

Reka Bentuk dan Pembangunan Mikro Sel Fuel Metanol Langsung (μ SFML) untuk Aplikasi Mudah Alih

(Design and Development of Micro Direct Methanol Fuel Cell
(μ DMFC) for Portable Application)

N. HASHIM, S.K. KAMARUDIN*, W.R.W. DAUD

ABSTRAK

Sel tunggal dan berbilang sel metanol langsung berskala mikro dengan luas permukaan 1.0 cm^2 beroperasi secara pasif telah dibangunkan dan diuji. Gas oksigen telah diambil dari persekitaran dan larutan metanol disimpan pada ruang tersedia pada bahagian anod. Prestasi sel tunggal diuji dengan menggunakan beberapa kepekatan metanol antara 1.0 M hingga 5.0 M dan keputusan menunjukkan kepekatan 4.0 M memberikan prestasi yang optimum pada operasi sel. Stek yang mengandungi 6 sel difabrikasi dan diuji dengan menggunakan kepekatan metanol optimum iaitu 4.0 M dan tenaga yang terhasil dengan muatan mangkin yang berbeza pada anod dibandingkan. Kombinasi muatan mangkin 3.0 mg cm^{-2} Pt/Ru pada anod dan 2.0 mg cm^{-2} Pt pada katod memberikan nilai tenaga yang paling tinggi antara kombinasi lain iaitu 12.05 mW pada 1.08 V dan 11.2 mA .

Kata kunci: Muatan mangkin; reka bentuk; sel fuel mikro; SFML

ABSTRACT

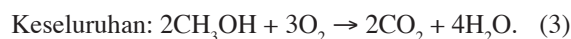
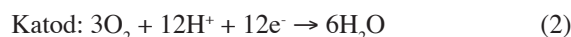
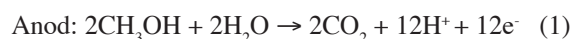
A passive, air-breathing single cell and a multi-cell stack micro direct methanol fuel cell with 1.0 cm^2 active area were designed, fabricated and tested. The fuel cell was completely passive without any ancillary device such as pump. Oxygen was taken from the surrounding air, and the methanol solution was stored in a built-in reservoir. The performance of the single cell was tested with different methanol concentrations ranging from 1.0 M to 5.0 M , and the optimum performance was achieved by using methanol at a concentration of 4.0 M . A stack with 6 cells was fabricated and tested with the optimum methanol concentration of 4.0 M , and power levels produced by different catalyst loadings on the anode were compared. The combination of a catalyst loading of 3.0 mg cm^{-2} Pt/Ru on the anode and 2.0 mg cm^{-2} Pt on the cathode yielded the highest power of 12.05 mW at 1.08 V and 11.2 mA .

Keywords: Catalyst loading; design; DMFC; micro fuel cell

PENGENALAN

Antara peralatan yang berpotensi sebagai sumber kuasa mudah alih adalah sel fuel metanol langsung yang memberikan kelebihan seperti ketumpatan tenaga yang tinggi, kurang pencemaran, masa mula yang cepat, ringan dan lebih padat mengatasi bateri pengecas, serta mudah digunakan dibandingkan dengan jenis fuel sel yang lain untuk peralatan mudah alih (Baglio et al. 2009; Cao et al. 2008). Kebelakangan ini, banyak syarikat termasuk Motorola, Samsung, Toshiba, DuPont, Polyfuel, NEC, MTI (Mechanical Technology Inc.) LG Chem, Casio dan Smart Fuel Cell mengusahakan penyelidikan ke arah mengkomersialkan sumber tenaga mikro ini (Kim et al. 2004).

Mikro-SFML adalah sel fuel yang mampu menukarkan terus tenaga kimia antara tindak balas metanol dan bahan pengoksida (oksigen atau udara) kepada tenaga elektrik. Tindak balas keseluruhan yang terhasil dalam sistem ini adalah tindak balas redoks yang boleh diungkapkan melalui persamaan:



Prestasi mikro-SFML bergantung kepada, kinetik, reka bentuk dan parameter-parameter operasi (Kulikovskiy et al. 2003). Pembangunan sel fuel elektrolit polimer (PEFCs) kini berdepan dengan pelbagai penghalang besar kepada peningkatan prestasi sel, seperti tindak balas elektrokimia yang perlahan pada permukaan mangkin dan aliran silang metanol merentasi membran elektrolit polimer (Dillon et al. 2004; Kulikovskiy et al. 2003; Ma et al. 2003; Prabhuram et al. 2004; Ye et al. 2005). Pengurusan air dan gas mewakili isu kritikal yang lain yang perlu diberi perhatian dalam meningkatkan prestasi sel dan melebarkan masa operasi sel untuk satu tempoh masa yang lebih lama (Lua et al. 2004). Kesemua faktor dan isu ini membentuk satu halangan yang perlu diatasi untuk menghasilkan sistem

mikro-SFML yang berfungsi sebagai sumber tenaga masa hadapan menggantikan bateri dan sumber tenaga yang lain. Ketumpatan tenaga yang tinggi, keupayaan masa mula yang cepat dan kematangan teknologi sel fuel, ia menjadikan teknologi SFML ini sebagai satu pilihan yang menarik untuk senario yang berkuasa rendah (Bostic et al. 2004).

