

APLIKASI MEMBRAN NANOKOMPOSIT SEBAGAI ELEKTROLIT SEL BAHAN BAKAR HIDROGEN PADA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL*

Mahreni

Jurusan Teknik Kimia, F T I-Universitas Pembangunan Nasional Veteran
Jl. SWL. 104 Lingkar Utara Condong Catur, Yogyakarta (55283)
E-mail: mahreni_03@yahoo.com

ABSTRAK

APLIKASI MEMBRAN NANOKOMPOSIT SEBAGAI ELEKTROLIT SEL BAHAN BAKAR HIDROGEN PADA *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL*. Sel bahan bakar hidrogen jenis *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* saat ini masih dalam pengembangan dan komersialisasi. Beberapa hambatan komersialisasi di antaranya membran Nafion sebagai elektrolit sangat sensitif terhadap kelembaban. Maka Nafion harus dimodifikasi dengan cara membuat komposit Nafion-SiO₂-HPA dengan tujuan meningkatkan ketahanan elektrolit terhadap fluktuasi kelembaban selama sel digunakan. Penelitian dilakukan dengan mencampur larutan Nafion dengan tetra etoksi orto silikat (*TEOS*) dan bahan konduktif *phosphotungstic acid (PWA)* dengan memvariasi perbandingan Nafion, *TEOS* dan *PWA*. Membran dihasilkan dengan cara memanaskan campuran Nafion, *TEOS* dan *PWA* dengan memvariasi suhu penguapan, waktu dan suhu *annealing* sehingga didapatkan membran dengan penampakan transparan. Membran yang dihasilkan dianalisis terhadap sifat fisika, kimia dan sifat elektrokimia dengan mengaplikasikan membran sebagai elektrolit *PEMFC* pada berbagai kelembaban dan suhu operasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada suhu rendah 30 °C hingga 90 °C dan kelembaban tinggi (100 %RH), membran Nafion murni lebih baik dibandingkan membran komposit Nafion-SiO₂-PWA, tetapi pada kelembaban rendah membran komposit lebih baik dibanding membran Nafion murni dan dapat disimpulkan bahwa membran komposit Nafion-SiO₂-PWA dapat menggantikan peranan membran Nafion murni sebagai elektrolit *PEMFC* yang beroperasi pada kelembaban rendah (40 %RH) dan suhu di antara 30 °C hingga 90 °C.

Kata kunci : Membran, Nanokomposit, Nafion-SiO₂-PWA, *PEMFC*, Kelembaban

ABSTRACT

APPLICATION OF THE NANOCOMPOSITE MEMBRANE AS ELECTROLYTE OF PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL. Hydrogen fuel cells proton exchange membrane fuel cell (*PEMFC*) is currently still in development and commercialization. Several barriers to the commercialization of these Nafion membrane as electrolyte is its very sensitive to humidity fluctuation. Nafion must be modified by making a composite Nafion-SiO₂-HPA to increase electrolyte resistance against humidity fluctuations during the cell used. Research carried out by mixing Nafion solution with Tetra Ethoxy Ortho Silicate (*TEOS*) and conductive materials is phosphotungstic acid (*PWA*) by varying the ratio of Nafion, *TEOS* and *PWA*. The membrane is produced by heating a mixture of Nafion, *TEOS* and *PWA* by varying the evaporation temperature, time and annealing temperature to obtain the transparent membrane. The resulting membrane was analyzed its physical, chemical and electrochemical properties by applying the membrane as electrolyte of *PEMFC* at various humidity and temperature of operation. The results showed that at low temperatures (30-90) °C and high humidity at 100 %RH, pure Nafion membrane is better than composite membrane (Nafion-SiO₂-PWA), but at low humidity condition composite membrane is better than the pure Nafion membrane. It can be concluded that the composite membranes of (Nafion-SiO₂-PWA) can be used as electrolyte of *PEMFC* operated at low humidity (40 %RH) and temperature between (30-90) °C.

Key words : Membrane, Nanocomposite, Nafion-SiO₂-PWA, *PEMFC*, Humidity

PENDAHULUAN

Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) pada saat ini sedang menuju komersialisasi [1]. Penelitian dan pengembangan

masih terus dijalankan untuk meningkatkan efisiensi dan meningkatkan tenaga yang dihasilkan sehingga *PEMFC* dapat bersaing dengan mesin konvensional.

