

Integrasi Sistem Penulenan Biohidrogen dan Aplikasi Sel Fuel

(Integration of Biohydrogen Purification System and Fuel Cell Application)

Muhammad Zhaahir Sidek^a, Mohd Shahbudin Masdar^{a,b,c*}, Nik Muhammad Hafiz Nik Dir^b, Nur Fatimah Ainaa Amran^b,
Simreth Kaur Dhalywal A/P Ajit Sing^b, Wong Woon Loong^b

^aResearch Center for Sustainable Process Technology (CESPRO),

^bChemical Engineering Programme, Faculty of Engineering & Built Environment,

^cFuel Cell Institute

Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia

ABSTRACT

Biohydrogen (bio-H₂) has a large potential as an alternative and renewable energy in the future. However, there are a few constraints that need to be overcome such as CO₂ removal as one of the fuel impurities. For instance, in fuel cell system, if bio-H₂ is being used directly, it most likely will lead to low the performance and damage the fuel cell system. Thus, separation technologies are required to separate bio-H₂ from the CO₂ impurities, and hence produce H₂ at high purity. In this study, the purification of bio-H₂ system; adsorption technique; was integrated with hydrogen fuel cell system. Therefore, a commercial mixed gas H₂/CO₂ 50 vol%/ 50 vol% as mimic bio-H₂ gas is used as feed gas with flow rate of 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, and 1.0 L min⁻¹ to produce the purified H₂ via adsorption technique. The purified H₂ from adsorber column's outlet then was flowed into polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) to obtain the power generation. Meanwhile, the breakthrough profile and adsorption capacity was plotted and measured to analyze the adsorption technique performances. As a comparison, a commercial pure H₂ was used in order to compare the performance for both cases. From the results, the CO₂ adsorption capacities decreased with the increasing of feed gas flowrate. Simultaneously, the performance of PEMFC would decrease significantly more than 50% when the impurities of CO₂ exists in the adsorber column outlet. It was confirmed that the existence of CO₂ in the H₂ fuel with greatly decreased the PEMFC performance and results in unstable power generation. Therefore, an efficient purification system for bio-H₂ is required as part of integration unit in bio-H₂ application for power generation.

Keywords: Biohydrogen purification; CO₂ removal; adsorption; activated carbon

ABSTRAK

Biohidrogen (bio-H₂) mempunyai potensi yang besar sebagai suatu tenaga alternatif dan keterbaharuan pada masa hadapan. Walau bagaimanapun, terdapat beberapa kekangan yang perlu diatasi seperti penyingkiran CO₂ yang mana ianya merupakan komponen bendasing bahan api. Sebagai contoh dalam sistem sel fuel, penggunaan bio-H₂ secara langsung akan menyebabkan prestasi yang rendah dan mengakibatkan kerosakan pada sistem sel fuel. Oleh yang demikian, teknologi pemisahan sangat diperlukan bagi memisahkan bio-H₂ daripada bendasing CO₂, seterusnya memperoleh H₂ berketulenan tinggi. Dalam kajian ini, sistem penulenan biohidrogen; teknik penjerapan; diintegrasikan bersama sistem H₂ sel fuel. Oleh yang demikian, gas komersil campuran gas H₂/CO₂ 50 vol%/ 50 vol% sebagai model gas bio-H₂ digunakan sebagai gas suapan dengan kadar air 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, dan 1.0 L min⁻¹ bagi menghasilkan H₂ berketulenan tinggi melalui teknik penjerapan. H₂ yang telah ditulenan dari keluaran turus penjerap kemudiannya disalurkan kepada sel fuel membran elektrolit polimer (PEMFC) bagi menjanakan kuasa elektrik. Sementara itu, profil lengkung bulus dan kapasiti penjerapan CO₂ diplot dan diukur bagi menganalisa prestasi teknik penjerapan. Sebagai perbandingan, gas H₂ komersil tulen digunakan bagi membandingkan prestasi bagi kedua-dua suapan komposisi gas yang berbeza. Berdasarkan hasil uji kaji, kapasiti penjerapan CO₂ menurun dengan peningkatan kadar aliran gas suapan. Secara langsung, prestasi PEMFC menurun secara ketara melebihi 50% apabila bendasing CO₂ hadir di bahagian keluaran turus penjerap. Ianya juga telah disahkan bahawa kehadiran CO₂ di dalam bahan api H₂ memberi kesan yang sangat ketara dalam penurunan prestasi dan menyebabkan ketidakstabilan prestasi pada PEMFC. Oleh yang demikian, sistem penulenan bio-H₂ yang efisien diperlukan sebagai komponen unit dalam sistem integrasi bagi aplikasi bio-H₂ untuk menjana kuasa elektrik.

Kata kunci: Penulenan biohidrogen; Penyingkiran CO₂; penjerapan; karbon teraktif

PENGENALAN

Pada masa ini, penggunaan bahan api fosil yang meluas di dalam pasaran dunia telah menyebabkan peningkatan pencemaran dan isu alam sekitar yang semakin serius. Pada

masa akan datang, minyak mentah yang dirizab dijangkakan akan habis digunakan pada kadar 4 billion tan setiap tahun. Berdasarkan ramalan ini, ia membawa kepada ketidakcukupan bahan api fosil yang boleh diperoleh pada sekitar tahun 2042 (Grunewald et al. 2017). Sungguhpun begitu, masih terdapat

kaedah alternatif bagi menyelesaikan isu yang dibangkitkan ini. Ini termasuk penggunaan gas/ bahan api yang boleh diperbaharui dan kurang atau tiada produk sampingan yang terbentuk dalam proses pembakaran atau tindak balas kecuali air seperti gas hidrogen (H_2). H_2 juga mempunyai ketumpatan tenaga yang tinggi berbanding bahan api bio yang tersedia ada seperti metana, metanol dan etanol. Justeru itu, ia sesuai diaplikasikan sebagai bahan api untuk pembakaran secara langsung di dalam enjin pembakaran (ICE) (De Boera et al. 1976) atau juga sebagai bahan api untuk sel fuel.

