

EVALUASI PRODUKSI LISTRIK SUMBER ENERGI TERBARUKAN SEL ELEKTROKIMIA BERBASIS MIKROBA PADA VOLUME REAKTOR YANG BERBEDA

Tania Surya Utami^{1*}, Rita Arbianti², Guruh Mehra Mulyana³

Departemen Teknik Kimia, Universitas Indonesia
Kampus UI Depok, 16424

*E-mail address: nana@che.ui.ac.id

ABSTRAK

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan salah satu teknologi yang dikembangkan untuk mendapatkan sumber energi terbarukan. MFC berupa sel elektrokimia yang menghasilkan listrik akibat aktivitas mikroba yang mendegradasi senyawa organik. Untuk menentukan apakah MFC dapat diaplikasikan menjadi teknologi praktis, dilakukan evaluasi melalui parameter kinetika berbasis Monod dan efisiensi coulomb serta efisiensi energi. Penelitian ini menggunakan reaktor *tubular single chamber membranless* dengan volume 0,5 L dan 5 L. Fokus penelitian ini adalah untuk mengevaluasi pengaruh peningkatan volume reaktor terhadap parameter kinetika dan efisiensi sistem. Data hasil percobaan di laboratorium berhasil dimodelkan dengan persamaan Monod. Nilai parameter kinetika untuk sistem MFC dengan volume 0,5 L adalah P_{max} 0,032 mW/m² dan K_s 772,98 mg/L, sedangkan untuk reaktor 5 L nilai P_{max} sebesar 1,59 mW/m² dan K_s 399,97 mg/L. Nilai efisiensi coulomb tertinggi untuk reaktor 0,5 L adalah sebesar 0,435% dan 2,84% untuk reaktor 5 L. Nilai efisiensi energi tertinggi pada sistem MFC adalah 0,015% dengan reaktor 5 L. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan nilai parameter kinetika dan nilai efisiensi pada peningkatan volume reaktor dari 0,5 L ke 5 L. Peningkatan yang terjadi cukup signifikan, pada parameter P_{max} terjadi peningkatan hingga 50 kali lipat.

Kata kunci: efisiensi, *Microbial Fuel Cell*, parameter kinetika, peningkatan volume reaktor, reaktor tubular tanpa membran

ABSTRACT

Microbial fuel cell (MFC) is a technology developed to obtain new sources of renewable energy. MFC form an electrochemical cell which generates electricity as a result of microbial activities that degrade organic compounds. To determine whether the MFC can be adapted to a practical technology, evaluation conducted through the kinetic parameters based Monod equation, coulombic efficiency, and energy efficiency. This study uses a single chamber membranless tubular reactor with a volume of 0.5 L and 5 L. The focus of this study was to evaluate the effect of enhanced reactor volume to kinetic parameters and system efficiency. Data from experiments in the laboratory successfully modeled with Monod equation. Value kinetic parameters for the MFC system with a volume of 0.5 L is P_{max} 0,032 mW/m² and K_s 772.98 mg/L, whereas for the 5 L reactor P_{max} value of 1.59 mW/m² and K_s 399.97 mg/L. The highest value for the coulombic efficiency of 0.5 L reactor is equal to 0.435% and 2.84% for reactors 5 L, and highest value of energy efficiency in the system MFC is 0.015% for reactor 5 L. The results showed an increase in the value of kinetic parameters and efficiency on enhancing of the reactor volume from 0.5 L to 5 L. The increase was significant, for P_{max} parameter increased up to 50 times.

Keywords: efficiency, enhanced reactor volume, *Microbial Fuel Cell*, kinetic parameters, tubular membranless reactor

PENDAHULUAN

Usaha untuk pengadaan energi alternatif yang dapat diperbaharui dan berkelanjutan sudah banyak dilakukan guna memenuhi kebutuhan energi sekarang dan di masa yang akan datang. *Microbial Fuel Cell (MFC)* adalah suatu teknologi yang mampu mengubah energi yang tersimpan dalam

ikatan kimia senyawa organik menjadi energi listrik dengan memanfaatkan reaksi katalitik oleh mikroorganisme (Du dkk., 2007). MFC menyediakan kesempatan baru untuk produksi energi yang berkelanjutan dari bahan bakar yang *biodegradable*, dan dapat mereduksi senyawa substrat (Rabaey & Verstraete, 2005).

