

Pembangunan Sel Fuel Mikrob untuk Rawatan Air Sisa Kilang Sawit (Development of Microbial Fuel Cell for Palm Oil Mill Effluent Treatment)

LIM SWEE SU*, JAMALIAH MD. JAHIM, SITI NORHANA SHARI,
MANAL ISMAIL & WAN RAMLI WAN DAUD

ABSTRAK

Sel fuel mikrob (SFM) merupakan peranti yang menggunakan bakteria sebagai biomangkin untuk mengoksidakan bahan organik dan bukan organik bagi menjana arus elektrik. Tujuan utama kajian ini ialah menguji kebolehan SFM skala makmal dengan menggunakan enapcemar yang mengandungi kultur campuran yang hidup dalam air sisa buangan kilang pemprosesan sawit (POME). Kajian ini juga bertujuan membina reka bentuk SFM yang sesuai dan mengkaji keaktifan kultur campuran yang boleh menghasilkan kuasa elektrik. POME telah digunakan dalam bentuk yang dicairkan dengan kandungan COD bersamaan dengan $3750 \text{ mg-COD L}^{-1}$. Prestasi penghasilan kuasa elektrik dan kecekapan rawatan yang dinilai daripada segi penyingkiran COD, nitrogen dan jumlah karbohidrat dalam SFM dwi-ruang telah dicatat dan dianalisis setiap hari selama 15 hari. Hasil padanan uji kaji dan model keketubatan adalah memuaskan dan telah menjelaskan ketumpatan kuasa elektrik yang dapat dihasilkan pada setiap hari. Ketumpatan kuasa didapati meningkat dari hari pertama 1.607 mW m^{-2} (3.816 mA m^{-2}) ke nilai maksimum pada hari ketiga 1.979 mW m^{-2} (4.780 mA m^{-2}) dan mula turun sehingga minimum pada hari ketujuh 1.311 mW m^{-2} (3.346 mA m^{-2}). Peringkat rawatan air sisa kilang sawit oleh SFM boleh dibahagikan kepada tiga tahap yang berbeza. Kecekapan rawatan yang rendah walaupun ketumpatan kuasa meningkat pada tahap pertama, manakala pada tahap kedua kecekapan rawatan lebih tinggi dan akhirnya pada tahap ketiga penghasilan kuasa SFM mula turun. Kecekapan rawatan paling tinggi berlaku pada tahap ketiga semasa penghasilan kuasa elektrik yang terhasil agak malar. Kecekapan rawatan yang dinilai dalam bentuk penyingkiran COD, penggunaan nitrogen dan karbohidrat paling tinggi berlaku pada hari ke-15 dengan nilai masing-masing adalah 54.9, 100 dan 98.9%. Hubungan penghasilan kuasa elektrik dan kecekapan rawatan telah berjaya dimodelkan dalam persamaan linear matematik berdasarkan kepada tahap-tahap penghasilan kuasa elektrik ini.

Kata kunci: Air sisa kilang sawit; kuasa elektrik; model matematik; rawatan air sisa; sel fuel mikrob

ABSTRACT

Microbial fuel cells (MFCs) are a device that utilises microorganisms as a biocatalyst, to oxidize organic and inorganic matters to generate electric current. The main purpose of this study was to evaluate laboratory scale MFC which was inoculated with sludge containing mixed culture grown in palm oil mill effluent (POME). This work also aimed to construct a suitable design of MFC and to observe mixed culture activation that could lead to electric power production. POME was used in diluted form with COD concentration of $3750 \text{ mg-COD L}^{-1}$. The performance of power generation and the efficiency of waste-water treatment in term of COD, nitrogen and total carbohydrate removal, in dual chamber MFC were recorded and analysed everyday for 15 days. The plots between experimental data and polarization model fit well and are able to describe the ability of power density generated in each day. Power density increased from 1.607 mW m^{-2} (3.816 mA m^{-2}), in the first day of the experiments to a maximum value on the third day 1.979 mW m^{-2} (4.780 mA m^{-2}) and then slowed down in day seventh to a minimum value of 1.311 mW m^{-2} (3.346 mA m^{-2}). The removal efficiency in MFC could be divided into three different levels. The first level is in term of poor efficiency although the power was increasing, while in the second level, the efficiency was getting higher and finally in third level, power production of MFC started to diminish. The highest efficiency occurs during the third level when steady power generation took place at certain level. The treatment efficiency in term of COD removal, nitrogen and carbohydrate utilization at day 15th were 54.9, 100 and 98.9%, respectively. The relationship between electricity power generation and treatment efficiency was successfully modelled into linear equation based on the respective power generation levels.

Keywords: Electricity power; mathematic model; microbial fuel cell; palm oil mill effluent (pome); wastewater treatment

PENGENALAN

Kajian mengenai sel fuel mikrob (SFM) kini sedang giat dijalankan bagi menyediakan peluang baru dalam

penghasilan tenaga mampan yang boleh diperbaharui. Alat ini menggunakan unsur mikroorganisma dengan bakteria digunakan sebagai mangkin untuk mengoksidakan bahan

organik dan bukan organik disamping menghasilkan elektrik dalam air sisa buangan. Dalam sel fuel mikroba, elektron yang dihasilkan oleh bakteria daripada pengoksidaan substrat akan dikumpulkan di anod dan kemudian dialirkan ke katod melalui litar luar (Logan et al. 2006). Teknologi ini penting kerana disamping melengkapkan rawatan air sisa semasa pengoperasiannya menggunakan mikroorganisma, ia juga dapat menjana kuasa elektrik (Jiang et al. 2009; Moon et al. 2005; Oh et al. 2010; Rodrigo et al. 2007). SFM dua ruang adalah SFM yang paling biasa dipakai untuk melakukan penyelidikan awal bagi menguji potensi enapcemar (Jiang et al. 2009) dan air sisa domestik (Rodrigo et al. 2007) sebagai sumber substrat.

Dalam kajian ini, SFM dua ruang juga telah digunakan untuk menguji kesesuaian enapcemar dan air sisa kilang sawit dalam penjana arus elektrik. Secara umumnya, air sisa dari kilang sawit adalah sangat tercemar jika dibuang secara langsung ke alam sekitar kerana mengandungi kepekatan COD (keperluan oksigen kimia) dan BOD (keperluan oksigen biokimia) yang tinggi (Poh & Chong 2009). Dengan kandungan bahan organik yang tinggi, enapcemar dan air sisa kilang sawit adalah bahan substrat yang boleh digunakan oleh mikroba dalam SFM untuk menjanakan arus elektrik dari segi konsep.