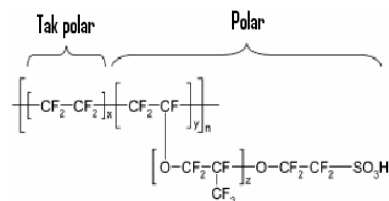
Penelitian yang telah dilakukan dalam usaha komersialisasi PEMFC meliputi peningkatan kinerja sel dengan mengurangi berat dan volume sel, penggantian bahan bakar selain hidrogen sebagai sumber elektron (bensin dan metanol), pengembangan katalis anode yang tahan terhadap CO, seperti penggunaan paduan logam (Pt-Ru/C, Pt-Sn/C, Pt-Mo/C (Pt:Mo=5:1), Pt-Ru-Mo/C (Mo=10%), Pt-Ru-HxMoO₃/C, Pt-Ru/C (nanotube) dan Pd-Ac/C) dengan tujuan untuk meningkatkan ketahanan katalis terhadap kandungan CO di dalam hidrogen hingga mencapai nilai >50 ppm, pengembangan katalis katoda untuk mengurangi kehilangan tegangan aktivasi dan untuk meningkatkan arus (*exchange current density, i₀*) dan penggunaan membran jenis lain selain membran Nafion yang harganya lebih murah tetapi konduktivitasnya tinggi dan dapat menghantarkan proton tanpa air serta dapat digunakan pada suhu diatas 100 °C [2].

Selama ini membran Nafion masih tetap digunakan sebagai elektrolit PEMFC. Kelemahan membran Nafion merupakan penghalang dalam usaha untuk mengkomersialikan PEMFC, karena membran mengkerut pada kelembaban rendah dan akan merusak sistem sambungan permukaan membran dengan elektroda serta menurunkan kinerja PEMFC. Oleh karena itu penelitian difokuskan kepada proses peningkatan kinerja membran untuk menghasilkan PEMFC yang dapat dioperasikan pada kelembaban rendah.

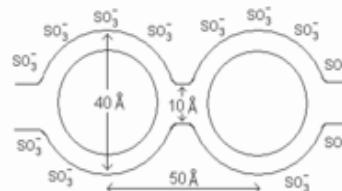
Makalah ini melaporkan hasil penelitian modifikasi membran Nafion dengan cara memasukkan komponen yang bersifat higroskopik dan mempunyai konduktivitas tinggi seperti asam padat (H₃PW₁₂O₄₀, PWA) ke dalam kluster Nafion yang berukuran ± 10 μm. Keberadaan partikel PWA di dalam kluster Nafion akan mengubah sifat fisika-kimia membran yang dihasilkan dan dapat mengubah mekanisme perpindahan proton di dalam membran dari mekanisme secara difusi menjadi lompatan proton sehingga perpindahan proton semakin cepat pada kelembaban rendah. Hubungan sifat fisika-kimia Nafion dan kinerja membran lebih difokuskan kepada hubungan struktur membran dan mekanisme perpindahan air serta konduktivitas membran.

Struktur Membran Nafion

Struktur kimia membran Nafion (C₇H₉F₁₃O₅S · C₂F₄) ditunjukkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 [3]. Nafion adalah *polyelectrolyte* yang terdiri dari segmen tetrafluoroethylene (CF₂-CF₂) (TFE) yang merupakan rantai utama polimer dan *perfluorosulfonic vinyl ether (PSVE)* ((CF₂-CF(O-CF₂-CF(CF₃))-CF₂-CF₂-SO₃H) sebagai rantai samping. Rantai utama bersifat tidak polar atau hidrofobik merupakan senyawa fluorokarbon yang memberikan sifat kekuatan mekanik dan ketahanan termal terhadap Nafion. Rantai strukturmikro membran Nafion terdiri dari kristal dan ionik. Kumpulan ionik adalah gugus SO₃H yang dikelilingi oleh molekul air primer. Beberapa



Gambar 1. Struktur kimia membran Nafion



Gambar 2. Kluster Nafion

kumpulan ionik akan dihubungkan oleh saluran yang sempit dengan ukuran 4 nm hingga 10 nm dan membentuk satu kluster. Antara satu kluster dan kluster yang lainnya dihubungkan oleh saluran sempit yang berukuran 1 nm.