Walaupun H_2 merupakan elemen yang banyak di dalam alam semesta ini, sebatian yang mengandungi H_2 seperti bahan api fosil, biojisim, atau air sendiri diperlukan untuk menghasilkan lebih banyak gas H_2 . Secara umumnya, terdapat beberapa kekangan yang wujud dalam penghasilan H_2 dengan kos rendah. Pada masa ini, penghasilan H_2 masih menggunakan kaedah konvensional. Antaranya, melalui kaedah pembaharuan wap, pengegasan arang batu, dan pengoksidaan separa hidrokarbon yang mana ianya membawa kepada kos pengoperasian yang tinggi, penggunaan tenaga yang besar dengan kecekapan rendah, dan juga pelepasan gas karbon dioksida (CO_2) yang banyak (Henriques & Sadowsky 2017). Disebabkan oleh faktor-faktor ini, penghasilan H_2 secara biologi telah mula diperkenalkan dan telah diguna pakai sebagai kaedah alternatif dan sumber boleh diperbaharui. Secara asasnya, kaedah penghasilan H_2 secara biologi merupakan teknologi penghasilan yang menggunakan sumber tenaga boleh diperbaharui seperti biojisim, dengan menggunakan mikroorganisma (Zhang J. 2008). Teknologi dan proses ini dijalankan pada keadaan suhu dan tekanan ambien, selain menggunakan tenaga yang lebih rendah berbanding dengan kaedah kimia atau elektrokimia.

Walaupun bagaimanapun, proses penghasilan H_2 secara biologi ini mempunyai kelemahan iaitu gas H_2 yang terhasil mempunyai bendasing seperti gas CO_2 , yang mana boleh mewujudkan keterbatasan ketumpatan tenaga sekiranya digunapakai secara langsung. Sebagai contoh, dalam membran elektrolit polimer sel fuel (PEMFC), kehadiran hidrogen sulfida (H_2S), karbon monoksida (CO) dan juga CO_2 berpotensi meracuni tindakan sel fuel, seterusnya akan merendahkan prestasi PEMFC (Janssen & Lebedeva 2004). Permintaan tinggi dalam penghasilan H_2 tulen semakin mendapat perhatian, terutama sekali di dalam industri sel fuel. Bagi aplikasi sel fuel, ketulenan H_2 dengan 99.99% adalah diperlukan dan lantaran itu, bendasing yang ada perlu diasingkan (Kamarudin et al. 2007). Oleh itu, teknologi pemisahan dan penulenan gas yang sesuai diperlukan bagi menyingkirkan komponen gas bendasing ini terutamanya komponen CO_2 . Sebagai contoh, teknologi penyerapan, teknologi penjerapan, dan teknologi membran merupakan teknologi konvensional yang digunakan dalam penulenan gas (Wu et al. 2017).

Merujuk teknologi yang dinyatakan sebelum ini, teknologi penjerapan merupakan kaedah yang paling sesuai untuk digunakan dalam proses pemisahan dan penulenan gas disebabkan tenaga dan kos pengoperasian adalah rendah. Secara umumnya, penjerapan dapat dibahagikan

kepada beberapa teknik seperti penjerapan buaian tekanan (PSA), penjerapan buaian vakum (VSA), penjerapan buaian bersuhu (TSA), hidrid PSA dan TSA, dan penjerapan pada suhu dan tekanan ambien dengan gas lengai digunakan dalam penyahjerapan. Walau bagaimanapun, teknik bertekanan merupakan proses yang paling banyak diguna pakai untuk memerangkap CO_2 (Zulkefli et al. 2016). Pada asasnya, penghasilan bio- H_2 berketulenan tinggi oleh teknologi penjerapan adalah dengan pemisahan campuran gas dengan penyingkiran CO_2 semasa proses kitaran jerapan pada tekanan yang tinggi. Manakala proses penjanaan semula (nyahjerapan) berlaku pada keadaan tekanan rendah untuk menyahjerap bendasing CO_2 yang tidak diperlukan. Bagi teknik penjerapan ini, bahan penjerap yang sesuai amat diperlukan. Terdapat beberapa bahan penjerap boleh didapati yang sesuai digunapakai di dalam sistem penjerapan ini. Secara amnya, karbon teraktif (AC) merupakan bahan penjerap yang paling banyak digunakan kerana kesesuaiannya dan kapasitinya dalam memerangkap CO_2 . Ini disebabkan oleh ciri-cirinya yang tidak memerlukan penyingkiran lembapan, boleh mencapai kapasiti penjerapan CO_2 yang tinggi pada tekanan yang normal dan pada suhu sederhana serta bahan AC mudah dijanakan semula (Ao & Lee 2005).

Oleh itu, dalam kajian ini, teknologi penjerapan digunakan dengan AC sebagai bahan penjerap dalam penulenan bio- H_2 . Oleh itu, model gas biohidrogen digunakan dengan campuran gas H_2/CO_2 50 vol%/50 vol% bagi memperoleh H_2 berketulenan tinggi. Seterusnya, H_2 tulen yang diperoleh akan diaplikasi dan disuapkan ke sistem PEMFC. Integrasi sistem penulenan dan sel fuel PEM akan dibincangkan berdasarkan prestasi teknik penjerapan dan kecekapan PEMFC yang diperoleh.

METODOLOGI

PENGOPERASIAN TURUS PENJERAP

Dalam teknik penjerapan ini, karbon teraktif (AC) komersil dalam bentuk pelet (~saiz 0.5 -1 cm) telah digunakan sebagai bahan penjerap. Ianya dibekalkan oleh syarikat Effigen Carbon Sdn. Bhd di Kapar, Selangor. Jadual 1 menunjukkan ciri-ciri AC komersil yang diperoleh daripada analisis BET.