Ramai penyelidik telah meneliti dan mengkaji pembangunan mikro-SFML ini. Mereka, memfokus kepada prestasi Himpunan Membran-Elektrod (MEA) untuk mikro-SFML (Liu 2006; Yang et al. 2007). Beberapa reka bentuk dan prosedur fabrikasi juga telah diperkenalkan untuk meningkatkan prestasi mikro-SFML (Ito et al. 2006; Jeng et al. 2009; Nakagawa et al. 2009; Zhang et al. 2007; Zhong et al. 2008). Terdapat juga penulisan yang meneliti permodelan dan reka bentuk konsep untuk tujuan yang sama (Ge et al. 2007; Rawool et al. 2006; Seong et al. 2005; Schultz et al. 2005; Yang et al. 2007). Walaupun terdapat banyak usaha untuk mengkomersialkan produk ini, tetapi masih terdapat banyak kekangan antaranya ialah saiz, kos dan untuk mengekalkan masa operasinya. Ramai penyelidik telah mencuba untuk membangunkan SFML bersaiz mikro menggunakan teknologi sistem mikro-elektro-mekanikal (MEMS) (Cao et al. 2008; Chen et al. 2008; Ge et al. 2007; Kim et al. 2008; Kuriyama et al. 2008; Schultz et al. 2005; Yang et al. 2007; Zhang et al. 2007), tetapi berdepan dengan reka bentuk yang terlalu kompleks, kos fabrikasi yang mahal dan akhirnya membawa kepada peningkatan kos untuk sel fuel itu sendiri.

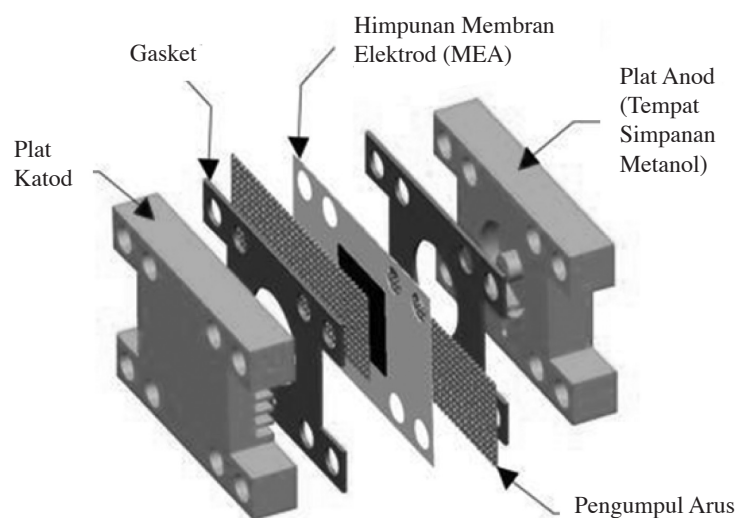
Objektif utama kajian ini adalah untuk membangunkan mikro-SFML bersifat pasif dengan struktur reka bentuk yang ringkas dan prosedur fabrikasi yang murah. Mikro-SFML dengan luas aktif 1.0 cm^2 dipilih untuk kajian ini. Prestasi untuk stek juga diuji dalam kajian ini. Mikro-SFML juga dioptimumkan dengan mengambil beberapa parameter penting seperti kepekatan metanol, muatan

mungkin dan sebagainya. Prestasi sel fuel biasanya diperlihatkan dengan lengkung polarisasi iaitu voltan melawan ketumpatan arus disamping lengkung OCV juga diberi perhatian.

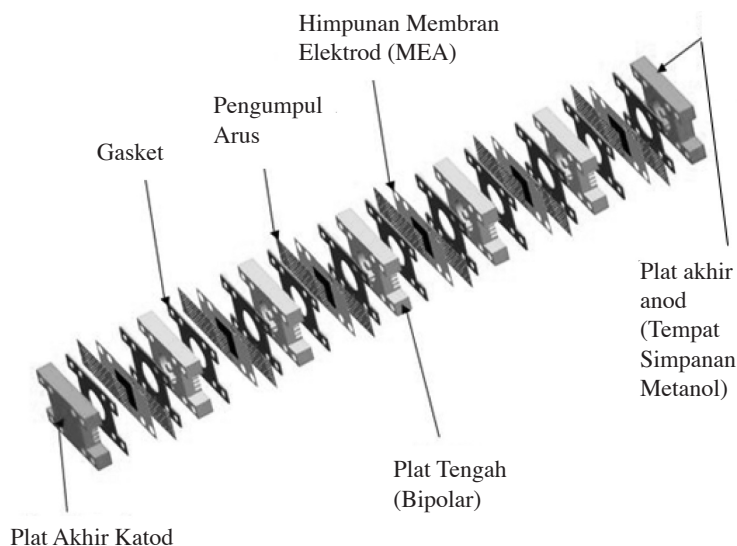
ASAS REKA BENTUK PROSES

Prototaip sel tunggal dengan reka bentuk kawasan aktif 1.0 cm^2 telah difabrikasi dengan isipadu takungan fuel sekitar 1.5 mL. Pada bahagian katod, saluran mengufuk dengan dimensi 1.0 mm untuk lebar dan 1.5 mm kedalaman direka. Corak aliran ini direka untuk tujuan memudah dan meningkatkan aliran udara secara pasif pada bahagian katod untuk melengkapkan tindakbalas kimia keseluruhan. Metanol disuntik ke dalam sel menerusi lubang suapan pada permukaan atas sel. Dimensi keseluruhan untuk sel tunggal ini adalah: $30 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. Pemasangan sel tunggal ini dikemaskan dengan menggunakan empat pasang skru dan bolt. Rajah 1 menunjukkan gambaran susunan untuk sel tunggal yang difabrikasi dalam penyelidikan ini.

