

Aplikasi Keluli Tahan Karat Sebagai Elektrod Logam di dalam Sistem Bioelektrokimia

(Stainless Steel Application as Metal Electrode in Bioelectrochemical System)

Raba'atun Adawiyah Shamsuddin^a, Mimi Hani Abu Bakar^{a*}, Rozan Mohamad Yunus^a, Wan Ramli Wan Daud^b,
Jamaliah Md. Jahim^b, Wan Syaiful Aqma^c

^aFuel Cell Institute

^bResearch Center for Sustainable Process Technology (CESPRO), Faculty of Engineering & Built Environment

^cFaculty of Science and Technology

Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia

ABSTRACT

This paper reviews on the latest use and performance of several types of metals as electrodes within the development of bioelectrochemical systems (BES) including microbial fuel cells (MFC) and microbial electrolysis cells (MEC). The conventional carbon-based electrodes are typically used as an anode or cathode since the structure of the material is porous and are most suitable for the growth of electrochemically active bacteria (EAB). However, there are new developments that show the use of metal electrodes capable of producing higher current density and maximum power than carbon, due to the properties of metals such as high conductivity and mechanical strength, anti-corrosion as well as chemical structure stability. The surface modification strategy of metal promotes the EAB attachment and increases the biocompatibility or electron transfer between bacterial cell and electrode. Besides, cost-effective and easy to operate for the long-term is a contributing factor to the use of metal electrodes. To date, stainless steel becomes a common metal used in the development of BES.

Keywords: Bioelectrochemical system; Electrode; Metal; Stainless steel; Carbon

ABSTRAK

Kertas kerja ini meninjau akan penggunaan dan prestasi terkini beberapa jenis logam sebagai elektrod dalam pembangunan sistem bioelektrokimia (BES) termasuk sel bahan api mikrob (MFC) dan sel elektrolisis mikrob (MEC). Elektrod konvensional yang berasaskan karbon biasanya digunakan sebagai anod atau katod disebabkan struktur bahan berliang dan paling sesuai untuk pertumbuhan bakteria aktif elektrokimia (EAB). Walau bagaimanapun, perkembangan baru menunjukkan penggunaan elektrod logam mampu menghasilkan ketumpatan arus yang lebih tinggi dan kuasa maksimum daripada karbon, kerana sifat-sifat logam seperti kekonduksian yang tinggi dan kekuatan mekanikal, anti-karat serta kestabilan struktur kimia. Strategi pengubahsuaian permukaan logam menggalakkan perlekatan EAB serta meningkatkan tahap biokompatibiliti atau pemindahan elektron di antara sel bakteria dan elektrod. Di samping itu, kos efektif serta mudah beroperasi untuk jangka masa panjang merupakan faktor penyumbang kepada penggunaan elektrod logam. Dari kajian yang dijalankan sehingga kini, keluli tahan karat merupakan logam yang sering digunakan dalam pembangunan BES.

Kata kunci: Sistem bioelektrokimia; Elektrod; Logam; Keluli tahan karat; Karbon

PENGENALAN

Sistem bioelektrokimia (BES) menggunakan mikroorganisma sebagai pemangkin untuk pelbagai tindak balas biologi dan elektrokimia. Teknologi BES merupakan satu alternatif kepada rawatan sisa kumbahan yang turut menghasilkan tenaga mampan termasuk elektrik, hidrogen (H₂) dan lain-lain bahan kimia yang berguna (Logan 2010; Pandit et al. 2017; Rahimnejad et al. 2015). Berbanding dengan sel bahan api konvensional, BES beroperasi pada suhu bilik serta menggunakan air kumbahan dan biomas sebagai substrat terdiri dari pelbagai bahan organik atau bukan organik. Terdapat beberapa jenis BES di mana ianya boleh diklasifikasikan sebagai sel bahan api mikrob (MFC), sel

elektrolisis mikrob (MEC), sel penyahgaraman mikrob (MDC) dan sel solar mikrob (MSC), bergantung kepada konfigurasi serta aplikasi sistem tersebut (Logan et al. 2006; Logan et al. 2015; Pandit et al. 2017). Sistem MFC mengoksidakan bahan organik dan tidak organik bagi menghasilkan tenaga elektrik (Logan et al. 2006; Logan & Regan 2006). Sistem MEC pula menukar bahan organik menjadi tenaga H₂ atau pelbagai bahan kimia seperti metana (CH₄), asetat, hidrogen peroksida (H₂O₂), etanol, dan asid formik (Croese et al. 2011; Jeremiassé et al. 2010; Kadier et al. 2016), manakala MDC menggunakan potensi tenaga elektrik yang dihasilkan untuk mencapai penyahgaraman air (Santoro et al. 2017). Berbanding dengan MFC, MSC menggunakan bakteria fotoautotropik yang diperkayakan (*enriched*) sebagai bakteria

aktif elektrokimia (EAB) untuk penuaian tenaga solar bagi menghasilkan arus elektrik (Strik et al. 2011; Strycharz-Glaven et al. 2013).

Secara amnya, BES terdiri daripada beberapa komponen asas iaitu bahagian anod, katod serta membran terpilih sebagai pemisah antara dua bahagian tersebut. Mikroorganisma EAB atau juga dikenali dengan nama lainnya seperti bakteria elektrogen, bakteria eksoelektrogenik atau bakteria anod berperanan mengoksidakan bahan organik untuk menghasilkan karbon dioksida, proton dan elektron di bahagian anod (Logan 2009; Logan et al. 2006; Wang & Ren 2013). Seterusnya, elektron yang dihasilkan dipindahkan ke anod sementara proton yang dibebaskan menuju ke bahagian katod melalui membran (Logan et al. 2006; Santoro et al. 2017). EAB boleh diperolehi daripada pelbagai sumber semulajadi seperti sisa air kumbahan, sisa tanaman, lumpur, efluen minyak kelapa sawit dan sebagainya (Jong et al. 2011; Logan 2009; Zhang et al. 2015). Majoriti para penyelidik masa kini memberi fokus kepada aplikasi MFC dan MEC (Chouler et al. 2018; Daud et al. 2015; Jafary et al. 2018; Mohanakrishna et al. 2018; Stoll et al. 2018).

Di dalam MFC, elektron di anod seterusnya dipindahkan ke katod melalui litar elektrik dan kemudiannya bergabung dengan proton dan oksigen di udara untuk membentuk air. Secara keseluruhannya, tindak balas yang berlaku di dalam MFC dapat ditunjukkan di dalam rajah 1 manakala tindak balas kimia di anod dan katod adalah seperti di dalam persamaan (1) dan (2) di bawah:

Tindak balas di anod:



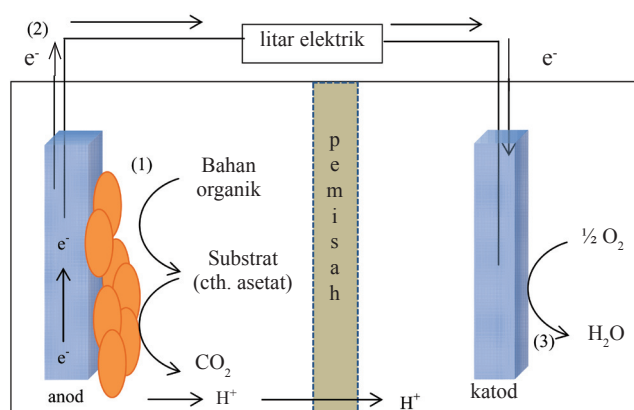
Tindak balas di katod:



Sistem BES yang lain misalnya MEC, merupakan hasil pembangunan MFC yang diubahsuai. Secara amnya, reaksi yang berlaku di dalam MEC adalah hampir sama dengan MFC. Tanpa kehadiran oksigen dalam MEC, elektron yang dibebaskan oleh EAB daripada tindak balas pengoksidan bahan organik di anod diangkut ke katod, seterusnya bergabung dengan proton untuk menghasilkan H₂. Walau bagaimanapun, tindak balas ini tidak berlaku secara spontan disebabkan faktor termodinamik. Sejumlah kecil tenaga luaran adalah diperlukan untuk memacu tindak balas tersebut (Kadier et al. 2016; Logan 2010).