Ukuran gugus ionik dan saluran penghubung tergantung jumlah air yang ada di dalam membran. Semakin banyak air maka ukuran saluran makin besar dan sebaliknya, dimana makin kecil kandungan air maka ukuran saluran makin kecil [4]. Molekul air yang ada di dalam membran dapat memisahkan proton (H⁺) dari gugus sulfonat (SO₃H) menyebabkan medan listrik yang dapat memisahkan H⁺ dari ikatannya dengan gugus SO₃⁻. Menghasilkan proton yang bergerak (*mobile*) [4]. Hidrasi membran Nafion menyebabkan sifat menghantarkan proton melalui molekul air dalam bentuk ion hidronium (H₃O⁺) dan ion oxonium (H₂O₅⁺). Air yang mengisi pori-pori di dalam polimer Nafion dikenal sebagai air primer, dimana air tersebut mengelilingi bagian hidrofilik. Air primer terdiri dari tiga molekul air untuk setiap satu gugus sulfonat. Apabila jumlah bagian primer sudah dipenuhi, selebihnya mengisi ruangan di antara rantai induk dan rantai samping dalam pori-pori yang berukuran 4 nm hingga 10 nm. Air yang mengisi pori-pori ini disebut air sekunder.

Jika kandungan air dalam membran mencukupi untuk hidrasi primer maka kecepatan perpindahan proton melalui membran adalah sama dengan kecepatan difusi proton melalui molekul air. Artinya konduktivitas proton sebanding dengan kandungan molekul air di dalam membran. Oleh karena itu semakin tinggi kandungan air makin tinggi pula konduktivitas proton dan begitu juga sebaliknya.

Melihat kandungan air di dalam membran sangat menentukan konduktivitas proton, maka pengendalian air di dalam sel hidrogen memerlukan perhatian yang khusus karena air dihasilkan secara kontinyu oleh reaksi di katoda [5]. Air juga dibawa oleh hidrogen dan oksigen dari luar sel sebagai pelembab hidrogen dan oksigen.

Dalam penelitian ini telah dilakukan modifikasi membran Nafion dengan memasukkan komponen anorganik SiO_2 dan *PWA* sebagai bahan isian yang bersifat higroskopik dan mempunyai konduktivitas tinggi untuk meningkatkan konduktivitas membran pada kelembaban rendah. Silika oksida (SiO_2) mempunyai peranan sebagai *imobilizer HPA* di dalam matriks polimer Nafion sehingga *HPA* stabil di dalam polimer Nafion. Kehadiran molekul *HPA* dan (SiO_2) dapat menciptakan efek kondensasi kapiler di dalam pori-pori membran dan diharapkan dapat meningkatkan daya serap membran Nafion terhadap air serta membran tidak mengkerut ketika kelembaban di permukaan membran menurun.

Peningkatan daya serap air dapat mempertahankan konduktivitas membran walaupun kelembaban membran rendah. Uji konduktivitas membran Nafion- SiO_2 -*HPA* dilakukan dengan cara mengaplikasikan membran yang dihasilkan sebagai elektrolit *PEMFC* pada suhu 30 °C hingga 90 °C dan kelembaban rendah sampai dengan 40 % dengan menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar dan udara sebagai oksidan. Alat tes menggunakan sistem uji *PEMFC* (FCT-2000 ElectroChem, USA).

METODE PERCOBAAN

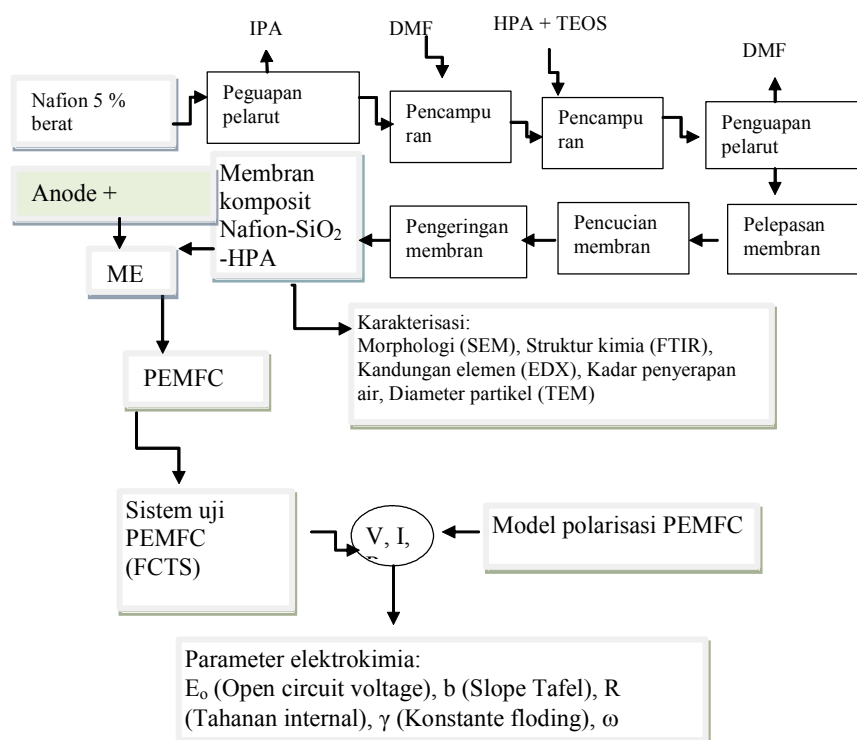
Jalannya penelitian dapat dijelaskan sesuai dengan diagram alir yang ditampilkan pada Gambar 3 [2].