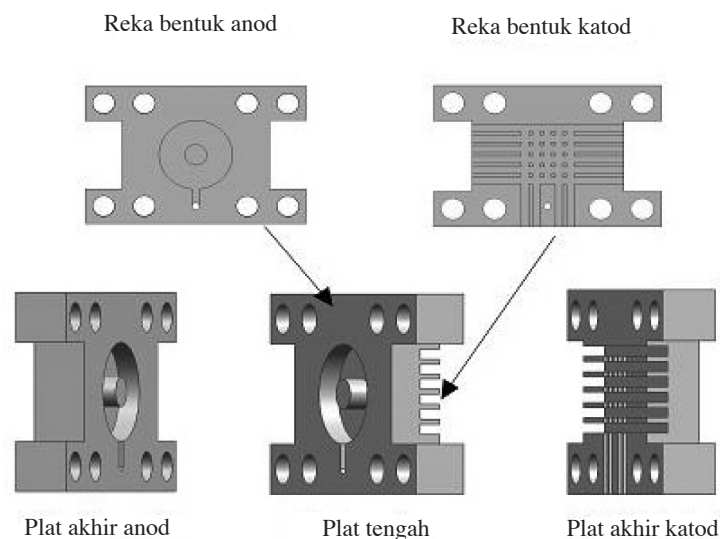
Stak mikro-SFML yang digunakan dalam penulisan ini mengandungi enam sel SFML seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Struktur ini mengandungi tujuh plat PMMA dan enam himpunan membran-elektrod (MEA) yang diletakkan berjajukan dan disambung menggunakan sambungan sesiri. Setiap pasang sel yang bersebelahan akan berkongsi satu plat tengah yang mengandungi corak aliran katod dan corak takungan fuel anod pada satu plat yang sama. Rajah 3 menjelaskan secara visual corak pada bahagian-bahagian plat anod, plat katod dan plat tengah yang dihasilkan. Corak aliran kedua-dua bahagian pada plat tengah adalah selari dengan tiada lintasan yang menghubungkan keduanya kecuali untuk lubang penjajaran dan empat lubang pengikat skru. Setiap bahagian anod mempunyai lubang suapan untuk tujuan suapan metanol ke dalam sel.



RAJAH 1. Skematik sel tunggal mikro SFML



RAJAH 2. Skematik stek mikro-SFML



RAJAH 3. Ilustrasi plat corak aliran katod, plat ruang simpanan anod dan plat tengah

METODOLOGI

Lapisan tersokong pada bahagian anod menggunakan kertas karbon tersalut Teflon (Electrochem) dengan tebal 240 μm . Buburan untuk lapisan mangkin disediakan dengan menyebarkan Pt/Ru 50% (1:1) tersokong karbon pada XC-72R untuk anod atau Pt 50% tersokong karbon pada XC-72R untuk katod ke dalam larutan Nafion 5 wt% (Gas Hub). Hasil buburan yang terbentuk disebarkan pada permukaan kertas karbon menggunakan pisau penyerak buatan sendiri. Kemudiannya, kertas karbon yang telah tersalut mangkin dikeringkan pada suhu 80°C selama 1 jam di dalam oven. Membran Nafion 117 (tebal: 183 μm , berat asas: 360 g/m^2 , konduktiviti ionik: 0.083 Scm^{-1} , DuPont) dipra-rawat dengan kaedah rendaman berjujukan ke dalam larutan 3 vol.% H_2O_2 mendidih, air

suling, larutan 1.0 M H_2SO_4 mendidih dan akhirnya air suling semula, dimana setiap langkah rendaman dalam larutan berbeza ini dilakukan selama 2 jam. Elektrod-elektrod bermangkin untuk anod dan katod kemudiannya diletakkan pada kedua-dua bahagian lapisan membran Nafion 117 yang telah dirawat membentuk lapisan terapit dan ditekan-panas (hot press) pada suhu 135°C dan 20 kgf cm^{-2} selama 3 min untuk membentuk seunit himpunan membran-elektrod (MEA).

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

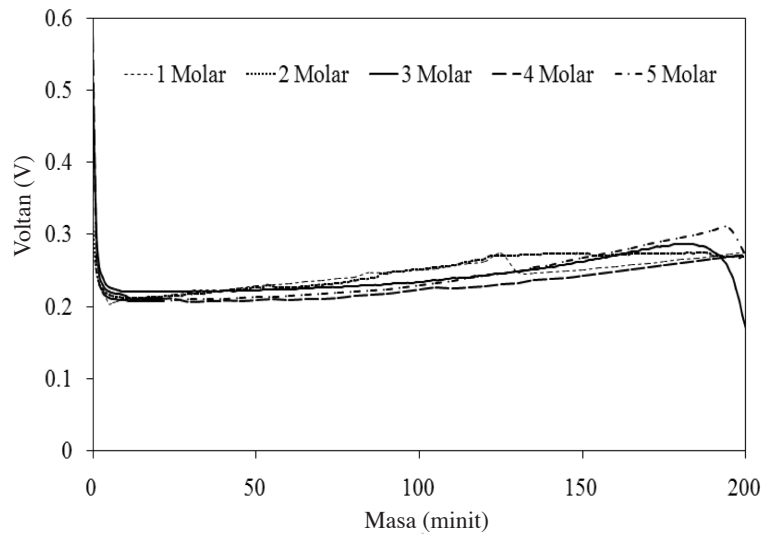
Sel tunggal dengan luas aktif 1.0 cm^2 yang mengandungi dua plat akhir (EP), dua pengumpul arus (CC) dan satu MEA telah difabrikasi. Data eksperimen disukat dan dikumpul untuk setiap kepekatan metanol dengan setiap

suapan tunggal tanpa penambahan kepada isipadu metanol sepanjang data dikumpul.