Secara praktikal, tenaga luaran sebanyak 0.2 hingga 1.0 V biasanya digunakan untuk mengatasi kekurangan tenaga disebabkan faktor penggunaan elektrod berpotensi tinggi serta bahan-bahan yang meningkatkan ketahanan atau rintangan dalaman seperti membran (Jeremiasse et al. 2010; Logan 2010; Rozendal et al. 2008).

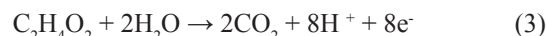
Penggunaan tenaga tersebut apabila dijumlahkan dengan tenaga yang dihasilkan oleh bakteria di dalam MEC adalah kira-kira 1.3 V. Keseluruhan tenaga luaran tambahan ini adalah hampir dengan tenaga luaran yang diperlukan untuk tindak balas elektrolisis air, iaitu kira-kira 1.4 V. Oleh itu,



RAJAH 1. Skematik mudah MFC. EAB di permukaan anod mengoksidakan bahan organik untuk menghasilkan CO₂, H⁺ dan e⁻ (1). Elektron kemudiannya dipindahkan ke katod melalui litar elektrik (2), dan seterusnya bergabung dengan proton dan oksigen untuk membentuk air (3)

proses MEC turut dikenali sebagai elektrolisis bahan organik berbanding elektrolisis air (Kadier et al. 2016; Logan 2010). Tindak balas kimia yang berlaku di anod dan katod ditunjukkan di dalam persamaan (3) dan (4) di bawah:

Tindak balas di anod:



Tindak balas di katod:



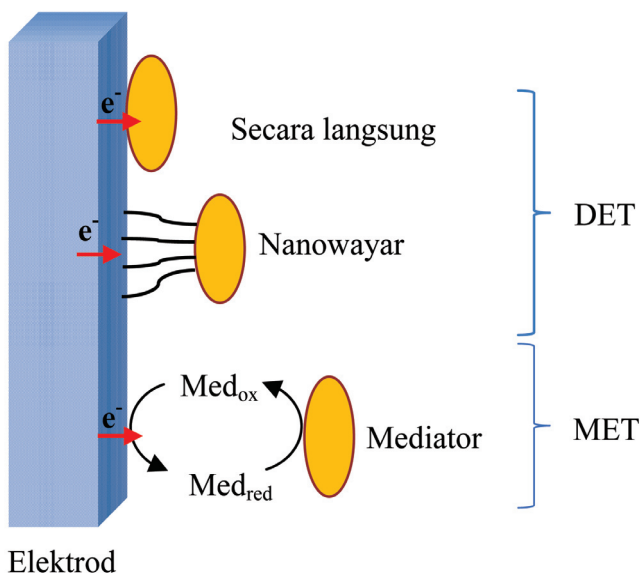
Di dalam sistem MEC, katod adalah salah satu bahagian terpenting di mana H₂ serta sebatian kimia yang berbeza dihasilkan (Babauta et al. 2012; Karmakar et al. 2011; Kundu et al. 2013; Zhou et al. 2013). Platinum (Pt) adalah pemangkin kegemaran yang digunakan di katod dan telah diaplikasikan dalam kebanyakan kajian kerana keupayaannya yang tinggi untuk memangkin penghasilan H₂ (Foley et al. 2010; Jeremiasse et al. 2010; Kundu et al. 2013; Rozendal et al. 2008). Walau bagaimanapun, terdapat kelemahan dalam penggunaan Pt, seperti kos yang tinggi dan impak negatif terhadap alam sekitar (Jeremiasse et al. 2010; Kundu et al. 2013; Logan 2010; Rozendal et al. 2008). Hal ini kerana Pt boleh menjadi toksik disebabkan oleh bahan kimia seperti sulfida yang banyak terdapat di dalam air kumbahan (Logan 2010; Rozendal et al. 2008).

Pada dasarnya, prestasi sesebuah MFC mahupun MEC boleh terjejas disebabkan beberapa faktor termasuk inokulum mikrob, pemisah dan elektrod. Walau bagaimanapun, kebanyakan penyelidikan dalam bidang ini memberi tumpuan ke atas bahan elektrod kerana ia secara langsung mempengaruhi prestasi serta potensi pembangunan BES secara komersial. Dalam kertas kerja ini, elektrod dari pelbagai jenis bahan dibincang dan dibandingkan dari segi sifat, ciri-ciri semulajadi serta prestasi yang ditunjukkan dalam aplikasi anod atau katod.

INTERAKSI ANTARA ELEKTROD DAN MIKROORGANISMA

EAB dan elektrod merupakan komponen utama yang mempengaruhi prestasi serta pembangunan BES. Mikroorganisma ini mampu menggunakan laluan metabolik yang berbeza untuk penjanaan kuasa dan tenaga. EAB yang melekat pada permukaan elektrod, turut disebut sebagai 'biofilm' memainkan peranan penting dalam penghasilan tenaga elektik atau H_2 . Biofilm merupakan jisim agregat kompleks komuniti mikrob yang dibentuk oleh pertumbuhan bakteria yang melekat sendiri pada substrat pepejal, dikenali sebagai bahan-bahan polimer ekstraselular (EPS) (Babauta et al. 2012; Hartshorne et al. 2007; Philips et al. 2016). Biofilm memainkan peranan penting dalam proses elektrokimia yang melibatkan tindak balas anodik (pengionan atau pengoksidaan) pada permukaan logam. Dengan mengubah sifat elektrod tersebut, konduktiviti, pemindahan elektron dan perlekatan biofilm boleh dipertingkatkan (Kumar et al. 2013; Sarathi & Nahm, 2013; Wei et al. 2011; Xiao et al. 2012).

Mekanisma pengangkutan elektron atau pemindahan elektron ekstraselular (EET) oleh EAB dapat diklasifikasikan kepada dua jenis iaitu secara langsung (*direct electron transfer* atau DET) dan melalui perantara atau mediator (*mediated electron transfer* atau MET) (Kracke et al. 2015; Oliveira-Brett 2017; Rosenbaum et al. 2011; Song et al. 2015), sebagaimana yang ditunjukkan di dalam Rajah 2. DET membenarkan elektron dari proses metabolisma bakteria dipindahkan secara langsung ke anod atau dari katod ke sel bakteria. Untuk itu, hubungan fizikal yang rapat antara sel bakteria dan elektrod adalah perlu bagi memudahkan pengangkutan elektron ke elektrod melalui membran *cytochromes*, enzim dan pili atau nanowayer konduktif.



RAJAH 2. Mekanisma pemindahan elektron ekstraselular (EET). Elektron dari permukaan elektrod mengalir secara langsung (DET) atau melalui mediator (MET) ke sel bakteria

Beberapa jenis EAB seperti *Geobacter sulfurreducens* dan *Shewanella oneidensis* MR-1 menggunakan mekanisma DET untuk berkomunikasi secara elektrokimia dengan anod. Seterusnya, mekanisma pemindahan elektron secara tidak langsung melibatkan perantara atau mediator seperti riboflavin (Kato 2016; Philips et al. 2016; Silva et al. 2012).

Mediator sama ada terdiri daripada molekul organik atau bukan organik seperti H_2 dan sulfur berfungsi mengangkut elektron di antara sel bakteria dengan elektrod. Ianya boleh dihasilkan sendiri oleh mikroorganisma atau disuntik untuk merangsang pemindahan elektron. Sebagai contoh, mediator seperti *derivative phenazine* yang dihasilkan oleh bakteria *Pseudomonas aeruginosa* dan flavin oleh *Shewanella* masing-masing terlibat dalam MET (Hartshorne et al. 2007; Philips et al. 2016). Mikroorganisma dengan mediator yang tersendiri berupaya mengangkut elektron dari sel ke permukaan elektrod meskipun pada jarak yang jauh (Kracke et al. 2015; Oliveira-Brett 2017).

