

Artikel Riset

Kinerja *Microbial Fuel Cell* dengan Variasi Hambatan Eksternal dalam Menghasilkan Energi Listrik dan Menyisihkan Senyawa Organik pada Limbah Cair

Performance of Microbial Fuel Cell with Variation of External Resistors in Producing Electrical Energy and Removing Organic Compounds in Wastewater

Syarif Hidayat^{1*}, Dini Widayani Aghnia¹, Edwan Kardena¹, Qomarudin Helmy¹

¹ Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha No. 10, Bandung, Jawa Barat, Indonesia 40132

* Penulis korespondensi, email: shidayat@tl.itb.ac.id

Abstrak

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversikan senyawa organik yang terkandung dalam limbah cair menjadi energi listrik. Pada penelitian ini dilakukan variasi hambatan eksternal (1000 Ω , 800 Ω , 400 Ω , 200 Ω , 100 Ω , dan 50 Ω) pada reaktor MFC untuk menentukan kondisi optimum dalam menghasilkan energi listrik dan menyisihkan senyawa organik. Kinerja reaktor MFC dievaluasi berdasarkan besarnya beda potensial, kerapatan daya, efisiensi Coulomb (CE), dan penyisihan senyawa organik. Selain itu, dilakukan uji biokimia untuk melihat aktivitas dari mikroorganisme dalam reaktor untuk kemudian dijadikan dasar dalam menentukan jenis mikroorganisme dominan yang tumbuh dalam reaktor MFC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kinerja reaktor MFC dipengaruhi oleh hambatan eksternal yang digunakan. Reaktor MFC dengan hambatan eksternal 100 Ω dipilih sebagai kondisi optimum karena menghasilkan kerapatan daya (174,2 mW/m²) dan penyisihan organik (91%) tertinggi dibandingkan dengan reaktor lain. Selain itu, nilai CE pada kondisi tersebut mencapai 57%, sedikit lebih rendah dari nilai CE yang dihasilkan oleh reaktor MFC dengan hambatan eksternal 50 Ω yaitu 65%. Mikroorganisme yang tumbuh pada anoda adalah bakteri yang masuk dalam genus *Clostridium* yang termasuk ke dalam *exoelectrogen*. Berdasarkan hasil tersebut dapat dilihat bahwa pemilihan hambatan eksternal yang tepat merupakan faktor penting dalam pengoperasian reaktor MFC.

Kata Kunci: energi terbarukan; pemulihan bioenergi; pengolahan limbah cair; *exoelectrogen*

Abstract

Microbial Fuel Cell (MFC) is a relatively new technology that can be used to convert the organic compounds contained in wastewater into direct electrical energy. In this study, the applied external resistance in MFC reactor was optimized to determine its optimum conditions in generating electrical energy and removing organic compounds contained wastewater. The performance of the MFC reactor was evaluated by cell potential, power density, Coulombic efficiency (CE), and organic removal efficiency. Biochemical tests were

carried out to determine the type of microorganisms in the anode electrode. This measurement is important for optimization of environmental conditions for subsequent experiment. MFC reactor with 100 Ω was selected as an optimum condition since it produced the highest power density and efficiency organic removal. The CE value in this condition was 57%, slightly lower than the MFC reactor with an external resistance of 50 Ω which was 65%. Microorganisms that grow on the anode electrode were closed to the Clostridium which belongs to the class of the exoelectrogen. Thus the selection of the proper external resistance is an important factor in the operation of the MFC reactor.

Keywords: renewable energy, bioenergy recovery, wastewater treatment, exoelectrogen

1. Pendahuluan

Penggunaan energi di Indonesia masih didominasi oleh minyak bumi dan batu bara yang merupakan sumber energi yang tidak dapat diperbaharui (Kementerian ESDM, 2019). Ketergantungan terhadap penggunaan minyak bumi dan batubara dapat menyebabkan adanya pemanasan global dan perubahan iklim akibat dari karbon yang diemisikannya (Rahimnejad dkk., 2015). Sedangkan, sumber energi yang berasal dari nuklir memiliki risiko yang sangat tinggi dan dapat mengancam keselamatan jiwa manusia akibat radiasi yang dipancarkan dan apabila terjadi kesalahan maka dapat memberikan kerugian yang sangat besar. Karenanya energi terbarukan atau energi alternatif menjadi suatu pilihan yang dibutuhkan. Energi alternatif telah menjadi isu pada *Sustainable Development Goals* (SDG's) pada tujuan no 7 tentang energi bersih dan terjangkau (Bappenas, 2019). Indonesia sendiri telah berkomitmen untuk mencapai tujuan tersebut melalui Peraturan Pemerintah No 70 Tahun 2014 tentang kebijakan energi nasional yang menetapkan bahwa target Indonesia mencapai energi baru dan energi terbarukan adalah sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (PP No 79 Tahun 2014). Sehingga penemuan terkait energi terbarukan menjadi hal yang penting baik di dunia maupun di Indonesia khususnya.

