

Reka Bentuk Optimum Mikro Sel Fuel Metanol Langsung untuk Peralatan Mudah Alih (Design of an Optimal Micro Direct Methanol Fuel Cell for Portable Applications)

M.M. AHMAD, S.K. KAMARUDIN* & W.R.W. DAUD

ABSTRAK

Halangan utama untuk mengkomersialkan mikro sel fuel metanol langsung (μ SFML) sebagai sumber kuasa bagi peralatan mudah alih adalah prestasi sel fuel itu sendiri. Dalam kajian ini, didapati penghasilan keluaran kuasa yang tinggi oleh μ SFML iaitu 14.10 mW pada 4 cm² keluasan kawasan aktif dengan menggunakan muatan mangkin yang rendah, 0.5 mg cm⁻² pada bahagian katod telah diperolehi. Penentuan parameter-parameter reka bentuk yang optimum juga telah dikenal pasti. Di samping itu, pengujian ke atas prestasi, jangka hayat dan voltan arus terbuka (OCV) turut dilakukan.

Kata kunci: μ SFML; muatan mangkin; pengoptimuman

ABSTRACT

The main constraint for the commercialization of micro Direct Methanol Fuel cell (μ DMFC) for small power generation is the performance of the fuel cell. In this study, a high-power μ DMFC with a power output of 14.10 mW on an active area of 4 cm² and catalyst loading of 0.5 mg cm⁻² cathode was successfully developed. The optimal parameters for methanol concentration and catalyst loading were determined. Besides that, testing of performance, long term and open circuit voltage (OCV) was also performed.

Keywords: μ DMFC; catalyst loading; optimization

PENGENALAN

Penggunaan mikro sel fuel sebagai sumber kuasa bagi peralatan mudah alih yang setanding dengan penggunaan bateri ion litium telah menarik minat ramai penyelidik untuk mengkaji potensinya secara lebih mendalam. Penghasilan arus secara terus serta permintaan terhadap alat penyimpan tenaga yang memberikan tempoh pengoperasian lebih lama tanpa memerlukan penjanaan tenaga elektrik luaran juga menjadi faktor yang menjadikan mikro sel fuel berpotensi untuk menggantikan bateri. Mikro sel fuel juga mempunyai 5-10 kali lebih besar ketumpatan tenaga daripada bateri pengecas semula.

Pembangunan μ SFML dalam usaha meningkatkan prestasi telah banyak dilakukan oleh ramai penyelidik. Chen & Yang (2003) telah melakukan pengoptimuman prestasi himpunan membran elektrod (MEA) dengan mengawal parameter fizikal seperti muatan elektro mangkin pada kedua-dua bahagian elektrod, komposisi elektro mangkin dan ketebalan lapisan mangkin. Zhang et al. (2007) mengkaji pengaruh lapisan penyerapan gas (GDL) di anod ke atas prestasi SFML pada suhu yang rendah yang mana pencirian pengangkutan jisim dan penyingkiran CO₂ dilakukan. Zhong et al. (2008) memperkenalkan SFML dengan struktur yang padat serta penghantaran bahan api yang ringkas. Krewer et al. (2009), mengkaji perubahan prestasi MEA pada keadaan parameter eksperimen yang berbeza di dalam SFML.

Walaupun telah banyak kajian telah dijalankan ke atas sistem SFML, kekangan utama untuk mengkomersialkannya

adalah prestasi sel fuel itu sendiri. Selain itu, terdapat juga kekangan daripada segi kecekapan dan ketumpatan kuasa yang rendah disebabkan aktiviti elektro-mangkin yang rendah, keracunan di anod akibat daripada berlakunya penyerapan ke atas produk pertengahan iaitu karbon monoksida serta pindah silang metanol yang tinggi melalui membran Nafion.

Objektif utama kajian ini adalah untuk membangunkan sistem μ SFML berkuasa tinggi untuk penjanaan kuasa yang kecil menggunakan keluasan kawasan aktif yang kecil dan muatan mangkin yang rendah. Potensi μ SFML digambarkan sebagai lengkung prestasi. Kim et al. (2004) mendapati pengoptimuman muatan mangkin diperolehi dengan menggunakan kaedah tuangan yang baharu. Kombinasi muatan mangkin antara bahagian anod dan katod penting bagi mendapatkan ketumpatan kuasa yang tinggi serta prestasi jangka hayat yang panjang. Walaupun secara umumnya muatan mangkin yang tinggi akan memberikan ketumpatan kuasa yang tinggi tetapi ianya juga meningkatkan kos. Maka, adalah amat penting bagi menentukan kombinasi nilai muatan mangkin yang optimum bagi kedua-dua bahagian elektrod.

