

Kajian *Fuel Cell* (Sel Bahan Bakar) dari Tinjauan Material dan Daya Keluaran

Sulistyo^{1,*}, Darjat²

¹Departemen Teknik Mesin FT-UNDIP, Jl Prof Sudarto Tembalang Semarang, Indonesia

²Departemen Teknik Elektro FT-UNDIP, Jl Prof Sudarto Tembalang Semarang, Indonesia

*email: listyo2007@gmail.com

Abstrak

Sel bahan bakar (*Fuel cell*) adalah perangkat elektrokimia yang mengubah gas dan oksidan menjadi listrik secara langsung. Produk buangan yang lain adalah uap air dan panas jika menggunakan bahan bakar hidrogen. Sel bahan bakar ini menjanjikan menjadi unit pembangkit daya yang ramah lingkungan dan bahan bakarnya dapat dimanfaatkan dengan berbagai jenis bahan bakar konvensional maupun yang terbarukan. Jenis sel bahan bakar yang telah dikembangkan meliputi alkaline *Fuel cell*, Polimeric electrolyte membrane *fuel cell*, Phosphoric acid *Fuel cell*, molten carbonate *fuel cell* dan Solid Oxide *fuel cell* serta microbial *fuel cell*. Suhu pengoperasian *fuel cell* bervariasi dari suhu kamar sampai suhu 1000°C. Paper ini membahas tentang material dan daya keluaran pada masing-masing tipe *fuel cell* yang telah dikembangkan dan telah diaplikasikan secara komersial. Material yang dibahas meliputi jenis material dan karakteristik kelistrikan. Metode yang dilakukan dengan menelaah literatur dan jurnal yang telah diterbitkan serta informasi yang diterbitkan dari perusahaan yang telah mengembangkan *fuel cell*. Informasi yang diperoleh dari studi literatur dan jurnal ditelaah dan dibandingkan tipe satu dengan tipe yang lain. Aspek yang ditinjau adalah jenis material yang digunakan dan daya keluaran listrik. Kajian juga menyajikan kelebihan dan kekurangan masing-masing tipe *fuel cell*. Tinjauan ini diharapkan dapat memberikan sumbangan pemikiran tentang *fuel cell* yang dapat dipakai sebagai acuan pada lembaga riset dan dunia industri yang ingin mengembangkan *fuel cell* disesuaikan dengan potensi sumber daya alam dan sumber daya manusia.

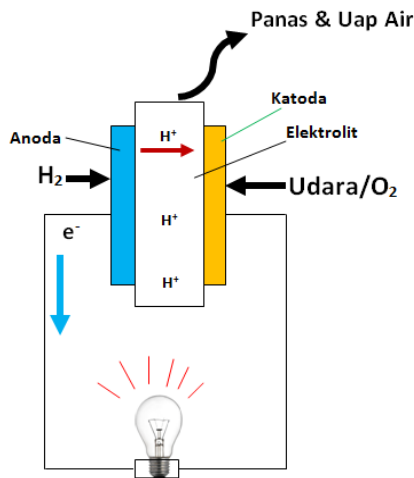
Kata kunci: *fuel cell*, material, daya listrik

Pendahuluan

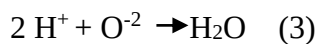
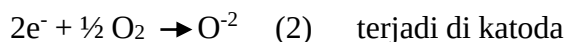
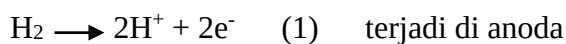
Fuel Cell (sel bahan bakar) adalah perangkat konversi energi yang mengubah bahan bakar menjadi listrik secara langsung melalui reaksi elektrokimia [1, 2]. Produk buangan berupa panas dan uap air jika menggunakan bahan bakar gas hidrogen. *Fuel cell* ini diharapkan menjadi salah satu alternatif peralatan konversi energi yang ramah lingkungan [3] dan memanfaatkan bahan bakar yang terbarukan (*renewable fuel*) [4] yang sesuai dengan kondisi di Indonesia saat ini dan yang akan datang. Secara prinsip *fuel cell* bekerja seperti dalam Gambar 1. Komponen utama dari *fuel cell* peralatan adalah anoda, elektrolit

dan katoda. Gas hidrogen dilewatkan pada anoda. Gas hidrogen dipecah menjadi atom hidrogen bermuatan positif (H^+ /proton) dan elektron bermuatan negatif (e^-). Elektron dialirkan ke luar melalui penghantar menuju beban yang ditunjukkan dengan lampu. Kemudian elektron mengalir menuju katoda. Di katoda elektron bertemu dengan oksigen atau udara. Oksigen dan elektron bereaksi membentuk ion oksigen bermuatan negatif (O^{2-}). Ion hidrogen positif (proton) dari anoda mengalir melalui elektrolit menuju katoda. Pada lapis batas (antar muka) elektrolit dan katoda, ion hidrogen positif (H^+) dan ion oksigen bermuatan negatif bereaksi membentuk uap air (H_2O) [6].