Dengan menggunakan cara konvensional, proses pencernaan anaerobik adalah paling umum digunakan dalam rawatan awal air sisa kilang sawit (Poh & Chong 2009; Tay 1991; Wong et al. 2009) dengan keadaan pengoperasian yang agak sama seperti di bahagian anod SFM. Walaupun begitu, proses ini menjadi kian popular dan diterima secara meluas sebagai kaedah yang berkesan dalam rawatan air sisa kilang sawit, namun begitu penglibatan rawatan ini sahaja tidak dapat memenuhi piawaian yang telah ditetapkan untuk pelepasan ke alam sekitar. Hal ini disebabkan kandungan bahan organik atau COD yang tinggi dalam air sisa kilang sawit (Chan et al. 2010). Justeru, proses rawatan awal adalah penting supaya proses rawatan anaerobik yang seterusnya dapat merawat air sisa sehingga 90% ke atas (Vijayaraghavan et al. 2007).

Selain daripada pencernaan anaerobik, air sisa kilang sawit juga boleh dirawat menggunakan teknologi membran (Ahmad et al. 2006), reaktor enapcemar aktif aerobik (Vijayaraghavan et al. 2007) dan kaedah pengewapan (Ma 1997). Daripada sekian proses rawatan yang diuji, SFM masih belum pernah digunakan oleh para penyelidik untuk merawat air sisa kilang sawit. Kuasa maksimum yang dihasilkan oleh SFM dipengaruhi oleh pelbagai faktor termasuk reka bentuk sel, spesies mikroba, aktiviti mikroba, komposisi atau kepekatan substrat dan suhu (Chae et al. 2009; Morris et al. 2007).

Dalam penyelidikan ini, komuniti mikroorganisma yang terkandung dalam enapcemar dari air sisa kilang sawit bagi sumber biomangkin (kultur konsortium) dan air sisa kilang sawit sebagai fuel telah digunakan dalam operasi SFM. Sumber biomangkin merupakan mikroorganisma yang membentuk lapisan biofilm

di permukaan anod. Biofilm ini memerlukan masa sekurang-kurangnya 10 hari untuk menyesuaikan diri bagi menghasilkan elektron dan dialirkan ke anod sebagai penerima elektron (Jiang et al. 2009; Rodrigo et al. 2007). Tujuan utama penyelidikan ini adalah untuk menghasilkan elektrik menggunakan teknologi SFM selain daripada mengkaji kebolehan rawatan air sisa kilang sawit yang lebih cekap.

BAHAN DAN KAEDAH

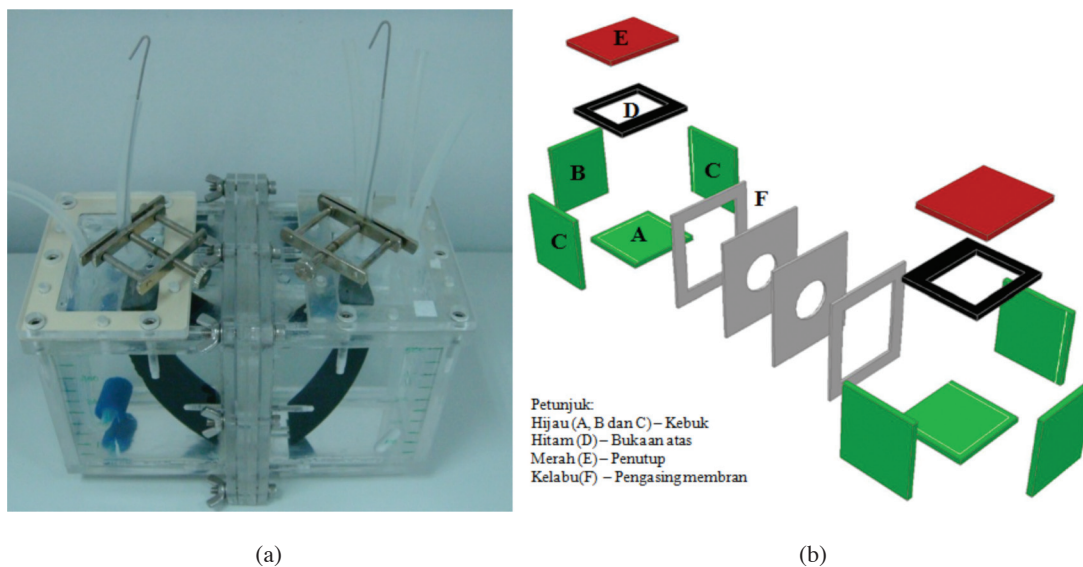
STOK KULTUR BIOMANGKIN, SUMBER AIR SISA DAN PENGKULTURAN

Enapcemar yang mengandungi kultur campuran dan air sisa sawit masing-masing diambil dari takungan pencernaan anaerobik dan unit pemprosesan minyak sawit di Kilang Minyak Sawit Sri Ulu Langat, Dengkil, Selangor, Malaysia. Medium Wolfe terubahsuai digunakan sebagai medium kultur untuk mengekalkan dan mengaktifkan komuniti bakteria campuran dalam enapcemar tersebut. Medium terbitan ini mengandungi: 5.0 g L⁻¹ glukosa; 2.76 g L⁻¹ NaH₂PO₄·H₂O; 4.26 g L⁻¹ Na₂HPO₄; 0.31 g L⁻¹ NH₄Cl; 0.13 g L⁻¹ KCl; 10 mL larutan vitamin Wolfe dan 10 mL larutan mineral Wolfe dalam 1 L larutan (Atlas 2004). Sebanyak 1000 mL enapcemar basah dikulturkan dalam 2000 mL botol makmal Duran[®] dan dicampurkan dengan 1000 mL medium terbitan.