CIRI BAHAN ELEKTROD

Dalam usaha meningkatkan prestasi serta pembangunan BES secara meluas, kos bahan mestilah dikurangkan dan penghasilan kuasa harus dimaksimumkan. Di samping itu, bahan katod hendaklah juga memiliki sifat pemangkin untuk penurunan oksigen. Walaupun ciri atau kriteria dalam pemilihan bahan yang diaplikasikan sebagai anod atau katod adalah berbeza, secara amnya elektrod harus mempunyai ciri-ciri seperti:

LUAS PERMUKAAN DAN BERLIANG

Penghasilan arus dan tenaga di dalam MFC atau MEC sangat dipengaruhi oleh luas permukaan elektrod. Di dalam aplikasi BES, kehilangan ohmik adalah berkadar langsung dengan rintangan elektrod. Justeru, salah satu kaedah untuk mengurangkan rintangan tersebut adalah dengan meningkatkan kawasan atau luas permukaan elektrod (Logan, Hamelers, Rozendal, Schröder, et al. 2006; Mustakeem 2015; Sonawane et al. 2017). Selain itu, luas permukaan yang tinggi menyediakan lebih banyak kawasan bagi tapak perlekatan bakteria sekaligus meningkatkan biokompatibiliti dan penghasilan elektron. Walau bagaimanapun, permukaan elektrod yang berliang juga boleh menyebabkan pengumpulan terlalu banyak mikroorganisma justeru mengurangkan pengaliran arus dan penghasilan kuasa maksimum (Call et al. 2009; Kalathil et al. 2017; Kumar et al. 2013).

KONDUKTIVITI

Secara amnya, di dalam aplikasi MFC atau MEC, elektron yang dibebaskan dari tindak balas pengoksidaan bahan organik oleh mikroorganisma akan melalui anod seterusnya menuju ke katod menerusi litar elektrik. Bahan anod atau katod yang mempunyai sifat konduktiviti yang tinggi akan lebih

memudahkan aliran elektron dengan rintangan yang lebih rendah (Baudler et al. 2015; Kalathil et al. 2017; Yamashita et al. 2016).

KESTABILAN DAN KETAHANAN

Pengoksidaan serta penurunan bahan organik dalam persekitaran MFC atau MEC boleh menjejaskan kestabilan kedua-dua sistem tersebut. Oleh itu, bahan elektrod yang digunakan harus bersifat tahan lama serta stabil sama ada dalam keadaan berasid atau beralkali (Kalathil et al. 2017; Peng et al. 2016; Rodenas Motos et al. 2015; Sonawane et al. 2017).

KOS EFEKTIF DAN MUDAH DIDAPATI

Penggunaan bahan elektrod sangat mempengaruhi kos pembangunan BES. Beberapa jenis bahan sama ada terdiri daripada karbon mahupun logam adalah sangat mahal dan sukar diperolehi. Logam seperti Pt melibatkan kos yang tinggi serta tidak tahan lama (Kalathil et al. 2017; Selemba et al. 2009; Wang et al. 2011). Selain itu, penggunaan bahan dengan kos yang tinggi boleh menghadkan aplikasi MFC atau MEC untuk tujuan komersial.

LOGAM SEBAGAI ELEKTROD

Pemilihan elektrod yang sesuai adalah merupakan cabaran utama bagi penyelidik dalam usaha membangunkan reka bentuk BES yang kos efektif dan berskala besar (Zhang et al. 2011; Zhang et al. 2010). Bahan anod atau katod yang sering digunakan bagi membolehkan bakteria melekat pada permukaan serta membenarkan pengaliran elektron melaluinya adalah dari beberapa jenis bahan berasaskan karbon atau logam.

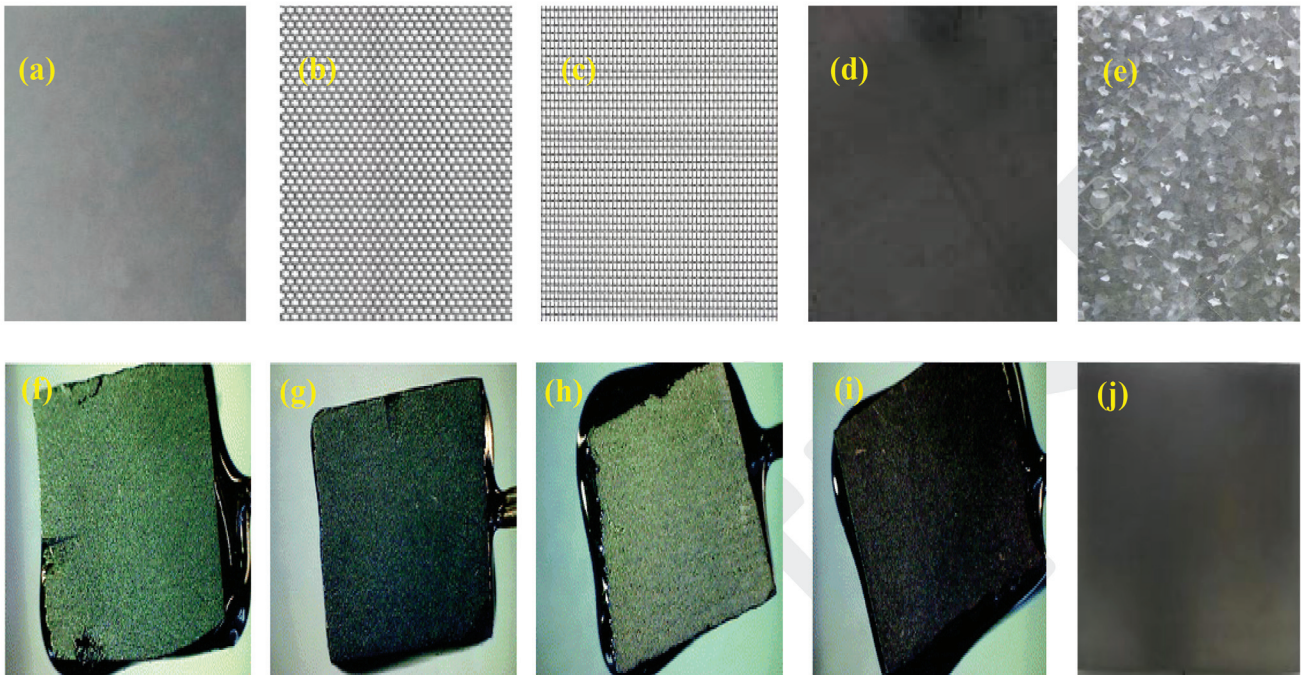
Bahan elektrod yang dipilih memainkan peranan penting dalam prestasi MFC mahupun MEC. Dalam beberapa dekad yang lalu, banyak bahan berbeza telah diteroka sebagai anod untuk MFC. Walaupun kebanyakan penyelidik terdahulu menumpukan kepada penggunaan bahan karbon seperti rod grafit, berus grafit, granul grafit, kain karbon, rod karbon dan kertas karbon, kajian mendapati bahawa jenis bahan elektrod tersebut mempunyai beberapa batasan atau kekurangan seperti luas permukaan yang rendah, rintangan dalaman yang tinggi serta agak sukar untuk diaplikasikan dalam skala besar (Baudler et al. 2015; Mustakeem 2015; Wei et al. 2011). Misalnya, penggunaan rod karbon dikatakan tidak sesuai digunakan sebagai anod kerana luas permukaan yang rendah (Santoro, Arbizzani, et al. 2017). Peningkatan prestasi ke atas elektrod karbon melalui kaedah pengubahsuaian pula malangnya melibatkan kos yang tinggi (Kumar et al. 2013; Sonawane et al. 2017). Bahan berasaskan logam amat jarang digunakan pada masa itu kerana penghasilan arus serta tenaga elektrik yang rendah. Perkara ini disebabkan beberapa faktor seperti biokompatibiliti yang rendah berbanding elektrod karbon justeru menghadkan aktiviti katalitik bakteria dan mekanisma pengangkutan elektron. Bagi mengatasi masalah tersebut, penyelidikan ke atas elektrod logam dijalankan dengan lebih mendalam termasuk pengubahsuaian permukaan. Strategi pengoksidaan lapisan logam atau rawatan haba telah berjaya meningkatkan arus dan tenaga maksimum ke atas elektrod logam (Guo et al. 2015; Liu et al. 2017; Peng et al. 2016). Malah, kaedah ini melibatkan kos yang lebih rendah berbanding penggunaan partikel grafin, komposit dan tiga dimensi (3D) ke atas elektrod karbon. Di samping pengubahsuaian permukaan, kekonduksian arus elektrik dan kekuatan mekanikal yang tinggi merupakan ciri-ciri elektrod logam yang menyumbang kepada peningkatan prestasi BES. Jadual 1 di atas menunjukkan beberapa ciri perbandingan di antara elektrod karbon dan logam.