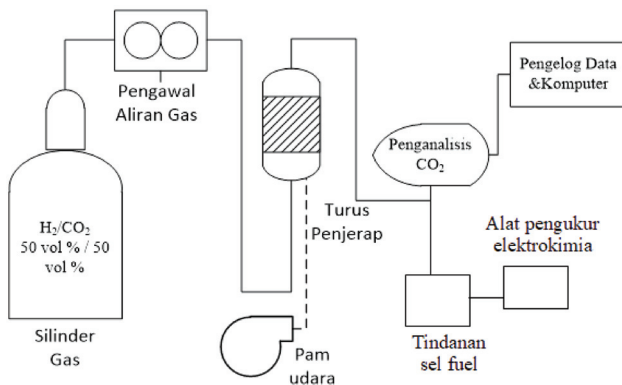
JADUAL 1. Ciri-ciri karbon teraktif yang digunakan dalam kajian ini

Jenis karbon teraktif	Luas permukaan BET ($m^2 g^{-1}$)	Jumlah isi padu liang ($m^3 g^{-1}$)	Saiz liang (nm)
Komersil AC	901.042	4.305×10^{-7}	1.911

Di dalam kajian ini, hanya gas CO_2 digunakan sebagai bendasing bahan api H_2 kerana ianya merupakan komponen utama bendasing di dalam penghasilan bio- H_2 . Berdasarkan kajian-kajian penyelidikan lepas, di dalam penghasilan H_2 secara biologi (bio- H_2), kehadiran H_2S dan CO adalah

terlalu kecil sehingga tahap ppb (*part per billion*) atau tidak dapat dikesan. Ini berbeza dengan penghasilan gas metana secara biologi (bio-metana) yang mempunyai kehadiran gas H_2S melebihi 500 ppm bergantung kepada sumber biojisim (Mohamad et al. 2016).

Rajah 1 menunjukkan susun atur peralatan bagi kajian ini. Satu gas campuran H_2/CO_2 50 vol%/50 vol% (Linde, Malaysia) digunakan dan disuap ke dalam satu turus penjerap berkapasiti 0.85 L. Tekanan gas adalah pada keadaan malar iaitu 1 bar. Sebanyak 160 g AC telah digunakan dalam turus penjerap ini sebagai bahan penjerap. Satu pengawal aliran gas digunakan (Kofloc model RK1200) untuk mengawal jumlah isi padu gas yang mengalir melalui turus penjerap dalam unit $L\ min^{-1}$. Kadar kepekatan gas CO_2 yang mengalir keluar daripada turus penjerap direkod dan disukat menggunakan penganalisis CO_2 (Instrumen Quantek model 906).



RAJAH 1. Susun atur peralatan dalam kajian ini

Penglog data disambungkan kepada komputer untuk mengumpul bacaan data bagi proses jerapan yang terpapar secara atas talian. Pam udara (RS-348A) digunakan untuk mengepam udara semasa proses penjanaan semula (nyahjerapan).

Kapasiti penjerapan CO_2 diukur berdasarkan masa lengkung bulus, dan kadar aliran suapan seperti yang ditunjukkan dalam persamaan 1 untuk menentukan kapasiti penjerapan menggunakan persamaan (1):

$$\sigma_{dc} = \frac{1}{R_s l} \quad (1)$$

yang mana Q adalah kapasiti penjerapan CO_2 ($mg\ g^{-1}$); q , kadar alir suapan; T_b , masa lengkung bulus; C , kepekatan lengkung bulus; MW_{CO_2} , berat molekul CO_2 ; V_M , isi padu molar pada S.T.P.; m_{ads} , berat bahan penjerap

PENGOPERASIAN TINDANAN SEL FUEL

Dalam aplikasi sel fuel ini, tindanan sel fuel komersil digunakan (Horizon Fuel Cell, model FCS-B20). Sebelum mengintegrasikan sistem sel fuel pada sistem penjerapan, prestasi tindanan sel fuel diuji menggunakan kadar aliran H_2 tulen yang berbeza iaitu pada $0.2\ L\ min^{-1}$ hingga $1.0\ L\ min^{-1}$. Selain itu, prestasi sel fuel dibandingkan menggunakan

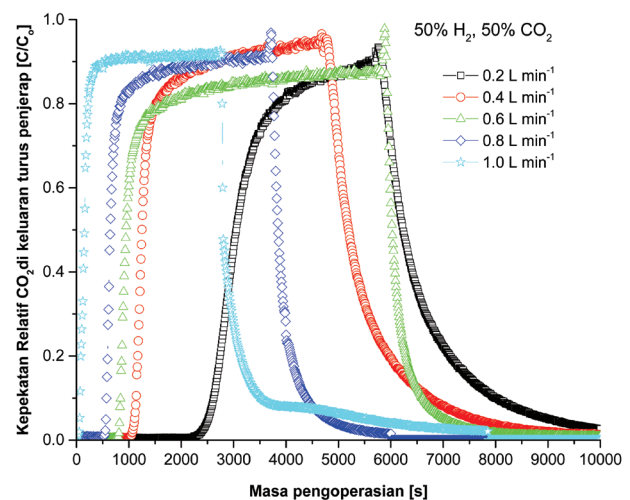
suapan H_2 tulen dan campuran 50% vol. H_2/CO_2 pada kadar aliran suapan yang optimum.

Dalam integrasi sistem penulenan dan sel fuel ini, kadar aliran suapan bagi campuran gas CO_2/H_2 yang digunakan di dalam turus jerapan adalah pada julat 0.2 hingga $1.0\ L\ min^{-1}$. Setelah H_2 tulen dihasilkan, analisis sel fuel dijalankan dengan menyalurkan secara langsung H_2 tulen dari keluaran turus penjerap ke tindanan sel fuel untuk mengukur prestasinya. Setelah bahan penjerap tepu dengan CO_2 , proses nyahjerapan akan dilakukan bagi menyingkirkan gas CO_2 yang terjerap di dalam AC. Oleh itu, udara digunakan untuk menyahjerap CO_2 dari AC pada kadar aliran $100\ L\ min^{-1}$ menggunakan pam udara seperti yang ditunjukkan pada Rajah 1.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KESAN KADAR ALIRAN TERHADAP PENJERAPAN CO_2

Rajah 2 menunjukkan kesan kadar aliran terhadap penjerapan CO_2 pada turus penjerap menggunakan AC. Paksi-y menunjukkan kepekatan relatif antara kepekatan awal CO_2 , C_o iaitu 50% vol., manakala kepekatan akhir, C , mewakili kepekatan CO_2 dalam peratus (%) di keluaran turus penjerap yang diukur oleh penganalisis CO_2 . Secara umumnya, profil lengkung bulus kesemua kadar aliran adalah hampir sama. Pada awal pengoperasian, tiada CO_2 di bahagian keluaran turus penjerap sehingga pada suatu ketika masa, kehadiran CO_2 telah dikesan dan meningkat secara mendadak sebelum bahan penjerap tepu pada kepekatan relatif menghampiri 1.0. Setelah bahan penjerap tepu, ianya dinyahjerap menggunakan udara melalui penggunaan pam udara seperti mana yang ditunjukkan pada penurunan drastik kepekatan relatif CO_2 pada Rajah 2.



