BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Bahan Bakar Padat (*Solid Oxide Fuel Cell)*

Fuel cell atau sel bahan bakar merupakan perangkat elektrokimia yang dapat mengubah energi kimia yang berasal dari reaksi bahan bakar gas hidrogen dengan oksigen menjadi energi listrik [9]. Reaksi ini terjadi karena hadirnya oksidan pada elektrolit yang kemudian berinteraksi dengan hidrogen pada anoda sehingga memungkinkan terjadinya reaksi redoks antara hidrogen dengan oksigen bersamaan pelepasan elektron berlebih dan menghasilkan produk berupa uap air [10]. Proses ini menghasilkan efisiensi yang jauh lebih tinggi (di atas 70%) daripada mesin termo-mekanis konvensional (seperti diesel, mesin kendaraan, dll.) yang hanya mencapai efisiensi 40-42% [11]. Sementara itu dalam bentuk sistem kogenerasi (sistem pembangkit listrik dengan lebih dari satu sumber energi), sel bahan bakar dapat mencapai total efisiensi 90% dan tidak dibatasi oleh siklus Carnot [11].

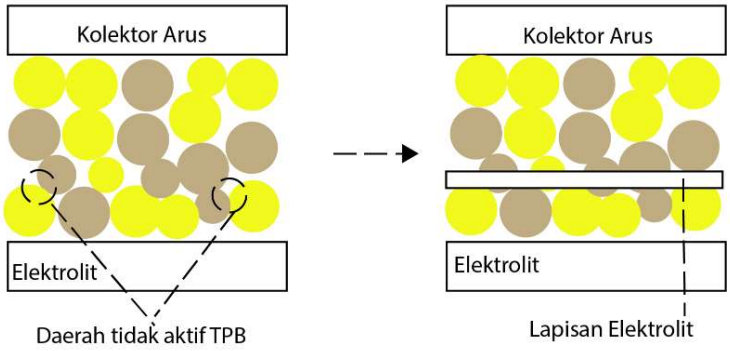
Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) atau sel bahan bakar oksida padat merupakan salah satu perangkat *fuel cell* dengan elektrolit berbahan komposit keramik atau *solid oxide* (padatan oksida) yang beroperasi pada rentang suhu 450-1000^{o}C [11]. Material elektrolit yang sering digunakan adalah *cermet (ceramic metal)* yaitu paduan bahan keramik dan logam. Terdapat berbagai geometri sel bahan bakar oksida padat (SOFC) yang telah dikembangkan. Jenis yang paling populer adalah sel *planar*. Sementara itu, perusahaan otomotif seperti Siemens Westinghouse, Toto, Mitsubishi Heavy Industries, Adelan, dan Accumentrics telah mengembangkan bentuk geometri sel lainnya, yaitu sel *tubular* standar dengan struktur tabung pipih, disebut juga tabung tersegmentasi yang merupakan jenis alternatif yang digunakan pada kendaraan bermotor [12].

Sel bahan bakar padat termasuk dalam energi terbarukan yang mana proses yang terjadi pada sel bahan bakar jauh lebih ramah emisi. SOFC dapat memproduksi CO_2 lebih rendah daripada perangkat pembangkit listrik tradisional yang menghasilkan emisi CO_2 2-3 kali lebih tinggi, padahal asumsi daya keluaran yang dihasilkan

sama. Sehingga sel bahan bakar juga menjadi kandidat kuat untuk menggantikan mesin pembakaran internal pada kendaraan bermotor sebagai energi portabel yang fleksibel. Konstruksi modular pada sel bahan bakar dapat ditingkatkan dan dimodifikasi ke ukuran yang diinginkan apalagi aplikasinya pada pembangkit listrik dengan sumber energi terpusat [13]. Sementara itu, penggunaan bahan bakarnya juga tidak hanya berasal dari gas hidrogen saja, teknologi baru telah memungkinkan penggunaan bahan bakar yang berbeda-beda menyesuaikan kebutuhan seperti bioetanol, hidrokarbon, amoniak, dan karbon padat. Kelebihan tersebut dapat menjamin produksi SOFC dalam skala besar dan proses distribusi dalam kurun waktu yang singkat, dikala permintaan energi yang terus meningkat [14]. Salah satu pengembangannya saat ini adalah upaya untuk menaikkan efisiensi sel dengan menambahkan lapisan pendukung pada salah satu lapisan SOFC. Lapisan pendukung anoda dengan penambahan bahan elektrolit menjadi fokus penelitian ini.

Penambahan bahan elektrolit pada material elektroda, 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 [15]. Penelitian Jiang dkk. [16], membuktikan bahwa untuk mengurangi suhu operasi pada anoda NiO-YSZ dilakukan penambahan SDC [16]. Sementara itu menurut Zhang dkk. [17], memberikan infiltrasi pada anoda NiO-YSZ dengan SDC dapat meningkatkan densitas daya sebesar 60% dan penurunan area resistansi spesifik hingga 47% pada suhu 700^0 C [17].

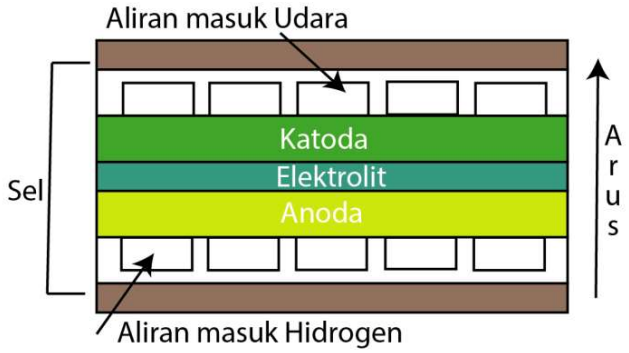
Sedangkan pada penelitian Timurklutuk dkk. [8], menambahkan lapisan GDC di antara lapisan fungsional Ni-YSZ yang dapat mengubah beberapa zona mati TPB pada anoda SOFC menjadi daerah yang aktif [8] untuk meminimalkan terjadinya retakan dan meningkatkan kinerja sel. Hal tersebut memungkinkan terbentuknya jalur elektronik dan ion berkelanjutan akibat dari konduktivitas ionik GDC. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Daerah TPB pada lapisan pendukung anoda.