Salah satu sumber daya alam yang berpotensi digunakan untuk energi alternatif adalah senyawa organik yang terkandung dalam air limbah. Salah satu jenis teknologi yang dapat memanfaatkan senyawa organik yang terkandung dalam air limbah tersebut adalah teknologi *Microbial Fuel Cell* (MFC). Microbial Fuel Cells merupakan teknologi baru yang memanfaatkan bakteri sebagai biokatalis untuk mengkonversi energi yang tersimpan dalam senyawa organik/anorganik yang mudah terdegradasi menjadi energi listrik (Logan, 2008). Selain dapat menghasilkan energi listrik implementasi teknologi ini dapat membantu menyelesaikan permasalahan pengolahan limbah yang semakin hari jumlahnya semakin banyak. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh Logan dan Rabaey (2012) kandungan organik dalam air limbah memiliki potensi energi sebesar 2-5 kWh/m³ jika diolah menggunakan teknologi MFC. Hal ini tentu jauh lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan menggunakan teknologi konvensional (*Activated Sludge*) dimana membutuhkan energi 0,12-2 kWh untuk per meter kubik air limbah yang diolah. Beberapa penelitian lain menunjukkan bahwa jika dibandingkan dengan air limbah domestik, air limbah industri yang mengandung senyawa organik tinggi memiliki potensi pembentukan energi listrik yang lebih besar dengan efisiensi penyisihan senyawa organik yang hampir sama (Jia dkk., 2013; Choi dan Ahn, 2015; dan Xin dkk., 2018). Ramadan dan Purwono (2017) menyebutkan bahwa potensi aplikasi MFC di Indonesia sangat besar. Selain karena teknologi ini relatif murah dan sederhana, teknologi ini juga dapat diaplikasikan untuk mengolah berbagai jenis limbah industri.

Penelitian terkait produksi energi listrik dan pengolahan air limbah beserta identifikasi bakterinya pada teknologi *microbial fuel cell* telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Kaushik dan Jadhav (2015) menggunakan air limbah dari industri bubur kertas dan bakteri *Pseudomonas fluorescens* menghasilkan energi listrik maksimum sebesar 1,24 V (5,94 A). Jayashree dkk., (2016) melaporkan bahwa

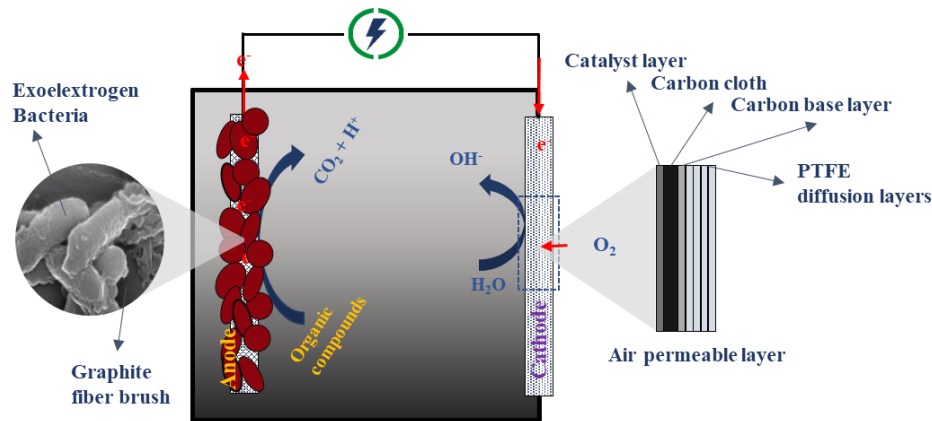
reaktor MFC yang didominasi oleh bakteri *Stenotrophomonas* sp mampu menghasilkan energi listrik sebesar 0,22 W/m², penyisihan COD sebesar 83%, dan nilai CE 26,7%. Penelitian MFC lainnya yang dilakukan oleh Maminska dkk., (2018) dengan menggunakan air limbah dari pengolahan kayu dan bakteri *Anaerobaculum* sp. and *Rhizobium* sp dilaporkan mampu menghasilkan energi listrik sebesar 0,36 W/m² dan penyisihan COD sebesar 90%. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat dilihat bahwa MFC memiliki potensi dijadikan sebagai teknologi penghasil energi listrik dan pengolah air limbah dari berbagai limbah industri. Selain itu, jenis mikroorganisme yang terdapat pada reaktor MFC juga memiliki peran penting dalam menentukan kinerja reaktor MFC.

Pada penelitian ini dilakukan evaluasi kinerja reaktor MFC dalam menghasilkan energi listrik dan menyisihkan senyawa organik yang terkandung dalam limbah cair yang dioperasikan dengan berbagai variasi hambatan eksternal. Limbah cair dari industri tahu digunakan sebagai substrat pada penelitian ini. Limbah cair dari industri tahu memiliki potensi untuk dijadikan substrat pada reaktor MFC karena memiliki kandungan organik yang tinggi. Dari hasil evaluasi ini diharapkan dapat ditentukan kondisi optimum dari reaktor MFC baik dalam menghasilkan energi listrik maupun dalam menyisihkan senyawa organik. *Seeding* mikroorganisme dalam reaktor MFC dilakukan selama kurang lebih 80 hari dengan mengevaluasi beda potensial yang terbentuk. Tahap adaptasi dilakukan dengan menumbuhkan mikroorganisme pada limbah tahu yang akan digunakan sebagai substrat dengan meningkatkan konsentrasinya secara bertahap. Reaktor MFC kemudian dioperasikan dengan variasi hambatan eksternal yang digunakan. Kinerja reaktor MFC dievaluasi berdasarkan besarnya beda potensial, kerapatan daya, efisiensi Coulomb (CE), dan penyisihan senyawa organik (sebagai COD). Selain itu, dilakukan uji biokimia untuk melihat aktivitas atau metabolisme dari mikroorganisme dalam reaktor untuk kemudian dijadikan dasar dalam menentukan jenis mikroorganisme dominan yang tumbuh dalam reaktor MFC.