SPESIFIKASI SISTEM

Sistem μ SFML terdiri daripada sepasang plat, sepasang gasket, sepasang pengumpul arus dan satu himpunan membran elektrod (MEA). Sistem ini menggunakan larutan metanol sebagai sumber fuel dan dioperasikan pada

keadaan ambien (23 °C, 1 atm). Plat diperbuat daripada poli-metil metakrilat (PMMA) dan difabrikasi menggunakan mesin pemonitoran kawalan berangka *Computer Numerical Control, CNC* dan mesin pemotong laser yang terdapat di Institut Sel Fuel, UKM.

Keluli tahan karat (SS) berbentuk jaringan dijadikan sebagai pengumpul arus (CC) (Yang et al. 2007). Ini kerana jaringan keluli tahan karat mempunyai kekonduksian dan sifat mekanikal yang lebih baik. Penggunaan gasket yang diperbuat daripada getah silikon bertujuan untuk mengelakkan sebarang kebocoran sepanjang sistem sel fuel beroperasi. Ruang takungan larutan metanol yang difabrikasi pada plat bahagian anod berupaya diisi dengan 1.5 mL larutan metanol untuk memastikan ianya dapat berinteraksi dengan elektrod pada bahagian anod secara langsung. Semua uji kaji dijalankan sepenuhnya dalam keadaan pasif yang mana penghantaran fuel dan oksigen berlaku sepenuhnya secara neutral (Chen & Yang 2003). Larutan metanol yang berbeza kepekatan dimasukkan ke dalam ruangan takungan larutan metanol dengan menggunakan picagari melalui lubang masukkan pada plat atas. Penghasilan prototaip sistem μ SFML melibatkan beberapa langkah yang perlu dilakukan terlebih dahulu sebelum ujian prestasi dijalankan. Antaranya, proses pra perawatan membran Nafion 117 (DuPont), pembuatan mangkin elektrod dan seterusnya fabrikasi himpunan membran elektrod (MEA).

Membran Nafion 117 digunakan selepas melalui proses pra perawatan yang mana proses ini dimulakan dengan merendam membran ke dalam air pengionan pada suhu 80 °C selama satu jam. Kemudian membran dipanaskan pada suhu 80 °C di dalam 3% H₂O₂ selama satu jam dan direndam menggunakan air pengionan selama 20 minit. Selepas itu, membran direndam ke dalam 1 M H₂SO₄ pada suhu 80 °C selama satu jam. Langkah terakhir melibatkan proses rendaman membran ke dalam air yang mendidih dan seterusnya dibilas sehingga neutral dengan air suling serta disimpan di dalam air suling sebelum ianya dapat digunakan untuk membentuk himpunan elektrod membran (MEA).

Dalam penyelidikan ini, mangkin yang digunakan adalah daripada jenis tersokong karbon iaitu Pt/Ru 50% (1:1) XC-72R dan Pt 50% XC-72R. Kebiasaannya, logam binari Pt/Ru digunakan pada bahagian anod manakala logam Pt di bahagian katod (Yang et al. 2007). Penggunaan mangkin Ru di bahagian anod adalah bertujuan untuk menyokong nyaherapan hasil pertengahan iaitu CO pada permukaan Pt semasa tindak balas pengoksidaan metanol berlaku (Chen et al. 2005; Qi & Kaufman 2002). Mangkin Ru bertindak sebagai oksigen bagi memastikan gas CO bertindak balas dengannya bagi membentuk CO₂ di dalam sistem. Ini penting kerana ianya akan mempengaruhi potensi SFML yang mana pembentukan gas CO akan menyebabkan berlakunya keracunan di dalam sistem. Manakala platinum terbukti sebagai mangkin terbaik dalam tindak balas pengoksidaan metanol dan penurunan oksigen dalam sel fuel.