2.1.1 Desain Sel Bahan Bakar Oksida Padat

Komponen aktif secara elektrokimia dari SOFC konvensional terdiri dari dua elektroda berpori (anoda dan katoda) yang dipisahkan oleh elektrolit padat. Masing-masing komponen tersebut harus menunjukkan karakteristik tertentu agar sistem berfungsi secara efektif; misalnya, pada SOFC dengan lapisan pendukung elektrolit, desain dominan yang digunakan adalah kedap gas dan memiliki sifat ion konduktif yang lebih besar yang membatasi pergerakan elektron. Pada komponen elektroda kinerja anoda dan katoda sangat dipengaruhi oleh komposisi material dan struktur mikro berpori [18]. Kedua elektroda mendukung reaksi elektrokimia dan juga harus memungkinkan terjadinya konduksi yang berdifusi melalui pori-pori bahan. Desain SOFC sel *planar* atau lempeng dengan interkoneksi ditunjukkan pada Gambar 2.2. Interkoneksi berfungsi untuk mengumpulkan arus dan memandu aliran gas, serta diperlukan untuk menumpuk banyak sel secara seri.



Gambar 2.2. Skema Struktur kerja SOFC dengan dua interkoneksi pada satu buah sel *planar*.

Perangkat SOFC sebagian besar didesain berbentuk tabung oleh banyak pengembang sebab sistem yang didesain jauh lebih mudah untuk disekat. Namun, pada produksi skala besar sistem yang tersedia secara komersial saat ini berada dalam konfigurasi *planar* karena pertimbangan manufaktur, kepadatan daya volumetrik yang optimal, dan kemudahan penumpukan sel. Penumpukan memungkinkan sistem untuk memiliki tegangan yang lebih tinggi baik pada tumpukan seri ataupun arus yang lebih besar pada tumpukan paralel dibandingkan hanya sel tunggal [19].

Saat memilih desain yang optimal, setidaknya ada beberapa faktor utama yang harus diperhatikan untuk meningkatkan performa sel bahan bakar oksida padat, yaitu pemilihan bahan dan ketebalan lapisan sel. Salah satu komponen sel harus dipilih sebagai pendukung untuk seluruh paket geometri agar memberikan stabilitas material yang meningkatkan performa sel. Biasanya, lapisan pendukung ditambahkan pada anoda atau elektrolit sel. Komponen sel yang ditambahkan lapisan pendukung tersebut di fabrikasi dengan struktur yang lebih tebal dan kuat atau lebih dominan, sedangkan lapisan lainnya dibuat lebih tipis. Lapisan pendukung juga dapat ditambahkan dengan bahan lainnya, dan tidak hanya berkonsentrasi pada ketebalan salah satu komponen, tetapi juga dapat diterapkan pada seluruh komponen, seperti sel yang didukung logam (*metallic-supported cells*) dan film tipis pada substrat tipis [13]. Perbandingan perbedaan jenis lapisan pendukung ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada penelitian Amar [20], menunjukkan bahwa ukuran ketebalan lapisan pendukung pada elektrolit dapat dilakukan secara komputasi dengan menggabungkan konduktivitas material lapisan pendukung [20].

Gambar 2.3. Perbandingan struktur jenis lapisan pendukung SOFC.

Pertimbangan suhu pengoperasian terhadap desain sistem SOFC dilakukan untuk mendapatkan desain yang efektif. Operasi pada temperatur yang tinggi tidak hanya memberikan beberapa sifat yang diinginkan seperti efisiensi yang lebih tinggi dan potensi integrasi dengan turbin gas, tetapi juga memiliki kelemahan, yaitu biaya operasional yang lebih tinggi. Oleh karena itu pemilihan suhu operasi yang optimal sering terkait dengan aplikasi penggunaan akhir [19].