Seterusnya, kultur tadi akan dialirkan dengan gas nitrogen untuk menyingkirkan oksigen dan mengekalkan keadaan anaerobik. Kemudian botol ini diletakkan atas pengaduk magnetik dan suapan medium baru diulangi selepas pembuihan yang diperhatikan timbul atas permukaan medium kultur telah terhenti. Ini untuk memastikan kepekatan COD yang masih tinggal dalam enapcemar dapat diturunkan sepenuhnya kepada ≈ 1500 mg-COD L⁻¹ sebelum uji kaji dimulakan. Pengkulturan dilakukan pada suhu bilik 28 - 30°C selama 2 minggu dan sejumlah biojisim basah digunakan untuk memulakan setiap kajian yang baru.

REKA BENTUK DAN PENGOPERASIAN SFM

SFM dwi-kebuk yang berisi padu 500 mL bagi setiap kebuk direka bentuk dan dibina menggunakan kaca poli-akrilik dengan ketebalan 0.8 cm. Dimensi setiap kebuk (panjang, lebar dan tinggi) adalah 8.2, 9.0 dan 10.4 cm. Kertas karbon digunakan sebagai anod dan katod dengan saiz (panjang, lebar dan ketebalan) 9.0, 5.0 dan 0.240 cm (AvCarb[™] P75T). Kedua-dua elektrod dipasang di setiap kebuk sejauh 7.3 cm dari hujung ke hujung. Salah satu elektrod dijadikan sebagai anod pada kultur anaerobik manakala yang lagi satu elektrod sebagai katod. Katod yang diguna pakai dalam SFM dilapisi dengan satu lapisan mangkin berbeban sebanyak 0.5 mg cm⁻² (50% Pt/C) untuk membantu meningkatkan penurunan oksigen. Rajah 1 menunjukkan gambar reka bentuk sel fuel mikroba yang dipakai dalam uji kaji ini.



RAJAH 1. (a) Gambar dan (b) rajah reka bentuk sel fuel mikro

Selain medium kultur (10% L/L POME) yang diisi sebagai elektrolit dalam kebuk anod, kebuk katod pula diisi dengan 50 mM larutan penimbal fosfat (dalam g L⁻¹: 2.76 NaH₂PO₄·H₂O; 4.26 Na₂HPO₄; 0.31 NH₄Cl dan 0.13 KCl). Kebuk katod dialirkan udara secara selanjat menggunakan pam akuarium. Membran penukar proton yang terdiri daripada Nafion 117 diapitkan di antara dua kebuk bertujuan untuk mengasingkan elektrolit disamping membenarkan pemindahan ion H⁺ melalui membran. Membran Nafion dirawat dengan memanaskannya dalam 30% H₂O₂, 0.5M H₂SO₄ dan air penyahionan secara berasingan pada suhu 80°C selama 1 jam pada setiap kali persediaan uji kaji. Membran yang siap dirawat disimpan dalam air penyahionan sebelum digunakan. SFM yang telah siap diisikan dengan air penyahionan disimpan semalam sebelum dioperasikan. Bagi memulakan uji kaji, sebanyak 200 mL biojisim basah dimasukkan ke dalam anod dan ditambahkan dengan medium POME 10% v/v sehingga isi padu kebuk menjadi 500 mL. SFM dioperasikan dengan mencelupkan dalam air pada kawalan suhu 35°C. Pengaduk magnetik diletak bawah kebuk anod SFM untuk mengampai medium kultur.

ANALISIS KUASA ELEKTRIK DAN RAWATAN AIR SISA

Dalam kajian ini, rangsangan yang diambil kira termasuklah kuasa elektrik yang dijanakan, kecekapan rawatan air sisa dan kadar penyingkiran/penggunaan substrat oleh SFM. Kuasa elektrik dicatatkan menggunakan alat pengumpulan data yang boleh berinteraksi dengan komputer iaitu Fluke digital multimeter (Fluke 289, USA) manakala kecekapan rawatan dan penyingkiran substrat dianalisis menggunakan reagen kimia dengan bantuan bacaan daripada spektrofotometer. Bagi operasi rawatan jangka panjang, voltan MFC di antara dua elektrod direkodkan setiap 15 min oleh multimeter dan dipindahkan ke dalam komputer melalui kabel USB-IR.

Masa data direkodkan setiap 15 min pada permulaannya diubahkan kepada satu min semasa menguji polarisasi SFM dan dilakukan pada setiap hari. Bacaan voltan hanya akan dicatat selepas 10 min untuk mendapatkan nilai voltan pada keadaan malar-pseudo pada titik rintangan tertentu. Nilai rintangan litar luar diubah daripada 1.0 M ohm hingga 1.0 K ohm dan ketumpatan kuasa dikirakan berdasarkan formula P_D (mW m⁻²) = $I_D \times V$, dengan I_D ialah ketumpatan arus (mA m⁻²). Nilai I_D boleh dikira melalui persamaan $I_D = V / (R_{eks} \times A)$ berdasarkan rintangan litar luar, R_{eks} (Ω) dan luas permukaan elektrod, A (m²).

Lengkung polarisasi dan prestasi diperoleh dengan memplotkan nilai voltan dan ketumpatan kuasa melawan ketumpatan arus. Kepekatan COD dan nitrogen ditentukan dengan menggunakan kaedah piawai HACH manakala kandungan karbohidrat dianalisis dengan menggunakan ujian fenol-asid sulfurik. Reagen pencernaan kimia COD untuk julat 0 - 1 500 mg-COD L⁻¹ dibekalkan oleh HACH adalah siap disediakan dalam tabung uji tertutup 10 mL (Hach, USA).