2. Metode Penelitian

2.1 Konfigurasi Reaktor MFC

Pada penelitian ini reaktor yang digunakan adalah reaktor MFC ruang tunggal tanpa adanya separator/membran (*membraneless single chamber* MFC). Reaktor terbuat dari bahan akrilik dengan dimensi panjang 5,0 cm, lebar 5,0 cm, dan tinggi 3,0 cm (volum reaktor 75 ml) (Gambar 1). Anoda yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari serat grafit yang berbentuk sikat (*graphite fiber brush*)(T700 SC-12000, Toray, Japan) dengan diameter 2,5 cm dengan panjang 3,0 cm. Sedangkan katoda yang digunakan pada penelitian ini terbuat dari kain karbon kedap air (30% *wet proofing*) (1071 HCB, AvCarb®, United States) yang dilapisi serbuk karbon yang dicampur dengan *polytetrafluoroethylene* (PTFE) pada bagian yang menghadap udara dan katalis Platinum pada bagian yang menghadap air. Luas area katoda adalah 25 cm². Anoda dan katoda dihubungkan dengan kawat yang terbuat dari Titanium. Reaktor kemudian dihubungkan pada hambatan eksternal (*external resistance*) dengan besaran tertentu dan pengukur beda tegangan digital (VR-71, T&D Corporation, Japan) yang terhubung pada komputer.



Gambar 1. Skematik diagram reaktor MFC yang digunakan pada penelitian ini.

2.2 Kondisi Operasional Reaktor MFC

Sumber bakteri yang digunakan pada penelitian ini adalah berasal dari lumpur (*sludge*) yang diambil pada zona anaerobik di Instalasi Pengolahan Air Limbah Bojongsoang, Kabupaten Bandung. Langkah pertama lumpur di cuci dengan menggunakan larutan buffer fosfat (*Phosphat Buffer Solution/ PBS*) supaya kondisi lingkungan berada pada pH netral dan mikroorganisme yang ada pada lumpur tersebut dapat hidup dengan baik (Song dkk., 2015). Pada saat proses perbanyak mikroorganisme (*seeding*), reaktor MFC kemudian diinokulasikan dengan 50% volum lumpur yang telah di cuci dengan PBS dan 50% volum media yang mengandung 1.0 g/L asetat. *Seeding* dianggap berhasil apabila reaktor MFC dapat menghasilkan listrik yang stabil minimal dalam 3 kali siklus (*batch cyle*) secara berturut-turut. Komposisi media dan PBS terdiri dari (per Liter) 0,31 g NH_4Cl ; 0,13 g KCl ; 6,6 g $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 8,19 g Na_2HPO_4 ; 12.5 mL larutan mineral dan vitamin.

Pada penelitian ini, reaktor MFC dioperasikan dengan sistem *batch*. Setelah kondisi stabil kemudian reaktor MFC dioperasikan dengan menggunakan air limbah tahu sebagai substrat dengan konsentrasi COD awal 1000 mg/L. Volume air limbah yang digunakan adalah sesuai dengan volume reaktor yaitu 75 ml. Pengambilan sampel untuk pengukuran COD adalah sebanyak 1,5 ml – 3 ml. Total waktu penelitian adalah 6 bulan, dengan masing-masing variasi penelitian berkisar antara 5 – 10 hari. Variasi penelitian yang dilakukan adalah dengan mengoperasikan reaktor MFC pada berbagai hambatan eksternal yaitu 1000 Ω , 800 Ω , 600 Ω , 400 Ω , 200 Ω , 100 Ω , dan 50 Ω . Kinerja reaktor kemudian di evaluasi dengan mengukur nilai beda potensial (*Voltage*), kuat arus (*Current*), kerapatan daya (*Power density*), efisiensi Coulomb (*Coulombic efficiency (CE)*), dan efisiensi penyisihan organik (COD removal) pada masing-masing hambatan eksternal.

2.3 Analisa dan Pengukuran

Beda potensial untuk masing-masing reaktor diukur setiap 10 menit dengan menggunakan *voltage recorder* digital yang dikoneksikan pada komputer. Kuat arus yang dihasilkan ditentukan dengan menggunakan prinsip Hukum Ohm (Logan, 2008). Beda potensial (V) diukur dengan rumus: $V = I \times R$ dimana I adalah kuat arus dalam Ampere (A) dan R adalah hambatan (eksternal) dalam Ohm (Ω). Daya (P) yang dihasilkan dihitung dengan rumus: $P = V \times I$ dimana V adalah beda potensial (*voltage*) dalam Volt (V), dan I adalah kuat arus dalam Ampere (A). Efisiensi Coulomb (CE) dihitung berdasarkan penyisihan organik dan dihitung dengan rumus, $CE = (8 \times \int I dt) / (V_{an} \times \Delta\text{COD} \times F)$ dimana I adalah kuat arus (A), V_{an} adalah volum reaktor (L), ΔCOD adalah penyisihan senyawa organik (mg/L), dan F adalah konstanta Faraday (96.485 C/mol). Kerapatan daya (mW/m^2) dan kerapatan arus (A/m^2) di ukur dengan membagi masing-