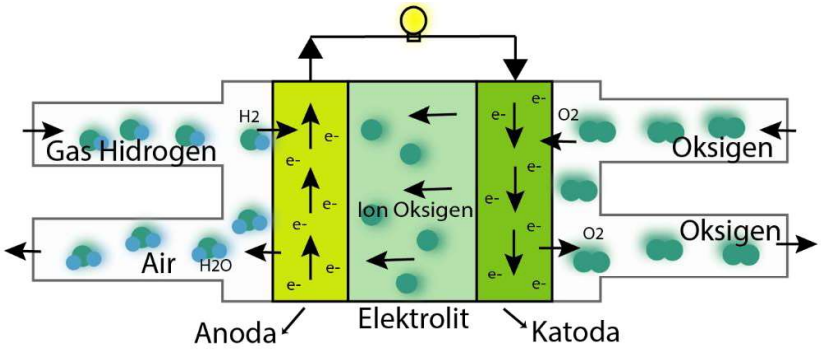
Perangkat SOFC pada awalnya cenderung beroperasi pada suhu tinggi (*High Temperature*, HT-SOFC) yaitu dalam rentang suhu 750^0 hingga 1000^0 C, karena menghasilkan performa tinggi yang mana tingkat konduktivitas ionik sangat baik pada kondisi tersebut [21]. Seperti halnya pada sifat bahan keramik, konduktivitas elektronik dan kinetik pertukaran ion permukaan akan semakin meningkat seiring dengan naiknya suhu, yang berarti bahwa secara teori, SOFC dengan bahan keramik dapat beroperasi lebih efisien pada suhu tinggi dibandingkan pengoperasian sistem pada suhu yang lebih rendah [22]. Selain itu, pada operasi dengan suhu yang tinggi juga memungkinkan produk reaksi lebih cepat terbentuk, dan meningkatkan efisiensi sistem pada pemakaian berbagai bahan bakar. Namun, perangkat HT-SOFC memiliki beberapa kelemahan praktis: pertama, desainnya membutuhkan *Balance of Plan* (BoP) yang mensyaratkan kemampuan untuk mempertahankan dan menahan kondisi suhu yang tinggi, akibatnya konsumsi biaya material yang dipakai akan semakin meningkat [23]. Kedua, untuk meminimalkan kerusakan secara termo-mekanis, perangkat harus dipanaskan secara bertahap sebelum beroperasi, sehingga HT-SOFC membutuhkan waktu lebih lama untuk proses *startup*. Ketiga, interkoneksi pada HT-SOFC harus memiliki ketahanan terhadap atmosfer yang sangat mengoksidasi dan mereduksi, serta kompatibel, baik secara kimia maupun dalam hal ekspansi termal [24]. Tidak hanya itu, pengoperasian HT-SOFC membutuhkan keramik dan logam paduan yang bertahan pada suhu tinggi sebagai komponen *stack*. Pada akhirnya, desain perangkat HT-SOFC menjadi semakin sulit [25].

Steele [26] mendefinisikan kategori SOFC lainnya, yaitu SOFC suhu menengah (*Intermediate Temperature*, IT SOFC), yang beroperasi dalam rentang 500-800^{o}C [26]. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan proses yang berlangsung secara efektif

pada suhu yang lebih rendah. Menurut Steele IT-SOFC dapat dikembangkan untuk sistem yang layak secara komersial. Oleh karena itu perlu dikembangkan lebih lanjut untuk mengimbangi aktivitas dan konduktivitas yang lebih rendah terutama lapisan kombinasi, dan mikro struktur.

2.1.2 Prinsip Kerja

Pada konfigurasi yang paling sederhana, perangkat SOFC terdiri dari tiga lapisan: anoda dan katoda yang dipisahkan oleh elektrolit, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4. Proses yang terjadi berlangsung terus menerus selama bahan bakar dan oksidan pada masing-masing disuplai ke anoda dan katoda. Oksidasi bahan bakar terjadi di lapisan anoda, sedangkan reduksi terjadi pada lapisan katoda. Proses ini juga memungkinkan terjadinya *irreversible losses* selama perangkat SOFC beroperasi, yang disebut *voltage losses* atau *overpotential* [27].



Gambar 2.4. Skema operasi SOFC.

Terdapat beberapa parameter yang menyebabkan kehilangan tegangan (*voltage losses)* yaitu, pertama aktivasi polarisasi dapat terjadi karena energi aktivasi elektrokimia yang berlangsung di elektroda, nilainya bergantung pada bahan elektro-katalis, mikro struktur, aktivitas reaktan, dan densitas arus. Kedua dapat berupa polarisasi ohmik yang disebabkan oleh resistensi ionik dalam elektrolit dan elektroda, resistensi elektronik dalam elektroda, arus kolektor dan interkoneksi, serta hambatan kontak. *Ohmic losses* juga dapat ditinjau berdasarkan densitas arus yang bergantung pada jenis material, geometri sel dan temperatur selama beroperasi. Sedangkan ketiga, yaitu hambatan konsentrasi polarisasi yang

dihasilkan dari laju pembatasan transportasi massal pada reaktan dan sangat bergantung pada densitas arus, aktivitas reaksi, dan struktur elektrolit [28].

Prinsip kerja pada perangkat SOFC dapat digambarkan dengan sifat fisika dan komposisi reaksi kimia yang berlangsung selama beroperasi. Persamaan reaksi kimia tersebut berasal dari bahan bakar dan oksidan yang disuplai sehingga menghasilkan produk H_2O. Proses secara keseluruhan dapat dinyatakan dalam persamaan Nernst, yang mana berupa penjumlahan dari potensial sel standar dan aktivitas pada kondisi spesifik, yang ditunjukkan pada persamaan 2.1 berikut

$$E_{Nernst} = E^0 + \frac{RT}{2F} \ln \frac{(P_{H_2} P_{O_2}^{1/2})}{P_{H_2O}} \quad (2.1)$$

di mana R adalah konstanta gas universal sebesar 8,314, T adalah suhu dalam Celsius, F adalah konstanta Faraday sebesar $9{,}648 \times 10^4$ C/mol, dan P adalah tekanan parsial normal dari spesies H_2, O_2 dan H_2O. Istilah potensial sel standar (E^0) dihitung sebagai perbedaan antara potensial kesetimbangan dari dua reaksi reduksi / oksidasi (redoks) dalam kondisi standar:

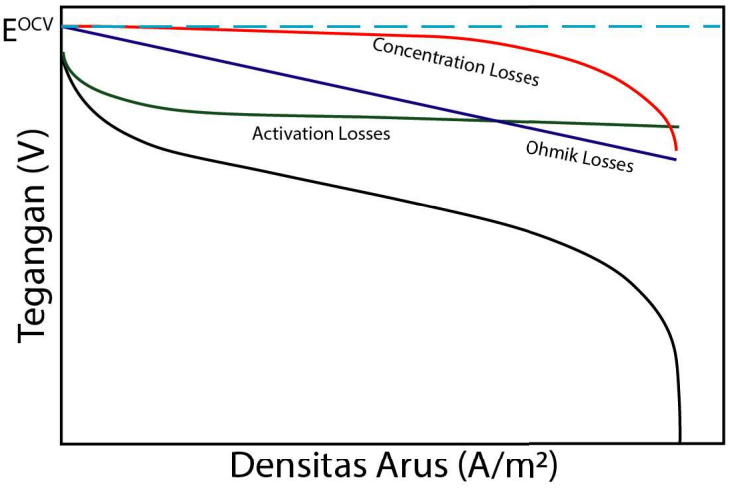
$$2H^+ + 2e^- \leftrightarrows H_2 \qquad (E^0 = 0V) \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrows H_2O \qquad (E^0 = 1.23\ V) \quad (2.3)$$

Untuk pasangan redoks hidrogen dan oksigen dalam kondisi standar, potensial sel adalah 1,23 V. Sehingga pada saat arus diambil, sistem bergerak menjauh dari kesetimbangan dan potensial antara kedua elektroda menurun. Potensial Nernst menggambarkan reaksi ideal, yang dapat digunakan sebagai referensi ketika mengukur empat kategori utama *overpotential* (kelebihan potensial) dalam SOFC seperti yang dijelaskan sebelumnya [6]. Tegangan ideal dapat dinyatakan dalam potensial Nernst yang merujuk pada potensial *Open Circuit Voltage* (OCV). Keadaan signifikan yang relatif dari masing-masing jenis *losses* dapat bergantung pada beban yang diterapkan. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 merupakan hubungan antara tegangan sel dengan fungsi kerapatan arus dan masing-masing label *losses* yang berkontribusi [27]. Maka perhitungan untuk tegangan yang sebenarnya adalah

$$E_{cell} = E_{Nernst} + \eta_{act} + \eta_{ohm} + \eta_{conc} \quad (2.4)$$

η_{act}, η_{ohm} dan η_{conc} merupakan *activation losses, ohmic losses* dan *concetration losses*.



Gambar 2.5. Plot yang menggambarkan setiap jenis *losses* yang dapat terjadi pada performa sel [6].

2.1.3 Aplikasi SOFC

Pada dasarnya SOFC merupakan salah satu teknologi inovatif yang dapat diintegrasikan dengan pembangkit listrik tradisional atau sebagai pembangkit listrik. Ada tiga aplikasi utama SOFC saat ini seperti pembangkit listrik dengan siklus gabungan, yaitu kogenerasi dan trigenerasi, aplikasi pembangkit listrik di perumahan, dan perangkat listrik untuk aplikasi transportasi portabel yang mana para peneliti sedang mengembangkan perangkat SOFC dengan mengurangi suhu operasi agar cocok untuk aplikasi portabel yaitu SOFC dengan suhu menengah [29].

Komponen dasar pembangkit listrik SOFC terdiri dari prosesor bahan bakar, *desulphurizer*, modul daya sel bahan bakar, peralatan pengkondisian daya untuk konverter DC-AC dan penukar panas gas proses. SOFC menghasilkan berbagai tingkat panas limbah yang dapat diperoleh kembali untuk tujuan aplikasi pemanasan, pendinginan, kogenerasi yang bergantung pada suhu operasi. Suhu operasi menjadi kunci untuk mendapatkan optimalisasi efisiensi sistem, ekonomi dan masalah lingkungan. Sementara itu, hasil produk berupa hidrogen dan karbon

monoksida digunakan kembali sebagai bahan bakar pada siklus pembangkit listrik SOFC [29].

Kogenerasi atau *Combined Heatand Power* (CHP) didefinisikan sebagai generator berurutan yang menggunakan dua bentuk energi dari satu sumber energi primer, biasanya energi mekanik dan termal. Energi mekanik digunakan untuk menggerakkan alternator (peralatan elektromekanis) yang menghasilkan listrik, atau peralatan berputar seperti motor, kompresor, pompa atau kipas. Energi termal dapat digunakan baik untuk aplikasi proses langsung atau secara tidak langsung menghasilkan uap, air panas, dan udara panas untuk proses pengeringan atau air dingin untuk proses pendinginan. Sementara itu, gas buang suhu tinggi dari SOFC dapat digunakan kembali untuk tujuan pemanasan [30].

SOFC merupakan salah satu energi terbarukan yang dapat di integrasikan menjadi sebuah *microgrids* pada daerah-daerah terpencil di Indonesia. *Microgrids* merupakan pembangkit listrik yang sumber energinya berasal dari berbagai jenis energi yang saling berintegrasi [30]. Selain itu, *microgrids* dapat ditingkatkan menjadi lebih mandiri dengan membangun sistem *smart microgrids*. Sistem ini sudah masuk tahap komersialisasi di negara Amerika Serikat dan Jepang, seperti perusahaan *Bloom Energy* dan *Morimura SOFC technology*. Gambar 2.6 menunjukkan microgrids yang sudah dikembangkan oleh *Bloom Energy.*

Gambar 2.6. *Microgrids* SOFC *Bloom Energy* [31].