RAJAH 2. Profil penjerapan dan nyahjerapan CO_2 pada kadar aliran gas suapan berbeza

Berdasarkan Rajah 2, masa lengkung bulus menurun dengan peningkatan kadar aliran suapan gas campuran seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 2. Sementara itu, profil nyahjerapan tidak menunjukkan sebarang perbezaan dari segi masa nyahjerapan CO_2 pada AC sehingga menghampiri nilai kepekatan relatif pada nilai sifar.

JADUAL 2. Masa lengkung bulus dan kapasiti penjerapan CO_2 pada kadar aliran gas suapan berbeza

Kadar aliran gas suapan (L min^{-1})	Masa lengkung bulus (min)	Kapasiti penjerapan (mg g^{-1})
0.2	44.13	54.23
0.4	19.11	46.96
0.6	11.12	41.00
0.8	7.23	35.54
1.0	1.20	7.37

Jadual 2 menunjukkan masa lengkung bulus dan juga kapasiti penjerapan CO_2 pada kadar aliran gas suapan yang berbeza. Merujuk kepada Jadual 2, ianya dapat dilihat bahawa semakin tinggi kadar aliran gas suapan, semakin rendah kapasiti penjerapan yang diperoleh. Tren yang sama ini juga telah diperoleh oleh Natalie (2012) dalam hasil simulasinya kesan kadar alir suapan terhadap kapasiti penjerapan. Sementara itu, turus penjerap menggunakan kadar aliran 0.2 L min^{-1} menunjukkan penjerapan terhadap CO_2 paling tinggi pada kapasiti penjerapan 54.23 mg per gram bahan penjerap (mg/g). Kapasiti penjerapan ini sedikit tinggi sekiranya dibandingkan dengan hasil kajian oleh Lu et al. (2008) iaitu sekitar 44.89 mg/g dengan menggunakan bahan penjerap pengisitepuan AC.

Kadar aliran suapan yang rendah membolehkan penjerapan CO_2 pada bahan penjerap berlaku dengan keadaan yang baik. Pada kadar aliran yang rendah, penjerapan fizikal CO_2 mempunyai masa mastautin (*residence time*) yang cukup melalui mekanisme penyerapan dan perolakan.

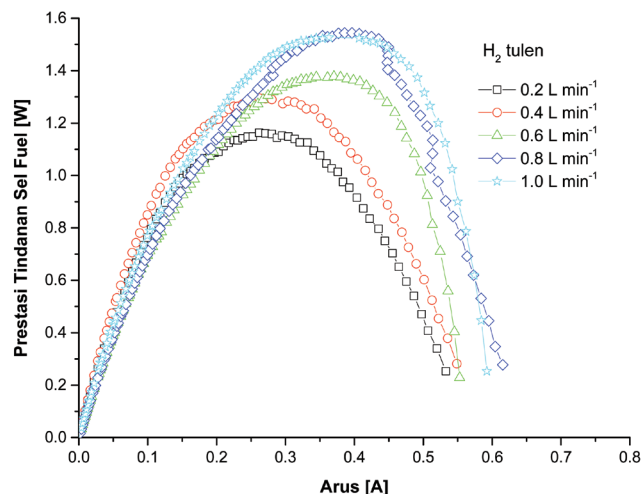
Dengan peningkatan kadar aliran, masa mastautin menjadi singkat bagi komponen CO_2 dan bahan penjerapan berinteraksi. Oleh yang demikian, dapat disimpulkan bahawa kadar aliran gas suapan merupakan antara parameter penting bagi memperoleh kapasiti penjerapan yang baik. Apabila sesuatu bahan penjerap memerangkap CO_2 dengan baik, kemungkinan bendasing gas untuk mengalir masuk ke dalam sel fuel adalah berkurang dan prestasi sel fuel dalam menjana tenaga akan dapat dikekalkan.

KESAN KADAR ALIR HIDROGEN TERHADAP PRESTASI PEMFC

Sebelum integrasi sistem penulen biohidrogen dan sel fuel dilakukan, prestasi tindanan sel fuel diuji menggunakan kadar aliran gas H_2 yang berbeza. Dalam kajian ini, H_2 dibekalkan melalui tangki H_2 komersil dengan ketulenan 99.99%. Kadar alir suapan H_2 yang ditetapkan dalam kajian ini adalah sekitar 0.2 L min^{-1} hingga 1.0 L min^{-1} .

Rajah 3 menunjukkan prestasi tindanan PEMFC bagi kadar alir H_2 yang berbeza. Merujuk kepada Rajah 3, prestasi tindanan PEMFC meningkat apabila kadar alir H_2 meningkat. Tren yang ditunjukkan dalam Rajah 3 ini adalah sama seperti yang dilaporkan oleh Taymaz et al. (2011). Berdasarkan Taymaz et al. (2011), peningkatan dalam kadar alir H_2 akan meningkatkan arus sel dan kemudiannya meningkat ketumpatan kuasa. Hal ini demikian kerana, peningkatan kadar alir H_2 akan meningkatkan pengangkutan

H_2 di bahagian anod sebagai zat tindak balas bagi tindak balas elektrokimia di bahagian anod. Tambahan pula, peningkatan terhadap profil kuasa tindanan PEMFC yang berlaku apabila kadar alir H_2 meningkat dari 0.2 L min^{-1} ke 0.8 L min^{-1} adalah disebabkan oleh kelembapan relatif H_2 yang memastikan membran sentiasa berada dalam keadaan terhidrat sepenuhnya seterusnya mengekalkan kekonduksian proton yang baik.