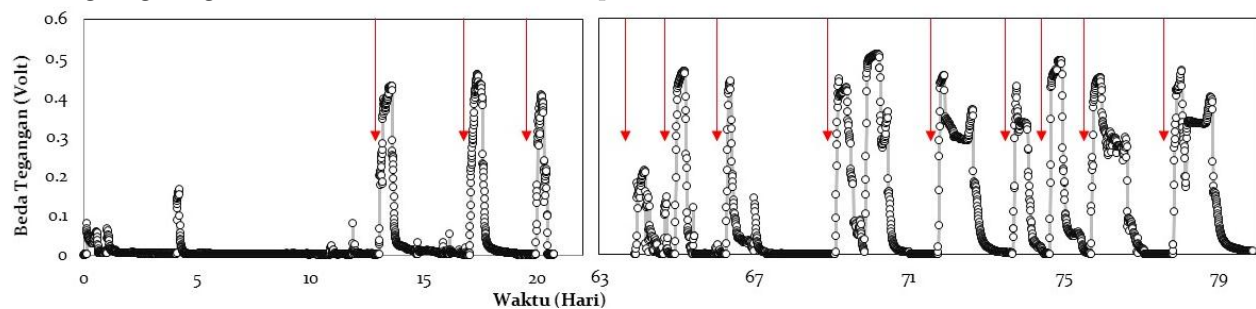
masing daya dan arus yang dihasilkan dari reaktor dengan luas area dari elektroda katoda. Pengukuran COD dilakukan dengan menggunakan Hach spectrophotometer (DR-2800, Hach Company, United States)

Selain itu, pada penelitian ini juga dilakukan identifikasi bakteri yang tumbuh pada area anoda. Pada tahapan ini dilakukan identifikasi bakteri (*biofilm*) yang tumbuh anoda dan mempengaruhi pembentukan listrik pada MFC. Identifikasi bakteri dilakukan dengan melakukan uji biokimia dan diikuti dengan prosedur yang tertera pada *Cowan and Steele's manual for the identification of medical bacteria* (Barrow dan Feltham, 1993) dan *Bergey's manual on systematic bacteriology* (Sneath, 1986).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Seeding dan Adaptasi Mikroorganisme

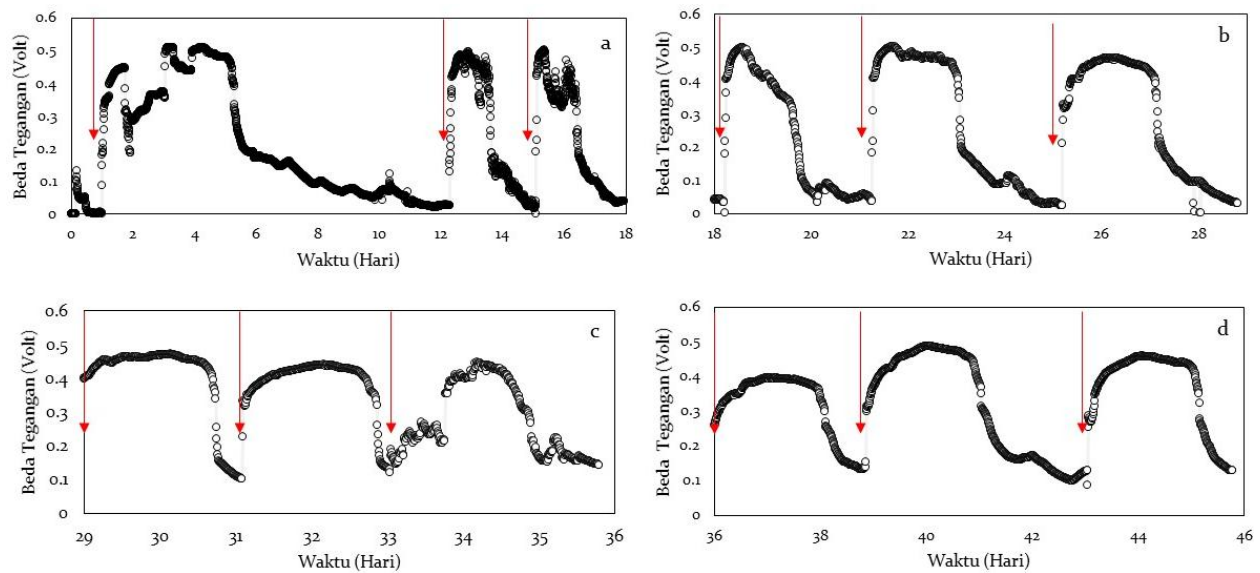
Pada tahap *seeding*, reaktor MFC diberikan umpan berupa asetat dengan konsentrasi 1,0 g/L. Pertumbuhan mikroorganisme diamati dengan pembentukan energi listrik berupa beda potensial yang muncul pada *voltage recorder* (Song dkk., 2015). Hasil pengamatan dapat dilihat pada Gambar 1. Pada Gambar 1 terlihat bahwa mikroorganisme mulai tumbuh pada anoda mulai hari ke-14. Hal ini ditandai dengan munculnya beda potensial dengan puncaknya sebesar 0,495 V. Beda potensial pada reaktor kemudian turun kembali ke < 0,05 V setelah beberapa saat yang menandai bahwa substrat dalam reaktor telah berkurang (habis). Penambahan umpan (ditandai dengan tanda panah merah pada Gambar 1) kemudian dilakukan kembali setelah beda potensial dalam reaktor berada pada kondisi < 0,05 V. Fenomena ini diamati selama kurang lebih 80 hari. Selama dalam rentang waktu 80 hari tersebut terlihat bahwa reaktor menghasilkan beda potensial dengan puncak berada pada rentang 0,450 V – 0,550 V (sebanyak 40 siklus). Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa proses *seeding* mikroorganisme pada reaktor MFC berlangsung dengan baik dan reaktor telah berada pada kondisi stabil.