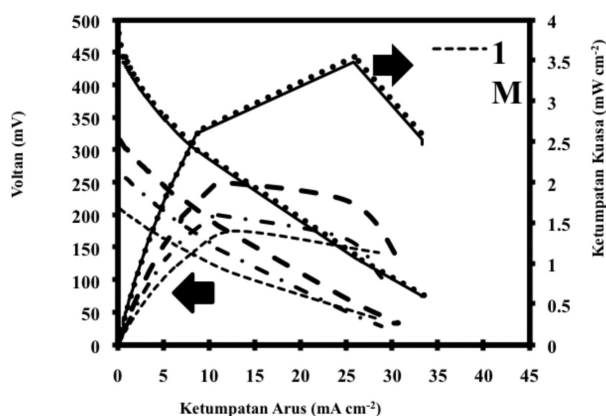
Dakwat mangkin disediakan dengan menyebarkan sejumlah mangkin ke dalam larutan air pengionan, isopropil alkohol dan larutan Nafion 5 w%. Setelah itu, dakwat mangkin tersebut dituang dan disapu secara manual di atas kertas karbon-PTFE untuk dijadikan elektrod. Proses tuangan dilakukan secara lapisan demi lapisan disebabkan penggunaan muatan mangkin yang tinggi di kedua-dua bahagian. Pengoptimuman muatan mangkin dilakukan dengan menetapkan nilai optimum pada bahagian katod terlebih dahulu dengan menggunakan nilai yang tetap pada bahagian anod iaitu bervariasi muatan mangkin pada katod 0.5 dan 1.5 mg cm⁻² 50% Pt dengan muatan mangkin pada anod dimalarkan, 1.5 mg cm⁻² 50% Pt/Ru. Nilai optimum muatan mangkin yang diperolehi pada bahagian katod ini akan dimalarkan pula dalam menentukan nilai muatan mangkin optimum di bahagian anod. Muatan mangkin pada anod divariasikan 3.0, 4.0 dan 5.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru. MEA diperolehi dengan mengenakan tekanan haba iaitu 20 kg cm⁻² dengan suhu 130°C kepada elektrod anod serta katod yang dilapisi lapisan membran Nafion 117 ditengah-tengah selama 3 minit. Membran berfungsi sebagai pemisah antara bahagian anod dan katod serta menghalang pencampuran aliran metanol ke katod. Gabungan ketiga-tiga bahagian iaitu elektrodi anod serta katod dan membran Nafion 117 akan membentuk satu MEA. Bagi membentuk sistem μ SFML, MEA yang dihasilkan akan digabungkan diantara plat, gasket dan juga pengumpul arus. Kemudian, μ SFML diuji prestasinya dengan menggunakan sistem beban elektronik Prodigit 3315 D.

Kepekatan larutan metanol optimum adalah berbeza bagi suatu sistem SFML yang dibangunkan sama ada dalam keadaan pasif ataupun aktif. Oleh sebab sistem yang dibangunkan dalam kajian ini merupakan sistem pasif, maka pergerakan fuel di dalam sistem berlaku akibat perbezaan kepekatan fuel iaitu larutan metanol di dalam sistem sepanjang tindak balas berlaku. Perbezaan kepekatan inilah yang mendorong pengaliran elektron dan proton berlaku lebih cepat. Bagi mendapatkan kepekatan optimum bagi sistem pasif SFML yang dibangunkan, kepekatan larutan metanol yang berbeza iaitu 1 M - 5 M digunakan. Larutan metanol dibiarkan selama lapan jam di dalam tangki takungan sebelum ujian prestasi dilakukan. Ujian prestasi dilakukan bagi mendapatkan nilai ketumpatan kuasa serta ketumpatan arus maksimum.

Muatan mangkin merupakan parameter yang amat penting dalam menentukan potensi SFML. Secara teorinya, bagi mendapatkan potensi yang tinggi, penggunaan muatan mangkin yang tinggi perlu digunakan. Namun, penggunaan muatan mangkin yang tinggi juga akan mendatangkan masalah kepada MEA itu sendiri. Oleh sebab itu, muatan mangkin pada bahagian anod dan katod perlu dioptimumkan penggunaannya. Nilai muatan mangkin yang berbeza digunakan bagi mendapatkan nilai muatan mangkin yang optimum yang mana memberikan ketumpatan kuasa yang tinggi.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Rajah 1 menunjukkan prestasi μ SFML pada kepekatan metanol yang berbeza dengan 5.0 mg cm^{-2} mangkin di anod dan 0.5 mg cm^{-2} mangkin di katod. Setiap MEA yang digunakan akan dioperasikan selama 8 jam sebelum ujian prestasi pada kepekatan metanol yang berbeza dilakukan. Bentuk graf yang dihasilkan bagi semua kepekatan adalah sama tetapi memberikan nilai keluaran ketumpatan kuasa maksimum yang berbeza. Nilai ketumpatan kuasa maksimum meningkat dengan peningkatan kepekatan metanol suapan dan mencapai nilai ketumpatan kuasa maksimum, 3.57 mW cm^{-2} pada kepekatan metanol 4.0 M . Nilai ketumpatan kuasa maksimum berkurang pada kepekatan metanol 5 M . Keputusan yang diperolehi sama seperti kajian yang dilakukan oleh Kim et al. (2004) yang telah mengkaji kesan kepekatan metanol ke atas sistem sel pasif.