JADUAL 1. Perbandingan di antara elektrod karbon dan elektrod logam

Ciri perbandingan	Karbon	Logam	Rujukan
Konduktiviti	Rendah	Tinggi	(Kalathil et al. 2017; Sawant et al. 2017; Wei et al. 2011)
Kekuatan mekanikal	Rendah	Tinggi	(Baudler et al. 2015; Kalathil et al. 2017; Wei et al. 2011)
Biokompatibiliti	Tinggi	Rendah	(Guo et al. 2014; Mustakeem 2015; Zhang et al. 2011)
Toksisiti	Tidak toksik terhadap bakteria	Sesetengah logam bersifat toksik terhadap bakteria	(Baudler et al. 2015; Zhu & Logan 2014)
Kemampuan perlekatan bakteria pada permukaan	Memudahkan perlekatan EAB disebabkan kebanyakan permukaan elektrod adalah berliang	Menyukarkan perlekatan EAB disebabkan kebanyakan permukaan elektrod adalah licin	(Kalathil et al. 2017; Wei et al. 2011)
Rintangan dalaman	Tinggi	Rendah	(Kalathil et al. 2017; Wei et al. 2011)
Sensitiviti	Kesesuaian terhadap nilai pH katodik yang tinggi	Sensitif terhadap nilai pH katodik yang tinggi	(Sawant et al. 2017)
Aplikasi	Sukar untuk diaplikasikan dalam skala besar	Mudah diaplikasikan dalam skala besar	(Kalathil et al. 2017; Wei et al. 2011)
Kemampuan untuk dibentuk	Sukar dibentuk	Mudah dibentuk	(Kalathil et al. 2017; Sawant et al. 2017)

Seperti yang telah dibincangkan, bahan logam lebih konduktif berbanding karbon. Walau bagaimanapun, faktor mudah berlakunya pengkaratan ke atas logam merupakan cabaran yang perlu diatasi oleh para penyelidik dalam mempertingkatkan prestasi BES. Kajian yang dijalankan sehingga kini menunjukkan aplikasi logam di dalam MFC mahupun MEC kebanyakannya menggunakan keluli tahan karat sebagai elektrod (Fontmorin et al. 2018; Gomez et al. 1997; Guo et al. 2014; Guo et al. 2015; Sudesh et al. 2006; Zhang et al. 2010; Zhang et al. 2012). Logam ini dikatakan

tidak mudah berkarat malah berupaya menunjukkan prestasi serta penghasilan tenaga yang lebih baik berbanding karbon atau lain-lain logam (Ketep et al. 2014; Peng et al. 2016; Yamashita et al. 2016). Rajah 3 menunjukkan pelbagai jenis logam yang digunakan sebagai anod atau katod di dalam pembangunan BES. Antaranya ialah emas, keluli tahan karat, titanium, nikel dan tembaga, di mana setiap satu memiliki kelebihan dan ciri-ciri yang tertentu serta keutamaan dalam aplikasi BES.



RAJAH 3. Logam elektrod (a) Plat keluli tahan karat (b) Jaringan keluli tahan karat (c) Jaringan titanium (d) Plat keluli karbon (e) Aluminium (f) Perak (g) Nikel (h) Emas (i) Tembaga (j) Besi
Rujukan: (Baudler et al. 2015)

PERBANDINGAN PRESTASI BAHAN LOGAM SEBAGAI ELEKTROD DI DALAM BES

Berdasarkan kajian yang dibuat sehingga kini, pelbagai jenis logam telah diaplikasikan sebagai elektrod di dalam sistem BES. Misalnya, emas (Au) sering digunakan sebagai anod di dalam penyelidikan MFC disebabkan logam tersebut bersifat tahan karat serta memiliki kekuatan mekanikal (Baudler et al. 2015; Sadeghifar & Rashid-Nadimi 2018; Vereia et al. 2016) dan konduktiviti yang tinggi (Muda et al. 1997). Selain itu, Au juga mempunyai rintangan terhadap aktiviti bakteria. Baru-baru ini, kajian perbandingan prestasi telah dibuat oleh Sadeghifar dan Rashid-Nadimi (2018) di antara Au nanoporos dan karbon yang dirawat dengan asid serta haba. Keputusan yang diperolehi menunjukkan Au berupaya memberi ketumpatan arus dan kuasa maksimum yang lebih tinggi iaitu masing-masing pada 0.016 A/m^2 dan 4.71 mW/m^2

berbanding karbon (0.00958 A/m^2 dan 3.55 mW/m^2) yang telah diubah suai permukaannya. Hal ini adalah kerana struktur serta sifat elektrokimia logam Au yang bertindak lebih berkesan sebagai anod dalam MFC (Sadeghifar & Rashid-Nadimi 2018). Malah, merujuk kepada hasil uji kaji yang lain, planar Au menunjukkan prestasi terbaik anod dengan ketumpatan kuasa maksimum sebanyak 8000 mW/m^2 (Sonawane et al. 2017). Hasil kajian oleh Ren et al. (2015), anod Au yang digunakan dalam MFC katod udara (Ren et al. 2015) adalah lebih baik (480.0 mW/m^2) berbanding karbon dan kain karbon lapisan mikroporos yang telah diubahsuai permukaan iaitu masing-masing adalah 419.0 mW/m^2 dan 50.6 mW/m^2 (Sonawane et al. 2017).

Seterusnya, di dalam penyelidikan MFC mahupun MEC, kebanyakan elektrod karbon diaplikasikan bersama Pt. Pt tergolong dalam kumpulan logam peralihan pada Jadual Berkala Unsur serta memiliki sifat atau ciri yang sama

dengan Au. Pt merupakan pemangkin katod yang paling biasa digunakan kerana memiliki kecekapan yang tinggi ke arah pengurangan oksigen (Gajda et al. 2018; Santoro et al. 2018). Malah, elektrod karbon tanpa Pt sebagai pemangkin telah diuji sebagai katod di dalam MFC. Hasil kajian tersebut menunjukkan kuasa maksimum yang diperolehi masih tidak dapat dibandingkan dengan katod yang disaluti dengan Pt (Verea et al. 2016). Walaupun Au dan Pt memiliki sifat logam yang berupaya meningkatkan prestasi BES, namun disebabkan kos yang tinggi menghalang aplikasi berskala besar dan tujuan pengkomersialan. Penggunaan Pt boleh memberi kesan negatif dan toksik kepada bakteria (Mustakeem 2015; Santoro et al. 2018; Wang et al. 2011).

Selain logam di atas, penggunaan keluli tahan karat (ss) sebagai anod mahupun katod di dalam MFC atau MEC semakin menarik minat para penyelidik di seluruh dunia. ss seringkali digunakan di dalam pelbagai aplikasi industri termasuk pemasangan sistem perpaipan, perumahan dan hospitaliti (Gómez et al. 1997; Sudesh et al. 2006). ss adalah alternatif bahan berasaskan logam yang sangat baik bagi menggantikan karbon kerana sifat mekanikal dan konduktiviti yang tinggi, rintangan terhadap kakisan atau tidak mudah berkarat serta memiliki kestabilan komposisi bahan kimia untuk aplikasi jangka panjang. Malah, sesetengah kajian BES mendapati prestasi ss adalah lebih baik atau setanding anod berasaskan karbon serta mampu menghasilkan ketumpatan arus maksimum yang tinggi. Misalnya, perbandingan bahan anod MFC yang dijalankan oleh Pocaznoi et al. (2012) di antara ss dengan karbon dan grafit. Hasil kajian mereka mendapati ss mampu menghasilkan ketumpatan arus maksimum sehingga 35.0 A/m^2 sementara karbon dan grafit, masing-masing adalah 33.7 A/m^2 dan 9.5 A/m^2 . Pembentukan biofilm juga kelihatan agak menyeluruh pada permukaan ss menerusi analisis morfologi pengimbas mikroskop elektron (SEM) (Pocaznoi et al. 2012). Strategi pengubahsuaian permukaan yang diperkenalkan pada tahun 2015 menjadikan elektrod logam lebih kerap digunakan kerana keupayaannya menghasilkan arus dan kuasa yang lebih tinggi (Ledezma et al. 2015; Sonawane et al. 2017). Misalnya, Ledezma et al. (2015) telah menguji prestasi ss di dalam MFC apabila ianya dikenakan rawatan haba pada suhu 600°C . Ternyata keputusan uji kaji mereka menunjukkan logam anod teroksida tersebut lebih berkesan dan mampu meningkatkan ketumpatan arus berbanding permukaan keluli yang tidak diubahsuai atau dikenakan haba ke atasnya (Ledezma et al. 2015). Ketumpatan arus maksimum sehingga 19.1 A/m^2 diperolehi oleh ss teroksida manakala sebanyak 0.025 A/m^2 didapati dari keluli yang tidak dirawat haba ke atasnya (Peng et al. 2016). Sementara itu, kajian yang dijalankan oleh Yamashita et al. (2016) mendapati ss teroksida menunjukkan ketumpatan kuasa maksimum sebanyak 1063 mW/m^2 , masing-masing adalah 184% dan 24% lebih tinggi berbanding ss dan karbon anod yang tidak dirawat (Yamashita et al. 2016). Keputusan yang sama diperolehi oleh Guo et al. (2014) dengan menggunakan kaedah pengoksidaan api ke atas ss. Justeru, mereka memberi