PADANAN MODEL POLARISASI DAN ANALISIS KEHILANGAN VOLTAN

Model kekutuban digunakan untuk menerangkan tahap penjanaan dan kehilangan voltan dalam SFM. Data yang diperoleh daripada uji kaji dianalisis dan digunakan dalam mensimulasikan model polarisasi dengan ujian padanan terbaik. Daripada nilai pemalar yang diperoleh, tahap kehilangan voltan akibat beberapa faktor telah dikenal pasti dapat digunakan untuk tujuan pengoptimuman hasil kuasa. Model polarisasi untuk SFM boleh diperihal dengan menggunakan model sel fuel biasa. Secara keseluruhannya, sifat voltan-arus sel fuel boleh dituliskan sebagai:

$$V = E_o - b \log I_D - RI_D - \gamma \exp(\omega I_D) \quad (1)$$

dengan V , E_o , b , R , γ dan ω dan I_D masing-masing adalah voltan sel, voltan litar terbuka, pemalar Tafel, rintangan dalaman, pemalar banjir, pemalar padanan dan ketumpatan arus. Data uji kaji digunakan dalam simulasi berangka dinilai berdasarkan padanan terbaik untuk mendapatkan pemalar elektrokimia. Kod simulasi dihasilkan dalam perisian MATLAB (versi R2008a) dengan menggunakan kaedah jumlah sisihan kuadrat (Mahreni 2009). Nilai regresi R^2 yang menunjukkan kejituan padanan antara data uji kaji dan model disetkan menghampiri 0.95.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

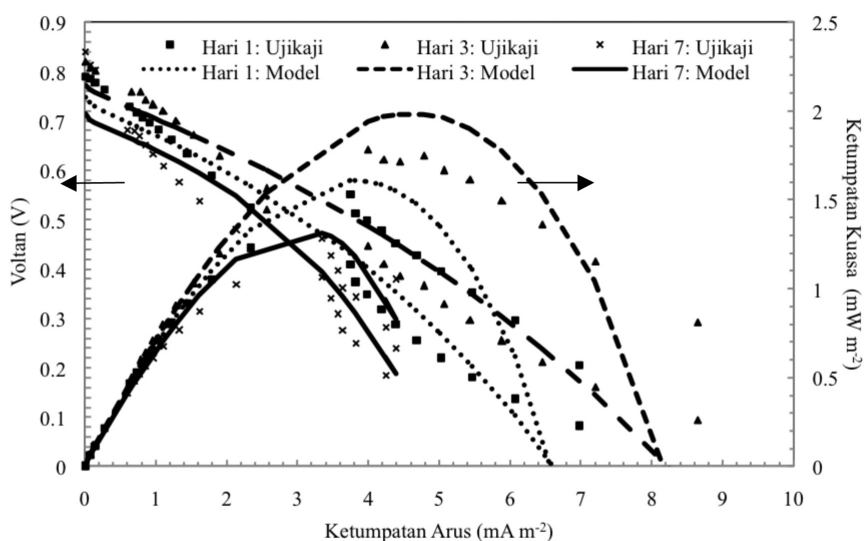
Rajah 2 menunjukkan lengkung polarisasi dan prestasi SFM menggunakan air sisa kilang sawit sebagai fuel. Lengkung ini adalah berdasarkan perubahan penghasilan kuasa elektrik pada hari-hari tertentu iaitu hari pertama, ketiga dan ketujuh agar dapat diperhatikan dengan lebih jelas (data hari lain tidak ditunjukkan). Hasil daripada padanan model dengan data uji kaji mendapati prestasi kuasa meningkat dari hari pertama ke hari ketiga dan mula turun pada hari ketujuh. Nilai ketumpatan kuasa diikuti ketumpatan arus pada hari pertama, ke-tiga dan ke-tujuh masing-masing bernilai (mW m^{-2} ; mA m^{-2}): 1.607; 3.816, 1.979; 4.780 dan 1.311; 3.346. Kepekatan awal COD yang digunakan dalam uji kaji ini adalah 3750 mg L^{-1} dan lebih rendah berbanding dengan Cheng et al. (2010) berkepekatan $8000 - 10500 \text{ mg L}^{-1}$. Prestasi kuasa SFM dipengaruhi oleh kadar suapan kepekatan substrat dan konfigurasi SFM (Morris et al. 2007). Cheng et al. (2010) menggunakan kepekatan POME yang agak tinggi dan sistem integrasi SFM berperingkat dua yang beroperasi dengan suapan selanjur. Prestasi kuasa yang diperolehi bernilai 45.0 mW m^{-2} dengan nilai ketumpatan arus 250.0 mA m^{-2} .

Analisis kehilangan voltan akibat faktor pengehad diplotkan seperti Rajah 3 dengan tahap kehilangan setiap faktor ditunjukkan dengan jelas. Daripada Rajah

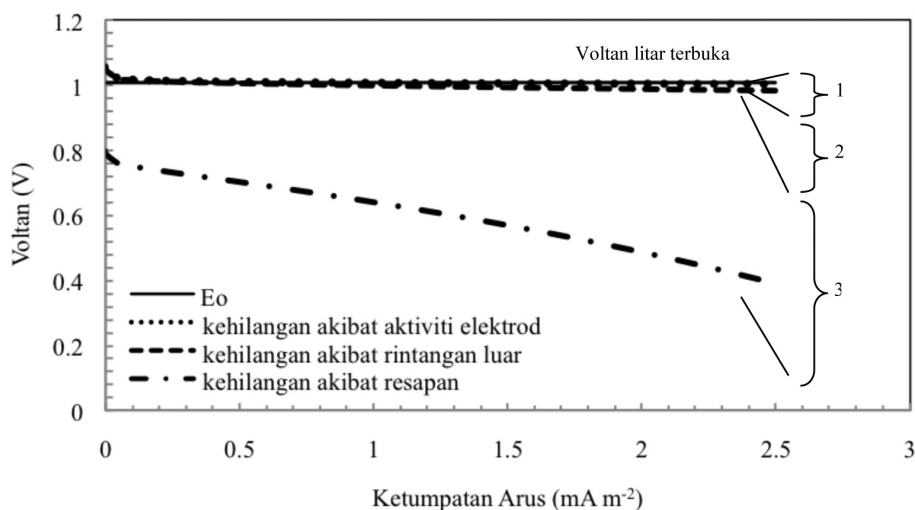
ini, didapati bahawa faktor pengangkutan jisim akibat penurunan kepekatan substrat merupakan sebab utama kehilangan voltan dalam SFM, diikuti rintangan dalaman dan aktiviti elektrod/mungkin. Proses tindak balas (penurunan substrat) dan penyingkiran proton pada anod SFM ditetapkan oleh pengangkutan jisim. Pengangkutan jisim menjadi kurang cekap apabila kebanyakan substrat telah bertindak balas dan menyebabkan pengumpulan produk metabolit dalam SFM. Pembentukan biofilem di atas permukaan anod menghadkan pengangkutan bahan tindak balas masuk ke dalam lapisan tebal biofilem pada kepekatan substrat yang semakin rendah (Picioreanu et al. 2008). Tambahan lagi, proton yang dihasilkan daripada proses metabolisme bakteria juga sukar diangkut keluar daripada biofilem (Torres et al. 2008).