RAJAH 3. Prestasi tindanan PEMFC pada kadar aliran suapan H_2 yang berbeza

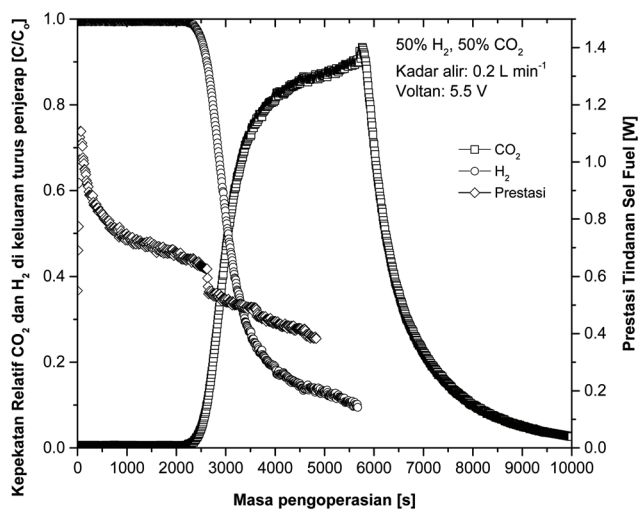
Sementara itu, pada kadar aliran 1.0 L min^{-1} , prestasi tindanan PEMFC dilihat sedikit menurun. Hal ini mungkin disebabkan oleh dua faktor yang menyumbang kepada kejatuhan profil kuasa PEMFC pada kadar alir H_2 yang tinggi. Faktor pertama adalah kadar alir H_2 yang tinggi akan meningkatkan kandungan kelembapan di bahagian anod sel fuel melalui pembentukan air semasa tindak balas sel fuel. Hal ini akan menyebabkan masalah banjiriran di dalam sel fuel akan berlaku. Apabila ianya terjadi, liang lapisan pemangkin dan lapisan resapan gas akan dibanjiri dengan air yang berlebihan dan menyebabkan rintangan pengangkutan jisim yang lebih tinggi di bahagian katod (Guvelioglu et al. 2007). Hal ini mengundang kepada peningkatan serta merta dalam kehilangan pengangkutan jisim, terutamanya di bahagian katod. Oleh yang demikian, kadar pengangkutan zat tindak balas ke tapak aktif pemangkin akan berkurang dengan banyak. Kuantiti air yang berlebihan akan menghalang liang lapisan resapan gas dan menghalang zat tindak balas daripada mencapai tapak aktif pemangkin. Hal ini akan menyebabkan kebuluran gas di tapak aktif pemangkin dan kejatuhan prestasi dari segi penjanaan arus dan kuasa.

Tambahan pula, faktor kedua yang menyumbang kepada penurunan prestasi PEMFC pada kadar aliran H_2 yang tinggi adalah kesan daripada mekanisme perolakan paksa. Dalam hal ini, membran elektrolit akan dinyahhidratkan di permukaan elektrod bahagian anod pada kadar aliran H_2 yang tinggi walaupun resapan balik air dari katod ke anod mungkin terjadi. Oleh itu, ia akan menjejaskan pengangkutan proton dari anod ke katod di samping meningkatkan rintangan

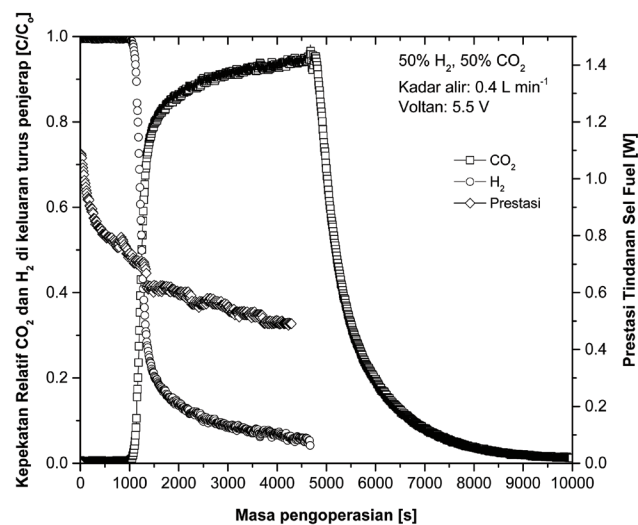
dalam sel dan menyebabkan kejatuhan dalam prestasi PEMFC (Li et al. 2015).

KESAN KADAR ALIRAN GAS SUAPAN TERHADAP INTEGRASI SISTEM

Dalam integrasi sistem penulenan bio- H_2 dan sel fuel ini, kadar aliran gas suapan yang berbeza (0.2 L min^{-1} hingga 1 L min^{-1}) dilakukan bagi melihat kesannya terhadap prestasi penjerapan CO_2 dan tindakan sel fuel. Rajah 4 hingga Rajah 8 menunjukkan penjerapan CO_2 di turus penjerap, ketulenan H_2 di bahagian keluaran turus penjerap dan prestasi tindakan PEMFC melalui suapan bio- H_2 yang telah dituliskan pada kadar aliran suapan gas berbeza. Secara umumnya, bagi kesemua Rajah 4 hingga Rajah 8, profil kepekatan relatif CO_2 , ketulenan H_2 dan prestasi tindakan adalah hampir sama.



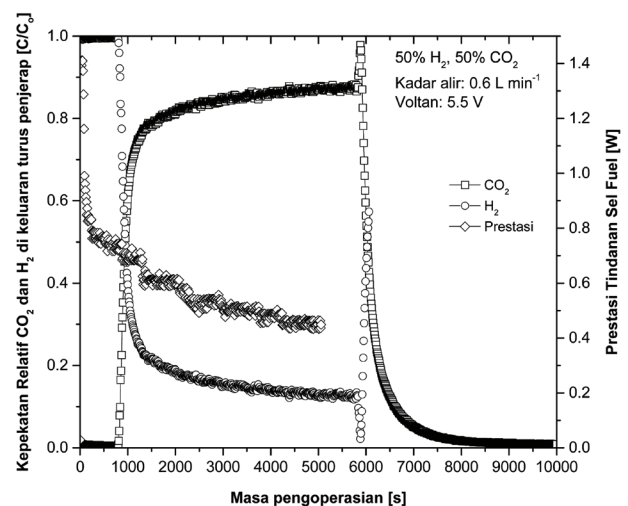
RAJAH 4. Prestasi sistem integrasi penulenan biohidrogen dan tindakan PEMFC pada kadar aliran suapan gas 0.2 L min^{-1}