Evaluasi kinerja MFC merupakan salah satu proses untuk mengetahui keberhasilan sistem MFC yang dikembangkan. Parameter utama yang dikaji adalah nilai daya listrik yang dihasilkan. Dalam sistem MFC, daya listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh berbagai faktor operasional. Untuk menentukan apakah MFC dapat diaplikasikan menjadi teknologi praktis, dilakukan evaluasi melalui parameter kinetika berbasis Monod dan efisiensi coulomb serta efisiensi energi. Kedua parameter efisiensi ini menunjukkan tingkat keefektifan sistem dalam menghasilkan listrik terkait dengan proses transfer elektron yang terjadi.

Parameter kinetika dan efisiensi yang didapat nantinya akan dibandingkan dengan parameter kinetika dan efisiensi pada reaktor yang sudah diperbesar volumenya. Tujuan dilakukan pembesaran volume adalah untuk tahap awal evaluasi sistem MFC agar diperoleh gambaran hubungan listrik keluaran dengan volume reaktor yang digunakan. Penelitian ini diharapkan dapat menunjang pengaplikasian MFC.

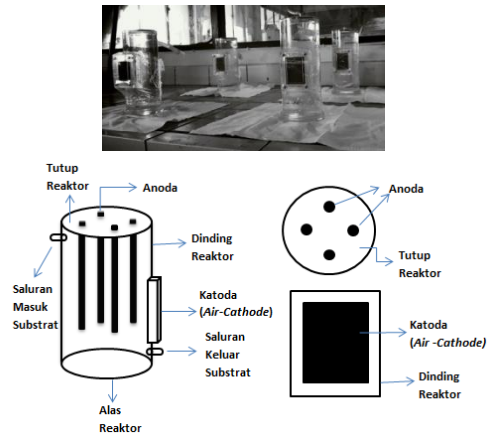
METODE

Persiapan Inokulum Bakteri

Konsorsium bakteri dari limbah cair tempe diinkubasi pada suhu ruang (27°C) selama 24 jam. Konsorsium dicampurkan dengan campuran dari limbah, larutan buffer, dan elektrolit dengan komposisi 45:45:10 (v/v) sebanyak 1% (v/v), dan diamkan selama 7 hari untuk proses penumbuhan biofilm pada permukaan anoda.

Kondisi Operasi dan Konstruksi Reaktor

Reaktor tanpa membran berbentuk tubular yang digunakan, dibuat dari bahan akrilik dengan volume 0,5 L dan 5 L (Gambar 1). Anoda dan katoda terbuat dari karbon yang dibentuk dengan ukuran tertentu. Anoda yang digunakan berbentuk silinder berjumlah empat buah, dengan luas 0,0042 m² untuk reaktor 0,5 L dan 0,0304 m² untuk reaktor 5 L. Katoda yang digunakan hanya berjumlah satu buah berbentuk plat, dengan luas katoda 0,002 m² untuk reaktor 0,5 L dan 0,013 m² untuk reaktor 5 L. Katoda kontak langsung dengan udara luar, atau disebut *air-cathode*.



Gambar 1. Reaktor yang digunakan

Masing-masing reaktor dihubungkan dengan rangkaian listrik dan resistor. Nilai resistor optimal untuk reaktor 0,5 L adalah 820 Ω dan untuk reaktor 5 L adalah 560 Ω. Pengambilan data tegangan dengan menggunakan multimeter APPA 109N yang dihubungkan dengan *personal computer* (PC). Semua percobaan dilakukan pada kondisi ruang (27°C).

Pada penelitian ini limbah cair tempe dimanfaatkan sumber inokulumnya saja untuk membentuk biofilm pada permukaan anoda reaktor. Untuk studi kinetika digunakan substrat tunggal glukosa untuk mempermudah analisis. Limbah tidak digunakan karena terdapat banyak makromolekul dalam kandungannya sehingga menyulitkan analisis terhadap sistem. Selain itu, limbah juga sulit divariasikan konsentrasinya.