Gambar 2. Pembentukan energi listrik pada tahap seeding pada reaktor MFC.

Tahap selanjutnya setelah proses *seeding* adalah mengadaptasikan mikroorganisme pada limbah tahu yang akan digunakan sebagai substrat pada penelitian selanjutnya sesuai dengan prosedur yang dilakukan pada penelitian sebelumnya (Song dkk., 2012). Proses adaptasi dilakukan dengan menambahkan air limbah tahu ke dalam reaktor dalam perbandingan volum (v/v) tertentu secara bertahap (25%, 50%, 75%, dan 100%) dengan mengontrol konsentrasi COD berada di nilai 1000 g/L. Proses adaptasi dilakukan sebanyak 3 siklus untuk masing-masing tahap. Hasil adaptasi mikroorganisme terhadap air limbah tahu dapat dilihat pada Gambar 2. Rata-rata puncak beda potensial untuk masing-masing tahap (25%, 50%, 75%, dan 100%) adalah 0,50 V, 0,49 V, 0,45 V, dan 0,45 V. Penyisihan senyawa organik sebagai COD pada masing-masing tahap adalah $95 \pm 3 \%$, $95 \pm 2 \%$, $91 \pm 5 \%$, dan $88 \pm 2 \%$. Dari hasil tersebut terlihat ada penurunan rata-rata puncak beda potensial dan penyisihan senyawa organik dengan semakin besarnya persentase volum air limbah yang ditambahkan ke dalam reaktor MFC. Hal ini terjadi karena komposisi air limbah tahu yang lebih kompleks dibandingkan dengan asetat sebagai substrat. Mikroorganisme akan lebih mudah menggunakan senyawa organik sederhana seperti asetat untuk pertumbuhan sel dan menghasilkan energi listrik dalam reaktor MFC, sedangkan senyawa organik kompleks akan sulit dikonsumsi oleh

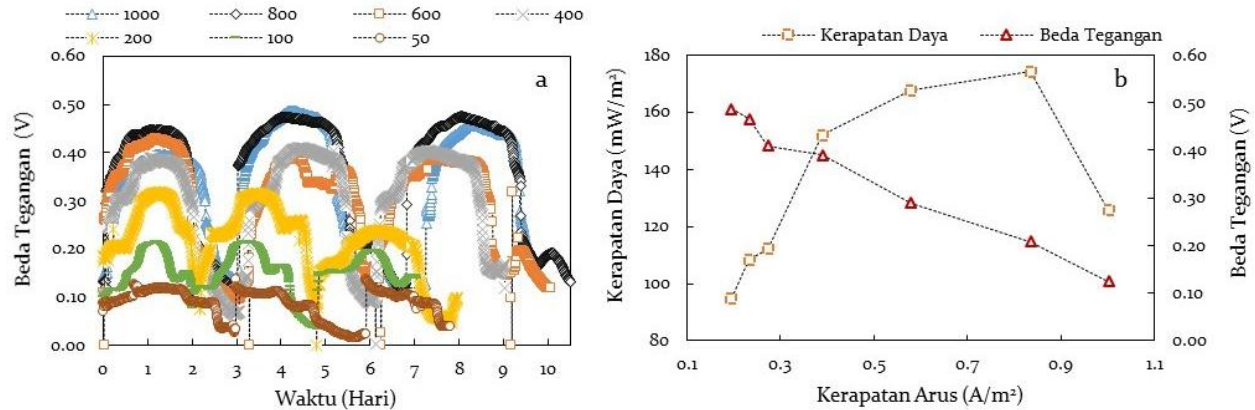
mikroorganisme sehingga menyebabkan efisiensi penyisihan substrat dan pembentukan energi listrik menjadi berkurang. Selain itu, dari hasil penyisihan senyawa organik yang dihasilkan oleh reaktor MFC, terlihat bahwa mikroorganisme dalam reaktor MFC dapat tumbuh dengan baik dengan menggunakan air limbah tahu sebagai substrat. Hasil ini juga mengindikasikan bahwa mikroorganisme dalam reaktor MFC teradaptasikan dengan baik terhadap limbah tahu yang akan dijadikan sebagai substrat pada penelitian selanjutnya.



Gambar 3. Pembentukan energi listrik pada tahap adaptasi mikroorganisme pada limbah tahu dengan perbandingan volum/volum (v/v) air limbah tahu dan asetat sebagai substrat, (a) 25% limbah tahu : 75% asetat, (b) 50% limbah tahu : 50% asetat, (c) 75% limbah tahu : 25% asetat, dan (d) 100% limbah tahu.