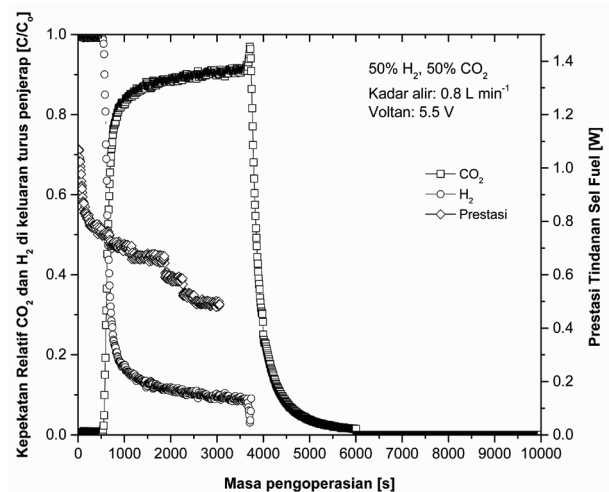
RAJAH 5. Prestasi sistem integrasi penulenan biohidrogen dan tindakan PEMFC pada kadar aliran suapan gas 0.4 L min^{-1}

Profil penjerapan dan nyahjerapan bahan penjerap adalah hampir sama seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Manakala, kepekatan relatif H_2 menunjukkan ketulenan H_2 yang diperoleh di bahagian keluaran turus penjerap dengan andaian bahawa tiada komponen H_2 yang dijerap oleh bahan penjerap AC. Ketulenan H_2 adalah bertepatan dengan penjerapan CO_2 di turus penjerap yang mana ketulenan H_2 mencapai lebih 99% di awal pengoperasian. Dengan peningkatan kadar aliran gas suapan ke dalam turus penjerap, masa bulus semakin singkat dan menyebabkan masa memperoleh ketulenan H_2 semakin pendek dan ia menjejaskan prestasi tindakan sel fuel.

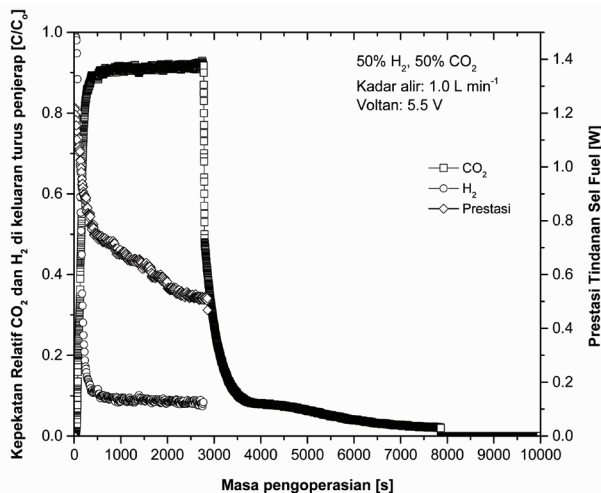
Sementara itu, dari segi profil prestasi tindakan sel fuel, prestasi yang tinggi diperoleh di awal pengoperasian sebelum ianya menjunam secara drastik dan stabil pada suatu keadaan masa pengoperasian. Masa kestabilan prestasi tindakan sel fuel ini bergantung kepada sistem penulenan bio- H_2 di turus penjerap. Pada keadaan ketulenan H_2 yang menurun, prestasi sel fuel semakin menurun dan tidak stabil. Ianya jelas dapat dilihat pada Rajah 4 hingga Rajah 8 pada keadaan ketulenan H_2 yang semakin menurun.



RAJAH 6. Prestasi sistem integrasi penulenan biohidrogen dan tindakan PEMFC pada kadar aliran suapan gas 0.6 L min^{-1}



RAJAH 7. Prestasi sistem integrasi penulenan biohidrogen dan tindakan PEMFC pada kadar aliran suapan gas 0.8 L min^{-1}



RAJAH 8. Prestasi sistem integrasi penulenan biohidrogen dan tindanan PEMFC pada kadar aliran suapan gas 1.0 L min^{-1}

Bagi kesemua kadar aliran gas suapan, kuasa yang dijana dalam sel fuel PEMFC pada 5.5 V semakin berkurang apabila kepekatan CO_2 dalam bahan api H_2 meningkat. Berdasarkan kajian penyelidikan lepas, walaupun sifat berasid membran elektrolit dalam PEMFC boleh bertahan dengan kewujudan CO_2 , namun keputusan uji kaji menunjukkan bahawa bendasing CO_2 mempunyai impak kesan keracunan terhadap prestasi tindanan PEMFC. Kesan keracunan oleh CO_2 mungkin disebabkan oleh penukaran CO_2 kepada CO pada tapak aktif platinum dan jerapan CO pada tapak aktif platinum melalui tindak balas berbalik peralihan gas air (RWGS) ataupun tindak balas elektrokimia penyingkatan CO_2 . Perkara ini akan dijelaskan dengan lebih terperinci di bahagian seterusnya.

Di samping itu, secara teorinya, pengiraan termodinamik juga menunjukkan bahawa sekitar 20-100 ppm kepekatan CO akan dihasilkan melalui tindak balas RWGS dalam gas pemulih (*reformate*) yang mengandungi 10% hingga 20% kepekatan CO_2 . Menurut Li H. et al. (2009), walaupun pada tahap kepekatan CO_2 serendah 1% di dalam bahan api H_2 , kepekatan CO yang dihasilkan adalah mencukupi untuk meracuni lebih daripada 50% permukaan tapak platinum pada keadaan normal pengoperasian PEMFC. Seterusnya, hal ini akan mengakibatkan penurunan yang besar dalam voltan (*voltage loss*).