Selain daripada hipotesis kesukaran mengangkut bahan tindak balas, kehilangan ini juga boleh disebabkan oleh faktor-faktor lain yang melibatkan resapan seperti resapan oksigen dari katod ke anod dan menyebabkan kehilangan elektron dari anod ke oksigen (Rodrigo et al. 2007), resapan bahan tindak balas keluar dari ruang anod ke ruang katod akibat kegagalan bahan pemisah antara dua ruang (Moon et al. 2005). Kebanyakan COD yang digunakan oleh mikroorganisma tidak dapat dihantar ke anod untuk menjanakan elektrik akibat kemasukan agen pengoksidaan yang lebih kuat, iaitu oksigen dari udara dan menyebabkan ketumpatan kuasa sangat rendah dalam SFM ini.

Membran Nafion 117 yang digunakan dalam SFM didapati membenarkan resapan oksigen dari ruang katod (yang tepu dengan oksigen terlarut) ke anod (yang anaerobik). Kajian awal yang dilakukan sebelum menunjukkan resapan oksigen merentasi membran Nafion 117 boleh berlaku dengan nilai resapan $3.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ (Lim et al. 2012). Hal ini berlaku kerana membran Nafion mengandungi molekul ion kelompok yang bersifat hidrofobik. Air yang banyak dan membanjiri permukaan



RAJAH 2. Lengkung polarisasi dan prestasi SFM daripada rawatan air sisa kilang sawit



RAJAH 3. Kehilangan voltan akibat faktor pengehad: (1) Kehilangan akibat aktiviti elektrod, (2) Kehilangan akibat rintangan luar dan (3) Kehilangan akibat resapan

membran akan meningkatkan resapan oksigen merentasi membran dengan memindahkan molekul oksigen melalui ion kelompok (Anantaraman & Gardner 1996).

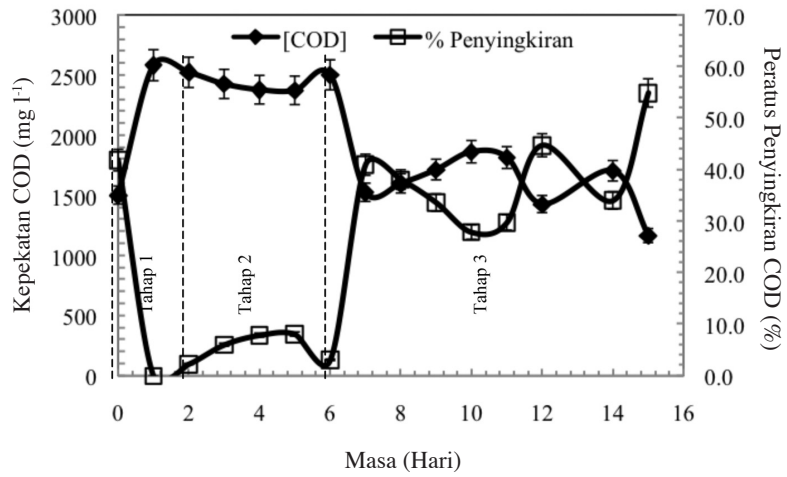
Rajah 4 menunjukkan tahap kecekapan rawatan air sisa kilang sawit yang dapat dicapai dalam SFM. Parameter utama termasuk kandungan COD, nitrogen dan karbohidrat dikaji sepanjang uji kaji dijalankan. Peratusan penyingkiran yang paling tinggi diperoleh pada hari ke-15 dengan parameter COD, nitrogen dan karbohidrat pada nilai kandungan awal, mg L^{-1} adalah masing-masing bernilai (%): 54.9 (2582.0), 99.9 (19.0) dan 98.9 (615.5). Kaedah rawatan anaerobik kolam mendapati bahawa penyingkiran COD bernilai 70.0% pada 15 hari masa pemastautin hidraulik dan hampir malar (85.0%) selepas hari ke-50 (Wong et al. 2009). Manakala sistem intergrasi MFC dua peringkat pula berjaya menyingkirkan COD sehingga 90% (Cheng et al. 2010). Walau bagaimanapun, kajian sebelum ini menunjukkan penggunaan kaedah rawatan yang berbeza daripada SFM. Kajian ini menggunakan sistem SFM sesekumpul jika dibandingkan dengan kajian sebelum ini yang menggunakan sistem intergrasi selanjut berperingkat.

Hubungan ketumpatan kuasa dan peratusan penyingkiran dapat dikaitkan berdasarkan kaedah pelinearan matematik pada tahap-tahap penghasilan kuasa elektrik yang berbeza. Rajah 5 menunjukkan ketumpatan kuasa dan peratusan penyingkiran yang dapat dihubungkan melalui persamaan linear pada tahap penghasilan kuasa yang berbeza. Daripada tahap satu berlaku pada hari pertama sehingga hari ketiga, ketumpatan kuasa meningkat, manakala tahap dua pula berlaku antara hari ketiga dan hari ketujuh semasa ketumpatan kuasa menurun. Akhirnya, tahap tiga berlaku selepas hari ke tujuh dengan perubahan ketumpatan kuasa yang agak malar. Penyingkiran COD dan karbohidrat pada tahap satu menunjukkan peningkatan ketumpatan kuasa dari 1.607 hingga 1.979 mW m^{-2} dengan peratusan penyingkiran masing-masing 6.0% dan 80.3%.

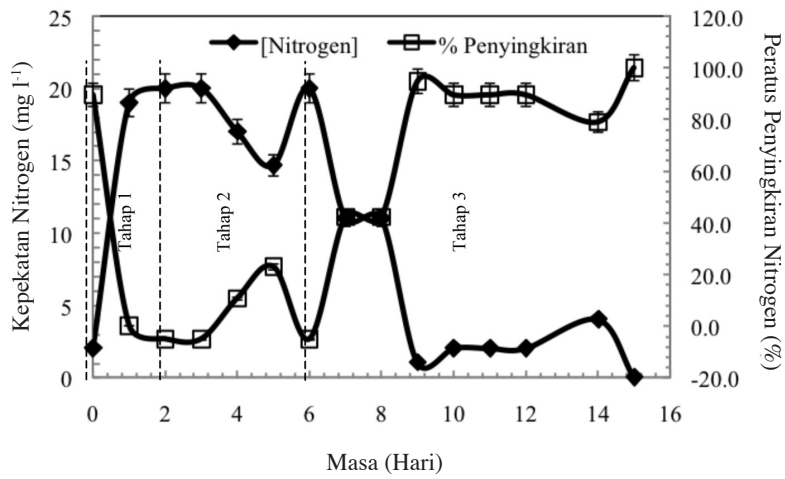
Kadar suapan substrat yang berbeza akan menyebabkan perbezaan kepekatan substrat dan menyebabkan perubahan prestasi kuasa (Behera & Ghangrekar 2009; Venkata Mohan et al. 2007).