Reaksi elektrokimia tersebut dapat digambarkan sebagai berikut



Gambar 1. Prinsip *fuel cell* [5]



Jika suplai bahan bakar (gas hidrogen) ke anoda dan oksigen berlangsung secara terus menerus (*continue*) maka elektron akan selalu diproduksi sehingga aliran listrik berlangsung terus [7-9]. Dengan demikian produksi listrik berlangsung terus selama suplai bahan bakar dan oksigen terus ada.

Secara umum pengelompokan *fuel cell* adalah alkaline fuel cell (AFC), polymeric electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), phosphoric acid fuel cell (PAFC), molten carbonate fuel cell (MAFC) dan solid oxide fuel cell (SOFC). Pengelompokan *fuel cell* tersebut berdasarkan pada jenis elektrolit [6]. Tiga jenis *fuel cell* menggunakan elektrolit cair yaitu AFC, PAFC dan MAFC sedangkan 2 jenis yang lain PEMFC dan SOFC menggunakan elektrolit padat [3, 10].

Fungsi komponen Fuel Cell dan Material

Fungsi komponen *fuel cell* yang diungkap dalam paper ini adalah komponen anoda, elektrolit dan katoda.

1. Anoda

Fungsi utama anoda dalam *fuel cell* adalah elektroda yang bersinggungan dengan bahan bakar secara langsung. Pada anoda bahan bakar direduksi menghasilkan elektron dan ion bermuatan positif. Persyaratan anoda *fuel cell* secara umum [11, 12] adalah bersifat konduktor listrik yang baik, mampu berperan sebagai katalis penghasil elektron (*electrocatalytic*), tidak mudah menghasilkan endapan karbon, mempunyai tiga lapis batas (*triple phase boundary*) yang banyak, dibuat setipis mungkin untuk menghindari rugi-rugi masa tetapi cukup mampu sebagai pendistribusian arus listrik, stabil dalam lingkungan terjadinya reaksi reduksi, mempunyai koefisien thermal ekspansi yang sesuai dengan komponen ditetangganya, sesuai dengan lingkungan kimia dengan komponen didekatnya, mempunyai ukuran partikel yang relatif kecil, material mudah diperoleh dan relatif tidak mahal.

Tabel 1 Material anoda *fuel cell*

Type Mat	I	II	III	IV	V	ref
NiO					√	[11, 13]
Ni	√					[14]
Ag,Pt	√					[7]
Pt		PTFE		√		[6]
Ni,Pt			√			[15]

Keterangan: I: AFC, II: PAFC, III: MCFC, IV: PEMFC, V: SOFC

Dari tabel 1 terlihat bahwa untuk material NiO digunakan untuk SOFC karena beroperasi pada suhu relatif tinggi sampai suhu 1000°C. Kondisi ini berhubungan dengan material elektrolit yang efektif mampu menghantarkan listrik pada suhu

relatif tinggi [10]. Material yang baik sebagai katalis adalah material yang inert seperti Pt (platina) [16] dan sebenarnya dapat dipakai anoda pada semua tipe fuel cell tetapi kendalanya adalah ketersediaan di alam relatif sedikit dan harganya relatif mahal [7, 11]. Untuk memenuhi anoda yang mudah dilalui gas harus memiliki porositas tertentu. Keegan [11] menyarankan porositas anoda berkisar 20 – 60 % volume.