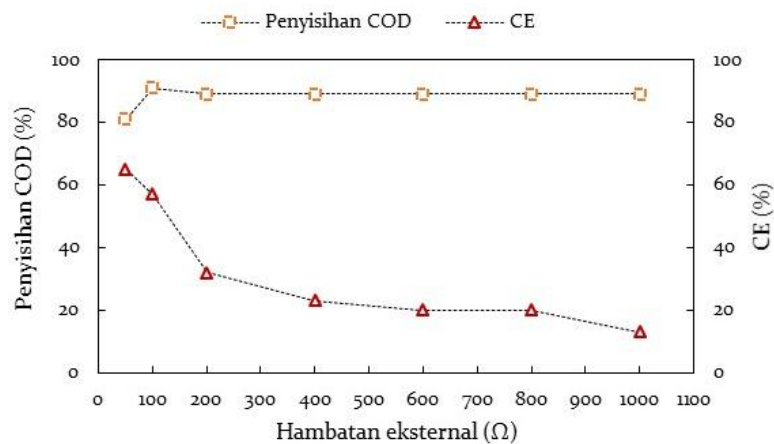
3.2 Kinerja Reaktor MFC pada Variasi Hambatan Eksternal

Kinerja reaktor MFC dalam menghasilkan energi listrik di evaluasi berdasarkan besarnya beda potensial dan kerapatan daya yang dihasilkan oleh masing-masing reaktor (Gambar 4.a dan Gambar 4.b). Gambar 4.a dan Gambar 4.b memperlihatkan bahwa puncak beda potensial yang dihasilkan oleh reaktor MFC menurun (dari 0,487 V ke 0,125 V) seiring dengan mengecilnya hambatan eksternal (dari 1000 Ω ke 50 Ω) yang digunakan pada reaktor MFC. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya (Kature dkk., 2011, dan Choi dan Ahn, 2015) dimana dilaporkan bahwa beda potensial yang dihasilkan oleh reaktor MFC akan berbeda-beda dan cenderung menurun seiring dengan mengecilnya hambatan eksternal yang digunakan. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Meniccuci dkk. (2006) hal ini dapat terjadi karena adanya keterbatasan pada reaksi kinetik di elektroda pada saat perpindahan masa dan proses transfer elektron dalam reaktor MFC. Pada saat hambatan eksternal besar maka besarnya penurunan relatif anodik potensial (*relative decrease in anodic potential*) akan kecil karena adanya penurunan laju transfer elektron yang menyebabkan nilai beda potensial besar. Hal ini juga sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Song dkk. (2010) yang menyatakan bahwa nilai penurunan relatif anodik potensial semakin signifikan terlihat pada saat hambatan eksternal yang digunakan semakin besar. Penurunan laju transfer elektron juga akan berpengaruh terhadap waktu operasional dari reaktor MFC. Hal ini terlihat pada Gambar 4.a bahwa siklus operasional reaktor MFC berkurang dari 3,40 hari pada hambatan eksternal 1000 Ω menjadi 1,48 hari pada hambatan eksternal 50 Ω . Pada saat hambatan eksternal besar, laju transfer elektron dalam sistem akan rendah, sehingga akan memperlama siklus operasional reaktor MFC dan begitupun sebaliknya.



Gambar 4. Kinerja reaktor MFC (a) beda potensial dan (b) kerapatan daya pada masing-masing hambatan eksternal.

Gambar 4.b menunjukkan rata-rata puncak kerapatan daya dan puncak beda potensial pada masing-masing reaktor MFC. Kerapatan daya meningkat dari 94,5 mW/m² pada reaktor MFC yang dioperasikan dengan hambatan eksternal 1000 Ω (kerapatan arus 0,195 A/m²) menjadi 174,2 mW/m² pada saat reaktor MFC dioperasikan dengan hambatan eksternal 100 Ω (kerapatan arus 0,835 A/m²). Kerapatan daya kemudian turun ke 125,7 mW/m² pada saat hambatan eksternal diturunkan menjadi 50 Ω. Berdasarkan hasil tersebut terlihat bahwa nilai kerapatan daya cenderung meningkat pada saat hambatan eksternal yang digunakan mengecil (kerapatan arus meningkat), kemudian menurun pada saat melewati hambatan eksternal optimumnya. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Gonzalez dkk. (2016) yang menyatakan bahwa kerapatan daya pada reaktor MFC akan mengalami penurunan pada saat hambatan eksternal yang digunakan telah melewati titik optimumnya. Pada titik optimum, besarnya nilai hambatan eksternal akan mendekati atau sama dengan hambatan internal (Lyon dkk., 2010). Apabila reaktor MFC dioperasikan pada hambatan eksternal kurang atau melebihi dari hambatan internalnya maka power yang dihasilkan tidak akan maksimal (Ren dkk., 2011). Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini kinerja reaktor MFC dalam menghasilkan energi listrik optimal pada saat hambatan eksternal 100 Ω karena menghasilkan kerapatan daya yang paling besar.



Gambar 5. Penyisihan COD dan efisiensi Coulomb reaktor MFC pada masing-masing hambatan eksternal.