Hubungan ketumpatan kuasa dengan peratusan penyingkiran nitrogen pula menunjukkan perbezaan daripada COD dan karbohidrat. Hubungan peratusan penyingkiran nitrogen dengan ketumpatan kuasa adalah berkadar langsung dan sama pada tahap satu dan dua. Nilai regresi, R^2 yang menyatakan ketepatan padanan antara nilai uji kaji dan model memberikan nilai lebih daripada 0.8 bagi semua plot, seperti ditunjukkan pada Rajah 5. Daripada padanan linear, hubungan ketumpatan kuasa melawan peratusan penyingkiran COD dan karbohidrat diperoleh adalah $y = 0.0518x + 1.6553$ dan $y = 0.0042x + 1.6119$ pada tahap satu dan $y = -0.3052x + 3.7815$ dan $y = -0.056x + 6.4368$ pada tahap dua. Hubungan peratusan penyingkiran nitrogen melawan ketumpatan kuasa pada tahap dua adalah sama seperti tahap satu, iaitu $y = -0.0133 + 1.7042$. Semua nilai pelinearan diringkaskan seperti di Jadual 1. Tahap penghasilan kuasa elektrik dibahagikan kepada tiga tahap utama: tahap satu (peningkatan kuasa), tahap dua (penurunan kuasa) dan tahap ketiga (pengeluaran kuasa menjadi malar).

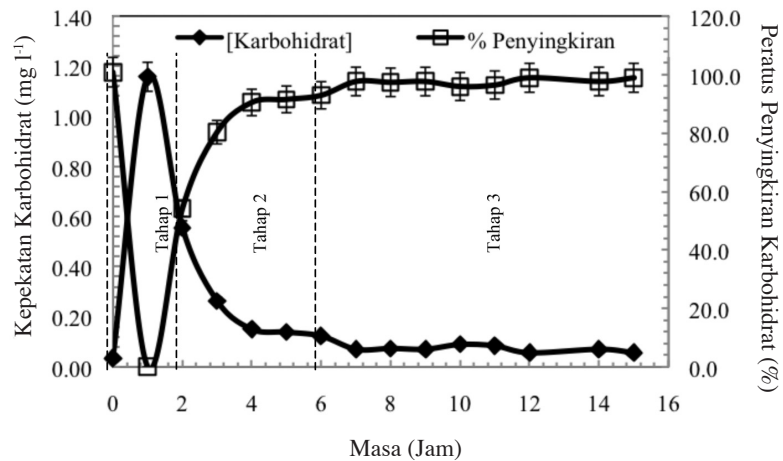
Daripada keputusan yang diperoleh, tahap satu mungkin disebabkan bakteria mula melekat pada permukaan anod untuk membentuk lapisan biofilem. Ini dapat diperhatikan daripada Rajah 4 (a), (b) dan (c) dengan kecekapan penyingkiran COD dan nitrogen adalah rendah dan kadar penghasilan kuasa elektrik juga rendah seperti ditunjukkan dalam Rajah 5 (a) dan (c). Pada tahap dua, biofilem mula terbentuk di permukaan anod dan berinteraksi antara satu sama lain dengan persekitaran cecair pual. Oleh itu, kecekapan penyingkiran mula meningkat seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4 (a), (b) dan (c). Kecekapan penyingkiran jumlah karbohidrat adalah paling cepat jika dibandingkan dengan COD dan nitrogen. Ini kerana sel-sel



(a)

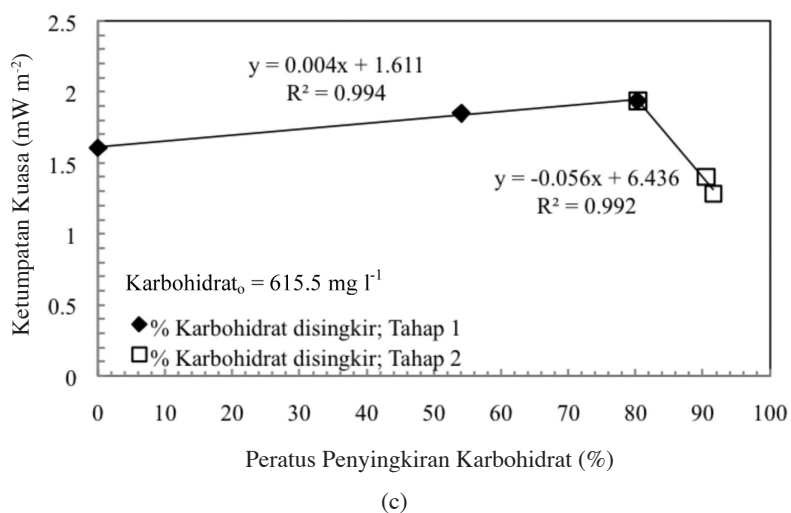
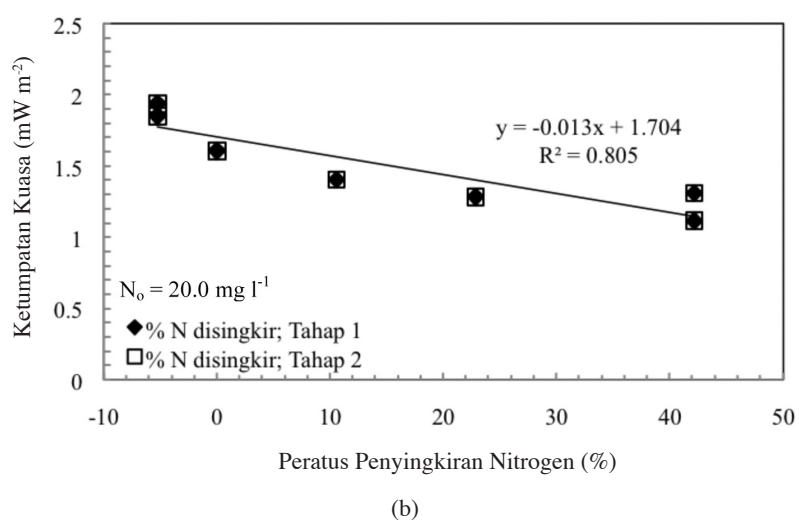
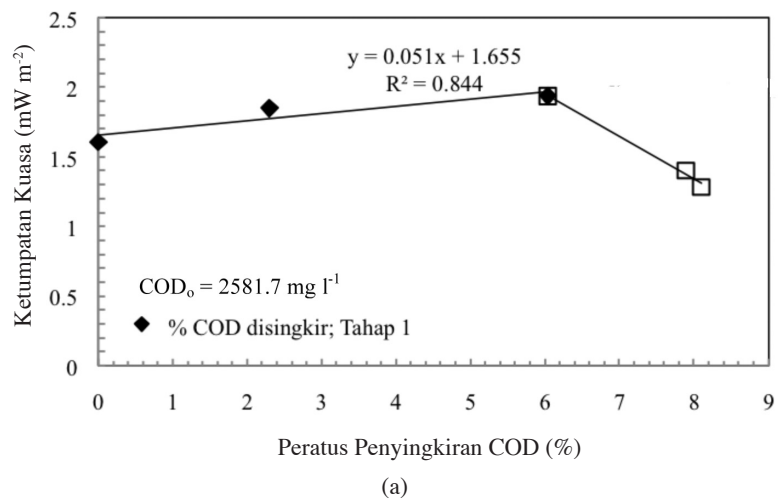