RAJAH 1. Lengkung prestasi μ SFML pada kepekatan metanol yang berbeza

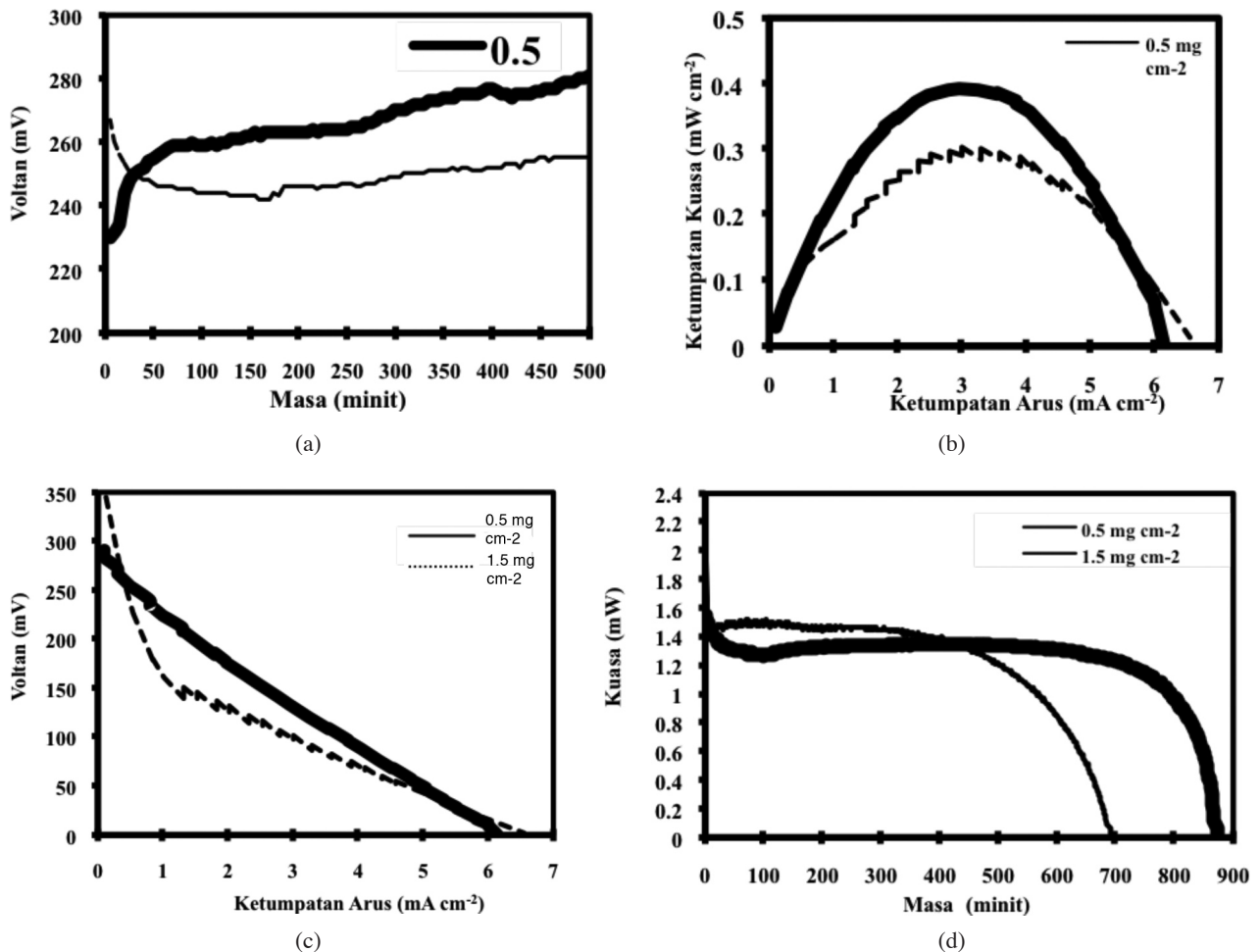
Terdapat dua faktor yang mempengaruhi kepada peningkatan kepekatan metanol optimum (Bae et al. 2006). Pertama, dipengaruhi oleh pengangkutan jisim metanol yang perlahan dalam sistem sel pasif yang mana ianya berlaku secara neutral. Berbeza dengan sistem sel aktif melibatkan daya penukaran yang dibekalkan ke atas sistem. Oleh sebab itu, kepekatan metanol yang tinggi diperlukan untuk mengatasi masalah pengangkutan jisim yang perlahan di dalam sistem pasif. Keduanya, berlaku kenaikan suhu di dalam sel disebabkan oleh pengoksidaan yang berlaku akibat pindah silang metanol pada bahagian katod yang akan membebaskan haba. Peningkatan kepekatan metanol akan meningkatkan kadar pindah silang metanol serta meningkatkan suhu sel seterusnya berlaku peningkatan tindak balas kinetik di kedua-dua bahagian di anod dan katod. Walau bagaimanapun, peningkatan kepekatan metanol juga akan menyebabkan berlakunya penurunan prestasi sel disebabkan oleh peningkatan pada keupayaan lampau yang berlaku di bahagian katod. Oleh sebab itu, kepekatan metanol optimum dalam keadaan pasif adalah berkaitan rapat dengan hubungan antara suhu, kadar pengangkutan metanol dan keupayaan campuran.