Perhitungan Data

Data dari multimeter yang diperoleh adalah tegangan listrik (mV atau V). Data diubah menjadi data arus dengan memasukkan nilai resistor yang digunakan, mengikuti Persamaan (1).

$$I = \frac{V}{R} \quad (1)$$

dimana I (A) arus, V (V) tegangan, dan R (ohm) resistor.

Data arus digunakan untuk menghitung *power density*. *Power density* digunakan untuk menentukan daya yang dihasilkan per meter luas anoda yang digunakan.

$$P = \frac{V(\text{volt}) \times I(\text{mA})}{A(\text{m}^2)} \quad (2)$$

dimana P (mW/m²) *power density* and A (m²) luas permukaan anoda.

Estimasi Parameter Kinetika

Persamaan Monod merupakan salah satu persamaan dasar yang banyak digunakan untuk membangun model kinetika pada sistem MFC (Logan, 2008; Torres dkk., 2007; Picioreanu dkk., 2007). Pada persamaan Monod, laju pertumbuhan sel dapat dinyatakan sebagai fungsi dari konsentrasi substrat. Persamaan Monod secara umum mengasumsikan hanya untuk pertumbuhan uniselular, yang bisa ditulis sebagai:

$$\mu = \mu_{max} \left(\frac{S}{K_s + S} \right) \quad (3)$$

dimana μ (mg/s) laju pertumbuhan spesifik, μ_{max} (mg/s) laju pertumbuhan spesifik maksimum, S (mg/L) konsentrasi substrat, dan K_s (mg/L) konstanta paruh jenuh.

Persamaan Monod juga dapat digunakan untuk menghitung laju degradasi substrat dengan mengasumsikan substrat hanya didegradasi oleh enzim spesifik oleh mikroba tertentu. Laju degradasi substrat akan sebanding dengan konsentrasi mikroba yang dapat mendegradasi substrat. Substrat berkontribusi dalam pertumbuhan mikroorganisme, sehingga laju degradasi substrat dapat disetarakan dengan laju pertumbuhan mikroba, dan memberikan persamaan seperti di bawah ini (Okpokwasili dan Nweke, 2005):

$$q = \left(\frac{q_{max} S}{K_s + S} \right) \quad (4)$$

dengan q (mg/s) laju degradasi substrat spesifik, dan q_{max} (mg/s) laju degradasi substrat maksimum.

Berdasarkan mekanisme produksi listrik dalam MFC yang melibatkan metabolisme mikroba, maka persamaan Monod sangat sering diaplikasikan untuk menggambarkan model matematis dalam MFC (Logan, 2008).

Perhitungan Nilai Efisiensi

Nilai efisiensi coulomb adalah nilai yang membandingkan antara listrik yang terukur saat MFC beroperasi dibandingkan dengan listrik keluaran secara teoritis. Berikut persamaan untuk menghitung efisiensi coulomb untuk sistem batch,

$$C_E = \frac{M_S \int_0^{t_b} I dt}{F b_{es} V_{an} S} \quad (5)$$

dengan C_E = Coulombic efficiency, M_S = berat molekul O_2 , I = arus (A), F = konstanta Faraday (98485 C/mol elektron), b_{es} = mol

elektron yang dihasilkan per mol O_2 , V_{an} = volume liquid dalam kompartemen anoda (L), S = konsentrasi substrat dalam satu siklus batch (g/L). Untuk substrat berupa limbah, nilai konsentrasi substrat dinyatakan dalam bentuk perubahan COD.

Dalam sistem MFC, efisiensi energi menyatakan jumlah energi yang diperoleh dibandingkan dengan jumlah energi total yang terkandung dalam substrat. Nilainya dapat dihitung dari rasio daya yang diproduksi dalam interval waktu t dibagi dengan perubahan entalpi reaksi, yang dalam persamaan matematis, dapat dituliskan sebagai berikut (Liu dkk., 2005):

$$E_E = \frac{E_p}{E_{Ti}} \quad (6)$$

dengan E_p (J) merupakan total energi yang diproduksi sel yang dihitung dengan mengintegrasikan daya terhadap waktu, dan E_{Ti} merupakan total energi teoritis yang bisa diproduksi. E_{Ti} dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$E_p = \int_0^{t_b} P dt \quad (7)$$