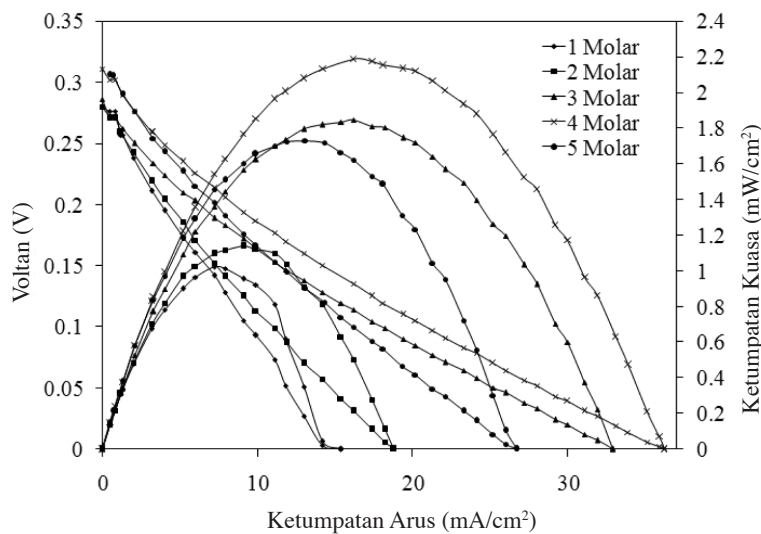
Rajah 4 menunjukkan lengkung OCV dengan kepekatan metanol yang berbeza. Lengkung ini diperolehi secara ujikaji menggunakan larutan-larutan metanol dengan kepekatan 1.0 M, 2.0 M, 3.0 M, 4.0 M, dan 5.0 M. Hasil yang diperolehi menunjukkan penghasilan voltan yang tidak stabil oleh kelima-lima kepekatan yang dikaji. Julat voltan untuk kesemua kepekatan metanol yang digunakan dalam ujikaji ini adalah sekitar 200 – 300 mV dengan peningkatan voltan sedikit demi sedikit pada setiap kepekatan yang diuji. Nilai voltan tertinggi dihasilkan apabila 5.0 M metanol digunakan. Data-data OCV yang diperolehi ini menjelaskan ia sebagai voltan maksimum yang boleh dihasilkan oleh setiap kepekatan tanpa dikenakan sebarang bebanan arus. Peningkatan voltan pada 5.0 M dan kesemua kepekatan secara beransur-ansur bersandarkan masa adalah disebabkan oleh peningkatan

suhu pada sel (Jewett et al. 2009). Peningkatan suhu ini membantu dalam peningkatan nilai voltan dalam lengkung OCV yang dikaji. Lengkung prestasi biasanya digunakan untuk mendapatkan nilai optimum, di mana dalam kes ujikaji yang dijalankan ini nilai optimumnya adalah pada kepekatan yang diperlukan untuk mengoperasikan sel SFML secara mod pasif.

Rajah 5 mempersembahkan kesan kepekatan suapan metanol terhadap prestasi sel tunggal pasif. Ketumpatan tenaga sel meningkat dengan peningkatan kepekatan metanol sehingga kepekatan mencapai 4.0 M tetapi mengalami penurunan mendadak apabila kepekatan metanol meningkat ke 5.0 M. Penurunan ketumpatan tenaga ini berpunca daripada aliran silang metanol merentasi membran apabila kepekatan metanol yang tinggi digunakan dalam SFML, seterusnya merendahkan prestasi sel. Aliran silang metanol ini merupakan salah satu masalah serius yang dikenalpasti dalam sistem ini.



RAJAH 4. Voltan litar terbuka (OCV) sel tunggal pada kepekatan berbeza



RAJAH 5. Kesan kepekatan metanol kepada prestasi sel dengan mod pasif

Masalah ini berlaku apabila terdapat metanol merentasi membran melalui diffusion dan elektro-osmosis dari anod ke katod. Hasilnya metanol akan terus bertindak balas dengan oksigen dari udara tetapi tidak menghasilkan sebarang arus daripada sel. Kebiasaanya, aliran silang metanol ini berkadar dengan kepekatan metanol yang digunakan iaitu semakin tinggi kepekatan, semakin tinggi kadar aliran silang (Guo et al. 2007). Daripada uji kaji dan keputusan yang diperolehi, kepekatan yang bersesuaian yang dikenalpasti untuk mengoperasikan sel pada keadaan optimum adalah pada kepekatan 4.0 M. Kepekatan metanol optimum sepertimana yang diperolehi adalah jelas bertentangan dengan kepekatan yang diperolehi oleh SFML dengan sel aktif yang mana biasanya respon tertinggi adalah pada kepekatan metanol sekitar 2.0 M (Faghri et al. 2008).

Rajah 6 menunjukkan keputusan untuk kesan kepekatan metanol terhadap ketumpatan tenaga. Daripada pemerhatian keputusan ini, dapat dilihat bahawa ketumpatan tenaga meningkat daripada 1.0 hingga 2.2 mWcm⁻² apabila kepekatan metanol meningkat daripada 1.0 M kepada 4.0 M. Apabila peningkatan ini ditingkatkan lagi kepada 5.0 M, ketumpatan tenaga menurun kepada nilai yang lebih rendah daripada ketumpatan tenaga yang dihasilkan oleh kepekatan metanol pada 3.0 M iaitu pada nilai sekitar 1.7 mWcm⁻². Oleh sebab ini, 4.0 M diambil sebagai kepekatan yang mempamerkan prestasi optimum antara kelima-lima kepekatan yang diuji.