Pada kebiasaannya, prestasi sel fuel digambarkan oleh lengkung kekutuban yang mana ianya merupakan graf voltan sel melawan ketumpatan arus. Dalam sistem aktif SFML, lengkung kekutuban boleh diukur pada keadaan sel yang stabil yang mana kepekatan bahan tindak balas dan suhu operasi dikawal oleh peralatan tambahan. Walau bagaimanapun, nilai voltan pada ketumpatan arus di dalam sistem pasif SFML berubah dengan masa disebabkan kepekatan metanol dalam tangki takungan mengalami pengurangan sepanjang proses pengoksidaan berlaku. Chen et al. (2007) telah mengenal pasti beberapa keadaan operasi bagi mentafsirkan data kekutuban bagi mencirikan prestasi SFML pada keadaan pasif.

Pengoptimuman muatan mangkin dilakukan dengan menggunakan muatan mangkin yang berbeza pada bahagian katod yang mana ianya ditentukan terlebih dahulu iaitu 0.5 dan 1.5 mg cm^{-2} 50% Pt serta nilai muatan mangkin yang malar pada bahagian anod, 1.5 mg cm^{-2} 50% Pt/Ru diuji dan ditunjukkan pada Rajah 2. Diperhatikan bahawa daripada Rajah 2(a)-2(c), bahawa 0.5 mg cm^{-2} 50% Pt pada bahagian katod memberikan nilai yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan 1.5 mg cm^{-2} 50% Pt.

Pembangunan sistem SFML perlu mempertimbangkan masa pengoperasian yang mana ianya telah dibuktikan adalah lebih lama berbanding dengan sumber kuasa sedia ada seperti bateri litium (Bae et al. 2006). Dalam penyelidikan ini, kestabilan dan tempoh kestabilan kuasa bagi kedua-dua kombinasi muatan mangkin ini ditunjukkan dalam Rajah 2 (d) iaitu graf jangka hayat. Kestabilan kuasa bermakna sel menghasilkan keluaran kuasa dengan nilainya adalah malar pada suatu tempoh masa. Muatan mangkin 1.5 mg cm^{-2} memberikan nilai kestabilan kuasa yang tinggi iaitu 1.58 mW selama 6 jam manakala bagi muatan mangkin 0.5 mg cm^{-2} memberikan nilai kestabilan kuasa yang rendah jika dibandingkan dengan 1.5 mg cm^{-2} iaitu 1.28 mW tetapi dalam tempoh yang lebih lama iaitu 11 jam. Selepas tempoh kestabilan kuasa, didapati nilai kuasa akan berkurang disebabkan larutan metanol di dalam tangki teroksida sepenuhnya. Walau bagaimanapun, pemilihan muatan mangkin optimum pada bahagian katod adalah 0.5 mg cm^{-2} 50% Pt disebabkan oleh ketumpatan kuasa maksimum yang tinggi serta tempoh kestabilan kuasa yang lebih lama serta suhu pengoperasian yang stabil. Ini menggambarkan bahawa prestasi sistem pasif μ SFML boleh dicirikan dengan mendapatkan data kekutuban apabila suhu operasi sel di bawah keadaan litar terbuka mencapai nilai yang stabil. Suhu sel pada keadaan mantap adalah tinggi berbanding pada permulaan operasi sel. Peningkatan suhu operasi sel akan meningkatkan kadar tindak balas pengoksidaan metanol dan penurunan oksigen yang mana pada masa yang sama akan meningkatkan prestasi sel yang diukur pada kestabilan suhu.