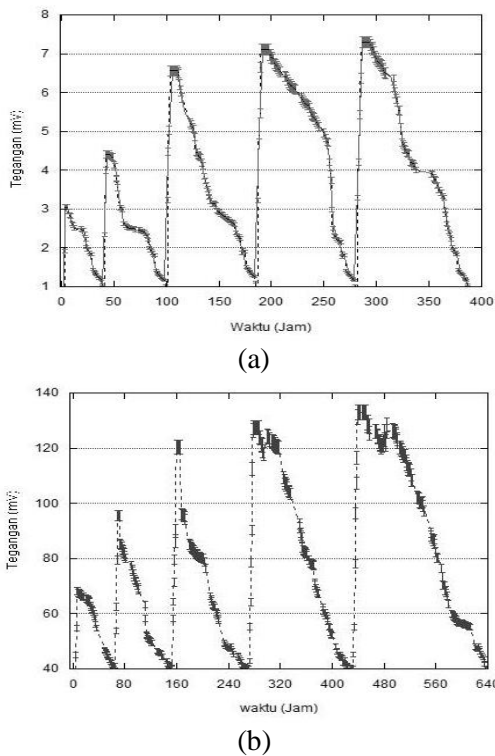
$$E_{Ti} = \frac{\Delta H S_i v}{M_i} \quad (8)$$

dengan : E_p adalah energi yang diperoleh dari sel MFC (Joule), P adalah daya (watt), t_b adalah waktu untuk satu siklus batch, E_{Ti} adalah energi teoritis yang bisa dihasilkan, ΔH adalah perubahan entalpi reaksi (J/mol), S_i adalah konsentrasi substrat (g/L), v adalah volume liquid dalam kompartemen anoda (L), dan M_i adalah berat molekul substrat (g/mol).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Produksi Listrik dengan Substrat Glukosa

Percobaan MFC dengan menggunakan glukosa dilakukan dalam mode *fed-batch*, yaitu konsentrasi awal glukosa ditingkatkan untuk setiap *batch* percobaan. Percobaan dilakukan sebanyak lima *batch*. Pada Gambar 2 di bawah ini dapat dilihat profil tegangan terukur dengan glukosa sebagai substrat, yang dihasilkan oleh sistem MFC dengan volume reaktor 0,5 L (a) dan 5 L (b). Konsentrasi glukosa yang digunakan untuk setiap *batch*-nya berturut-turut adalah 100 mg/L, 200 mg/L, 400 mg/L, 600 mg/L dan 800 mg/L.



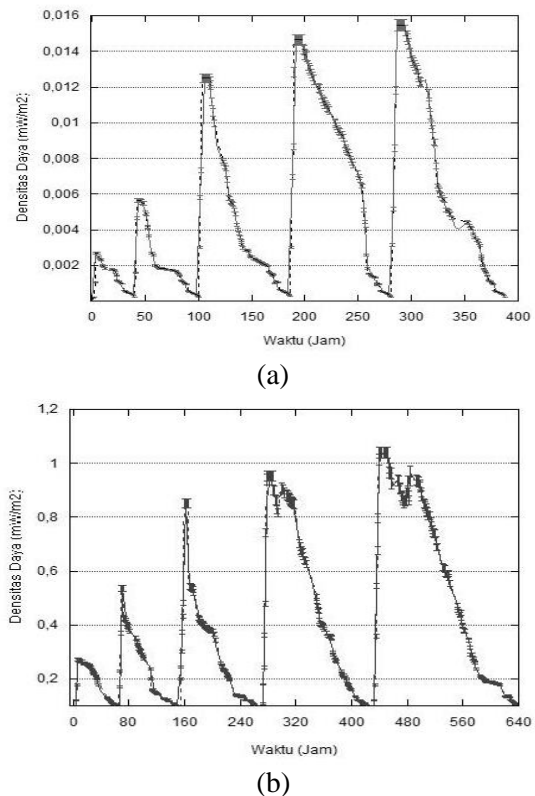
Gambar 2. Profil produksi listrik pada reaktor (a) 0,5 L dan (b) 5 L dengan substrat glukosa

Peningkatan konsentrasi glukosa mengakibatkan peningkatan tegangan maksimum dan waktu operasi pada masing-masing batch. Peningkatan tegangan disebabkan oleh semakin banyaknya molekul organik sebagai sumber elektron yang dapat didegradasi oleh bakteri, sehingga menyebabkan pula waktu yang dibutuhkan mikroba untuk memecah glukosa semakin panjang.