2. Elektrolit

Fungsi elektrolit sebagai media penghantar ion dan memisahkan antara anoda dan katoda. Secara umum elektrolit dikelompokkan menjadi elektrolit padat dan elektrolit cair. Fuel cell yang menggunakan elektrolit cair adalah AFC, PAFC dan MCFC sedangkan yang menggunakan elektrolit padat adalah PEMFC dan SOFC. Keuntungan elektrolit cair proses pembuatan lebih mudah namun kekurangan pada saat beroperasi kepekatannya berkurang karena mengalami penguapan sehingga mengganggu unjuk kerja fuel cell [7]. Untuk elektrolit padat tidak mengalami proses penguapan selama operasi fuel cell tetapi jika mengalami perubahan suhu saat operasi akan mengalami delaminasi atau retak karena koefisien muai panjang/CTE dari komponen yang tidak sama. Untuk mengatasi kelemahan tersebut CTE (*coefficient thermal expansion*) dibuat hampir sama dengan mengontrol material saat proses manufaktur [17].

Persyaratan elektrolit fuel cell adalah [7, 10, 11, 16, 18] bersifat penghantar ion negatif maupun positif, bukan penghantar ion (bersifat isolatif secara elektronik), stabil secara kimia pada lingkungan reduksi maupun oksidasi. Untuk elektrolit SOFC harus stabil pada suhu tinggi [19].

Material elektrolit AFC menggunakan larutan KOH dengan konsentrasi 85 % berat jika beroperasi pada suhu sampai 250 C, sedang pada suhu dibawah 120 C menggunakan konsentrasi larutan 35 -50 % berat [14]. Material elektrolit PAFC adalah asam phopat dalam SiC dengan konsentrasi

100 % berat dengan suhu operasi fuel cell 150 -220 C. Garam karbonat didalam matrix LiAlO_2 dipakai sebagai material elektrolit MCFC yang beroperasi pada rentang suhu 600 -700 C. Ion pembawa muatan adalah ion karbonat (CO_3^{2-}) [9]. Material elektrolit yang digunakan pada PEMFC dalam bentuk elektrolit padat adalah material *fluorinated sulfonic acid polymer* yang mempunyai sifat baik untuk penghantar ion hidrogen. Suhu operasi PEMFC berkisar antara 60 – 80 C. Keunggulan PEMFC beroperasi pada suhu rendah mudah menggunakan material pendukung yang sudah tersedia di pasaran. Kelemahan PEMFC adalah menjaga elektrolit dalam kondisi kelembaban tertentu dan mencegah banjir disisi katoda akibat terbentuk uap air yang sering mengembun sehingga menyebabkan pengumpulan air di sekitar katoda [6, 9]. Material elektrolit SOFC menggunakan material keramik. Biasanya menggunakan material baku zirconia (*zirconia based material*). Material tersebut seperti YSZ (Yttria Stabilized Zirconia). Operasi SOFC berkisar antara suhu 600 – 1000 C [20]. SOFC ini dikembangkan untuk menghindari terjadinya banjir. Dengan suhu operasi yang tinggi uap air yang terbentuk masih tetap dalam kondisi uap (uap supersaturated) [9, 21]. Kelemahan dari SOFC ini adalah suhu operasi yang relatif tinggi menyebabkan material pendukung memerlukan persyaratan khusus sehingga harga material relatif mahal. Upaya mengatasi kelemahan ini dengan menurunkan suhu operasi berkisar antara 600 – 800 C dengan menggunakan material elektrolit ceria base atau gadolina base [11, 20, 22]. Dengan menurunkan temperatur operasi SOFC dapat memanfaatkan material yang ada sebagai pendukung pembuatan susunan sel SOFC [17].

3. Katoda

Fungsi katoda adalah sebagai elektroda yang berfungsi untuk mereduksi gas

oksigen menjadi ion oksigen yang akan bereaksi dengan ion hidrogen menjadi uap air seperti pada reaksi (4) [5, 13]. Persyaratan katoda antara lain [23-25] konduktor elektron yang baik, kompatibel secara kimia dengan material yang berdekatan, dapat dibuat berpori dan setipis mungkin untuk menghindari rugi-rugi masa, stabil pada lingkungan oksidasi, mempunyai TPB yang banyak, memiliki CTE yang bersesuaian dengan material yang bersebelahan, memiliki harga yang relatif murah. Material dipakai sebagai katoda AFC adalah menggunakan material Ni, Ag maupun Pt [14, 26, 27], material Pt dipakai pada katoda PAFC dan PEMFC karena memiliki sifat sebagai katalis yang baik, sedangkan material katoda untuk MAFC menggunakan NiO, material katoda SOFC menggunakan material LSM (*lantanum strontium manganite*) atau metal cermet (*ceramic metal composite*).