2.2 Material SOFC

2.2.1 Anoda

Peran anoda adalah mengkatalisasi reaksi elektrokimia untuk membawa elektro-oksidasi bahan bakar dan memfasilitasi akses bahan bakar bersamaan dengan hasil produk reaksi. Selain itu, fungsinya harus memiliki konduktivitas elektronik yang memadai agar secara efektif mentransfer elektron ke kolektor. Sebagian besar, anoda terbuat dari *cermet* berpori (komposit logam dan keramik). Secara umum, *cermet* dapat meningkatkan kesesuaian CTE (*Coefficients Thermal Expansion*) antara elektrolit dan pengumpul arus. Oleh karena itu *cermet* merupakan penopang struktural yang penting dan sering digunakan dalam lapisan pendukung anoda (*anode supported*) pada perangkat IT-SOFC [32]. Bahan *cermet* yang paling umum adalah Ni-YSZ. Meskipun banyak penelitian yang telah dilakukan untuk menggantikan zirkonia dengan ceria (Ce) dan Ni dengan Cu, akan tetapi Ni memiliki karakteristik katalis elektronik yang sangat baik untuk oksidasi hidrogen. Peran Ni adalah untuk menciptakan jalur konduksi elektronik dan meningkatkan aktivitas katalis terhadap oksidasi kimia pada bahan bakar. Di sisi lain, peran YSZ adalah memperluas zona reaksi dalam anoda dengan menyediakan jalur konduksi ionik, yang biasanya terjadi pada daerah TPB. Selama *sintering*, YSZ juga mencegah Ni membentuk aglomerasi (pengumpalan) [33].

Cermet berbasis Ni dan Ni-YSZ memenuhi sebagian besar persyaratan untuk material anoda yang digunakan untuk SOFC. Namun, bahan berbasis Ni memiliki stabilitas redoks dan toleransi sulfur yang buruk. Selain itu, Ni juga dapat memicu pembentukan karbon dari bahan bakar hidrokarbon sedangkan pembentukan karbon tidak terjadi ketika Cu digunakan sebagai pengganti [33]. Berdasarkan penurunan suhu operasi sel, dapat digunakan bahan dengan CTE yang kecil tanpa mempengaruhi integritas mekanik anoda selama transien suhu [34].

Beberapa penelitian telah memiliki solusi alternatif mengganti *cermet* dengan anoda keramik. Pada SOFC berstruktur *planar* dengan lapisan anoda pendukung, material yang paling umum digunakan saat ini terdiri dari elektrolit itrium *stabilized* zirkonia (YSZ), dan komposit logam keramik berpori (*cermet*), termasuk anoda

nikel-zirkonia (Ni-YSZ) dan strontium doping $LaMnO_3$ (LSM) yang dicampur dengan lapisan katoda komposit YSZ [35].

2.2.2 Elektrolit

Bahan elektrolit SOFC yang digunakan harus menunjukkan konduktivitas ionik tinggi. Jenis bahan ini, disebut konduktor ion padat atau elektrolit *solid-state*, yang menunjukkan konduktivitas ionik tinggi sekitar 1 S/cm setara dengan garam cair dan larutan elektrolit cair. Energi aktivasi yang diperlukan untuk bahan-bahan ini cukup rendah yaitu, sekitar 0,1 eV dan mobilitasnya berkisar antara 10^{-7} hingga 10^{-4} cm^2/Vs. Besar konsentrasi pembawa ionik adalah $20/cm^2$. Sementara itu, untuk mendapatkan sifat yang sesuai sebagian besar bergantung pada parameter di mana bahan disintesis, jenis dan jumlah stabilisator dan struktur kristal spesifik yang tepat. Gerakan ionik konsentrasi tinggi yang hampir bebas dapat diwujudkan dalam struktur yang ditandai oleh parameter berikut [4]:

1. Terdiri dari setidaknya dua jenis ion yang berbeda.
2. Salah satu jenis ion yang menjadi penyusun pada strukturnya, pertama memberikan dinding struktur yang kuat dan yang kedua diizinkan untuk bergerak bebas di dalam struktur elektrolit.
3. Jumlah kemungkinan lokasi ion yang tersedia untuk ion bebas secara signifikan lebih tinggi daripada jumlah ion bebas yang ada dalam struktur elektrolit. Lokasi-lokasi tersebut harus setara secara struktural atau setidaknya secara energetik.
4. Struktur yang kaku memungkinkan transportasi ion bebas bergerak dengan mudah dari satu sisi lokasi ke sisi lainnya. Potensial penghalang antara kedua lokasi harus relatif rendah.
5. Ion bebas dapat melewati jalur transisi yang terbentuk untuk melintasi antar lapisan material.

Pada dasarnya, untuk mengembangkan IT-SOFC secara praktis, umumnya terdapat dua pendekatan yang harus diselidiki secara menyeluruh. Pertama adalah, menggunakan membran YSZ yang sangat tipis sehingga mengurangi ohmik *losses* akibat bahan penyusun elektrolit. Hal ini disebabkan hubungan terbalik antara

resistensi ohmik dan ketebalan membran. Sebagai contoh, jika ketebalan membran elektrolit YSZ dikurangi menjadi 1 μm, maka resistensi ohmik akan menurun bahkan pada suhu 500°C. Ketebalan tersebut dapat memastikan daya keluaran dari sel bahan bakar yang lebih cepat. Dengan demikian pengembangan elektrolit yang memiliki membran film tipis diselidiki secara luas untuk perangkat IT-SOFC [36]. Kedua, penggunaan bahan elektrolit inovatif yang ditunjukkan pada konduktivitas ion oksida tinggi pada suhu di bawah 800°C [37]. Oleh karena itu cara paling sederhana untuk mempertahankan resistansi ohmik yang rendah adalah dengan mengurangi ketebalan elektrolit. Banyak teknik fabrikasi baru digunakan untuk pengembangan elektrolit film tipis dengan ketebalan ~10 μm [38].