Peningkatan konsentrasi awal glukosa juga menyebabkan semakin stabilnya tegangan maksimum yang terukur. Fenomena ini merepresentasikan komunitas mikroba sudah semakin stabil dan dapat beradaptasi dengan baik terhadap lingkungan barunya. Hal ini dapat terlihat pada grafik dengan semakin lebarnya puncak yang terbentuk pada setiap *batch*. Hasil sama juga didapatkan oleh Zielke (2006) yang memvariasikan konsentrasi asetat sebagai substrat. Tegangan yang dihasilkan terus meningkat ketika asetat divariasikan konsentrasinya dari 0 mg/L hingga 800 mg/L (Zielke, 2006).

Kinetika Produksi Listrik MFC dengan Substrat Glukosa

Studi kinetika dilakukan untuk melihat profil densitas daya listrik keluaran dari sistem MFC sebagai fungsi dari konsentrasi substrat tunggal yang digunakan. Studi ini juga dilakukan untuk membandingkan hasil listrik yang diproduksi antara kedua volume reaktor yang digunakan, sehingga dapat diperkirakan pengaruh peningkatan volume terhadap produksi listrik maksimum pada sistem MFC.



Gambar 3. Profil daya listrik pada reaktor (a) 0,5 L dan (b) 5 L dengan substrat glukosa

Studi kinetika yang dilakukan pada penelitian ini berdasarkan persamaan Monod. Persamaan ini dipilih karena bisa menggambarkan secara sederhana kinetika pertumbuhan mikrobial baik dalam kultur murni ataupun campuran. Persamaan Monod juga biasa digunakan untuk mempelajari kinetika reaksi enzimatik yang tidak hanya melibatkan satu enzim, melainkan berbagai jenis enzim (Kovar, 1998; Logan, 2008), sehingga persamaan Monod dirasa cocok untuk digunakan dalam studi kinetika MFC dengan kultur campuran dan melibatkan reaksi enzimatik oleh bakteri.

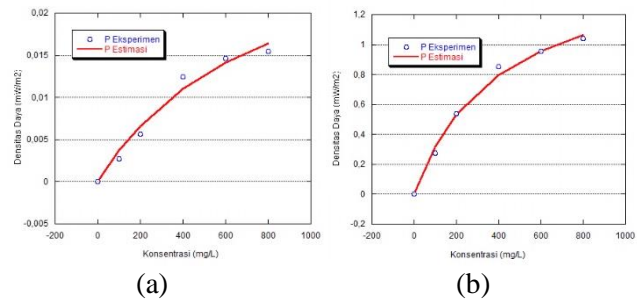
Tujuan utama pemodelan sistem MFC dengan persamaan Monod adalah untuk melihat keterkaitan antara densitas daya listrik yang dihasilkan dengan konsentrasi substrat awal. Hasil pemodelan ini dapat digunakan untuk memahami proses transfer elektron oleh mikroba baik pada reaktor dengan volume 0,5 L dan volume 5 L. Parameter kinetika yang dikaji dalam penelitian ini berkaitan langsung dengan densitas daya yang diproduksi.

Data densitas daya dari percobaan dengan substrat glukosa digunakan sebagai dasar untuk menentukan parameter kinetika dari sistem. Densitas daya yang digunakan untuk estimasi parameter kinetika adalah densitas daya maksimum pada masing-masing *batch* yang ditunjukkan sebagai puncak tertinggi pada Gambar 3. Tabel 1. di bawah ini merupakan hasil estimasi parameter kinetika berdasarkan persamaan Monod beserta nilai kuadrat error hasil estimasi terhadap data hasil penelitian. *Fitting* juga dilakukan untuk memperlihatkan secara visual hubungan data hasil penelitian dengan data hasil estimasi, yang diperlihatkan pada Gambar 4.