Apabila nilai muatan mangkin 0.5 mg cm^{-2} 50% Pt diketahui, nilai muatan mangkin pada bahagian anod pula dioptimumkan dengan mevariasikan nilai muatan mangkin Pt/Ru iaitu dari 3.0 - 5.0 mg cm^{-2} . Keputusan yang diperolehi ditunjukkan dalam Rajah 3(a)-(d). Profil voltan

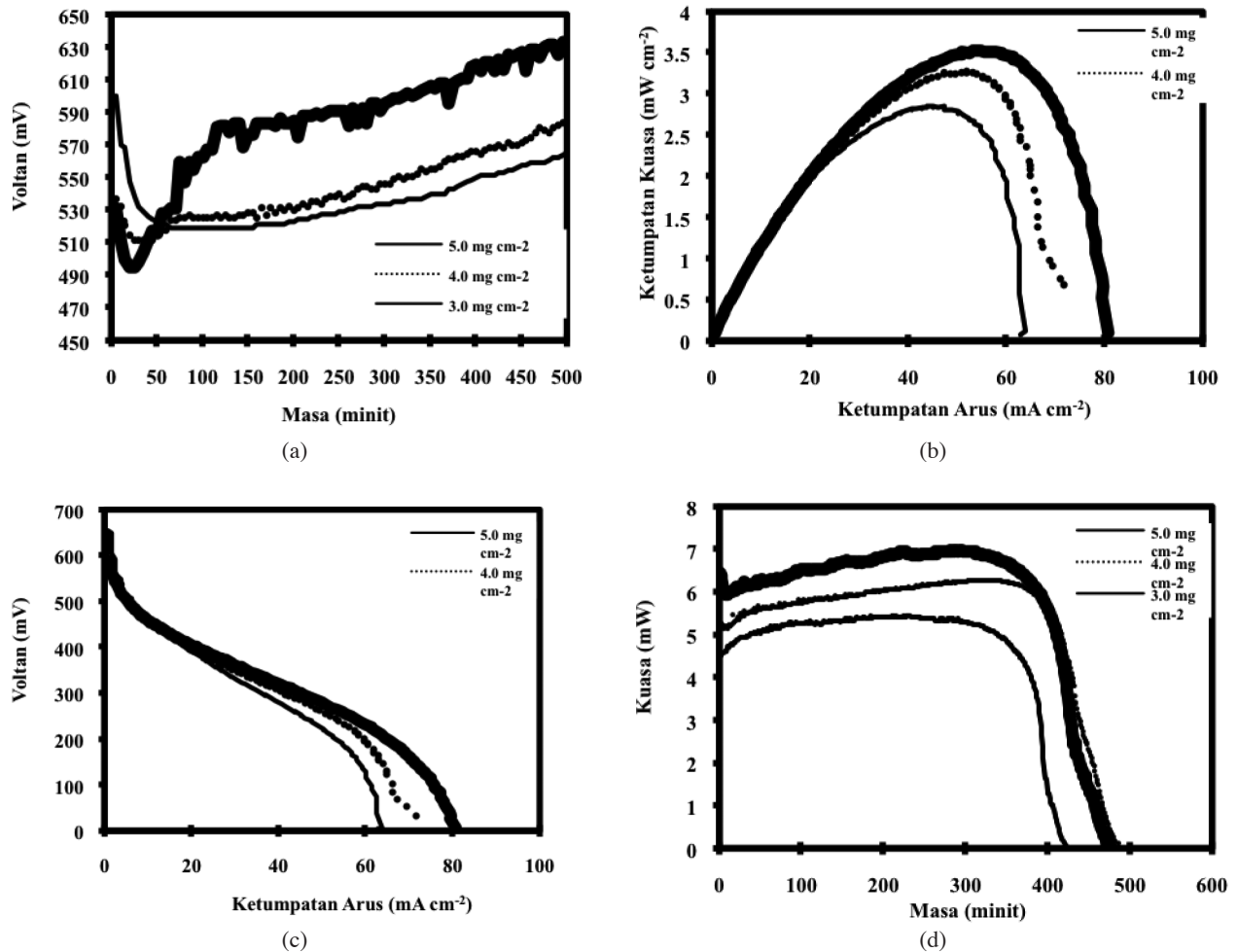


RAJAH 2. Pengoptimuman muatan mangkin pada bahagian katod (1.5 mg cm⁻² 50% Pt/Ru pada bahagian anod dan 0.5 dan 1.5 mg cm⁻² 50% Pt pada bahagian katod) (a) OCV (b) prestasi (c) lengkung kekutuban (d) lengkung jangka hayat

sel diperolehi daripada Rajah 3(a) yang mana menunjukkan nilai voltan yang diperolehi semasa pengoperasian dijalankan. Didapati nilai voltan meningkat terhadap masa. Diperhatikan daripada Rajah 3(b), nilai maksimum ketumpatan kuasa dan ketumpatan arus meningkat dengan peningkatan muatan mangkin. Ini adalah kerana muatan mangkin yang tinggi akan menyebabkan keluasan permukaan aktif bertambah besar dan meningkatkan rintangan pengangkutan jisim terhadap pengangkutan metanol. Nilai ketumpatan kuasa dan ketumpatan arus maksimum bagi muatan mangkin 5.0, 4.0 dan 3.0 mg cm⁻² di anod adalah 3.53 mW cm⁻² dan 54.51 mA cm⁻², 3.28 mW cm⁻² dan 51.86 mA cm⁻² dan 2.85 mW cm⁻² dan 45.16 mA cm⁻². Diperhatikan, muatan mangkin 5.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru memberikan nilai ketumpatan kuasa maksimum yang tinggi jika dibandingkan dengan muatan mangkin yang lain. Ianya turut dibuktikan oleh lengkung kekutuban iaitu Rajah 3 (c). Rajah 3 (d) pula adalah lengkung jangka hayat yang menunjukkan nilai dan tempoh kestabilan kuasa untuk semua kombinasi mangkin. Didapati, muatan mangkin 5.