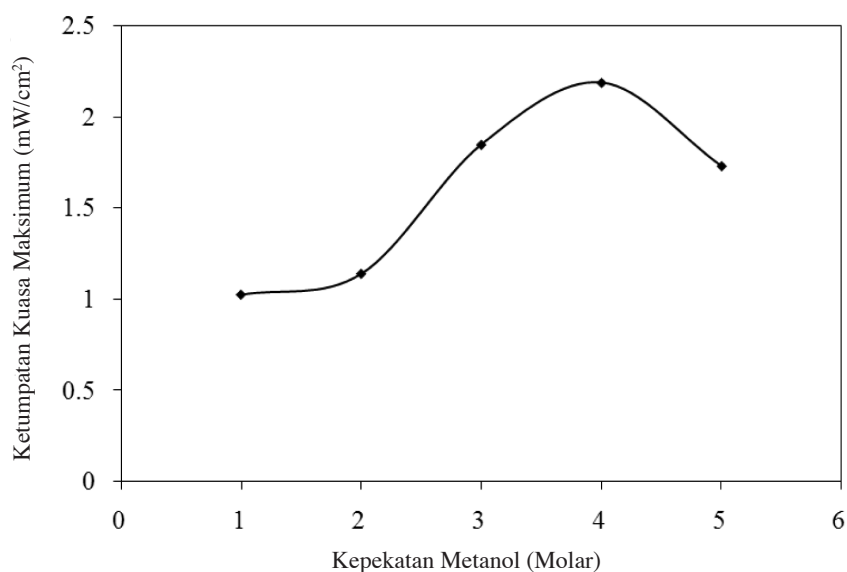
Larutan akues metanol pada kepekatan 4.0 M digunakan. Kesemua ujikaji dijalankan pada suhu bilik dalam keadaan operasi mod pasif tanpa sebarang peralatan tambahan digunakan pada sel. Data OCV dan prestasi disukat dan direkod menggunakan sistem bebanan elektronik (Prodigit 3315D) dalam keadaan mod arus tetap (CC mode). Stek mulanya dimasukkan dengan larutan metanol dan seterusnya diikuti dengan pengumpulan data

OCV sehingga bacaan voltan menjadi stabil. Kemudianya prestasi stek mikro disukat dengan manganakan arus atau beban kepada sel.

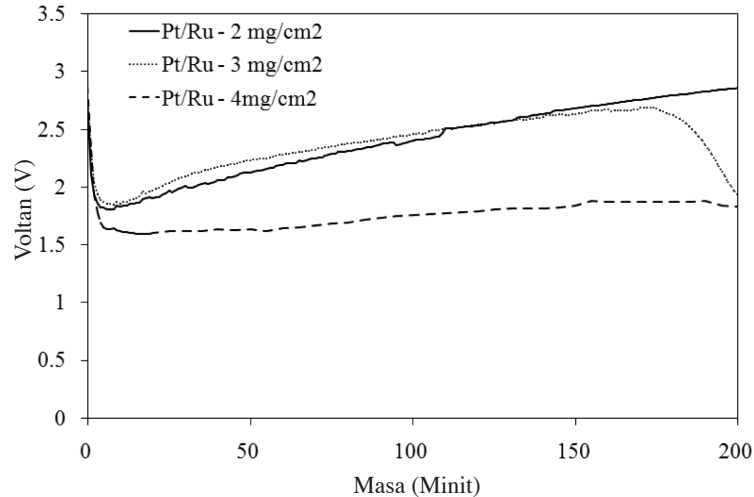
Prestasi mikro-SFML dengan 6 sel pasif pada muatan mangkin berbeza menggunakan 4.0 M metanol diuji pada keadaan ambien. Prestasi SFML ini diuji dengan menggunakan muatan mangkin yang tetap pada bahagian katod iaitu 2.0 mg cm⁻² Pt-C 50 wt% manakala muatan pada bahagian anod divariasikan kepada 2.0 mg cm⁻², 3.0 mg cm⁻² dan 4.0 mg cm⁻² Pt/Ru-C 50 wt% seperti yang ditunjukkan pada Rajah 7(a) dan (b). Voltan litar terbuka (OCV) diambil sekitar jangka masa 4 jam (Rajah 7(a)) sehingga nilai voltan menjadi stabil. Dari penelitian Rajah 7(b), nilai tenaga maksimum diperolehi dari setiap kombinasi muatan mangkin adalah 5.1 mW, 12.0 mW and 7.3 mW, dengan arus 3.4 mA, 11.2 mA and 9.2 mA untuk setiap muatan mangkin pada anod 2.0 mg cm⁻², 3.0 mg cm⁻² and 4.0 mg cm⁻².

Dalam Rajah 7(b), prestasi menggunakan muatan mangkin pada anod pada 2.0 mgcm⁻² menunjukkan ketidakseimbangan dan penghasilan amaun tenaga yang paling rendah. Masalah ini wujud disebabkan oleh penyambungan antara sel di dalam stek tersebut yang mana ia lebih memberi kesan yang signifikan pada muatan ini. Masalah lain yang turut menyumbang kepada penurunan nilai prestasi ini adalah seperti kebanjiran air pada bahagian katod, tindakbalas kinetic yang perlahan pada bahagian anod dan perkara biasa yang selalu terjadi adalah aliran silang metanol merentasi membrane semasa operasi sel (Liu et al. 2006; Yang et al. 2007). Isu-isu ini juga dihadapi oleh banyak penyelidik luar dalam membangunkan sistem SFML ini.