kesimpulan bahawa sifat-sifat ss termasuk mempunyai kestabilan komposisi bahan kimia, luas permukaan yang tinggi serta penggunaan kaedah pengoksidaan api, mampu memberi prestasi yang tinggi dalam membangunkan BES pada skala besar (Guo et al. 2014).

Titanium (Ti) juga merupakan logam yang digunakan sebagai elektrod dan industri elektrolisis. Ti memiliki sifat anti-karat serta konduktiviti yang tinggi (Feng et al. 2016). Berdasarkan Michaelidou et al. (2011), Ti mempunyai kestabilan komposisi bahan kimia justeru tidak mudah mengalami kemerosotan. Hal ini boleh menjadi kelebihan ke atas Ti sebagai elektrod dalam aplikasi BES untuk jangka panjang. Walau bagaimanapun, penggunaan logam tersebut sebagai anod kurang mendapat perhatian para penyelidik sebelum ini kerana biokompatibiliti yang rendah sekaligus menjejaskan prestasi dalam MFC. Kajian pengubahsuaian permukaan elektrod didapati telah berjaya meningkatkan kadar arus dan kuasa maksimum ke atas Ti. Kaedah *in situ* nanotubes titanium dioksida (TNS) menjadikan permukaan Ti lebih kasar, hidrofilik serta konduktiviti untuk pembentukan biofilm (Feng et al. 2016). Ketumpatan arus maksimum yang dicapai pada anod TNs ini ialah 12.7 A/m^2 , iaitu 190 kali lebih tinggi berbanding Ti yang tidak diubah suai (Feng et al. 2016). Selain itu, hasil kajian yang dijalankan oleh Zhou et al. (2016), Ti mengandungi lebih banyak atom oksigen setelah dikenakan rawatan haba sekaligus mampu mencapai ketumpatan kuasa maksimum yang lebih tinggi apabila dijadikan anod MFC. Melalui analisis SEM dan sinar-X difraksi (XRD), permukaan titanium teroksida mempamerkan aktiviti elektrokatalitik serta biokompatibiliti yang lebih baik untuk pemindahan elektron antara bakteria dan anod (Zhou et al. 2016). Walau bagaimanapun, penggunaan Ti masih belum meluas sebagai anod atau katod berbanding ss dalam kajian BES.

Selain itu, pembangunan BES menunjukkan keupayaan logam nikel (Ni) sebagai elektrod memberikan prestasi yang tinggi dan stabil dalam jangka panjang (Baudler et al. 2015; Michaelidou et al. 2011; Satar et al. 2017; Zhou et al. 2016). Kajian yang dibuat oleh Baudler et al. (2015), memperlihatkan ketumpatan arus maksimum sebanyak 3.84 A/m^2 apabila Ni digunakan sebagai anod dalam MFC (Baudler et al. 2015). Walau bagaimanapun, kajian tersebut memberikan ketumpatan arus maksimum lebih tinggi ke atas anod ss (6.74 A/m^2) berbanding Ni. Penyelidikan ke atas pembangunan tiga dimensi (3D) nikel-oksida grafin sebagai anod dalam MFC, memberikan ketumpatan kuasa maksimum lebih tinggi berbanding elektrod karbon yang lain iaitu kertas karbon dan kain karbon di bawah kondisi sistem yang sama (Wang et al. 2013). Keputusan membuktikan bahawa penggunaan Ni sebagai elektrod berupaya memberi prestasi yang lebih baik di dalam penghasilan arus tenaga. Walau bagaimanapun, disebabkan faktor harga yang agak mahal serta rintangan ohmik yang tinggi, menjadikan Ni kurang sesuai digunakan untuk aplikasi BES (Kadier et al. 2016; Lu et al. 2016). Malah, hasil beberapa kajian menjelaskan ion Ni yang dilepaskan daripada elektrod boleh menjadi racun

JADUAL 2. Perbandingan prestasi beberapa jenis logam sebagai anod di dalam MFC

Anod	Inokulasi bakteria	Ketumpatan arus maksimum (A/m ²)	Ketumpatan kuasa maksimum (mW/m ²)	Rujukan
Aluminium	Sedimen lumpur	0.36	266.0	(Haque et al. 2015)
Besi	Sedimen lumpur	0.89	646.0	(Haque et al. 2015)
Emas	Enap cemar pencernaan bukan aerobik	1.11	480.0	(Ren et al. 2015)
Emas	Influen klarifier	0.12	8000.0	(Fraiwan et al. 2014)
Jaringan keluli tahan karat	Pelepasan MFC	-	12.0	(Zhu & Logan 2014)
Keluli tahan karat	Tanah	35.0	-	(Pocaznoi et al. 2012)
Keluli tahan karat	Sisa air kumbahan, Steinhof, Braunschweig, German	6.74	-	(Baudler et al. 2015)
Kuprum	Sedimen lumpur	0.61	387.0	(Haque et al. 2015)
Nikel	Sisa air kumbahan, Steinhof, Braunschweig, German	3.84	-	(Baudler et al. 2015)
Perak	Sisa air kumbahan, Steinhof, Braunschweig, German	11.0	-	(Baudler et al. 2015)
Tembaga	Pelepasan MFC	-	2.0	(Zhu & Logan 2014)
Tembaga	Enap cemar bukan aerobik	-	40000.0	(Kargi & Eker 2009)
Tembaga	Sisa air kumbahan, Steinhof, Braunschweig, German	15.0	-	(Baudler et al. 2015)
Zink	Sedimen lumpur	1.17	913.0	(Haque et al. 2015)

JADUAL 3. Perbandingan prestasi beberapa jenis logam sebagai katod di dalam MEC

Katod	Inokulasi bakteria	Ketumpatan arus maksimum (A/m ²) atau sebaliknya dinyatakan	Kadar penghasilan hidrogen (m ³ -H ₂ /m ³ /d) atau sebaliknya dinyatakan	Keseluruhan pemulihan tenaga (%)	Kecekapan tenaga (%)	Rujukan
Jaringan keluli tahan karat	Sisa air kumbahan	136 ± 1	1.13 ± 0.02	54 ± 1	145 ± 4	(Lu et al. 2016)
Keluli tahan karat	Spesis fosfat	-	4.9 L/h/m ²	-	-	(Munoz et al. 2010)
Keluli tahan karat	MFC effluen	-	1.5	46	-	(Selembo et al. 2009)
Jaringan keluli tahan karat	Sisa air kumbahan	8.08 A/m ²	2.1 ± 0.3	98 ± 4	74 ± 4	(Zhang et al. 2010)
Berus keluli tahan karat	Sisa air kumbahan	188 ± 10	1.7 ± 0.1	78 ± 5	221 ± 8	(Call et al. 2009)
Nikel	Sisa air kumbahan	140 ± 1	1.13 ± 0.01	47 ± 0	141 ± 1	(Lu et al. 2016)
Nikel	Sisa air kumbahan	-	1.09	74	139	(Wang et al. 2011)
Nikel	MFC effluen	-	0.76	48	-	(Selembo et al. 2009)

kepada bakteria dan ini memberi kesan negatif terhadap pembentukan biofilm pada permukaan anod atau katod, sekaligus menghasilkan ketumpatan arus yang rendah.