(b)



(c)

RAJAH 4. Tahap rawatan air sisa POME daripada SFM (a) COD, (b) nitrogen dan (c) karbohidrat



RAJAH 5. Lengkung hubungan ketumpatan kuasa dengan peratusan penyingkiran (a) COD, (b) nitrogen dan (c) karbohidrat

JADUAL 1. Ringkasan parameter penlinearan daripada Rajah 5

$y = mx + c$	COD		Nitrogen		Karbohidrat	
	Tahap satu*	Tahap dua**	Tahap satu*	Tahap dua**	Tahap satu*	Tahap dua**
m	0.0518	-0.3052	-0.0133		0.0042	-0.0560
c	1.6553	3.7815	1.7042		1.6119	6.4368
R ²	0.8442	0.9936	0.8051		0.9949	0.9926

*Hari pertama hingga hari ketiga; **Hari ketiga hingga hari ketujuh

mikrob menggunakan karbohidrat sebagai sumber karbon dan tenaga untuk proses metabolisme bagi menjanakan sel-sel baru di permukaan anod selepas proses pelekatan. Mikroorganisma dalam SFM ini telah mula matang selepas tahap tiga pada hari ke-7.

Masa yang diperlukan adalah lebih kurang sama dengan kajian lain yang dijalankan oleh penyelidik lain yang kurang daripada 10 hari untuk proses penyesuaian dan penghasilan arus elektrik yang mantap (Jiang et al. 2009; Rodrigo et al. 2007). Kuasa elektrik mula mantap selepas tahap dua seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5. Namun, kepekatan bahan organik yang tinggi atau banyak dalam air sisa biasanya tidak memberikan impak yang tinggi kepada penjana arus elektrik dalam SFM (Jiang et al. 2009). Kandungan organik lain selain daripada karbohidrat dan nitrogen yang tinggi menyebabkan arus elektrik SFM hampir malar walaupun 55% COD awal disingkirkan pada hari ke-15. Dengan itu, pemahaman terhadap ekologi komuniti mikroorganisma adalah penting dalam SFM dan seterusnya menyediakan satu sistem penyediaan, model dan kawalan untuk mendapatkan arus elektrik yang tinggi (Oh et al. 2010).

Penyelidikan ini telah berjaya dijalankan menggunakan air sisa kilang sawit sebagai fuel untuk SFM dan dapat menghasilkan profil kuasa elektrik yang tinggi pada hari ketiga. Namun, kecekapan rawatan yang tinggi hanya diperoleh selepas hari ketujuh untuk ketiga-tiga parameter yang diuji. SFM lebih cenderung menghasilkan kuasa elektrik yang lebih tinggi pada awal uji kaji (iaitu pada tahap satu dan dua) disamping merawat air sisa kilang. Tahap rawatan air sisa hanya menjadi tinggi selepas penghasilan kuasa menjadi malar pada akhir uji kaji (tahap ketiga). Ini menyatakan bahawa kecenderungan SFM berubah kepada merawat air sisa pada tahap ketiga sementara membekalkan kuasa elektrik yang agak malar. Walaupun SFM yang dikaji ini dapat merawat air sisa di samping menjanakan arus elektrik. Namun, kuasa elektrik yang dijanakan adalah rendah. Beberapa andaian telah dibuat berdasarkan pengalaman kajian penyelidik lain. Antaranya disebabkan oleh reka bentuk SFM yang kurang memuaskan, jarak antara elektrod terlalu jauh menyebabkan pemindahan proton rendah dan seterusnya menjejaskan pemindahan elektron dari anod ke katod (Moon et al. 2005; Oh et al. 2010). Kehadiran oksigen dalam anod juga mendatangkan masalah besar kepada SFM kerana sel mikrob lebih cenderung menggunakan oksigen daripada anod sebagai penerima elektron disebabkan tahap termodinamik yang lebih rendah. Dengan itu, kebanyakan

COD yang digunakan oleh mikroorganisma tidak dapat ditukarkan ke arus elektrik yang boleh diguna pakai dan ruang anod perlu dikekalkan dalam keadaan anaerobik supaya SFM tidak hilang kebolehannya untuk menjanakan arus elektrik (Rodrigo et al. 2007). Daripada Rajah 3, sebahagian besar kehilangan akibat resapan mungkin disebabkan oleh resapan oksigen yang banyak dari katod ke anod yang menyebabkan penurunan arus elektrik dengan kehilangan elektron kepada oksigen. Resapan oksigen dari udara boleh disebabkan membran dan reka bentuk yang kurang kedap udara menyebabkan elektron dioksidakan terus daripada mikrob sebelum dapat dikumpulkan oleh anod.