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru memberikan kestabilan kuasa yang tinggi iaitu 7 mW diikuti oleh 4.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru iaitu 6 mW manakala 3.0 mg cm⁻² 50% Pt/

Ru adalah 5 mW. Tetapi didapati tempoh kestabilan bagi semua kombinasi adalah lebih kurang sama iaitu selama 6 jam. Selepas 6 jam, didapati kuasa bagi semua kombinasi muatan mangkin akan berkurang disebabkan metanol yang terdapat di dalam tangki takungan telah dioksidakan sepenuhnya. Daripada lengkung-lengkung dalam Rajah 3, dapat disimpulkan bahawa nilai muatan mangkin pada bahagian anod yang optimum adalah 5.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru.

Nilai ketumpatan kuasa maksimum yang diperolehi daripada kajian ini, 3.53 mW cm⁻² dibandingkan dengan kajian yang dilakukan oleh penyelidik lain. Lam et al. (2009) telah menemui teknik terbaru dalam penghasilan elektrod. Namun begitu nilai ketumpatan kuasa maksimum yang diperolehi adalah lebih kurang sama dengan nilai ketumpatan kuasa yang dihasilkan dalam kajian ini iaitu 3.54 mW cm⁻² dengan penggunaan muatan mangkin di anod 4 mg cm⁻² Pt/Ru manakala 1.34 mg cm⁻² Pt muatan mangkin di katod. Didapati, muatan mangkin di katod adalah tinggi jika dibandingkan dengan 0.5 mg cm⁻² Pt yang digunakan dalam kajian ini. Selain itu, nilai ketumpatan kuasa maksimum yang dihasilkan daripada kajian oleh Ito et al. (2006) adalah 3 mW cm⁻² dengan penggunaan muatan