Kinerja reaktor MFC dalam menyisihkan senyawa organik yang terkandung dalam air limbah di evaluasi berdasarkan nilai efisiensi penyisihan organik dan efisiensi Coulomb (CE). Penyisihan organik ditentukan dengan menghitung konsentrasi COD awal dan akhir dari air limbah yang digunakan sebagai substrat dalam reaktor MFC. Nilai CE adalah rasio antara jumlah Coulomb yang terukur sebagai arus terhadap total Coulomb secara teoritis yang terdapat dalam substrat (air limbah). Nilai penyisihan COD dan CE pada masing-masing reaktor MFC dapat dilihat pada Gambar 5. Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa rata-rata efisiensi penyisihan COD berada pada rentang 81% - 91%. Efisiensi penyisihan COD tertinggi dicapai pada reaktor MFC dengan hambatan eksternal 100 Ω dengan nilai 91%, sedangkan efisiensi terendah dicapai pada reaktor dengan hambatan eksternal 50 Ω dengan nilai 81%. Untuk nilai CE reaktor cenderung meningkat seiring dengan mengecilnya hambatan eksternal yang digunakan dalam reaktor MFC. Penentuan besarnya nilai CE akan dipengaruhi dua faktor yaitu penyisihan COD dan besarnya arus listrik yang dihasilkan. Pada penelitian ini, dikarenakan besarnya penyisihan COD tidak terlalu berbeda signifikan, maka nilai CE akan dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang dihasilkan. Semakin kecil hambatan eksternal yang digunakan, maka arus listrik yang dihasilkan semakin besar sehingga nilai CE yang dihasilkan juga semakin besar. Berdasarkan hasil tersebut maka dapat disimpulkan bahwa pada penelitian ini kinerja reaktor MFC dalam menyisihkan senyawa organik dalam air limbah optimal pada saat hambatan eksternal 100 Ω karena menghasilkan penyisihan COD paling besar. Selain itu, nilai CE pada kondisi tersebut mencapai 57%, sedikit lebih rendah dari nilai CE yang dihasilkan oleh reaktor MFC dengan hambatan eksternal 50 Ω yaitu 65%.

3.3 Identifikasi Mikroorganisme

Sampel inokulum diisolasi dari lapisan biofilm yang terbentuk pada katoda anoda. Setelah dilakukan pemurnian terdapat dua (2) isolat dominan. Aktivitas atau metabolisme dari ke dua isolat tersebut kemudian di uji dengan metode biokimia dan di identifikasi dengan prosedur seperti yang di jelaskan dalam *Cowan and Steele's manual for the identification of medical bacteria* (Barrow dan Feltham, 1993) dan *Bergey's manual on systematic bacteriology* (Sneath, 1986). Hasil uji biokimia dari masing-masing isolat dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil uji biokimia bakteri hasil isolasi dari katoda anoda reaktor MFC.

No	Jenis Uji	Isolat 1	Isolat 2
1	Sitrat	-	-
	Indol	-	-
	Motilitas	-	-
2	Esculin	-	-
3	Lecithinase	-	+
4	D-Nase	+	+
5	Glukosa	+	+
6	Lactose	-	-
7	Manithol	-	-
8	Katalase	+	+
Jenis Bakteri		<i>Clostridium sp1</i>	<i>Clostridium sp2</i>

Berdasarkan hasil uji biokimia pada Tabel 1, dugaan awal sementara dapat disimpulkan bahwa kedua jenis isolat bakteri yang tumbuh dominan pada anoda reaktor MFC mendekati bakteri *Clostridium sp1* dan *Clostridium sp1*. Kedua jenis bakteri yang ditemukan merupakan genus *Clostridium* yang merupakan jenis mikroorganisme gram positif dan merupakan jenis mikroorganisme yang hidup dalam kondisi anaerob. Hal ini sesuai dengan kondisi aktual yang terjadi dalam reaktor MFC yaitu anaerob. Selain

itu, beberapa penelitian sebelumnya juga menunjukkan bahwa bakteri dari genus *Clostridium* merupakan salah satu genus bakteri exoelectrogen yang tumbuh pada anoda reaktor MFC (Kather dkk., 2017 dan Deng dkk., 2017). Walaupun demikian, perlu dilakukan pengujian lebih lanjut untuk menentukan jenis bakteri spesifik yang tumbuh pada reaktor MFC pada penelitian ini.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan variasi penggunaan hambatan eksternal pada reaktor MFC dalam menghasilkan energi listrik dan menyisihkan senyawa organik pada air limbah. Berdasarkan hasil penelitian, hambatan eksternal 100 Ω dipilih sebagai kondisi optimum. Hal ini dikarenakan pada kondisi tersebut reaktor MFC menghasilkan kerapatan daya dan efisiensi penyisihan COD yang paling besar jika dibandingkan dengan reaktor yang lain. Selain itu, nilai CE pada kondisi tersebut mencapai 57%, sedikit lebih rendah dari nilai CE yang dihasilkan oleh reaktor MFC dengan hambatan eksternal 50 Ω yaitu 65%. Berdasarkan uji biokimia, mikroorganisme yang tumbuh pada elektroda anoda adalah bakteri yang masuk dalam genus *Clostridium* (*Clostridium sp1* dan *Clostridium sp2*) yang ditengarai sebagai salah satu bakteri yang termasuk ke dalam jenis exoelectrogen. Berdasarkan hasil di atas dapat disimpulkan bahwa kinerja reaktor MFC dipengaruhi oleh besarnya hambatan eksternal yang digunakan. Pemilihan hambatan eksternal yang tepat merupakan salah satu faktor penting dalam pengoperasian reaktor MFC untuk menghasilkan energi listrik dan menyisihkan senyawa organik secara optimal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan oleh para peneliti lain dalam pengembangan teknologi MFC dalam skala yang lebih besar. Setelah menentukan hambatan eksternal optimum penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan melakukan *scale-up* ukuran reaktor yang digunakan dalam penelitian. Selain itu, kondisi operasional dari eksperimen juga dapat dilakukan dengan sistem kontinu untuk mengetahui sejauh mana teknologi ini dapat menghasilkan energi listrik dan mengolah air limbah pada kondisi tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini di danai oleh Program Riset Peningkatan Kapasitas Tahun 2020 (Program Riset ITB Tahun 2020)