Tembaga pula merupakan sejenis logam yang bersifat antimikrob, di mana mikroorganisma dikatakan tidak dapat tumbuh pada permukaannya. Tembaga mempunyai konduktiviti yang tinggi, malah dikatakan kira-kira 900 kali lebih baik berbanding grafit (Baudler et al. 2015). Namun, logam ini kurang sesuai untuk digunakan sebagai anod dalam MFC kerana bersifat mudah berkarat (Abdullah et al. 1999). Kajian yang dijalankan oleh Zhu & Logan (2014) menunjukkan bahawa pengaratan tembaga menghalang

pembentukan biofilm EAB pada anod tembaga (Zhu & Logan 2014). Keadaan ini memberi kesan negatif terhadap prestasi MFC mahupun MEC serta menghadkan pembangunan BES untuk pengoperasian jangka panjang.

Beberapa jenis logam lain seperti kuprum, tembaga dan perak juga telah diuji sebagai anod dalam aplikasi MFC. Walau bagaimanapun, hasil uji kaji yang diperolehi menunjukkan ketumpatan arus dan kuasa maksimum yang dihasilkan adalah rendah berbanding ss (Baudler et al. 2015; Haque et al. 2015; Pocaznoi et al. 2012). Misalnya, kajian yang dibuat oleh Baudler et al. (2015), menunjukkan logam perak dan tembaga sebagai anod dalam aplikasi MFC masing-

masing memberikan ketumpatan arus maksimum sebanyak 11.0 A/m² dan 15.0 A/m² (Baudler et al. 2015). Ion tembaga dan nikel yang dilepaskan daripada elektrod dikatakan boleh menjadi racun kepada mikroorganisma sekaligus memberi kesan negatif ke atas pembentukan 'biofilm'. Namun, hasil kajian juga mendapati kedua-dua logam tersebut adalah stabil untuk jangka panjang pembangunan BES (Santoro et al. 2017). Di dalam sistem MEC, pemilihan bahan katod yang sesuai adalah penting untuk penghasilan hidrogen. Misalnya, kajian yang dibuat oleh beberapa orang penyelidik menunjukkan ss katod mampu menghasilkan ketumpatan arus maksimum serta kadar penghasilan hidrogen lebih tinggi berbanding logam lain (Call et al. 2009; Wagner et al. 2009; Selembo et al. 2009).

Secara keseluruhannya, kajian yang dijalankan sehingga kini sama ada dalam MFC atau MEC, banyak memberi tumpuan kepada penggunaan ss memandangkan logam tersebut mampu memberi ketumpatan arus dan kuasa maksimum yang tinggi serta melibatkan kos yang rendah dalam pembangunan BES. Walau bagaimanapun, beberapa faktor masih perlu dipertimbangkan seperti rintangan dan luas permukaan untuk mencapai prestasi yang lebih tinggi di dalam aplikasi BES (Guo et al. 2014; Hou et al. 2015; Yamashita et al. 2016; Zhang et al. 2010). Jadual 2 dan 3 di bawah menunjukkan perbandingan prestasi ke atas pelbagai jenis logam yang digunakan.

KESIMPULAN

Selain pemangkin biologi, elektrod merupakan komponen utama serta paling kerap dikaji dalam usaha meningkatkan prestasi BES. Karbon sering digunakan sebagai anod atau katod disebabkan ciri-ciri bahan tersebut yang berliang sekaligus memudahkan perlekatan bakteria pada permukaannya. Walau bagaimanapun, hasil kajian yang dijalankan sehingga kini mendapati elektrod dari jenis logam berupaya menunjukkan prestasi yang hampir atau lebih tinggi berbanding karbon melalui pengubahsuaian permukaan serta ciri-ciri semula jadi logam tersebut. Permukaan logam teroksida mempamerkan aktiviti elektrokatalitik serta biokompatibiliti yang lebih baik untuk pemindahan elektron antara bakteria dan elektrod. Kebanyakan logam seperti Au, ss dan titanium memiliki sifat elektrokimia seperti konduktiviti serta kekuatan mekanikal yang tinggi, antikarat serta kestabilan komposisi bahan kimia. Selain itu, elektrod logam mudah dibentuk dan diaplikasikan dalam skala besar. Penggunaan elektrod yang sesuai, mampu meningkatkan kekuatan arus dan tenaga maksimum serta kos efektif menjadikan ss sebagai logam yang paling kerap diaplikasikan sebagai anod atau katod di dalam pembangunan BES.

PENGHARGAAN

Kajian ini dibiaya oleh Skim Geran Asas Penyelidikan (FRGS) (FRGS/1/2014/TK06/UKM/03/1) dan Skim Geran Penyelidikan Universiti (GUP) (GUP-2015-036). Penulis

ingin mengucapkan ribuan terima kasih kepada Penyelia dan Penyelia Bersama Institut Sel Fuel yang terlibat dalam membantu, memberi bimbingan serta tunjuk ajar dalam kajian yang dijalankan.

RUJUKAN

- Abdullah, S. R. S., Rahman, R. A., Mohamad, A. B., Mustafa, M. M. & Khadum, A. A. H. 1999. Removal of mixed heavy metals by hydroxide precipitation. *Jurnal Kejuruteraan* 85-101.
- Babauta, J., Renslow, R., Lewandowski, Z. & Beyenal, H. 2012. Electrochemically active biofilms: Facts and fiction. A review. *Biofouling* 28(8): 789-812.
- Baudler, A., Schmidt, I., Langner, M., Greiner, A. & Schroder, U. 2015. Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science* 8(7): 2048-2055.
- Call, D. F., Merrill, M. D. & Logan, B. E. 2009. High surface area stainless steel brushes as cathodes in microbial electrolysis cells. *Environmental Science & Technology* 43(6): 2179-2183.
- Call, D. F., Wagner, R. C. & Logan, B. E. 2009. Hydrogen production by *Geobacter* species and a mixed consortium in a microbial electrolysis cell. *Applied Environmental & Microbiology* 75(24): 7579-7587.
- Chouler, J., Cruz-Izquierdo, Á., Rengaraj, S., Scott, J. L. & Di Lorenzo, M. 2018. A screen-printed paper microbial fuel cell biosensor for detection of toxic compounds in water. *Biosensors & Bioelectronics* 102: 49-56.
- Croese, E., Pereira, M., Euserink, G.-J., Stams, A. M. & Geelhoed, J. 2011. Analysis of the microbial community of the biocathode of a hydrogen-producing microbial electrolysis cell. *Applied Microbiology & Biotechnology* 92(5): 1083-1093.
- Daud, S. M., Kim, B. H., Ghasemi, M. & Daud, W. R. W. 2015. Separators used in microbial electrochemical technologies: Current status and future prospects. *Bioresource Technology* 195: 170-179.
- Feng, H., Liang, Y., Guo, K., Chen, W., Shen, D., Huang, L., Zhou, Y., Wang, M. & Long, Y. 2016. TiO₂ nanotube arrays modified titanium: A Stable, scalable, and cost-effective bioanode for microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology Letters* 3(12): 420-424.
- Foley, J. M., Rozendal, R. A., Hertle, C. K., Lant, P. A. & Rabaey, K. 2010. Life cycle assessment of high-rate anaerobic treatment, microbial fuel cells, and microbial electrolysis cells. *Environmental Science & Technology* 44(9): 3629-3637.
- Fontmorin, J.-M., Hou, J., Head, I., Scott, K. & Yu, E. 2018. Stainless steel-based bioanodes for applications in bioelectrochemical systems. *Meeting Abstracts* 2247-2247.
- Fraivan, A., Adusumilli, S., Han, D., Steckl, A., Call, D., Westgate, C. & Choi, S. 2014. Microbial power-generating capabilities on micro-/nano-structured anodes

