFC dapat digunakan dalam siklus lain seperti *Rankine*, *Brayton* untuk pembangkit listrik tambahan atau untuk tujuan

pemanasan dan pendinginan (gabungan panas dan daya & pendinginan gabungan, pemanas dan daya), yang selanjutnya akan meningkatkan efisiensi hingga 90% tergantung pada kondisi operasi dan konfigurasi pemulihan panas yang digunakan (Choudhury, Chandra, & Arora, 2013). SOFC dapat dioperasikan langsung dengan bahan bakar gas alam atau hidrokarbon. Operasi pada suhu tinggi dapat mempercepat reaksi bahan bakar dan mendorong pencegahan reaksi kimia yang tidak diinginkan yang menyebabkan degradasi material. SOFC telah dikembangkan untuk mengecilkan skala dengan menjadi mikro-SOFC untuk aplikasi dalam *auxiliary power units* (APU), *uninterrupted power sources* (UPS), dan *combined heat and power* (CHP) sebagai unit pembangkit listrik skala kecil dan menengah (Radenahmad et al., 2020).

Karena jumlah pasien meningkat dari hari ke hari, pasokan listrik yang terus menerus diperlukan untuk memastikan semua alat kesehatan yang menunjang perawatan pasien berjalan. SOFC dapat menjadi potensi sumber energi yang dapat menyuplai listrik (Afroze et al., 2020). Dengan adanya teknologi mikro-SOFC yang digabungkan dengan CHP, APU, dan UPS untuk menghasilkan sumber listrik pada skala kecil dan menengah, diharapkan dapat membantu rumah sakit dan pusat kesehatan agar alat kesehatan yang berada di rumah sakit dan pusat kesehatan selama pandemik dapat terus berjalan dan pasien tertangani.

SIMPULAN

Seluruh orang di dunia tengah berperang melawan COVID-19. Meskipun keberadaan vaksin telah ada, ketakutan akan terpaparnya virus COVID-19 terus menghantui. Sembari menunggu vaksin terdistribusi dan dapat digunakan, hal yang dapat dilakukan untuk melindungi diri dari COVID-19 yaitu dengan menjaga jarak, memakai masker dan selalu mencuci tangan. Pasukan terdepan dalam garda kesehatan tengah berjuang untuk melayani pasien, yang semakin hari semakin meningkat. Hal ini membuat pasokan listrik yang dapat mengalir terus menerus sangat diperlukan agar alat kesehatan terus berjalan dan semua perawatan terpenuhi. SOFC sebagai sel bahan bakar merupakan salah satu pilihan yang berpotensi untuk memenuhi akan kebutuhan listrik. SOFC yang menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar, membuatnya menjadi sel bahan bakar yang menghasilkan emisi rendah. Selain itu SOFC memiliki efisiensi yang paling tinggi diantara sel bahan bakar lain dalam mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik. Untuk membuat komponen sel yang memiliki efisiensi yang tinggi dan kinerja elektrokimia yang baik, diperlukan material-material penyusun komponen SOFC yang memenuhi syarat. Dengan adanya penggabungan aplikasi SOFC dengan CHP, APU, dan UPS diharapkan dapat memenuhi kebutuhan pasokan listrik di masa pandemik saat ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abd Aziz, A. J., Baharuddin, N. A., Somalu, M. R., & Muchtar, A. (2020). Review of composite cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cell applications. *Ceramics International*, Vol. 46, pp. 23314–23325. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.06.176>
- Abdalla, A. M., Hossain, S., Azad, A. T., Petra, P. M. I., Begum, F., Eriksson, S. G., & Azad, A. K. (2018). Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82(September 2016), 353–368. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.046>
- Afroze, S., Karim, A. H., Cheok, Q., Eriksson, S., & Azad, A. K. (2019). Latest development of double perovskite electrode materials for solid oxide fuel cells: a review. *Frontiers in Energy*, Vol. 13, pp. 770–797. Higher Education Press. <https://doi.org/10.1007/s11708-019-0651-x>
- Afroze, S., Reza, M. S., Cheok, Q., Taweekun, J., & Azad, A. K. (2020). Solid oxide fuel cell (SOFC); A new approach of energy generation during the pandemic COVID-19. *International Journal of Integrated Engineering*, 12(5), 245–256.