Daya keluaran fuel cell

Di Indonesia pengembangan dan aplikasi teknologi fuel cell belum begitu berkembang dengan pesat. Memperhatikan material yang dipakai sebagai komponen fuel cell Indonesia mempunyai potensi untuk dikembangkan. Beberapa instansi pemerintah seperti BPPT, LIPI, ITB telah mulai mengembangkan teknologi fuel cell. Sumber tambang nikel yang tersedia di Sulawesi, zirconia yang tersedia di Kalimantan merupakan sumber potensial untuk mengembangkan teknologi SOFC. Telkomsel telah memanfaatkan PEMFC untuk mengatasi kebisingan dan menciptakan teknologi pembangkit yang ramah lingkungan [28]. Teknologi fuel cell memberikan dampak yang relatif kecil atau sama sekali tidak memproduksi gas CO₂ jika menggunakan gas hidrogen [17]. Pencapaian daya keluaran fuel cell memberikan harapan bahwa teknologi fuel cell layak sebagai pembangkit alternatif dalam mengatasi krisis energi fosil dan memberikan solusi terhadap kerusakan

lingkungan. Daya output fuel cell tipe PEMFC telah berhasil dipakai di kendaraan dan bus dengan power daya 75 KW pada kendaraan kecil dan bus sebesar 150 KW, kemudian kendaraan tipe HyPM berhasil mencapai power 198 KW [29]. Dengan demikian tahap komersialisasi telah dimulai dan sedang berjalan. Tipe SOFC yang digabungkan dengan MGT (*micro gas turbine*) telah berhasil mengeluarkan daya sebesar SOFC: 188 KW_e-AC dan MGT: 41 KW_e. Total daya keluaran tipe hibrid sebesar 229 KW_e-AC. Di Indonesia PT Telkom telah memasang FC tipe PEMFC dengan daya 2,5 KW untuk menciptakan power pembangkit listrik yang ramah lingkungan tidak bising [30]. Persaingan dan komersialisasi FC telah dimulai dan di Indonesia harus menerima dan merupakan suatu tantangan yang harus dihadapi.

Kesimpulan

Komersialisasi fuel cell telah dimulai. Beberapa negara telah berhasil mengembangkan fuel cell dan telah berhasil dikomersialkan. Di Indonesia PT Telecom telah memasang fuel cell jenis PEMFC. Indonesia yang memiliki potensi tambang Ni dan Zr merupakan bahan baku utama SOFC menjadi modal dasar untuk menggali potensi berdasarkan kemampuan sendiri. Beberapa perguruan tinggi dan instansi seperti ITB, UGM, LIPI dan BPPT harus bersinergi untuk mengembangkan kemandirian teknologi fuel cell juga tidak menutup kemungkinan instansi lain untuk berkolaborasi dalam riset fuel cell di Indonesia.

Referensi

1. Bahman Amini Horri, C.S., Huanting Wang, *Characteristics of Ni/YSZ Ceramic Anode Prepared Using Carbon Microspheres as a Pore Former*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. **37**: p. 15311-15319.
2. Hyeon Cheol Park, A.V.V., *Bimetallic (Ni-Fe) anode-supported solid oxide*