- in micro-sized microbial fuel cells. *Fuel Cells* 14(6): 801-809.
- Gomez de Saravia, S., Fernandez-lorenzo de Mele, M., Videla, H. & Edyvean, R. 1997. Bacterial biofilms on cathodically protected stainless steel. *Biofouling* 11(1): 1-17.
- Gajda, I., Greenman, J., Santoro, C., Serov, A., Melhuish, C., Atanassov, P. & Ieropoulos, I. A. 2018. Improved power and long term performance of microbial fuel cell with Fe-N-C catalyst in air-breathing cathode. *Energy (Oxford, England)* 144: 1073-1079.
- Guo, K., Donose, B. C., Soeriyadi, A. H., PrevotEAU, A., Patil, S. A., Freguia, S., Gooding, J. J. & Rabaey, K. 2014. Flame oxidation of stainless steel felt enhances anodic biofilm formation and current output in bioelectrochemical systems. *Environmental Science & Technology* 48(12): 7151-7156.
- Guo, K., Soeriyadi, A. H., Feng, H., PrevotEAU, A., Patil, S. A., Gooding, J. J. & Rabaey, K. 2015. Heat-treated stainless steel felt as scalable anode material for bioelectrochemical systems. *Bioresource Technology* 195(Supplement C): 46-50.
- Haque, N., Cho, D. & Kwon, S. 2015. Characteristics of electricity production by metallic and nonmetallic anodes immersed in mud sediment using sediment microbial fuel cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012032.
- Hartshorne, R., Jepson, B., Clarke, T., Field, S., Fredrickson, J. & Zachara, J. 2007. Characterization of *Shewanella Oneidensis* Mtrc: A cell-surface decaheme cytochrome involved in respiratory electron transport to extracellular electron acceptors. *JBIC, Journal of Biological Inorganic Chemistry* 12(7): 1083-1094.
- Hou, J., Liu, Z., Li, Y., Yang, S. & Zhou, Y. 2015. A comparative study of graphene-coated stainless steel fiber felt and carbon cloth as anodes in mfc. *Bioprocess & Biosystems Engineering* 38(5): 881-888.
- Jafary, T., Wan Daud, W. R., Ghasemi, M., Abu Bakar, M. H., Sedighi, M., Kim, B. H., Carmona-Martínez, A. A., Jahim, J. M. & Ismail, M. 2018. Clean hydrogen production in a full biological microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.01.010>.
- Jeremiassé, A. W., Hamelers, H. V. M. & Buisman, C. J. N. 2010. Microbial electrolysis cell with a microbial biocathode. *Bioelectrochemistry* 78(1): 39-43.
- Jong, B. C., Liew, P. W., Lebai Juri, M., Kim, B. H., Mohd Dzomir, A. Z., Leo, K. W. & Awang, M. R. 2011. Performance and microbial diversity of palm oil mill effluent microbial fuel cell. *Letter in Applied Microbiology* 53(6): 660-667.
- Kadier, A., Simayi, Y., Abdeshahian, P., Azman, N. F., Chandrasekhar, K. & Kalil, M. S. 2016. A comprehensive review of microbial electrolysis cells (mec) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production. *Alexandria Engineering Journal* 55(1): 427-443.
- Kalathil, S., Patil, S. A. & Pant, D. 2017. Microbial Fuel Cells: Electrode materials. Dlm. (pnyt.). *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences & Chemical Engineering*, Elsevier.
- Kargi, F. & Eker, S. 2009. High power generation with simultaneous cod removal using a circulating column microbial fuel cell. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 84(7): 961-965.
- Karmakar, S., Kundu, K. & Kundu, S. 2011. Development and designing of microbial fuel cells. *Journal of Biological Sciences* 2(2): 013-019.
- Kato, S. 2016. Microbial extracellular electron transfer and its relevance to iron corrosion. *Microbial Biotechnology* 9(2): 141-148.
- Ketep, S. F., Bergel, A., Calmet, A. & Erable, B. 2014. Stainless steel foam increases the current produced by microbial bioanodes in bioelectrochemical systems. *Energy & Environmental Science* 7: 1633-1637.
- Kracke, F., Vassilev, I. & Krömer, J. O. 2015. Microbial electron transport and energy conservation—the foundation for optimizing bioelectrochemical systems. *Frontiers in Microbiology* 6:575.
- Kumar, G. G., Sarathi, V. G. S. & Nahm, K. S. 2013. Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells. *Biosensors & Bioelectronics* 43: 461-475.
- Kundu, A., Sahu, J. N., Redzwan, G. & Hashim, M. A. 2013. An overview of cathode material and catalysts suitable for generating hydrogen in microbial electrolysis cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 38(4): 1745-1757.
- Ledezma, P., Donose, B., Freguia, S. & Keller, J. 2015. Oxidised stainless steel: a very effective electrode material for microbial fuel cell bioanodes but at high risk of corrosion. *Electrochimica Acta* 158(10): 356-360.
- Liu, D., Zheng, T., Buisman, C. & Ter Heijne, A. 2017. Heat-treated stainless steel felt as a new cathode material in a methane-producing bioelectrochemical system. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 5(12): 11346-11353.
- Logan, B. E. 2009. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells. *Nature Reviews Microbiology* 7(5): 375-381.
- Logan, B. E. 2010. Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems. *Applied Microbiology & Biotechnology* 85(6): 1665-1671.
- 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 & Technology* 40(17): 5181-5192.
- Logan, B. E. & Regan, J. M. 2006. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends Microbiology* 14(12): 512-518.
- Logan, B. E., Wallack, M. J., Kim, K.-Y., He, W., Feng, Y. & Saikaly, P. E. 2015. Assessment of microbial fuel