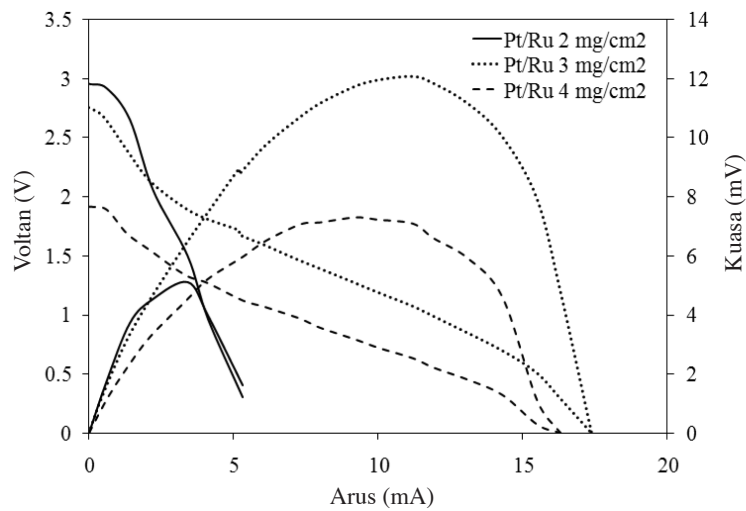
Rajah 8 menunjukkan lengkung polarisasi dan ketumpatan tenaga 6 sel secara individu pada suhu ambien menggunakan 4.0 M kepekatan metanol dan kombinasi muatan mangkin optimum. Sel-sel dengan lebel 1 dan 5



RAJAH 6. Ketumpatan tenaga maksimum yang terhasil dengan kepekatan metanol berbeza



(a)



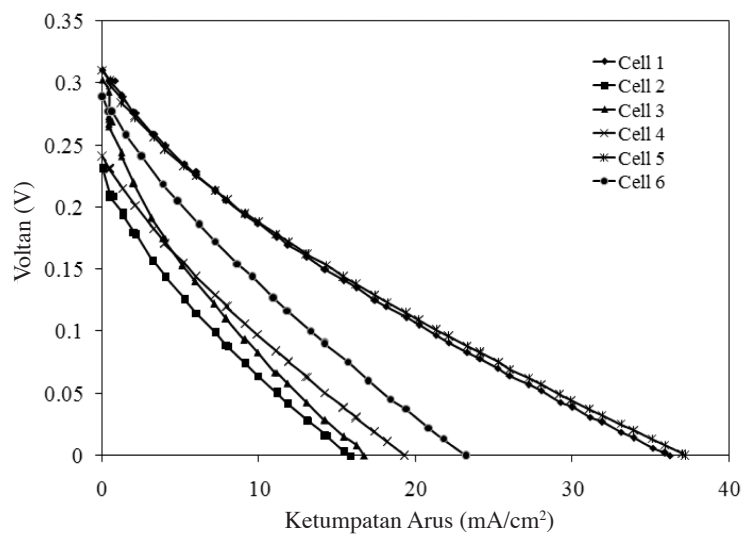
(b)

RAJAH 7. Lengkung untuk 2.0 mg/cm², 3.0 mg/cm² dan 4.0 mg/cm² Pt/Ru 50% dengan nilai 2.0 mg/cm² Pt 50% tetap pada katod (a) voltan litar terbuka (b) lengkung polarisasi dan kuasa

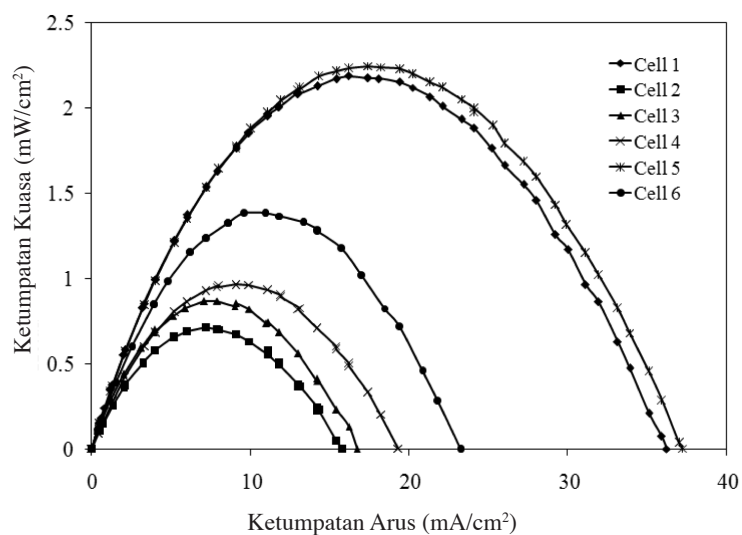
menunjukkan prestasi yang memberangsangkan. Prestasi yang rendah pada sel-sel dengan label yang lain, ia disebabkan oleh MEA yang tidak dirawat dengan sebaiknya, dimana setiap MEA yang baik bukan sahaja memberikan prestasi yang baik malah ia juga akan memberikan keseragaman yang baik (Chen et al. 2008). Prestasi yang rendah dan lemah ini bukan sahaja digambarkan oleh sel dengan nilai ketumpatan tenaganya, malah ia juga akan memberikan kesan had kepada nilai ketumpatan arus, dimana setiap sel secara urutan Sel 1, Sel 2, Sel 3, Sel 4, Sel 5 dan Sel 6 masing-masing memberikan nilai had arus yang boleh dicapai 36.2 mA cm⁻², 15.4 mA cm⁻², 16.7 mA cm⁻², 19.3 mA cm⁻², 37.0 mA cm⁻² and 23.2 mA cm⁻².