RAJAH 3. Pengoptimuman muatan mangkin pada bahagian anod (5.0, 4.0 dan 3.0 mg cm⁻² 50% Pt/Ru pada bahagian anod dan 0.5 mg cm⁻² 50% Pt pada bahagian katod) (a) OCV (b) prestasi (c) lengkung keketuban (d) lengkung jangka hayat

mangkin yang tinggi di kedua-dua bahagian iaitu 5 mg cm⁻². Nilai ketumpatan kuasa maksimum yang diperolehi dengan kombinasi parameter-parameter optimum di dalam kajian ini adalah setanding dengan nilai yang diperolehi oleh penyelidik lain. Secara keseluruhannya, dalam penyelidikan ini pembangunan sistem μ SFML yang dihasilkan adalah melibatkan kos yang rendah daripada segi pengurangan kuantiti mangkin di dalam sistem tetapi mempunyai nilai ketumpatan kuasa maksimum yang tinggi. Kajian lanjutan dicadangkan dalam usaha untuk meningkatkan nilai keluaran kuasa dengan melakukan gabungan sel secara tindanan seterusnya menguji prestasi sistem μ SFML yang telah dihasilkan ke atas peralatan mudah alih.

KESIMPULAN

Dalam penyelidikan ini, pembangunan sistem tunggal μ SFML menggunakan kaedah fabrikasi secara konvensional dengan penghasilan ketumpatan kuasa maksimum yang tinggi dengan keluasan kawasan aktif yang kecil dan muatan mangkin yang rendah telah dijalankan. Penyelidikan bagi mendapatkan kombinasi optimum muatan mangkin di

anod dan katod dalam sistem pasif μ SFML juga dijalankan. Penghasilan nilai keluaran kuasa iaitu 14.10 mW oleh sistem tunggal μ SFML dengan keluasan kawasan aktif 4 cm² berjaya diperolehi. Kombinasi muatan mangkin yang optimum dibahagian anod, 5.0 mg cm⁻²Pt/Ru dan katod, 0.5 mg cm⁻²Pt telah dikenal pasti.

PENGHARGAAN

Setinggi penghargaan ditujukan kepada bantuan kewangan yang diberikan oleh Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI), di atas Geran Universiti Penyelidikan bernombor UKM-GUP-BTT-07-30-192.

RUJUKAN

- Bae, B.C., Kho, B.K., Lim, T.H., Oh, I.H., Hong, S.A. & Ha, H.Y. 2006. Performance evaluation of passive DMFC single cell. *Journal of Power Sources* 158: 1256-1261.
- Chen, C.Y. & Yang, P. 2003. Performance of an air-breathing direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* 123: 37-42.
- Chen, C.Y., Yang, P., Lee, Y.S. & Lin, K.F. 2005. Fabrication of electro catalyst layers for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 141: 24-29.

- Chen, R. & Zhao, T.S. 2007. Performance characterization of passive direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 167: 455-460.
- Ito, T., Kimura, K. & Kunitatsu, M. 2006. Characteristics of micro DMFCs array fabricated on flexible polymer substrate. *Electrochemistry Communications* 8: 973-976.
- Kim, D., Cho, E.A., Hong, S.A., Oh, I.H. & Ha, H.Y. 2004. Recent progress in passive direct methanol fuel cell at KIST. *Journal of Power Sources* 130: 172-177.
- Krewer, U., Park, J.Y., Lee, J.H., Cho, H.J., Pak, C.H., You, D.J. & Lee, Y.H. 2009. Low and high temperature storage characteristics of membrane electrode assemblies for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 187: 103-111.
- Lam, A., Wilkinson, D.P. & Zhang, J. 2009. A novel single electrode supported direct methanol fuel cell. *Electrochemistry Communications* 11: 1530-1534.
- Qi, Z. & Kaufman, A. 2002. Open circuit voltage and methanol crossover in DMFCs. *Journal of Power Sources* 110: 177-185.
- Yang, W.M., Chou, S.K. & Shu, C. 2007. Effect of current collector structure on performance of passive micro direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* 164: 549-554.
- Zhang, J., Yin, G.P., Lai, Q.Z., Wang, Z.B., Cai, K.D. & Liu, P. 2007. The influence of anode gas diffusion layer on the performance of low temperature DMFC. *Journal of Power Sources* 168: 453-458.
- Zhong, L., Wang, X., Jiang, Y., Zhang, Q., Qiu, X., Zhou, Y. & Liu L. 2008. A micro-direct methanol fuel cell stack with optimized design and micro fabrication. *Sensors & Actuators* 143: 70-76.

Institut Sel Fuel
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor D.E.
Malaysia

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ctie@vlsi.eng.ukm.my

Diserahkan: 28 April 2009

Diterima: 23 November 2009