Tabel 1. Parameter kinetika berbasis Monod

Reaktor	Pmax (mW/m ²)	Ks (mg/L)	Kuadrat Error
0,5 L	0,03	772,89	$5,40 \times 10^{-6}$
5 L	1,59	399,99	$5,62 \times 10^{-3}$

Pmax menyatakan densitas daya maksimum yang dapat dihasilkan dari sistem MFC yang digunakan. Nilai Pmax merupakan representasi dari laju pertumbuhan maksimum pada persamaan Monod, dimana pada pertumbuhannya bakteri menggunakan substrat yang ada di lingkungannya. Pada saat bakteri memecah substrat untuk tumbuh dihasilkan elektron yang dimanfaatkan oleh sistem MFC sebagai listrik (Logan, 2008; Kovar, 1998). Nilai Pmax untuk reaktor dengan volume 5 L memiliki nilai 50 kali lebih besar dibandingkan dengan yang diperoleh dari reaktor 0,5 L.



Gambar 4. Kurva *fitting* data hasil penelitian dengan data hasil estimasi (a) reaktor 0,5 L dan (b) reaktor 5 L

Ks menyatakan konsentrasi substrat pada saat densitas daya yang dihasilkan sama dengan setengah kali densitas daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sistem MFC (Logan, 2008). Ks juga merupakan konstanta kesetimbangan ikatan antara substrat dan enzim yang dihasilkan oleh bakteri. Nilai Ks yang kecil menunjukkan ikatan yang kuat antara substrat dan enzim, sebaliknya nilai Ks yang besar menunjukkan ikatan yang lemah antara substrat dan enzim (Abdi, 2008).

Berdasarkan hasil yang didapat, reaktor 0,5 L memiliki nilai Ks yang tinggi menunjukkan lemahnya ikatan yang terjadi antara bakteri penghasil enzim dan substrat. Ikatan yang lemah ini membuat substrat yang terdegradasi tidak optimal, sehingga dibutuhkan substrat dengan konsentrasi yang lebih tinggi untuk mencapai Pmax. Dalam sistem MFC, aspek kinetika dikaji berdasarkan densitas daya yang dihasilkan. Degradasi substrat yang ditinjau hanya degradasi substrat oleh bakteri yang bisa menghantarkan elektron. Rendahnya nilai Pmax diikuti dengan nilai Ks yang tinggi mengindikasikan transfer elektron yang terjadi tidak maksimal.

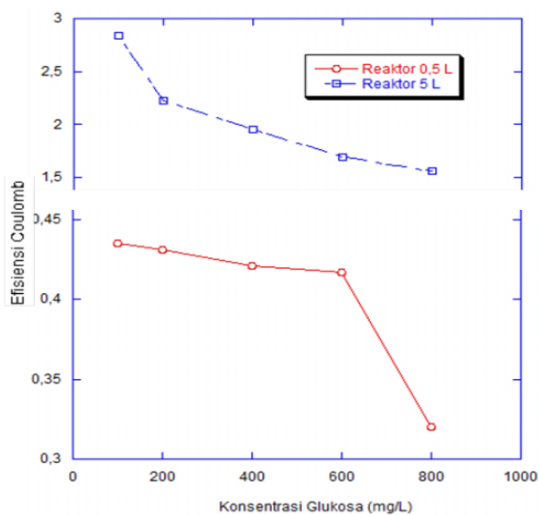
Jika ditinjau dari hambatan sistem, MFC dengan reaktor 0,5 L memiliki hambatan internal yang tinggi. Tingginya hambatan sistem akan menghambat pertumbuhan komunitas mikroba *exoelectrogen* (Picoreanu, 2007) dan substrat akan banyak didegradasi oleh mikroba non-*exoelectrogen* (Lee, 2007). Hal ini mengakibatkan substrat yang terdegradasi tidak menghasilkan beda

potensial pada system, sehingga tegangan yang terukur akan bernilai rendah.

Efisiensi Produksi Listrik MFC dengan Substrat Glukosa

Efisiensi sistem MFC, paling umum ditinjau melalui Efisiensi Coulomb (EC) dan Efisiensi Energi (EE). Kedua nilai efisiensi ini biasa dijadikan penentu apakah MFC dapat diaplikasikan menjadi teknologi praktis, baik sebagai penghasil energi maupun sebagai sistem pengolah limbah (Lee, 2007).