- fuel cells with gadolinia-doped ceria electrolyte. *Journal of Power Sources* 2009. **186**: p. 133–137.
3. Andrzej Wieckowski, J.K.N., *Fuel Cell Science Theory, Fundamentals and Biocatalysis* 2010, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
4. IEA, *Carbon Capture and Storage Progres and Next Steps Prepared with the Co-Operation of the Global CCS Institute*, 2010: Paris, France.
5. Ryan P. O'Hayre, S.-W.C., Whitney Colella, Fritz B. Prinz, *Fuel Cell Fundamentals* 2006, United State of America: John Wiley & Sons, Inc.
6. Matthew, M.M., *Fuel Cell Engine* 2008, Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons.
7. Li, X., *Principles of Fuel Cells* 2006, Madison Avenue, New York, USA: Taylor & Francis Group.
8. B Viswanathan, M.A.S., *Fuel Cells Principles and Applications* 2007, Hyderabad, India: Universities Press (India) Private Limited.
9. Wolf Vielstich, H.Y., Hubert A Gasteiger, *Handbook of Fuel Cells Fundamentals Technology and Applications* 2009, Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons.
10. Fergus, J.W., *Electrolyte for solid oxide fuel cells*. *Journal of Power Sources*, 2006. **162**: p. 30-40.
11. Keegan C. Wincewicz, J.S.C., *Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives*. *Journal of Power Sources*, 2005. **140**: p. 280-296.
12. Kevin Huang, J.B.G., *Solid Oxide Fuel Cell Technology Principles, Performance and Operations* 2009, Great Abington, Cambridge, UK: Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC.
13. Fergus, J.W., *Oxide anode materials for solid oxide fuel cells*. *Solid State Ionic*, 2006. **177**: p. 1529-1541.
14. EG&G Technical Services, I. *Fuel Cell Handbook*. 2004 21 September 2011; seventh:[Available from: www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/fuelcells/.../fchandbook7, June 15, 2016..
15. Andi Mehmeti, F.S., Massimiliano Della Petra, Stephen J. McPhail, *Life Cycle Assesment of Molten Carbonate Fuel Cell: State of Art and Strategies for the Future*. *Journal of Power Sources*, 2016. **308**: p. 97-108.
16. Stimming, C.S.a.U., *Review Recent Anode Advances in Solid Oxide Fuel Cells*. *Journal of Power Sources*, 2007. **171**: p. 247-260.
17. Jeffrey W. Fergus, R.H., Xianguo Li, David P. Wilkinson, Jiujun Zhang, *Green Chemistry and Chemical Engineering Solid Oxide Fuel Cells Materials Properties and Performance* 2009, Boca Raton, FL, USA CRC Press Taylor & Francis Group.
18. Sulisty, S.A., S. Mahzan, *Manufacturing of Electrolyte and Cathode Layers SOFC Using Atmospheric Spraying Method and Its Characterization*. *International Journal of Science and Engineering*, 2013. **4** (1): p. 30-33.
19. Plonczak, P., et al., *A high performance ceria based interdiffusion barrier layer prepared by spin-coating*. *Journal of Power Sources*, 2011. **196**(3): p. 1156-1162.
20. Huangang Shi, R.R., Zongping Shao, *Wet Powder Spraying Fabrication and Performance Optimization of IT-SOFCs with Thin-Film ScSZ Electrolyte*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012. **37**: p. 1125-1132.
21. Antonin Faes, H.G., Amédée Zryd, Zacharie Wullemmin, Jan Van herle *Fabrication of structured anode-supported solid oxide fuel cell by powder injection molding*. *Journal of Power Sources* 2013. **227**: p. 35 -40.
22. Mohadeseh Seyednezhad, A.R., Andanastuti Muchtar, Mahendra Rao Somalu, *Characterization of IT-SOFC Non-Symmetrical Anode Sintered*

- through Conventional Furnace and Microwave. *Ceramics International*, 2015. **41**: p. 5663–5669.
23. Guo-jun Li, Z.-r.S., Hong Zhao, Chunhuan Chen, Rui-ming Ren, Effect of temperature on the porosity, microstructure, and properties of porous La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃ cathode materials. *Ceramics International* 2007. **33**: p. 1503–1507.
24. S. Sulistyono, S.A., S. Mahzan Manufacturing of Electrolyte and Cathode Layers SOFC Using Atmospheric Spraying Method and Its Characterization. *International Journal of Science and Engineering* 2013. **4**(1): p. 30-33.
25. Li, S.P.J.a.J., Cathodes, in Jeffrey W. Fergus (Ed.) *Green Chemistry and Chemical Engineering Solid Oxide Fuel Cells Materials Properties and Performance* 2009, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
26. Mirna Urquidi-Macdonald, A.S., Patrick Grimes, Ashutosh Tewari, Varun Sambhy Design and Test of a Carbon-Tolerant Alkaline Fuel Cell, SGER, Number ECS-0432586 2004, National Science Foundation: USA.
27. M.C. Williams, J.P.S., Subhash C. Singhal, U.S distributed generation fuel cell program. *Journal of Power Sources*, 2004. **131**: p. 79-85.
- 28.-. Fuel Cell Stack Value Proposition Ballard Power Systems Putting Fuel Cells to Work The Power of Fuel Cell, Simply Delivered. 2016 [cited 2016 June, 15]; Available from: www.Ballard.com, June 9, 2016.
29. Gangi, S.C.a.J., Fuel Cell Technologies Market Report 2014. *Energy Efficiency & Renewable energy* 2014, Washington, D.C., USA: U.S. Department of Energy.
30. ElectraGen, Case Study - Backup Power System for Telecom in Indonesia, in Ballard Power System 2010, Ballard Smarter Solution for A Clean Energy Future: Canada.