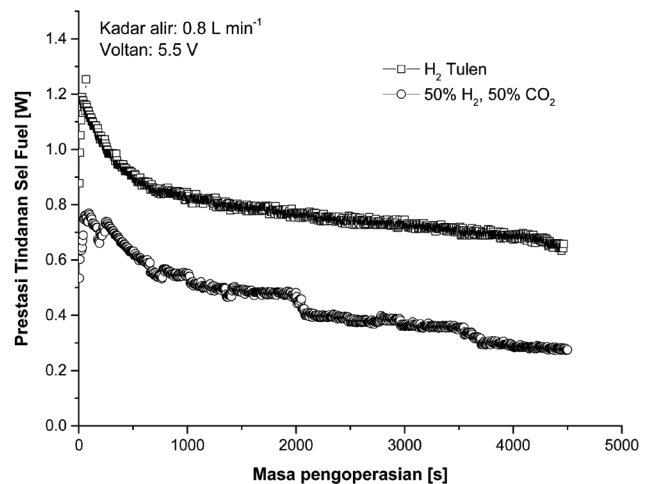
Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa kadar aliran gas suapan dan ketulenan H_2 merupakan aspek dan parameter penting bagi penghasilan kuasa elektrik oleh tindanan sel fuel. Semakin rendah kadar aliran suapan gas, semakin tinggi kapasiti penjerapan CO_2 , seterusnya H_2 tulen yang terhasil adalah lebih banyak dan dapat menghasilkan lebih kuasa pada PEMFC.

KESAN BENDASING CO_2 TERHADAP PRESTASI SEL FUEL

Rajah 9 menunjukkan perbezaan prestasi tindanan PEMFC menggunakan gas suapan H_2 tulen (99.99%) dan campuran gas H_2 50% vol. dan CO_2 50% vol. Berdasarkan Rajah 9, ianya jelas menunjukkan prestasi tindanan PEMFC

menurun melebihi 50% menggunakan suapan campuran gas berbanding suapan gas tulen H_2 . Selain itu, penggunaan gas suapan campuran H_2/CO_2 menyebabkan ketidakstabilan pada prestasi sel fuel. Merujuk kepada kajian penyelidikan lepas, beberapa penyelidik telah bersetuju dan telah membuat kesimpulan bahawa kewujudan CO_2 dalam bahan api H_2 akan mengurangkan kadar tindak balas elektrokimia, menjejaskan pengangkutan proton di sekitar elektrolit polimer dan menghalang aliran bahan api (Li et al. 2009; Ahluwalia et al. 2008).

Selain itu, ion bendasing yang bercaj positif sering kali mempunyai afiniti kimia yang lebih besar terhadap tapak pengangkutan ion dalam polimer berbanding dengan proton. Tambahan pula, ion bendasing turut mempunyai mobiliti yang lebih rendah berbanding dengan proton dan ini akan mengurangkan kekonduksian ion. Kewujudan bendasing CO_2 dalam bahan api H_2 juga akan mengurangkan jangka hayat operasi sel fuel dengan meningkatkan kadar kemerosotan komponen-komponen di dalamnya.

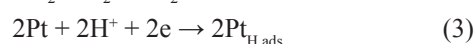


RAJAH 9. Prestasi tindanan PEMFC menggunakan suapan gas yang berbeza pada kadar aliran 0.8 L min^{-1}

Menurut Ahluwalia et al. (2008), bendasing CO_2 dalam bahan api H_2 akan menjerap dengan lemah pada pemangkin platinum dalam PEMFC. Pada kepekatan CO_2 yang rendah, penurunan terhadap kuasa elektrik adalah disebabkan oleh penghasilan CO oleh tindak balas RWGS antara CO_2 dengan H_2 yang terjerap. Pada kepekatan CO_2 yang tinggi, penurunan dalam keupayaan sel disebabkan oleh pencairan H_2 juga menyumbang kepada kejatuhan prestasi PEMFC. Secara ringkasnya, keputusan yang diperoleh daripada uji kaji ini bermanfaat dalam membangunkan piawaian kualiti H_2 pada masa depan.

Di samping itu, dengan membekalkan H_2 tulen di bahagian anod PEMFC, pemulihan prestasi sel fuel akan berlaku dalam masa kurang daripada setengah jam walaupun sel fuel telah pun terdedah kepada CO_2 selama 2 jam. Hal ini menunjukkan bahawa walaupun CO_2 dalam aliran bahan api bahagian anod akan mengurangkan prestasi sel fuel, namun ia tidak meninggalkan kesan keracunan yang kekal pada lapisan pemangkin. Keracunan oleh CO_2 kemungkinan

berasal daripada dua sumber yang mana kedua-dua sumber ini akan menghasilkan CO yang akan meracunkan tapak elektrokimia bermangkai untuk tindak balas pengoksidaan H₂. Dua sumber penghasilan CO₂ ini adalah tindak balas RWGS dan elektrokimia yang setara dengan RWGS. Persamaan tindak balas bagi proses RWGS pada persamaan tindak balas (2) dan (3) serta proses elektrokimia yang setara dengan RWGS pada persamaan tindak balas (4) adalah seperti berikut.



Sementara itu, menurut Rajalakshmi et al. (2003), dengan merujuk kepada data termodinamik pada suhu 80°C, 25% kepekatan CO₂ dalam bahan api H₂ akan menghasilkan kira-kira 100 hingga 200 ppm CO dan ianya bergantung kepada kepekatan air. Disebabkan sel fuel PEMFC dalam ujikaji ini beroperasi pada suhu bilik sekitar 27°C dan kesan keracunan adalah kesan berbalik, tindak balas RWGS mungkin bukan merupakan sumber keracunan dalam sel fuel PEMFC ini. Penurunan dalam prestasi PEMFC dalam uji kaji ini mungkin disebabkan oleh penghasilan satu lapisan CO₂ yang menutup tapak tindak balas. Oleh yang demikian, suapan gas H₂ tulen pada masa tertentu mampu memulihkan semula prestasi tindakan sel fuel ini.