- <https://doi.org/10.30880/ijie.2020.12.05.030>
- Alaswad, A., Baroutaji, A., Rezk, A., Ramadan, M., & Olabi, A. G. (2020). Advances in Solid Oxide Fuel Cell Materials. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11743-6>
- Ali, I., & Alharbi, O. M. L. (2020). COVID-19: Disease, management, treatment, and social impact. *Science of the Total Environment*, 728, 138861. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138861>
- Brandon, N. P., & Parkes, M. A. (2016). Fuel Cells: Materials. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.01726-4>
- Cao, J., Tu, W. J., Cheng, W., Yu, L., Liu, Y. K., Hu, X., & Liu, Q. (2020). Clinical features and short-term outcomes of 102 patients with coronavirus disease 2019 in Wuhan, China. *Clinical Infectious Diseases*, 71(15), 748–755. <https://doi.org/10.1093/cid/ciaa243>
- Chavan, A. U., Jadhav, L. D., Jamale, A. P., Patil, S. P., Bhosale, C. H., Bharadwaj, S. R., & Patil, P. S. (2012). Effect of variation of NiO on properties of NiO/GDC (gadolinium doped ceria) nano-composites. *Ceramics International*, 38(4), 3191–3196. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2011.12.023>
- Choudhury, A., Chandra, H., & Arora, A. (2013). Application of solid oxide fuel cell technology for power generation - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 20, pp. 430–442. Pergamon. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.031>
- Ciotti, M., Angeletti, S., Minieri, M., Giovannetti, M., Benvenuto, D., Pascarella, S., ... Ciccozzi, M. (2019). COVID-19 Outbreak: An Overview. *Chemotherapy*, 64(5–6), 215–223. <https://doi.org/10.1159/000507423>
- Felseghi, R.-A., Carcadea, E., Raboaca, M. S., TRUFIN, C. N., & Filote, C. (2019). Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications. *Energies*, 12(23), 4593. <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- Guo, Y. R., Cao, Q. D., Hong, Z. S., Tan, Y. Y., Chen, S. D., Jin, H. J., ... Yan, Y. (2020, March 13). The origin, transmission and clinical therapies on coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak- A n update on the status. *Military Medical Research*, Vol. 7, p. 11. BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s40779-020-00240-0>
- Hossain, F. M., Hasanuzzaman, M., Rahim, N. A., & Ping, H. W. (2015). Impact of renewable energy on rural electrification in Malaysia: a review. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 17(4), 859–871. <https://doi.org/10.1007/s10098-014-0861-1>
- Hosseini, S. E., & Wahid, M. A. (2016). Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 850–866. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.112>
- Huang, K., & Goodenough, J. . (2009a). *Solid Oxide Fuel Cell Technology: Principles, Performance and Operations* (Oxford, Ed.). Woodhead Publishing Limited.
- Huang, K., & Goodenough, J. B. (2009b). *Solid Oxide Fuel Cell Technology: Principles, Performance and Operations*. In *Solid Oxide Fuel Cell Technology: Principles, Performance and Operations*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1533/9781845696511>
- Hussain, S., & Yangping, L. (2020). Review of solid oxide fuel cell materials: cathode, anode, and electrolyte. *Energy Transitions*, 1, 3. <https://doi.org/10.1007/s41825-020-00029-8>
- Hwang, C., Tsai, C. H., Lo, C. H., & Sun, C. H. (2008). Plasma sprayed metal supported YSZ/Ni-LSGM-LSCF ITSOFC with nanostructured anode. *Journal of Power Sources*, 180(1), 132–142. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.01.075>
- Istomin, S. Y., & Antipov, E. V. (2013). Cathode materials based on perovskite-like transition metal oxides for intermediate temperature solid oxide fuel cells. *Russian Chemical Reviews*, 82(7), 686–700. <https://doi.org/10.1070/rc2013v082n07abeh004390>
- Jacobson, A. J. (2010). Materials for solid oxide fuel cells. *Chemistry of Materials*, Vol. 22, pp. 660–674. American Chemical Society. <https://doi.org/10.1021/cm902640j>
- Kaur, P., & Singh, K. (2020). Review of perovskite-structure related cathode materials for solid oxide fuel cells. *Ceramics International*, Vol. 46, pp. 5521–5535. Elsevier Ltd.