Larutan Nafion 5 % berat diuapkan di dalam lemari asam sehingga semua pelarut Iso propil alkohol menguap dan menghasilkan Nafion padat. Selanjutnya Nafion

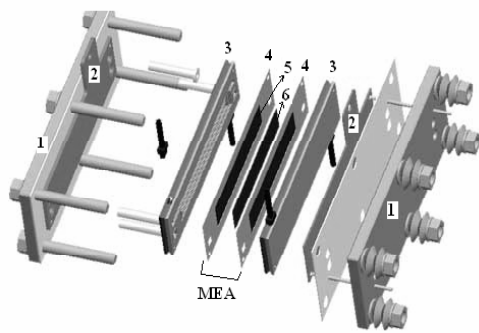
padat dilarutkan di dalam pelarut yang bersifat polar aprotik yaitu dimetil formamida (DMF). Campuran diaduk sampai terbentuk larutan homogen kurang lebih selama 2 jam. Ke dalam larutan homogen ditambahkan komponen aditif *tetra ethoxy ortho silicate (TEOS)* dan *PWA* dengan perbandingan tertentu. Kedua komponen tersebut larut di dalam campuran Nafion-DMF setelah diaduk beberapa menit. Untuk meyakinkan bahwa larutan homogen, pengadukan dilanjutkan dengan menggunakan pengaduk ultrasonik selama 2 jam. Setelah itu larutan didiamkan di dalam lemari asam tanpa diaduk selama 24 jam untuk menghilangkan gelembung udara yang terperangkap selama pengadukan.

Untuk menghasilkan membran komposit berbentuk film tipis, larutan dipanaskan di dalam oven vakum pada suhu 80 °C sampai semua pelarut menguap dan terbentuk membran padat. Selanjutnya membran yang terbentuk dipanaskan lebih lanjut pada suhu 120 °C sehingga didapatkan membran yang mempunyai struktur yang kuat. Untuk melepaskan membran dari cawan petri, membran dididihkan di dalam air mendidih sampai membran mengelupas. Untuk memisahkan kotoran dari permukaan membran, selanjutnya membran dicuci dengan menggunakan larutan peroksida 3 % berat diikuti dengan larutan asam sulfat 0,5 M selama 1 jam pada suhu 80 °C. Setelah dicuci membran dikeringkan pada suhu 80 °C selama 30 menit dan membran siap dikarakterisasi dan digunakan sebagai elektrolit *PEMFC*.

Aplikasi membran (M) dilakukan dengan cara merakit membran dengan plat penutup (*End Plate, EP*), plat pengumpul arus (*Current Collector, CC*), plat dua kutub (*Bipolar Plate, BP*), lapisan difusi gas elektroda



Gambar 3. . Diagram alir percobaan sintesis dan aplikasi membran



Gambar 4. Bagian-Bagian PEMFC

(Gas Diffusion Electrode, GDE), dengan urutan perakitan adalah EP, CC, BP, GDE, M, GDE, BP, CC, EP seperti ditunjukkan pada Gambar 4 [2].

Sistem Uji PEMFC

Udara dimasukkan di sisi katoda dan hidrogen masuk di sisi anoda dengan kecepatan tertentu sesuai dengan stoikiometri (perbandingan mol $H_2/O_2 = 0,5/0,38$), di mana kecepatan aliran dikontrol dengan menggunakan pengendali aliran (*flow controller*). Alat pengujian menggunakan satu sistem yang dilengkapi dengan pengukur arus dan tegangan, pemanas umpan, alat pengendali suhu dan kecepatan aliran umpan. Hasil pengukuran dicatat oleh satu set komputer. Uji membran dilakukan pada suhu yang divariasikan dari 30 °C sampai dengan 90 °C dan kelembaban 40 %RH hingga 90 %RH. Kelembaban diatur dengan cara mempertahankan suhu air penjenuh 5 °C hingga 10 °C di atas suhu umpan (hidrogen dan udara). Mekanisme konversi tenaga hidrogen ke tenaga listrik dapat dilihat pada Gambar 4.