Prestasi enam sel yang disambung secara sesiri diperlihatkan dalam Rajah 9. Tenaga yang dihasilkan oleh stek adalah menghampiri enam kali ganda nilai tenaga sel tunggal yang terbaik, iaitu 12.05 mW. Penghasilan tenaga oleh stek ini dibayangi oleh nilai tenaga setiap sel yang

berada dalam stek. Sebagaimana yang dapat kita lihat, ketumpatan tenaga yang terhasil oleh stek ini adalah 2.01 mWcm⁻², iaitu menghampiri kepada nilai ketumpatan tenaga sel tunggal terbaik iaitu 2.24 mWcm⁻². Walaupun begitu, nilai arus pengehad untuk stak- menunjukkan hanya separuh kepada nilai sel tunggal terbaik. Penjelasan yang boleh dinyatakan di sini adalah terdapatnya fenomena bonggolan prestasi antara sel-sel dalam stek dengan arus penghad setiap sel individu adalah berbeza. Ini memberikan nilai arus pengehad untuk keseluruhan stak turut mengalami penyusutan (Chen et al. 2008). Satu lagi penjelasan yang mungkin untuk isu ini adalah kurangnya keseragaman antara sel-sel individu yang membentuk stek. Seperti yang dibincangkan sebelumnya, keseragaman sel-sel yang membentuk stek ini akan memberikan kesan kepada keseluruhan. Walaupun stak ini memberikan nilai arus penghad yang rendah, namun tenaga yang dihasilkan oleh stak ini masih cukup tinggi di mana ia berkadaran

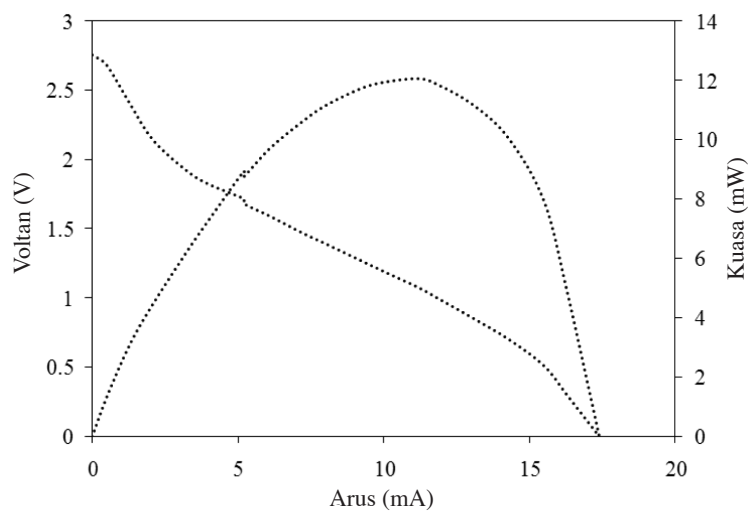


(a)



(b)

RAJAH 8. Lengkung polarisasi dan kuasa enam sel tunggal secara berasingan menggunakan 4.0 M metanol



RAJAH 9. Lengkung polarisasi dan kuasa stek mikro sel dengan muatan mangkin dan ketumpatan metanol optimum

dengan bilangan sel dalam stak. Perkara ini disebabkan oleh haba yang dihasilkan oleh stak lebih tinggi berbanding satu sel, ini menyebabkan stek beroperasi pada suhu yang lebih tinggi berbanding sel tunggal dan perkara ini banyak disebutkan oleh pengkaji lain di mana prestasi SFML meningkat dengan peningkatan nilai suhu operasinya (Martin et al. 2007).

Dalam kajian ini sel dibentuk menggunakan fabrikasi konvensional murah dengan reka bentuk novel untuk plat katod dan pemasangan yang memberikan ia potensi untuk pengkomersialan. Ringkasan untuk prestasi dapat dilihat pada Jadual 1. Ia memperlihatkan bahawa pembangunan sel fuel dalam kajian ini memberikan ketumpatan tenaga yang tinggi dengan muatan mangkin yang rendah dan luas permukaan aktif yang kecil.

JADUAL 1. Ringkasan Keputusan

Perkara	Sel Tunggal	6 Sel
Sistem	Pasif	Pasif
Luas Aktif (cm ²)	1.0	6.0
Kepekatan Metanol (M)	4.0	4.0
Tenaga Keluaran (mW)	2.2	12.05
Muatan Mangkin Anod (mg cm ⁻²)	2.0	2.0
Muatan Mangkin Katod (mg cm ⁻²)	3.0	3.0

KESIMPULAN

Kajian ini berjaya membangunkan sel fuel mikro yang terkecil menggunakan fabrikasi konvensional CNC. Sel tunggal dan stek multi sel mikro-SFML dengan reka bentuk novel struktur plat katod dengan binaan asas PMMA dan lapisan tindannya direka bentuk, difabrikasi dan dianalisa sifatnya. Dengan mod operasi pasif, ciri-ciri sel dan stek dikaji dengan memvariasikan kepekatan metanol dan muatan mangkin. Kepekatan metanol pada 4.0 M memberikan kepekatan yang optimum untuk operasi mod pasif. Peningkatan kepekatan tidak menjanjikan peningkatan kepada nilai prestasi sel. Didapati kombinasi antara 2.0 mgcm⁻² Pt/C 50 wt% pada katod dan 3.0 mgcm⁻² Pt/Ru-C 50 wt% pada bahagian anod memberikan kombinasi yang mangkin yang muncul sebagai muatan yang terbaik dari segi pengangkutan jisim dan kinetik menggunakan 4.0 M metanol. Dengan kuasa maksimum sebanyak 12.05 mW, kombinasi ini memberikan nilai hampir dua kali ganda berbanding kombinasi mangkin 4.0 mgcm⁻² (anod) dan 2.0 mgcm⁻² (katod). Ini membuktikan untuk memperolehi prestasi yang baik, ia tidak berkadar dengan peningkatan amaun muatan mangkin.

PENGHARGAAN

Penulis berterima kasih pada bantuan kewangan yang diberikan dalam membiayai kerja penyelidikan ini oleh Kementerian Sains, Teknologi dan Inovasi (MOSTI) di bawah Dana Penyelidikan ScienceFund 03-01-02 SF0455.