Daftar Pustaka

- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. Indonesia Energy Outlook 2019. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional
- 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.
- Badan Perencanaan Pembangunan Nasional. Roadmap of SDGs Indonesia 2019: a Highlight.
- Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No 79 Tahun 2014: Kebijakan Energi Nasional mendorong pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT) dan mengerem penggunaan sumber energi fosil.
- Logan, B.E., 2008. Microbial Fuel Cell. New Jersey, United States: John Willey & Sons.
- Logan, B.E. & Rabaey, K., 2012. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. Science 337 (6095),686-690.
- Jia, J., Tang, Yu., Liu, B., Wu, D., Ren, N., dan Xing, D., 2013. Electricity generation from food wastes and microbial community structure in microbial fuel cells. Bioresource Technology 144,94-99.
- Choi, J. dan Ahn, Y.H., 2015. Enhanced bioelectricity harvesting in microbial fuel cells treating food waste leachate produced from biohydrogen fermentation. Bioresource Technology 183,53-60.
- Xin, X., Ma, Y., Liu, Y., 2018. Electric energy production from food waste: Microbial fuel cells versus anaerobic digestion. Bioresource Technology 255, 281-287.

- Ramadan, B.S. and Purwono. 2017. Challenges and opportunities of microbial fuel cells (MFCs) technology development in Indonesia. Sriwijaya International Conference on Engineering, Science and Technology (SICEST 2016) 101, 02018.
- Kaushik, A., Jadhav, S.K., 2015. Conversion of waste to electricity in a microbial fuel cell using newly identified bacteria: *Pseudomonas fluorescens*. *International Journal of Environmental Science and Technology* 14(8), 1771-1780.
- Jayashree, C., Tamilarasan, K., Rajkumar, M., Arulazhagan, P., Yogalakshmi, K.N., Srikanth, M., Banu, J.R., 2016. Treatment of seafood processing wastewater using upflow microbial fuel cell for power generation and identification of bacterial community in anodic biofilm. *Journal of Environmental Management* 180, 351-358.
- Mamińska, R.T., Szymona, K., dan Kloch, M., 2018. Bioelectricity production from wood hydrothermal-treatment wastewater: Enhanced power generation in MFC-fed mixed wastewaters. *Science of The Total Environment* 634, 586-594.
- Song, Y.H., An, B.M., Shin, J.W., dan Park, J.Y., 2015. Ethanolamine degradation and energy recovery using a single air-cathode microbial fuel cell with various separators. *International Biodeterioration & Biodegradation* 102, 392-397.
- Song, S.T., Wu, X.Y., dan Zhou, C.C., 2012. Effect of different acclimation methods on the performance of microbial fuel cells using phenol as substrate. *Bioprocess and Biosystems Engineering* 37, 133-138.
- Barrow, G. dan Feltham, R., 1993. *Cowan and Steele's manual for the identification of medical bacteria*. 3rd edn. Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Sneath, P., 1986. *Bergey's manuals on systematic bacteriology* (vol. 2). Baltimore, USA: Williams & Wilkins.
- Katuri, K.P., Keith, S., Ian M.H., Cristian, P., dan Tom, P.C., 2011. Microbial fuel cells meet with external resistance. *Bioresource Technology* 102, 2758-2766.
- Menicucci, J., Haluk, B., Enrico, M., Raajaraajan, A.V., Goksel, D., dan Zbigniew, L., 2006. Procedure for determining maximum sustainable power generated by microbial fuel cells. *Environmental Science and Technology* 40, 1062-1068.
- Song, Y.H., An B.M., Shin, J.W., dan Park, J.Y., 2015. Ethanolamine degradation and energy recovery using a single air-cathode microbial fuel cell with various separators. *International Biodeterioration and Biodegradation* 102, 392-97.
- Gonzalez del Campo, A., Canizares, P., Lobato, L., Rodrigo, M., dan Fernandez, F.J., 2016. Effect of external resistance on microbial fuel cell. Eds. *Environment, Energy and Climate Change II: Energies from New Resources and the Climate Change*. Berlin, Germany: Springer International Publishing.
- Ren, Z., Yan, H., Wang, W., Mench, M.M., dan Regan, J.M., 2011. Characterization of microbial fuel cells at microbially and electrochemically meaningful time scales. *Environmental Science Technology* 45, 2435-2441.
- Lyon, D.Y., Buret, F., Vogel, T.M., Monier, J.M., 2010. Is resistance futile? Changing external resistance does not improve microbial fuel cell performance. *Bioelectrochemistry* 78, 2-7.
- Khater, D.Z., El-Khatib, K.M., dan Hassan, H.M., 2017. Microbial diversity structure in acetate single chamber microbial fuel cell for electricity generation. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology* 15 (1), 127-137.
- Deng, H., Xue, H., dan Zhong, W., 2017. A novel exoelectrogenic bacterium phylogenetically related to *Clostridium sporogenes* isolated from copper contaminated soil. *Electroanalysis*. 29 (5), 1294-1300.