Analisis Kinerja PEMFC

Kinerja PEMFC dipengaruhi oleh kinerja bagian-bagian yang menyusun PEMFC diantaranya adalah kinerja membran, katalis (anoda dan katoda) serta struktur geometri dan struktur bahan. Jenis alat uji arus dan tegangan PEMFC adalah (FCT-2000 ElectroChem, USA). Satu model matematik digunakan untuk menganalisis hubungan antara densitas arus (i), tegangan (V) dan tenaga (P) PEMFC. Model matematik digunakan untuk menentukan konstanta-konstanta yang mewakili tahanan internal sel (R) dan parameter banjir (γ) serta konstanta pertukaran arus standar (E_0). Tahanan internal sel berbanding terbalik dengan konduktivitas membran. Parameter banjir mewakili kandungan air sebagai hasil reaksi di dalam sel dan pertukaran arus standar (E_0) mewakili aktivitas katalis (anoda dan katoda). Model yang sesuai adalah model mewakili fenomena riil yang terjadi di dalam PEMFC yang menyertakan parameter banjir untuk analisis kinerja PEMFC atau model Baschuk [6]. Parameter banjir ini sangat tepat digunakan untuk memprediksi waktu terjadi

banjir di dalam sel, di mana pada kondisi tersebut arus dan tegangan turun dengan drastis dan tenaga menjadi nol, seperti ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$E = E_0 - b \log(i) - R(i) - \exp(\omega i) \dots\dots\dots (1)$$

di mana :

- E = Tegangan sel
- E_0 = Tegangan sirkuit terbuka
- b = Konstanta Tafel
- R = Tahanan internal
- γ = Konstanta banjir
- ω = Konstanta fitting

Hubungan antara tahanan internal dan konduktivitas dituliskan pada Persamaan (2). Tenaga (P) adalah hasil perkalian arus dan tegangan seperti dituliskan pada Persamaan (3) [2].

$$\sigma = (1/R) (l/S) \dots\dots\dots (2)$$

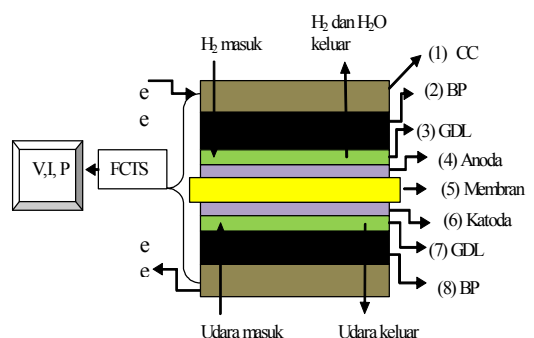
$$P = V \times I \dots\dots\dots (3)$$

di mana :

- σ = Konduktivitas membran ($S \text{ cm}^{-1}$)
- R = Tahanan (ohm)
- l = Tebal membran (cm)
- S = Luas permukaan kontak antara membran elektroda (cm^2)
- i = Arus (mA/cm^2)
- P = Tenaga/satuan luas (W/cm^2)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kinerja PEMFC menggunakan membran komposit Nafion-SiO₂-HPA didapatkan dengan mengukur densitas arus dan tegangan sel. Hasil tes pada suhu 30 °C hingga 90 °C dan pada humiditas relatif berbeda yaitu pada 40 %RH dan 100 %RH dicatat dan ditampilkan pada Gambar 5 sebagai densitas tenaga (mW/cm^2) terhadap densitas. Semua grafik hasil penelitian ditampilkan bersama-sama dengan persamaan matematik sebagai hasil optimisasi antara model polarisasi seperti Persamaan (1) dengan data yang dicatat dari komputer. Parameter yang merupakan konstanta pada Persamaan (1) ditentukan dengan cara kuadrat