Sementara itu, pada salah satu studi, penggunaan Ce (serium) didoping dengan Gd_2O_3 untuk mendapatkan $Ce_{0,90}Gd_{0,10}O_{2-\delta}$ (CGO), diamati bahwa konduktivitas CGO dapat mencapai 10 S/cm pada suhu 800°C sedangkan pada Ce didoping Sm_2O_3 (SDC) diperoleh nilai konduktivitasnya sebesar 4,2 S/cm pada suhu 700°C [39]. Upaya signifikan telah dilakukan untuk membuat IT-SOFC dengan elektrolit film tipis melalui doping serium. Studi lain seperti densitas daya maksimum dapat dihasilkan pada suhu 500°C dengan 30 nm film tipis GDC ($Ge_{0,2}Ce_{0,8}O_{1,9}$) elektrolit [40]. Teknik *casting tape multilayer* juga dapat digunakan untuk mempersiapkan SOFC dengan lapisan pendukung anoda (*Anoda Supported* SOFC). Xia, dkk. [41] menggunakan *screen printing method* untuk membuat SDC film tipis 30 nm ($Sm_{0,2}Ce_{0,8}O_{1,9}$). Penelitian lain membuktikan bahwa dengan menggunakan anoda sebagai Ni-SDC dan katoda sebagai SDC ($Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_3$) densitas daya maksimum yang dicapai sebesar 188 Mw/m^2 pada suhu 500° C. Penelitian tersebut mengamati bahwa 10% mol Sm atau Gd yang didoping CeO_2, menunjukkan konduktivitas ionik tinggi masing-masing sebesar 5,310 dan 3,831 S/cm pada suhu sekitar 500°C [42]. Konduktivitas tinggi ini disebabkan oleh tegangan, yang menyebabkan mobilitas ionik [36].

2.2.3 Katoda

Pengaruh daya tahan dan kinerja elektrokimia pada sel bahan bakar oksida padat (SOFC) juga berhubungan dengan fungsi katoda. Bahan yang digunakan pada

katoda harus menunjukkan ketahanan terhadap lingkungan yang sangat teroksidasi, memiliki sifat konduktivitas listrik yang baik, konduktivitas ionik yang baik serta bertindak sebagai katalis untuk mereduksi ion oksigen. Salah satu bahan yang paling umum digunakan untuk katoda adalah lanthanum strontium manganite (LSM), yang memiliki struktur kristal perovskit dan memiliki formula $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-d}$. Katoda yang terbuat dari bahan ini bekerja dengan baik pada suhu tinggi (di atas 800 ° C) meskipun penelitian yang dilakukan hanya memperhatikan pada reaksi lapisan batas elektrolit yang mengarah pada pembentukan senyawa non konduktif dan meningkatkan resistensi batas antar lapisan. Selain itu, LSM menunjukkan konduktivitas elektronik lebih besar daripada konduktivitas ionik nya. Biasanya penambahan material lain pada LSM dapat membantu menaikkan konduktivitas ionik. Bahan kedua biasanya bahan yang sama seperti yang digunakan dalam elektrolit (misalnya, 3YSZ). Namun, solusi ini menyebabkan reaksi yang tidak menguntungkan pada mikro struktur katoda, antara katoda dan elektrolit, memungkinkan terbentuknya zirkon yang tidak terkonduksi dengan strontium oksida atau zirkon dengan lantanum oksida. Oleh karena itu, bahan-bahan baru yang dapat mengurangi dampak tersebut sedang dalam proses penelitian lebih lanjut untuk operasi SOFC pada suhu yang lebih rendah. Bahan-bahan tersebut harus ditandai dengan [13]:

1. Aktivitas katalistik lebih tinggi pada suhu operasi yang lebih rendah
2. Hanya sedikit bereaksi dengan bahan elektrolit
3. Bahan campuran, konduktivitas ionik-elektronik.

Bahan yang paling menjanjikan untuk SOFC suhu menengah (IT-SOFC) saat ini tampaknya pada material dengan struktur perovskit yang lebih kompleks secara kimiawi [8]. Perovskit dari grup LSCF ($La_{1-x}Sr_xCo_{1-y}Fe_yO_{3-d}$) juga mampu dimodifikasi dengan banyak penyusun dengan beragam sifat fisika kimia. Perubahan komposisi kimia yang tepat dapat menghasilkan bahan dengan konduktivitas ionik-elektronik yang tinggi, sifat campuran, yang memicu perubahan yang baik dalam proses reaksi pada katoda. Tetapi penggunaan LSM sangat diminati pada produksi skala besar [36].

2.3 Tipe *Planar* SOFC dengan Lapisan Pendukung Anoda

Adapun ketebalan SOFC generasi saat ini yang didukung oleh sisi anoda adalah berkisar 200 hingga 1500 μm. Contoh sel ditunjukkan pada Gambar 2.6. Meskipun demikian, resistansi pada AS-SOFC (*Anode Supported* SOFC) atau SOFC dengan lapisan pendukung anoda lebih rendah dan memiliki efisiensi biasanya lebih tinggi dibandingkan SOFC dengan lapisan pendukung elektrolit. Anoda memiliki konduktivitas listrik yang baik karena kandungan logam (biasanya logam nikel) yang tinggi dan hanya sebagian kecil dari anoda yang terlibat dalam konduktivitas ionik, sehingga berkontribusi terhadap resistensi ionik pada lapisan dekat dengan elektrolit. Untuk memastikan transportasi bahan bakar (*fuel*) yang efisien ke batas-batas tiga fase (TPB), maka volume anoda harus memiliki porositas dengan persentase yang lebih tinggi daripada struktur biasa [13].

Gambar 2.7. Struktur AS-SOFC [13].