RUJUKAN

- Baglio, V., Stassi, A., Matera, F.V., Antonucci, V. & Aric`o, A.S. 2009. Investigation of passive DMFC mini-stacks at ambient temperature. *Electrochimica Acta* 54: 2004-2009.
- Bostic, E., Sifer, N., Bolton, C., Ritter, U. & Dubois, T. 2004. The US army foreign comparative test fuel cell program. *Journal of Power Sources* 137: 76-79.
- Cao, J., Zou, Z., Huang, Q., Yuana, T., Lia, Z., Xia, B. & Yang, H. 2008. Planar air-breathing micro-direct methanol fuel cell stacks based on micro-electronic-mechanical-system technology. *Journal of Power Sources* 185: 433-438.
- Chen, C-Y., Lai, W-H., Weng, B-J., Chuang, H-J., Hsieh, C-Y. & Kung, C-C. 2008. Planar array stack design aided by rapid prototyping in development of air-breathing PEMFC. *Journal of Power Sources* 179: 147-154.
- Chen, F., Chang, M-H. & Lin, H-Y. 2008. Analysis of a novel MEMS-based design of micro-direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* 178: 125-131.
- Dillon, R., Srinivasan, S., Aricò, A.S. & Antonucci, V. 2004. International activities in DMFC R&D: status of technologies and potential applications. *Journal of Power Sources* 127: 112-126.
- Faghri, A. & Guo, Z. 2008. An innovative passive DMFC technology. *Journal of Power Sources* 28: 1614-1622.
- Ge, J. & Liu, H. 2007. A three-dimensional two-phase flow model for a liquid-fed direct methanol fuel cell. *Journal of Power Sources* 163: 907-915.
- Guo, Z. & Faghri, A. 2007. Development of a 1W passive DMFC. *International Communication in Heat and Mass Transfer*.
- Ito, T., Kimura, K. & Kunimatsu, M. 2006. Characteristics of micro DMFC array fabricated on flexible polymeric substrate. *Electrochemistry Communication* 8: 973-976.
- Jeng, K-T., Huang & W-M., Hsu, N-Y. 2009. Application of low-voltage electrophoretic deposition to fabrication of direct methanol fuel cell electrode composite catalyst layer. *Materials Chemistry and Physics* 113: 574-578.
- Jewett, G., Fagri, A. & Xiao, B. 2009. Optimization of water and air management system for passive direct methanol fuel cell. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 3564-3575.
- Kim, D., Cho, E.A., Hong, S-A., Oh, I-H. & Ha, H.Y. 2004. Recent progress in passive direct methanol fuel cells at KIST. *Journal of Power Sources* 130: 172-177.
- Kim, T. & Kwon, S. 2009. MEMS fuel cell system integrated with a methanol reformer for a portable power sources. *Sensors and Actuators A* 15(2): 204-211.
- Kulikovskiy, A.A. 2003. A method for analysis of DMFC performance curves. *Electrochemistry Communications* 5: 1030-1036.
- Kuriyama, K., Kubota, T., Okamura, D., Suzuki, T. & Sasahara, J. 2008. Design and fabrication of MEMS-based monolithic fuel cells. *Sensors and Actuators A* 145-146: 354-362.
- Liu, J.G. 2006. Effect of membrane thickness on the performance and efficiency of passive direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 153: 61-67.
- Lua, G.Q., Wang, C.Y., Yen, T.J. & Zhang, X. 2004. Development and characterization of a silicon-based micro direct methanol fuel cell. *Electrochimica Acta* 49: 821-828.
- Ma, Z.Q., Cheng, P. & Zhao, T.S. 2003. A palladium-alloy deposited Nafion membrane for direct methanol fuel cells. *Journal of Membrane Science* 215: 327-336.
- Martin, J.J., Qian, W., Wang, H., Neburchilov, V., Zhang, J., Wilkinson, D.P. & Chang, Z. 2007. Design and testing of a

- passive planar three-cell DMFC. *Journal of Power Sources* 164: 287-292.
- Nakagawa, N. 2009. Reaction analysis of a direct methanol fuel cell employing a porous carbon plate operated at high methanol concentration. *Journal of Power Sources* 186: 45-51.
- Prabhuram, J., Zhao, T.S., Wong, C.W. & Guo, J.W. 2004. Synthesis and physical/electrochemical characterization of Pt/C nanocatalyst for polymer electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 134: 1-6.
- Rawool, A.S., Sushanta, K.M. & Pharoah, J.G. 2006. An investigation of convective transport in Micro Proton-Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources* 162: 985-991.
- Schultza, T. & Sundmacher, K. 2005. Rigorous dynamic model of direct methanol fuel cell based on Maxwell-Stefan mass transport equations and a Flory-Huggins activity model: Formulation and experimental validation. *Journal of Power Sources* 145: 435-462.
- Seong, J.Y., Bae, Y.C. & Sun, Y.K. 2005. Thermodynamic properties of direct methanol polymer electrolyte fuel cell. *Journal of Power Sources* 145: 598-603.
- 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
- Yang, W.W. & Zhao, T.S. 2007. A two-dimensional, two-phase mass transport model for liquid-feed DMFCs. *Electro. Acta* 52: 6125-6140.
- Ye, Q. & Zhao, T.S. 2005. A natural-circulation fuel delivery system for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 147: 196-202.
- Ye, Q. & Zhao, T.S. 2005. Electrolytic hydrogen evolution in DMFCs induced by oxygen interruptions and its effect on cell performance. *Electrochemical and Solid State Letters*, 8: A211-A214.
- 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.
- Zhang, Y., Lu, J., Shimano, S., Zhou, H. & Maeda, R. 2007. Development of MEMS-based direct methanol fuel cell with high power density using nanoimprint technology. *Electrochemistry Communications* 9: 1365-1368.
- 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 and Actuators A: Physical* 143: 70-76.

Institut Sel Fuel
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 Bangi, Selangor, Malaysia

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

Diserahkan: 28 April 2009

Diterima: 16 Mei 2010