Gambar 5. Sistem uji PEMFC

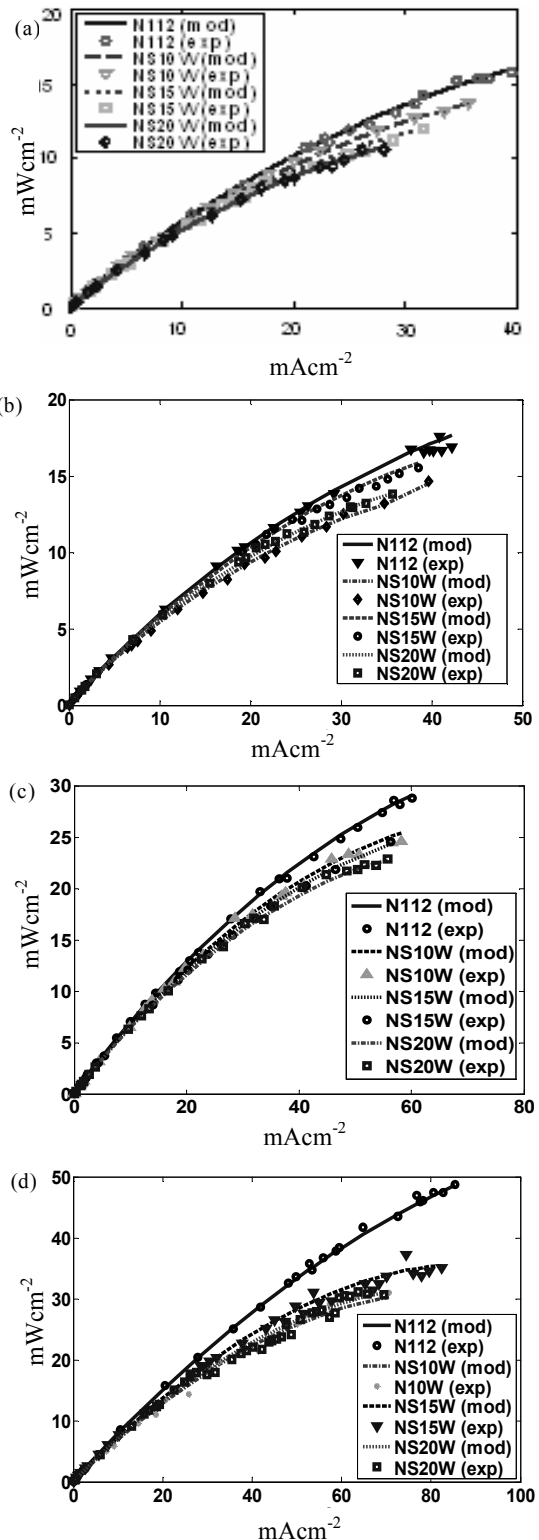
Tabel 1. Konduktivitas (σ) dan tenaga maksimal sel (P_{max}) untuk membran Nafion murni N112, NS10W, NS15W and NS20W dengan ketebalan membran $70 \pm 5 \mu\text{m}$ and luas permukaan membran 50 cm^2 .

| 30 °C, 100 %RH | | 60 °C, 100 %RH | | |
|----------------|---|----------------|---|-------------------|
| Membran | σ (S cm^{-1}) 10^3 | P (watt) | σ (S cm^{-1}) 10^3 | P_{maks} (watt) |
| N112 | 2,69 | 0,79 | 2,79 | 0,83 |
| NS10W | 2,40 | 0,68 | 2,49 | 0,75 |
| NS15W | 2,19 | 0,58 | 2,31 | 0,82 |
| NS20W | 2,12 | 0,50 | 2,19 | 0,66 |
| 80 °C, 100 %RH | | 90 °C, 100 %RH | | |
| N112 | 3,03 | 1,42 | 3,33 | 2,04 |
| NS10W | 2,64 | 1,20 | 3,04 | 1,55 |
| NS15W | 2,97 | 1,24 | 3,29 | 1,75 |
| NS20W | 2,64 | 1,13 | 3,02 | 1,47 |
| 60 °C, 40 %RH | | 80 °C, 40 %RH | | |
| N112 | 1,66 | 0,65 | 1,53 | 0,55 |
| NS10W | 2,32 | 1,13 | 2,41 | 0,73 |
| NS15W | 2,22 | 1,02 | 2,37 | 1,26 |
| NS20W | 2,00 | 0,73 | 2,12 | 0,77 |
| 90 °C, 40 %RH | | | | |
| N112 | 1,16 | 0,55 | | |
| NS10W | 2,51 | 0,86 | | |
| NS15W | 2,85 | 2,66 | | |
| NS20W | 2,32 | 1,81 | | |

terkecil (*least square*) dan dengan bantuan program *Matlab*.