KESIMPULAN

Kajian SFM menggunakan air sisa kilang sawit ini adalah merupakan kajian awal dilaporkan di Malaysia. Reka bentuk SFM di peringkat makmal telah berjaya dilakukan walaupun terdapat beberapa penambahbaikan yang harus dilakukan. Kajian ini menunjukkan penggunaan kultur campur daripada enapcemar rawatan POME dan substrat POME dapat menghasilkan kuasa elektrik di samping merawat air sisa POME pada peringkat awal. Kesan faktor penghad utama yang menyebabkan penurunan kuasa elektrik dapat dikurangkan dengan menggunakan POME berkepekatan tinggi tanpa pencairan. Penyelidikan ini telah mendemonstrasikan kajian awal menggunakan air sisa POME sebagai substrat dalam operasi SFM.

PENGHARGAAN

Para penulis ingin menyampaikan setinggi penghargaan kepada bantuan kewangan yang diberikan oleh Universiti Kebangsaan Malaysia (GUP-BTT-07-30/187) dan Malaysian Toray Science Foundation (MTSF: 09/G48) untuk menjalankan penyelidikan ini.

RUJUKAN

- Ahmad, A.L., Chong, M.F., Bhatia, S. & Ismail, S. 2006. Drinking water reclamation from palm oil mill effluent (POME) using membrane technology. *Desalination* 191(1-3): 35-44.
- Anantaraman, A.V. & Gardner, C.L. 1996. Studies on ion-exchange membranes. Part 1. Effect of humidity on the conductivity of Nafion®. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 414(2): 115-120.
- Atlas, R.M. 2004. *Handbook of Microbiological Media*. USA: CRC Press.

- Behera, M. & Ghangrekar, M.M. 2009. Performance of microbial fuel cell in response to change in sludge loading rate at different anodic feed pH. *Bioresource Technology* 100(21): 5114-5121.
- Chae, K.-J., Choi, M.-J., Lee, J.-W., Kim, K.-Y. & Kim, I.S. 2009. Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Bioresource Technology* 100(14): 3518-3525.
- Chan, Y.J., Chong, M.F. & Law, C.L. 2010. Biological treatment of anaerobically digested palm oil mill effluent (POME) using a Lab-Scale Sequencing Batch Reactor (SBR). *J. Environ. Manage.* 91(8): 1738-1746.
- Cheng, J., Zhu, X., Ni, J. & Borthwick, A. 2010. Palm oil mill effluent treatment using a two-stage microbial fuel cells system integrated with immobilized biological aerated filters. *Bioresource Technology* 101(8): 2729-2734.
- Jiang, J., Zhao, Q., Zhang, J., Zhang, G. & Lee, D.-J. 2009. Electricity generation from bio-treatment of sewage sludge with microbial fuel cell. *Bioresource Technology* 100(23): 5808-5812.
- Lim, S.S., Daud, W.R.W., Jahim, J.M., Ghasemi, M., Chong, P.S. & Ismail, M. 2012. Sulfonated poly(ether ether ketone)/poly(ether sulfone) composite membranes as an alternative proton exchange membrane in microbial fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(5): 11409-11424.
- Logan, B.E., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W. & Rabaey, K. 2006. Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology†. *Environmental Science and Technology* 40(17): 5181-5192.
- Ma, A.N. 1997. Effluent treatment - evaporation method. *PORIM Engineering News* 44: 7-8.
- Mahreni, A. 2009. The synthesis and application of composite membrane as electrolyte in proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). Tesis Ph.D. Universiti Kebangsaan Malaysia (tidak diterbitkan).
- Moon, H., Chang, I.S., Jang, J.K. & Kim, B.H. 2005. Residence time distribution in microbial fuel cell and its influence on COD removal with electricity generation. *Biochemical Engineering Journal* 27(1): 59-65.
- Morris, J.M., Jin, S., Wang, J., Zhu, C. & Urynowicz, M.A. 2007. Lead dioxide as an alternative catalyst to platinum in microbial fuel cells. *Electrochemistry Communications* 9(7): 1730-1734.
- Oh, S.T., Kim, J.R., Premier, G.C., Lee, T.H., Kim, C. & Sloan, W.T. 2010. Sustainable wastewater treatment: how might microbial fuel cells contribute. *Biotechnol. Adv.* 28(6): 871-881.
- Picioreanu, C., van Loosdrecht, M.C., Katuri, K.P., Scott, K. & Head, I.M. 2008. Mathematical model for microbial fuel cells with anodic biofilms and anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 57(7): 965-971.
- Poh, P.E. & Chong, M.F. 2009. Development of anaerobic digestion methods for palm oil mill effluent (POME) treatment. *Bioresource Technology* 100(1): 1-9.
- Rodrigo, M.A., Cañizares, P., Lobato, J., Paz, R., Sáez, C. & Linares, J.J. 2007. Production of electricity from the treatment of urban waste water using a microbial fuel cell. *Journal of Power Sources* 169(1): 198-204.
- Tay, J.H. 1991. Complete reclamation of oil palm wastes. *Resources, Conservation and Recycling* 5(4): 383-392.
- Torres, C.I., Kato Marcus, A. & Rittmann, B.E. 2008. Proton transport inside the biofilm limits electrical current generation by anode-respiring bacteria. *Biotechnology and Bioengineering* 100(5): 872-881.
- Venkata Mohan, S., Veer Raghavulu, S., Srikanth, S. & Sarma, P.N. 2007. Bioelectricity production by mediatorless microbial fuel cell under acidophilic condition using wastewater as substrate: Influence of substrate loading rate. *Current Science* 92(12): 7.
- Vijayaraghavan, K., Ahmad, D. & Ezani Bin Abdul Aziz, M. 2007. Aerobic treatment of palm oil mill effluent. *Journal of Environmental Management* 82(1): 24-31.
- Wong, Y.S., Kadir, M.O. & Teng, T.T. 2009. Biological kinetics evaluation of anaerobic stabilization pond treatment of palm oil mill effluent. *Bioresour. Technol.* 100(21): 4969-4975.

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

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: limss@ukm.my

Diserahkan: 19 Ogos 2010

Diterima: 15 Jun 2012