Struktur ini juga memungkinkan elastisitas yang lebih besar dari seluruh kinerja sel, terutama pada suhu yang lebih tinggi [34]. Penggunaan oksida logam sebagai anoda pada kombinasi dengan ketebalan anoda yang lebih besar dapat menyebabkan masalah terhadap reduksi setelah bahan bakar masuk ke lapisan, karena struktur internal penyangga berubah menjadi bentuk logam, yang juga terkadang merusak lapisan lain. Akan tetapi, permasalahan tersebut biasanya diselesaikan dengan memasukkan bahan bakar encer dan dilakukan secara perlahan, sembari diberi tambahan jenis lainnya sehingga terjadi pencampuran selama proses reduksi anoda. Karena tebal lapisan mempengaruhi integritas mekanik sel terhadap lapisan berelektrolit, maka bahan lain dengan konduktivitas ionik lebih tinggi dan kekuatan mekanik yang lebih rendah dapat digunakan. Hal tersebut dilakukan untuk memperpanjang area TPB di lapisan anoda. Di samping itu, jenis AS-SOFC juga bisa dikembangkan dengan ketebalan anoda di bawah 500 μm, seperti yang

diproduksi di *Institute of Power Engineering* (Polandia) dan fasilitas lain di seluruh dunia [13].

2.4 Persamaan Diferensial Parsial

Suatu fungsi yang diketahui memiliki banyak turunan parsial atau turunan dengan banyak peubah disebut persamaan diferensial parsial (PDP). Biasanya PDP merupakan bentuk representasi matematika untuk menggambarkan keadaan fisis di mana besaran-besaran yang terlibat di dalamnya berubah terhadap ruang dan waktu [43]. Terdapat orde pada persamaan, semakin tinggi orde pada persamaan tersebut maka penamaan persamaan tersebut mengikuti orde tertinggi. Baik persamaan diferensial biasa maupun parsial dapat digolongkan sebagai linier atau non linier. Sebuah persamaan diferensial disebut linier apabila persamaan tersebut memiliki orde lebih dari satu dalam peubah biasanya dan turunan parsialnya.

Apabila persamaan tersebut tidak memenuhi syarat linear, maka persamaan tersebut merupakan non linier. Jika setiap suku persamaan demikian ini mengandung peubah tak bebasnya atau salah satu dari turunannya, maka persamaan itu dikatakan homogen. Sebaliknya, persamaan dikatakan tak homogen. Bentuk umum dari persamaan diferensial parsial ini adalah [44]:

$$\sum_{i=1}^{N} A_i \frac{\partial^2 f}{\partial x_i^2} + \sum_{i=1}^{N} B_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + Cf + D = 0 \tag{2.5}$$

Orde dari persamaan diferensial parsial merupakan turunan tertinggi yang muncul pada persamaan diferensial parsial tersebut, maka:

1. PDP orde 1

$$\frac{\partial u}{\partial x} - a\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \tag{2.6}$$

2. PDP orde 2

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - Dc\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \tag{2.1}$$

3. PDP orde 3

$$\left(\frac{\partial^3 u}{\partial x^3}\right)^2 - \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial y} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \tag{2.2}$$

Selanjutnya, PDP juga dapat dikategorikan menjadi tiga jenis, yaitu persamaan diferensial eliptik, parabolik, dan hiperbolik. Diberikan suatu persamaan diferensial parsial orde dua dalam variabel ruang *x* dan waktu t

$$A\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + B\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + C\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + D\left(x, t, u, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial t}\right) = 0 \qquad (2.3)$$

di mana *A, B* dan *C* merupakan fungsi dari *x* dan *t,* sedangkan *D* adalah fungsi dari *u* dan turunan $\partial u \partial x$ dan $\partial u \partial t$, serta *x* dan *t*. Berdasarkan persamaan di atas dapat dibedakan antara tiga jenis PDP tersebut dengan meninjau nilai diskriminan $B^2{-}4AC$. Sehingga, ketiga jenis PDP dapat dibedakan menjadi [43]:

1. PDP hiperbolik jika diskriminan bernilai, $B^2 - 4AC > 0$ misalnya persamaan gelombang $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - c^2\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$.
2. PDP parabolik jika diskriminan bernilai, $B^2 - 4AC = 0$ misalnya persamaan difusi $\frac{\partial u}{\partial t} - k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$.
3. PDP eliptik jika diskriminan bernilai, $B^2 - 4AC < 0$ misalnya persamaan Laplace $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$.

2.5 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga (*Finite Element Method*) adalah teknik numerik yang memberikan solusi perkiraan untuk persamaan diferensial parsial dengan pemodelan terhadap masalah yang muncul dalam fisika dan teknik. Seperti dalam skema beda hingga sederhana, metode elemen hingga memerlukan permasalahan yang didefinisikan dalam ruang geometris (atau domain), untuk dibagi lagi menjadi sejumlah batas-batas wilayah yang lebih kecil (*mesh*). Pada metode beda hingga di masa lampau, *mesh* terdiri dari baris dan kolom garis ortogonal (dalam ruang komputasi, persyaratan yang sekarang ditangani melalui transformasi koordinat dan generator *mesh* yang tidak terstruktur), sementara itu pada elemen hingga, setiap sub divisi adalah unik dan tidak berbentuk ortogonal. Sebagai contoh, segitiga atau segi empat dapat digunakan dalam dua dimensi, dan tetrahedra atau hexahedra dalam tiga dimensi. Setiap elemen hingga, variabel yang tidak diketahui (misalnya suhu, kecepatan, dll.) dapat diperkirakan menggunakan fungsi yang diketahui,

fungsi-fungsi ini dapat berupa ekspansi polinomial linier atau orde tinggi dalam hal lokasi geometris (*node*) yang digunakan untuk menentukan bentuk elemen hingga. Hal tersebut juga disebut dengan pemodelan *multiphysics*, yang melibatkan banyak parameter fisis [45].