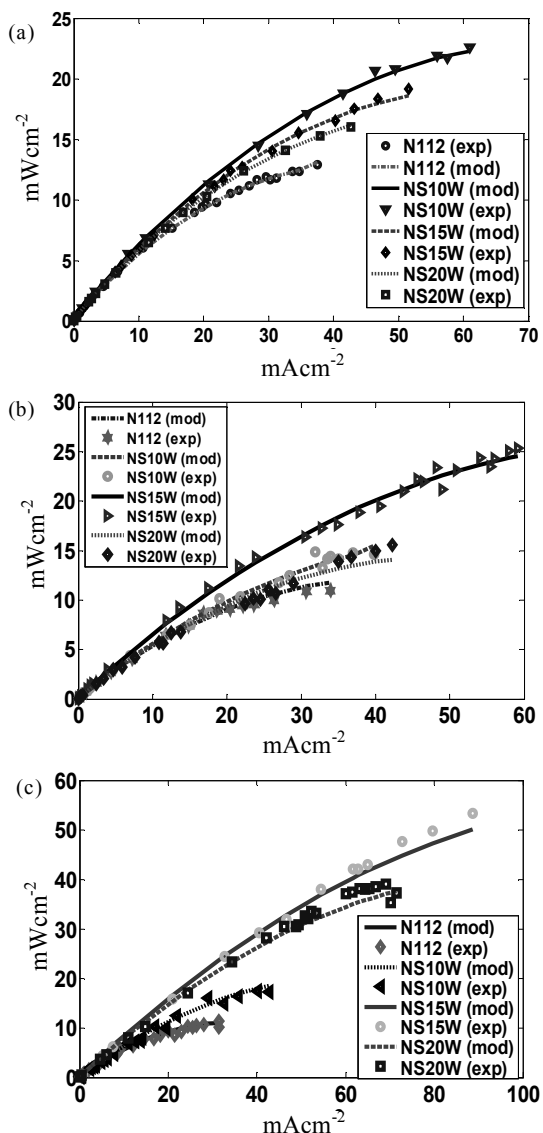
Dari Gambar 5 dan Tabel 1 dapat disimpulkan bahwa kinerja membran N112 (Nafion murni) pada suhu 30°C hingga 90°C dan kelembaban 100 %RH, menunjukkan kinerja lebih baik dibandingkan dengan membran komposit NS10W, NS15W dan NS20W seperti ditampilkan pada Gambar 6(a) sampai dengan Gambar 6(d). Untuk suhu 60 °C hingga 90 °C dengan kelembaban 40 %RH, kinerja membran komposit menunjukkan lebih baik dibandingkan dengan membran Nafion murni, seperti ditampilkan pada Gambar 7(a) sampai dengan Gambar 7(c). Membran NS15W adalah membran komposit terbaik di antara membran komposit lain dengan menghasilkan tenaga ($P = 1,75 \text{ Watt}$) pada kondisi pengujian.

Membran Nafion sampai sekarang masih tetap digunakan karena mempunyai konduktivitas tinggi pada kelembaban tinggi (100 %RH). Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan membran Nafion mempunyai kelemahan, dimana konduktivitas membran Nafion murni turun dengan drastis pada kelembaban rendah. Hal ini disebabkan karena konduktivitas proton sangat tergantung kepada kadar air di dalam membran. Semakin tinggi kadar air, konduktivitas semakin tinggi dan sebaliknya.



Gambar 6. Tenaga dihasilkan oleh PEMFC menggunakan membran N112, NS10W, NS15W dan NS20W sebagai elektrolit pada suhu (a) 30 °C pada 100 %RH, (b) 60 °C pada 100 %RH, 80 °C pada 100 %RH dan (d) 90 °C pada 100 %RH.

Sehingga usaha yang dilakukan untuk meningkatkan stabilitas membran Nafion pada suhu tinggi dan kelembaban rendah ber tujuan untuk



Gambar 7. Tenaga dihasilkan oleh PEMFC menggunakan membran N112, NS10W, NS15W dan NS20W sebagai elektrolit pada suhu (a) 60 °C pada 40 %RH, (b) 80 °C pada 40 %RH dan (c) 90 °C pada 40 %RH.

mempertahankan kandungan air di dalam membran tetap tinggi pada kondisi suhu tinggi dan kelembaban rendah. Penelitian yang telah dilakukan berdasarkan hipotesis bahwa komponen anorganik yang bersifat higroskopis dan mempunyai konduktivitas tinggi (asam bronsted) seperti ($H_3PW_{12}O_{40}$, PWA) dapat meningkatkan kandungan air membran Nafion pada kondisi suhu tinggi dan kelembaban rendah (40 %RH) telah berhasil mempertahankan konduktivitas membran tetap tinggi pada suhu rendah sampai dengan suhu tinggi yaitu antara 30 °C hingga 90 °C.