KESIMPULAN

Teknologi penulenan gas melalui teknik penjerapan menggunakan karbon teraktif (AC) sebagai bahan penjerap berupaya menulenan gas bio-H₂ (campuran campuran gas H₂ 50% vol. dan CO₂ 50% vol.) melebihi 99% ketulenan H₂. Kadar aliran gas suapan merupakan parameter penting dalam proses penulenan gas kerana memberi kesan kepada kapasiti penjerapan CO₂. Semakin tinggi kadar aliran gas suapan menyebabkan kapasiti penjerapan CO₂ semakin menurun. Integrasi sistem penulenan gas dan tindakan sel fuel membolehkan penjanaan kuasa elektrik dihasilkan. Kestabilan dan kemerosotan prestasi tindakan PEMFC bergantung sepenuhnya kepada ketulenan H₂ yang dihasilkan melalui teknik penjerapan. Penurunan dan kemerosotan prestasi yang sangat ketara diperolehi melebihi 50% sekiranya ketulenan H₂ merosot melebihi 50%. Oleh yang demikian, sistem penulenan biohidrogen yang mantap dan efisien sangat diperlukan dalam integrasi sistem dalam aplikasi sel fuel untuk menjanakan kuasa elektrik. Kajian yang lebih terperinci boleh dilakukan dengan skala yang lebih besar, seterusnya memungkinkan aplikasi tenaga elektrik dihasilkan melalui penghasilan bio-H₂ yang mesra alam.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan penghargaan kepada geran penyelidikan Universiti Penyelidikan UKM di bawah kod GUP-2016-043 dan DIP-2017-020 serta geran penyelidikan

kerjasama UKM-Sime Darby Research Sdn Bhd. dengan kod KK-2014-013 kerana membiayai kajian penyelidikan ini.

RUJUKAN

- Ahluwalia, R. K. & Wang X. 2008. Effect of CO and CO₂ impurities on performance of direct hydrogen polymer-electrolyte fuel cells. *Journal of Power Sources* 180(1): 122-131.
- Ao, C. H. & Lee, S.C. 2005. Indoor air purification by photocatalyst TiO immobilized on an activated carbon filter installed in an air cleaner. *Chemical Engineering Science* 60: 103-109.
- De Boera, P.C.T., McLeana W.J. & Homana H.S. 1976. Performance and emissions of hydrogen fueled internal combustion engines. *International Journal of Hydrogen Energy* 1(2): 153-172.
- Grunewald, N., Klasen, S., Martínez-Zarzoso, I. & Muris, C. 2017. The trade-off between income inequality and carbon dioxide emissions. *Ecoogical & Economics* 142: 249-256
- Guvelioglu, G.H. & Stenger, H. G. 2007. Flow rate and humidification effects on a PEM fuel cell performance and operation. *Journal of Power Sources* 163: 882-891
- Henriques, I. & Sadorsky, P. 2017. Investor implications of divesting from fossil fuels. *Global Finance Journal*. In press. DOI: doi.org/10.1016/j.gfj.2017.10.004,
- Janssen, G.J.M. & Lebedeva, N.P. 2004. Carbon dioxide poisoning on proton-exchange-membrane fuel cell anodes, in *Fuel Cells Science and Technology* 2004: Munich, Jerman.
- Kamarudin, S. K., Daud, W.R.W., Som, A.M. & Masdar, M. S. 2007. Conceptual Design of 5kW PEM Fuel Cell Stack. *Jurnal Kejuruteraan UKM* 19: 43-54.
- Li, H., Shi, Z. & Zhang, J. 2009. Impurities in fuels and air. *Fuel Cells - Proton Exchange Membrane Fuel Cells* 1: 941-950
- Li, W.C, Masdar, M.S. & Kamarudin, S.K. 2015. Purification of bio-hydrogen using absorption techniques and the effect of CO₂ impurity on the PEMFC performance. *American Journal of Chemistry* 5: 1-8.
- Lu, Z., Mercedes, M.V.M., Tang, Z. & Zhang. Y. 2008. Sorbents for CO₂ capture from high carbon fly ashes. *Waste Management* 28: 2320-2328.
- Mohamad, I.N., Rohani, R., Masdar M.S., Nor, M.T.M. & Jahim, J. 2016. Permeation properties of polymeric membranes for biohydrogen purification. *International Journal of Hydrogen Energy* 41(7): 4474-4488.
- Natalie, H. 2012. *Modeling hydrogen sulfide adsorption by activated carbon made from anaerobic digestion by-product*, Master Thesis (Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry University of Toronto).
- Rajalakshmi, N., Jayanth, T. T. & Dhathathreyan, K. S. 2003. Effect of carbon dioxide and ammonia on polymer electrolyte membrane fuel cell stack performance. *Fuel Cell* 3(4): 177-180.

- Taymaz, I., Akgun, F. & Benli, M. 2011. Application of response surface methodology to optimize and investigate the effects of operating condition on the performance of DMFC. *Energy* 36: 1156-1160
- Wu, S.Y, Hsiao I, Liu, C.M, Yusuf, N.Y, Isahak, W.N.R. & Masdar, M. S. 2017. A novel bio-cellulose membrane and modified adsorption approach in CO₂/H₂ separation technique for PEM fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy* 42: 27630-27640.
- Zhang, J. 2008. Hydrogen production by biomass gasification in supercritical water. *University of Kentucky, center for applied energy research, Energenia* 19(6): 1-6.
- Zulkefli, N.N., Masdar, M.S., Jahim, J. & Herianto, E. H. 2016. Overview of H₂S removal technologies from biogas production. *International Journal of Applied Engineering Research* 11: 10060-10066.
- Muhammad Zhaahir Sidek
Research Center for Sustainable Process Technology (CESPRO), Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- *Mohd Shahbudin Masdar
Fuel Cell Institute, Universiti Kebangsaan Malaysia
Chemical Engineering Programme,
Research Center for Sustainable Process Technology (CESPRO), Faculty of Engineering & Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Nik Muhammad Hafiz Nik Dir
Chemical Engineering Programme,
Faculty of Engineering & Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Nur Fatimah Ainaa Amran
Chemical Engineering Programme,
Faculty of Engineering & Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Simreth Kaur Dhalywal A/P Ajit Sing
Chemical Engineering Programme,
Faculty of Engineering & Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia.
- Wong Woon Loong^c
Chemical Engineering Programme,
Faculty of Engineering & Built Environment,
Universiti Kebangsaan Malaysia
- *Corresponding author;
email: shahbud@ukm.edu.my
- Received date: 21st Jun 2018
Accepted date: 13th September 2018
Online First date: 1st October 2018
Published date: 30th November 2018