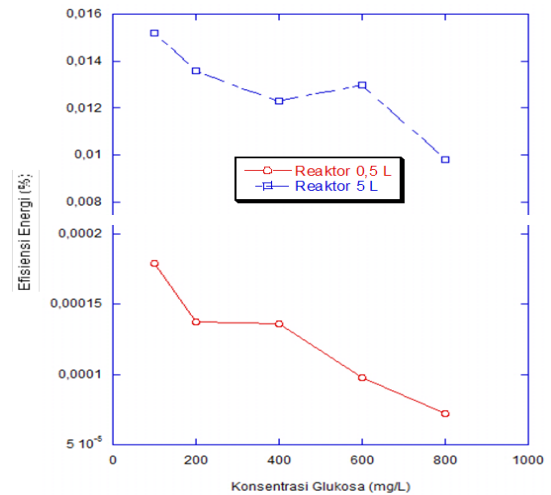
Nilai EC bisa digunakan untuk melihat keefektifan transfer elektron pada sistem yang telah ditumbuhi *biofilm*. EC berkaitan dengan jumlah elektron yang dikonversi menjadi arus listrik dibandingkan dengan jumlah elektron secara keseluruhan akibat dari sejumlah material organik yang terdegradasi. Gambar 5 di bawah ini menunjukkan nilai EC untuk setiap *batch* pada kedua reaktor yang digunakan.



Gambar 5. Efisiensi Coulomb untuk setiap *batch* percobaan

Dari hasil perhitungan diperoleh nilai EC yang terus menurun seiring dengan penambahan nilai konsentrasi awal glukosa. Nilai EC yang rendah terjadi karena rendahnya densitas *biofilm* eksoelektrogen pada permukaan anoda akibat kompetisi antar komunitas mikroba (Lee, 2007). Pada penelitian ini, glukosa yang terdegradasi lebih banyak disebabkan oleh aktivitas mikroba non-eksoelektrogen yang memicu rendahnya produksi arus dan rendahnya nilai EC.

Sama halnya dengan EC, nilai EE juga mampu mengevaluasi proses transfer elektron yang terjadi pada sistem MFC. Nilai EE sendiri mengevaluasi dengan membandingkan jumlah daya listrik yang terukur terhadap jumlah energi total yang seharusnya diperoleh dari reaksi degradasi senyawa organik. Gambar 6 menunjukkan hasil perhitungan EE untuk setiap *batch* percobaan pada kedua reaktor yang digunakan.



Gambar 6. Efisiensi Energi untuk setiap *batch* percobaan

Konsentrasi awal glukosa yang lebih besar, cenderung menghasilkan nilai EE yang lebih kecil. Fenomena ini menggambarkan bahwa peningkatan densitas daya listrik tidak sebanding dengan peningkatan konsentrasi awal substrat. Meningkatnya kompetisi antar komunitas mikroba dalam sistem dapat menghasilkan beragam aktivitas metabolik yang mengurangi densitas daya listrik keluaran.

Rendahnya nilai EE bisa disebabkan oleh *energy losses* pada sistem. Sitorus (2010) menerangkan bahwa hasil listrik yang terukur dari sistem MFC akan lebih kecil dibandingkan dengan hasil listrik keluaran secara teoritis. Hal ini dikarenakan adanya potensial berlebih, yaitu kehilangan potensial yang berkaitan dengan transfer elektron dan hambatan internal.

Mode operasi *batch* juga memungkinkan terjadinya penurunan nilai densitas daya (Arbianti, 2004). Mode operasi *batch* tanpa menggunakan *stirrer* dapat menghambat laju transfer massa dan tingginya gradien konsentrasi substrat antara fasa ruah dan

sekitar *biofilm*. Dalam sistem dengan sebagai substrat, sangat jarang komunitas eksoelektrogen langsung memecah glukosa.

Menurut Lee dkk., (2007), komunitas eksoelektrogen lebih menyukai produk hasil fermentasi dari glukosa seperti asetat, untuk kemudian didegradasi kembali menghasilkan elektron. Oleh karena itu, dalam sistem dengan kultur campuran sangat diperlukan kolaborasi antara aktivitas metabolik mikroba fermentatif dengan metabolik mikroba eksoelektrogen. Hal ini akan memicu tingginya *concentration loss*, yang mengakibatkan lapisan *biofilm* semakin menebal, namun lebih didominasi oleh biomassa inert yang tidak mampu menghasilkan arus. Kondisi ini dapat menghambat laju transfer massa dan menurunkan konsentrasi elektron donor pada permukaan anoda, yang pada akhirnya berdampak pada rendahnya nilai efisiensi energi (Lee dkk., 2007).