Proses sol-gel telah digunakan untuk sintesis membran komposit Nafion-SiO₂-PWA dimana hasil analisis menggunakan *Transmission Electron Microscope (TEM)* menunjukkan bahwa komponen PWA berukuran dibawah 10 nm sehingga dapat

masuk ke dalam kluster Nafion. Keberadaan komponen PWA di dalam membran Nafion dapat meningkatkan kandungan air di dalam membran pada suhu tinggi dan kelembaban rendah. Kenyataan ini sekaligus membuktikan bahwa proses sol-gel dengan menggunakan prekursor metaloid (*Tetra Ethoxy Ortho Silicate, TEOS*) dengan dibantu pengaduk ultrasonik telah berhasil menghasilkan material komposit berstruktur nano dimana membran komposit Nafion-SiO₂-PWA telah terbukti dapat menggantikan membran Nafion murni terutama pada suhu tinggi dan kelembaban rendah.

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa membran komposit mempunyai konduktivitas lebih tinggi dibandingkan dengan membran Nafion murni pada kelembaban rendah. Fenomena dibalik peningkatan kinerja membran komposit dapat dijelaskan dengan menggunakan model kondensasi kapiler. Komponen anorganik dalam ukuran lebih kecil dari 10 nm dapat masuk ke dalam kluster Nafion. Keberadaan komponen anorganik yang bersifat higroskopis seperti SiO₂ dan PWA di dalam kluster polimer Nafion dapat mengikat air di dalam pori-pori membran sehingga kadar penyerapan air oleh membran komposit lebih tinggi dibandingkan dengan membran Nafion murni.

Keberadaan air di dalam kluster Nafion mempunyai peranan sangat penting karena perpindahan proton di dalam kluster menjadi lebih cepat dan memperpendek jalan lompatan proton dari satu kluster ke kluster berikutnya. Secara makroskopik fenomena ini nampak pada peningkatan konduktivitas membran komposit pada kelembaban rendah yang dapat diukur dengan tahanan internal (R). Pada kelembaban rendah, terjadi penguapan sebagian air yang ada di dalam pori-pori membran sehingga membran akan mengkerut (*shrinkage*).

Peranan komponen anorganik di dalam kluster Nafion adalah dapat menurunkan tenaga kinetik air dengan meningkatkan keberlikuan jalan (*tortuosity*) di dalam pori sehingga terjadi kondensasi kapiler dan molekul air tidak dapat menguap walaupun tekanan uap air di permukaan membran lebih kecil dibandingkan dengan tekanan uap air di dalam pori-pori membran. Hal ini menyebabkan membran tidak mengkerut dan konduktivitas tetap tinggi pada kelembaban rendah.

DAFTAR ACUAN

- [1]. NIGEL SAMMES (Ed.), *Fuel Cell Technology Reaching Toward Commercialization*, Springer-Verlag London Limited, (2006)
- [2]. B. SMITHA, S. SRIDAR, A. A. KHAN, *Journal of Membrane Science*, **259** (2005) 10-26

- [3]. L.C. KLEINY, DAIKO, M. APPARICIO, F. DAMAG, *Journal of Polymer*, **46** (2005) 4504-4509
- [4]. V. RAMANI, H.R. KUNZ and J.M. FENTON, *Journal of Membrane Science*, **266** (2005) 110-114
- [5]. CULLEN R. BUIE, JONATHAN D. POSNER, TIBOR FABIAN, SUK-WON CHAA, DAEJOONG KIMA, FRITZ B. PRINZ, JOHN K. EATON, JUAN G. SANTIAGO, *Journal of Power Sources*, **161** (2006) 191-202
- [6]. MAHRENI, Sintesis dan Penggunaan Membran Komposit Sebagai Elektrolit Sel Fuel Membran Penukar Proton, *Tesis Dr. Falsafah, Jabatan Kejuruteraan Kimia dan Proses, Universiti Kebangsaan Malaysia*, (2009)
- [7]. J.J. BASCHUK, LI X., *Journal of Power Sources*, **86** (2000) 181