- cell configurations and power densities. *Environmental Science & Technology Letters* 2(8): 206-214.
- Lu, L., Hou, D., Fang, Y., Huang, Y. & Ren, Z. 2016. Nickel based catalysts for highly efficient h₂ evolution from wastewater in microbial electrolysis cells. *Electrochimica Acta* 206: 381-387.
- Michaelidou, U., Ter Heijne, A., Euverink, G. J. W., Hamelers, H. V., Stams, A. J. & Geelhoed, J. S. 2011. Microbial communities and electrochemical performance of titanium-based anodic electrodes in a microbial fuel cell. *Applied & Environmental Microbiology* 77(3): 1069-1075.
- Mohanakrishna, G., Abu-Reesh, I. M., Kondaveeti, S., Al-Raoush, R. I. & He, Z. 2018. Enhanced treatment of petroleum refinery wastewater by short-term applied voltage in single chamber microbial fuel cell. *Bioresource Technology* 253: 16-21.
- Muda, E. N. E., Majlis, B. Y. & Bakar, M. A. A. 1997. Penggunaan elektrod filem nipis emas dalam analisis enzim secara konduktometri. *Jurnal Kejuruteraan* 53-62.
- Munoz, L. D., Erable, B., Etcheverry, L., Riess, J., Basséguy, R. & Bergel, A. 2010. Combining phosphate species and stainless steel cathode to enhance hydrogen evolution in microbial electrolysis cell (mec). *Electrochemistry Communications* 12(2): 183-186.
- Mustakeem. 2015. Electrode materials for microbial fuel cells: Nanomaterial approach. *Materials for Renewable & Sustainable Energy* 4(4): 22.
- Oliveira-Brett, A. M. 2017. Electron transfer reactions in biological systems. Dlm. (pnyt.). *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences & Chemical Engineering*, Elsevier.
- Pandit, S., Kuppam, C., Kakarla, R., Kadier, A. & Jeevitha, V. 2017. *Basic principles of microbial fuel cell*: Technical challenges & economic feasibility. *Bioremediation & Bioenergy* 1: 165-188.
- Peng, X., Chen, S., Liu, L., Zheng, S. & Li, M. 2016. Modified stainless steel for high performance and stable anode in microbial fuel cells. *Electrochimica Acta* 194:246-252.
- Philips, J., Verbeeck, K., Rabaey, K. & Arends, J. B. A. 2016. Electron transfer mechanisms in biofilms. *Microbial Electrochemical & Fuel Cells*, 67-113. Boston: Woodhead Publishing.
- Pocaznoi, D., Calmet, A., Etcheverry, L., Erable, B. & Bergel, A. 2012. Stainless steel is a promising electrode material for anodes of microbial fuel cells. *Energy & Environmental Science* 5(11): 9645-9652.
- Rahimnejad, M., Adhami, A., Darvari, S., Zirepour, A. & Oh, S.-E. 2015. Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. *Alexandria Engineering Journal* 54(3): 745-756.
- Ren, H., Pyo, S., Lee, J.-I., Park, T.-J., Gittleson, F. S., Leung, F. C. C., Kim, J., Taylor, A. D., Lee, H.-S. & Chae, J. 2015. A high power density miniaturized microbial fuel cell having carbon nanotube anodes. *Journal of Power Sources* 273: 823-830.
- Rodenas Motos, P., Ter Heijne, A., Van Der Weijden, R., Saakes, M., Buisman, C. J. N. & Sleutels, T. H. J. A. 2015. High rate copper and energy recovery in microbial fuel cells. *Frontiers in Microbiology* 6: 527.
- Rosenbaum, M., Aulenta, F., Villano, M. & Angenent, L. T. 2011. Cathodes as electron donors for microbial metabolism: which extracellular electron transfer mechanisms are involved? *Bioresource Technology* 102(1): 324-333.
- Rozendal, R. A., Jeremiasse, A. W., Hamelers, H. V. M. & Buisman, C. J. N. 2008. Hydrogen production with a microbial biocathode. *Environmental Science & Technology* 42(23): 8630-8640.
- Sadeghifar, M. & Rashid-Nadimi, S. 2018. Nanoporous gold electrode prepared from gold compact disk as the anode for the microbial fuel cell. *Journal of the Iranian Chemical Society* 15(3): 607-612.
- Santoro, C., Abad, F. B., Serov, A., Kodali, M., Howe, K. J., Soavi, F. & Atanassov, P. 2017. Supercapacitive microbial desalination cells: new class of power generating devices for reduction of salinity content. *Applied Energy* 208: 25-36.
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B. & Ieropoulos, I. 2017. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications: A review. *Journal of Power Sources* 356: 225-244.
- Santoro, C., Kodali, M., Herrera, S., Serov, A., Ieropoulos, I. & Atanassov, P. 2018. Power generation in microbial fuel cells using platinum group metal-free cathode catalyst: Effect of the catalyst loading on performance and costs. *Journal of Power Sources* 378: 169-175.
- Sarathi, V. S. & Nahm, K. S. 2013. Recent advances and challenges in the anode architecture and their modifications for the applications of microbial fuel cells. *Biosensors & Bioelectronics* 43: 461-475.
- Satar, I., Daud, W. R. W., Kim, B. H., Somalu, M. R. & Ghasemi, M. 2017. Immobilized mixed-culture reactor (imcr) for hydrogen and methane production from glucose. *Energy* 139: 1188-1196.
- Sawant, S. Y., Han, T. H. & Cho, M. H. 2017. Metal-free carbon-based materials: promising electrocatalysts for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells. *International Journal of Molecular Sciences* 18(1): 25.
- Selembo, P. A., Merrill, M. D. & Logan, B. E. 2009. The use of stainless steel and nickel alloys as low-cost cathodes in microbial electrolysis cells. *Journal of Power Sources* 190(2): 271-278.
- Silva, S. M., Pacheco, I. & Pereira, I. A. 2012. Electron transfer between periplasmic formate dehydrogenase and cytochromes *c* in *Desulfovibrio desulfuricans* ATCC 27774. *Journal of Biological Inorganic Chemistry* 17(5): 831-838.
- Sonawane, J. M., Yadav, A., Ghosh, P. C. & Adeloju, S. B. 2017. Recent advances in the development and utilization of modern anode materials for high performance microbial fuel cells. *Biosensors & Bioelectronics* 90(Supplement C): 558-576.

- Song, H.-L., Zhu, Y. & Li, J. 2015. Electron transfer mechanisms, characteristics and applications of biological cathode microbial fuel cells—a mini review. *Arabian Journal of Chemistry*, DOI: doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.01.008.
- Stoll, Z. A., Dolfing, J. & Xu, P. 2018. Minimum performance requirements for microbial fuel cells to achieve energy-neutral wastewater treatment. *Water* 10(3): 243.
- Strik, D. P. B. T. B., Timmers, R. A., Helder, M., Steinbusch, K. J. J., Hamelers, H. V. M. & Buisman, C. J. N. 2011. Microbial solar cells: Applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology* 29(1): 41-49.
- Strycharz-Glaven, S. M., Glaven, R. H., Wang, Z., Zhou, J., Vora, G. J. & Tender, L. M. 2013. Electrochemical investigation of a microbial solar cell reveals a nonphotosynthetic biocathode catalyst. *Applied & Environmental Microbiology* 79(13): 3933-3942.
- Sudesh, T. L., Wijesinghe, L. & Blackwood, D. J. 2006. Electrochemical and optical characterisation of passive films on stainless steels. *Journal of Physics: Conference Series* 28(1): 74.
- Verea, L., Jaramillo-Torres, M., Mejia-Lopez, M., Campos, J. & Sebastian, P. 2016. Development of gold electrodes for microbial fuel cells. *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 19(1): 037-042.
- Wang, H. & Ren, Z. J. 2013. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology. *Biotechnology Advances* 31(8): 1796-1807.
- Wang, H., Wang, G., Ling, Y., Qian, F., Song, Y., Lu, X., Chen, S., Tong, Y. & Li, Y. 2013. High power density microbial fuel cell with flexible 3d graphene-nickel foam as anode. *Nanoscale* 5(21): 10283-10290.
- Wang, L., Chen, Y., Ye, Y., Lu, B., Zhu, S. & Shen, S. 2011. Evaluation of low-cost cathode catalysts for high yield biohydrogen production in microbial electrolysis cell. *Water Science & Technology* 63(3): 440-448.
- Wei, J., Liang, P. & Huang, X. 2011. Recent progress in electrodes for microbial fuel cells. *Bioresour Technol* 102(20): 9335-9344.
- Xiao, L., Damien, J., Luo, J., Jang, H. D., Huang, J. & He, Z. 2012. Crumpled graphene particles for microbial fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources* 208: 187-192.
- Yamashita, T., Ishida, M., Asakawa, S., Kanamori, H., Sasaki, H., Ogino, A., Katayose, Y., Hatta, T. & Yokoyama, H. 2016. Enhanced electrical power generation using flame-oxidized stainless steel anode in microbial fuel cells and the anodic community structure. *Biotechnology for Biofuels* 9(1): 62.
- Zhang, G.-D., Zhao, Q.-L., Jiao, Y., Zhang, J.-N., Jiang, J.-Q., Ren, N. & Kim, B. H. 2011. Improved performance of microbial fuel cell using combination biocathode of graphite fiber brush and graphite granules. *Journal of Power Sources* 196(15): 6036-6041.
- Zhang, Y.-C., Jiang, Z.-H. & Liu, Y. 2015. Application of electrochemically active bacteria as anodic biocatalyst in microbial fuel cells. *Chinese Journal of Analytical Chemistry* 43(1): 155-163.
- Zhang, Y., Merrill, M. D. & Logan, B. E. 2010. The use and optimization of stainless steel mesh cathodes in microbial electrolysis cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(21): 12020-12028.
- Zhang, Y., Sun, J., Hu, Y., Li, S. & Xu, Q. 2012. Biocathode materials evaluation in microbial fuel cells: A comparison of graphite felt, carbon paper and stainless steel mesh materials. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(22): 16935-16942.
- Zhou, M., Chen, J., Freguia, S., Rabaey, K. & Keller, J. 2013. Carbon and electron fluxes during the electricity driven 1,3-propanediol biosynthesis from glycerol. *Environmental Science & Technology* 47(19): 11199-11205.
- Zhou, X., Chen, X., Li, H., Xiong, J., Li, X. & Li, W. 2016. Surface oxygen-rich titanium as anode for high performance microbial fuel cell. *Electrochimica Acta* 209: 582-590.
- Zhu, X. P. & Logan, B. 2014. Copper anode corrosion affects power generation in microbial fuel cells. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology* 89(3): 471-474.

*Mimi Hani Abu Bakar

Fuel Cell Institute,

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

Raba'atun Adawiyah Shamsuddin, Rozan Mohamad Yunus

Fuel Cell Institute,

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

Wan Ramli Wan Daud, Jamaliah Md. Jahim

Department of Chemical Engineering & Process,

Faculty of Engineering & Built Environment,

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

Wan Syaidatul Aqma

Faculty of Science and Technology,

Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi, Malaysia

*Corresponding author; email: mimihani@ukm.edu.my

Received date: 12th April 2018

Accepted date: 13th September 2018

Online first date: 1st October 2018

Published date: 30th November 2018