SIMPULAN DAN SARAN

Hasil estimasi nilai parameter kinetika berbasis persamaan Monod adalah, untuk reaktor 0,5 L nilai P_{max} sebesar 0,032 mW/m^2 dan K_s 772,98 mg/L, sedangkan untuk reaktor 5 L nilai P_{max} sebesar 1,59 mW/m^2 dan K_s 399,97 mg/L. Nilai EC tertinggi untuk reaktor 0,5 L adalah sebesar 0,435% dan 2,84% untuk reaktor 5 L. Nilai EE tertinggi pada sistem MFC dengan reaktor 0,5 L adalah 0,000179% dan 0,0152% untuk reaktor 5 L.

Secara keseluruhan terjadi peningkatan nilai parameter kinetika dan nilai efisiensi baik EC maupun EE pada peningkatan volume reaktor dari 0,5 L ke 5 L. Peningkatan yang terjadi cukup signifikan, pada parameter P_{max} terjadi peningkatan hingga 50 kali lipat.

DAFTAR PUSTAKA

Abdi, Saba. 2008. *Enzyme Kinetics-2*. <http://faculty.ksu.edu.sa/73637/Documents/Enzyme%20kinetics-2.pdf> (Diakses 15 Juni 2016, pukul 09.39 WIB).

Arbianti, Rita. 2014. Penggunaan Microbial Fuel Cell untuk Pengolahan Limbah Cair Tempe dengan Mengukur Penurunan Nilai Chemical Oxygen Demand (COD). *Prosiding Seminar*

menggunakan kultur campuran dan glukosa

Nasional Sains dan Teknologi Lingkungan.

- Caye M., Drapcho, Nghiem Phu Nhuan, T. H. W. 2008. *Biofuels Engineering Process Technology*. McGraw Hill.
- Du, Zhuwei et.al. 2007. *A state of the art review on microbial fuel cell: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy*. USA: Elsevier.
- Kovar, Karin. 1998. Growth Kinetics of Suspended Microbial Cells: From Single-Substrate-Controlled Growth to Mixed-Substrate Kinetics. *Microbiology and molecular biology review*. vol. 62 no. 3, p. 646-666.
- Picioreanu C., Head I.M., Katuri K.P., Loosdrecht M.C.M.v., Scott K. 2007. A computational model for biofilm-based microbial fuel cells. *Water Research*. 41: 2921–2940.
- Lee, H.S., et.al. 2007. Evaluation of energy-conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates. *Water Research*. 42(6-7): 1501-1510.
- Liu, H., Cheng, S., Logan, B.E. 2005. Production of Electricity from Acetate or Butyrate Using a Single-Chamber Microbial Fuel Cell. *Environ. Sci. Technol.* 39: 658-662.
- Logan and Regan. 2006. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *TRENDS in Microbiology*. 14: 512-518.
- Logan B.E. 2008. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons Inc. New Jersey.
- Okpokwasili, G.C., Nweke, C.O. 2005. Microbial growth and substrate utilization kinetics. *African Journal of Biotechnology*. 5 (4): 305-317.
- Rabaey, Korneal and Verstraete, Willy. 2005. *Microbial Fuel Cells: Novel Biotechnology for Energy Generation*. *TRENDS in Biotechnology*. vol.23, no. 26.
- Sitorus, Berlian. 2010. Diservikasi Energi Terbarukan melalui penggunaan air buangan dalam sel elektrokimia berbasis mikroba. *Jurnal ELKHA*. vol.2, no.1.
- Torres C.I., Marcus A.K., Rittmann B.E. 2007. Kinetics of consumption of fermentation products by anode-respiring bacteria.

Applied Microbial and Cell Physiology. 77(3):
689-697.

Zielke, E.A. 2006. Application of Microbial
Fuel Cell technology for a Waste Water
Treatment Alternative.