Berbeda dengan prosedur *finite difference* (prosedur beda hingga konvensional, yang bertentangan dengan metode volume hingga, yang terintegrasi), persamaan yang mengatur dalam metode elemen hingga diintegrasikan pada setiap elemen hingga dan kontribusi dijumlahkan ("dirakit") di atas seluruh domain permasalahan. Sebagai konsekuensi dari prosedur ini, satu set persamaan linear terbatas diperoleh dalam beberapa set parameter yang tidak diketahui per elemennya. Solusi dari persamaan ini dicapai dengan menggunakan teknik aljabar linier [46]. Secara umum, *Finite Element Method* (FEM) dapat dibagi dalam beberapa jenis metode yang terus berkembang untuk memecahkan permasalahan yang tidak dapat diselesaikan dengan analitik, metode tersebut dapat menyesuaikan konteks berbeda-beda. Berikut beberapa metode dari FEM [47].

1. *hp*-FEM

   Metode ini dapat menjadi solusi PDP yang berjalan berdasarkan *piecewise* polinomial yang menggunakan unsur-unsur variabel ukuran (h) dan derajat polinomial (p). Metode ini adalah paling umum digunakan pada simulasi numerik.

2. *Extended finite element method* (XFEM)

   XFEM merupakan metode numerik yang melalukan pendekatan dengan memperluas ruang macam solusi persamaan diferensial melalui fungsi kontinu.

3. *Spectral method*

   Metode spektral merupakan sebuah metode yang biasanya digunakan dalam matematika terapan dan komputasi ilmiah tertentu untuk menyelesaikan secara numerik dengan menggunakan banyak persamaan diferensial biasa dan PDP, yang sering juga melibatkan penggunaan transformasi Fourier. Metode ini

memiliki level eror yang sangat baik atau disebut juga "*exponential convergen*" sehingga tingkat prosesnya dapat berjalan dengan cepat.

4. *Meshfree method*

   Metode ini merupakan bagian dari kelas tertentu pada *numerical simulation algorithms* yang dapat melakukan simulasi fenomena-fenomena fisis. metode *meshfree* menggunakan pendekatan simulasi geometri dalam penghitungannya, sedangkan pada algoritma tradisional hanya menggunakan *grid* atau *mesh*. Hal ini menjadi salah satu kelebihan dari metode *meshfree* dibanding dengan metode konvensional.

5. *Discontinuous galerkin method*

   Metode Galerkin diskontinu pertama kali diusulkan dan dianalisis pada awal 1970-an sebagai suatu teknik untuk menyelesaikan secara numerik persamaan diferensial parsial. Pada tahun 1973 Reed dan Hill memperkenalkan metode *Discontinuous Galerkin* untuk memecahkan persamaan transpor netron hiperbolik. Metode ini digunakan untuk memecahkan persamaan diferensial parsial dengan menggabungkan fitur dari *finite element* dan *volume element*, dan berhasil diaplikasikan untuk ukuran seperti hiperbolik, elips dan parabola.

2.6 Pemodelan Numerik

Simulasi numerik adalah metode teoritis penelitian yang menggunakan diskretisasi matematika dan sumber daya komputasi [20]. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pengetahuan teoritis tentang persamaan beberapa data eksperimental dan paket perangkat lunak atau bahasa pemrograman untuk menentukan karakteristik kinerja SOFC. Biasanya simulasi ini menggunakan persamaan diferensial parsial (PDP). Terdapat banyak studi yang telah melakukan pemodelan numerik, analitis, dan eksperimental dari SOFC. Pemodelan ini sangat bergantung pada pemahaman fenomena multi-fisik (*multiphysics*) yang terjadi dalam sel [48]. Simulasi SOFC memiliki parameter seperti massa, momentum, energi, transfer muatan, transfer spesies, dan persamaan elektrokimia yang harus dipecahkan secara bersamaan di zona fluida, interkoneksi padat, dan media berpori [49]. Kompleksitas

fisika dan elektrokimia tersebut memuat sejumlah banyak parameter yang terlibat, mustahil untuk menggunakan metode analisis untuk menyelesaikannya. Di sisi lain, instalasi *set up* eksperimental untuk kondisi operasi yang berbeda dan berbagai geometri adalah pendekatan yang tidak tepat dalam segi efisiensi waktu atau pengeluaran biaya yang tidak efektif. Selain itu, penelitian secara eksperimen tidak dapat mengukur semua karakteristik fisis seperti suhu, tekanan, atau distribusi kecepatan melalui sel. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan lain, melalui pemodelan numerik. Analisa simulasi SOFC secara numerik sangat menarik untuk diteliti [18].

Pemodelan numerik yang digunakan untuk memprediksi kinerja SOFC adalah Komputasi fluida dinamis (CFD). Banyak kelebihan yang dilaporkan dalam literatur terhadap pengujian CFD seperti: mengevaluasi revisi geometris dalam waktu yang sangat singkat dibandingkan dengan pengujian laboratorium, pengurangan masalah *scale-up*, kemampuan untuk mempelajari fenomena yang terjadi dalam kondisi tidak relevan, dan menganalisis akar penyebab yang menimbulkan efek tertentu [50], [51]. Simulasi CFD dapat merepresentasikan karakterisasi visual dari bidang aliran fluida [52] dan optimalisasi desain SOFC [20]. Pada penelitian ini paket *software* yang digunakan adalah COMSOL Multiphysics®.