- <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.066>
- King, G., & Woodward, P. M. (2010). Cation ordering in perovskites. *Journal of Materials Chemistry*, 20(28), 5785–5796. <https://doi.org/10.1039/b926757c>
- Kuterbekov, K. A. (2018). A brief review of conductivity and thermal expansion of perovskite-related oxides for SOFC cathode Radioecology problems tailing pond Koshkar-ATA View project nuclear physics View project. *Article in Eurasian Journal of Physics and Functional Materials*. <https://doi.org/10.29317/ejpfm.2018020309>
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, N. K., ... Lan, K. (2020). Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *BioRxiv*, 2020.03.08.982637. <https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637>
- Lotfi, M., Hamblin, M. R., & Rezaei, N. (2020). COVID-19: Transmission, prevention, and potential therapeutic opportunities. *Clinica Chimica Acta*, Vol. 508, pp. 254–266. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cca.2020.05.044>
- Lu, Y., Zhu, B., Cai, Y., Kim, J.-S., Wang, B., Wang, J., ... Li, J. (2016). Progress in Electrolyte-Free Fuel Cells. *Frontiers in Energy Research*, 4(MAY), 1. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2016.00017>
- Morales, M., Roa, J. J., Tartaj, J., & Segarra, M. (2016). A review of doped lanthanum gallates as electrolytes for intermediate temperature solid oxides fuel cells: From materials processing to electrical and thermo-mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 36, pp. 1–16. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2015.09.025>
- Nayak, N., Ghosh, A., Bhatta, D. R., & Gharti Magar, D. (2020). COVID-19: a brief review. *Journal of Pathology of Nepal*, 10(1), 1659–1662. <https://doi.org/10.3126/jpn.v10i1.28946>
- Nazir, H., Muthuswamy, N., Louis, C., Jose, S., Prakash, J., Buan, M. E. M., ... M. Kannan, A. (2020). Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 45, pp. 28217–28239. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.07.256>
- Paules, C. I., Marston, H. D., & Fauci, A. S. (2020). Coronavirus Infections-More Than Just the Common Cold. *JAMA - Journal of the American Medical Association*, Vol. 323, pp. 707–708. American Medical Association. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.0757>
- Radenahmad, N., Azad, A. T., Saghir, M., Taweekun, J., Bakar, M. S. A., Reza, M. S., & Azad, A. K. (2020). A review on biomass derived syngas for SOFC based combined heat and power application. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 119, p. 109560. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109560>
- Ruiz-Morales, J. C., Marrero-López, D., Canales-Vázquez, J., & Irvine, J. T. S. (2011). Symmetric and reversible solid oxide fuel cells. *RSC Advances*, Vol. 1, pp. 1403–1414. The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/c1ra00284h>
- Sammes, N. M., Galloway, K., Serincan, M. F., Suzuki, T., Yamaguchi, T., Awano, M., & Colella, W. (2012). Solid oxide fuel cells. In *Handbook of Climate Change Mitigation* (Vol. 4, pp. 1703–1727). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7991-9_44
- Sarfraz, A., Raza, A. H., Mirzaeian, M., Abbas, Q., & Raza, R. (2020). Electrode Materials for Fuel Cells. In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11742-4>
- Satuan Tugas Penanganan COVID-19. (2020). Peta Sebaran COVID-19 | Satgas Penanganan COVID-19. Retrieved December 30, 2020, from <https://covid19.go.id/peta-sebaran-covid19>
- Schlom, D. G., Chen, L. Q., Pan, X., Schmehl, A., & Zurbuchen, M. A. (2008). A thin film approach to engineering functionality into oxides. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(8), 2429–2454. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02556.x>
- Schoeman, D., & Fielding, B. C. (2019). Coronavirus envelope protein: Current knowledge. *Virology Journal*, Vol. 16, pp. 1–22. BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12985-019-1182-0>
- Su, C., Wang, W., Liu, M., Tadé, M. O., & Shao, Z. (2015). Progress and Prospects in

- Symmetrical Solid Oxide Fuel Cells with Two Identical Electrodes. *Advanced Energy Materials*, 5(14), 1500188. <https://doi.org/10.1002/aenm.201500188>
- Sun, C., Hui, R., & Roller, J. (2010). Cathode materials for solid oxide fuel cells: A review. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 14(7), 1125–1144. <https://doi.org/10.1007/s10008-009-0932-0>
- Tilley, R. J. D. (2016). Perovskites: Structure-Property Relationships . In *John Wiley & Sons Ltd.* United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. Retrieved from <https://www.wiley.com/en-id/Perovskites:+Structure+Property+Relationships-p-9781118935668>
- Wang, S. Z. (2004). High Performance Fuel Cells Based on LaGaO₃ Electrolytes. *Acta Physico - Chimica Sinica*, 20(1), 43–46. <https://doi.org/10.3866/pku.whxb20040109>
- Yi, Y., Lagniton, P. N. P., Ye, S., Li, E., & Xu, R. H. (2020). COVID-19: What has been learned and to be learned about the novel coronavirus disease. *International Journal of Biological Sciences*, 16(10), 1753–1766. <https://doi.org/10.7150/ijbs.45134>