
Potensi Microbial Fuel Cell sebagai Pengolah Limbah Cair Industri Tempe

Tania Surya Utami, Rita Arbianti, Sekar Puri Hardiyani

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

Kampus UI Depok, Depok 16424

nana@che.ui.ac.id

Abstrak

Limbah cair industri pada umumnya akan disalurkan dan diolah di fasilitas tersentralisasi yang masih menggunakan metode pengolahan limbah cair konvensional. Teknologi konvensional ini tidak banyak diaplikasikan pada industri menengah ke bawah di Indonesia, karena proses pengolahan yang sulit serta membutuhkan biaya yang cukup besar dalam pelaksanaannya. Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi pengolahan limbah cair yang menjanjikan karena dapat menghasilkan energi listrik sekaligus menurunkan kandungan organik dalam limbah. Pada penelitian ini digunakan reaktor MFC *single-chamber* tanpa membran penukar ion serta digunakan limbah model dan limbah industri tempe sebagai substrat. Potensi MFC dalam penelitian ini dilihat dari penurunan kadar Chemical Oxygen Demand (COD) dan tegangan listrik yang dihasilkan. Penelitian ini mendapatkan hasil tegangan listrik paling maksimum dari reaktor MFC volume limbah 2000 mL yang diberi hambatan luar sebesar 100 Ω yaitu sebesar 0,80 V dengan densitas daya 1,13 mW/m² dan persentase penurunan kadar COD sebesar 33,12%. Kadar COD pada limbah tempe yang telah diolah belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan yaitu Kep-51/MENLH/10/1995 tentang baku mutu limbah cair industri. Konsentrasi COD terkecil diperoleh pada pengolahan MFC bervolume reaktor 2000 mL yaitu 11211,33 mg/L sedangkan pada peraturan tersebut ditetapkan bahwa kadar COD yang memenuhi syarat baku mutu sebesar 300 mg/L.

Kata kunci: COD, Industri Tempe, Limbah Cair, MFC, *Single Chamber*.

1 Pendahuluan

Fasilitas tersentralisasi untuk pengolahan limbah cair kebanyakan menggunakan metode penanganan limbah secara aerobik dengan cara instalasi lumpur aktif, filter menetes, kolam atau parit oksidasi dan kolam aerasi yang mengkonsumsi energi cukup besar. Proses aerasi membutuhkan hampir 70% dari total energi yang diperlukan untuk pengolahan limbah tersebut (Kim, et.al., 2007).

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi yang menjanjikan untuk pengolahan limbah cair yang berkelanjutan. Pada MFC terjadi reaksi biokimia oleh bakteri elektrogenik pada anoda. Reaksi ini menghasilkan elektron dan proton melalui degradasi senyawa organik yang terkandung dalam berbagai macam substrat

homogen seperti glukosa dan asetat, hingga substrat heterogen seperti berbagai jenis limbah cair (Chae, et.al., 2008).

MFC memang menghasilkan energi listrik yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan sistem pembangkit listrik lainnya namun karena kemampuannya untuk menghasilkan listrik sekaligus menurunkan kadar organik dalam limbah, MFC memiliki prospek yang cerah dalam perkembangan bioenergi ramah lingkungan. Salah satu jenis limbah yang terdapat melimpah dan dapat digunakan dalam sistem MFC adalah limbah industri pangan. Limbah cair industri tempe merupakan salah satu limbah cair industri pangan yang banyak menimbulkan masalah terhadap lingkungan bila tidak diolah terlebih dahulu sebelum dibuang, karena tingginya kadar organik yang terkandung di dalamnya.

Sebelumnya telah dilakukan penelitian menggunakan substrat limbah cair industri tempe model yang menghasilkan daya hingga 1185 mW/m^2 (Rahimnejad, et.al., 2011). Penelitian reaktor *single-chamber* MFC menggunakan substrat limbah cair industri tempe dengan bermacam variasi telah dilakukan pada Departemen Teknik Kimia Universitas Indonesia selama Februari hingga Juni 2013. Variasi yang dilakukan yaitu variasi nilai hambatan luar menggunakan resistor bernilai hambatan 100Ω dan 1000Ω , variasi luas permukaan katoda menggunakan katoda berluas permukaan $0,06 \text{ m}^2$, $0,145 \text{ cm}^2$ dan $0,1712 \text{ m}^2$ serta variasi konfigurasi rangkaian reaktor menggunakan empat buah reaktor yang dirangkai secara seri, paralel dan campuran seri-paralel.

Semua penelitian tersebut menggunakan reaktor yang bervolume 500 mL untuk kemudian dilakukan penelitian lanjutan menggunakan reaktor 2000 mL sebagai pembanding terhadap sebuah reaktor bervolume 500 mL dan 4 buah reaktor bervolume 500 mL yang dipasang secara berangkai. Penelitian ini akan mengkaji potensi MFC sebagai pengolah limbah yang efisien yang dianalisa dari hubungan antara penurunan kadar COD dengan tegangan listrik yang dihasilkan dari penelitian-penelitian tersebut.

2 Metodologi

Reaktor yang digunakan ialah *single-chamber* MFC untuk volume limbah 500 mL dan 2000 mL. Instrument pengukur kuat arus dan tegangan yang digunakan ialah digital multimeter APPA *Electric Instrument*. Elektroda yang digunakan ialah grafit batang. Substrat yang digunakan adalah limbah model industri tempe dan limbah industri tempe yang diambil dari industri tempe di Kampung Lio, Depok, Jawa Barat. Bahan lainnya ialah HCl 1M dan NaOH 1M digunakan untuk preparasi elektroda (Ren, et.al., 2011), NH_4Cl 0,2 g/L dan KCl 0,1g/L sebagai elektrolit serta K_2HPO_4 2 g/L dan KCl 0,1 g/L sebagai penyangga. Reagen COD yang digunakan ialah reagen merek Hach Cat.2125925 dengan range 20-1500 mg/L.

Dalam eksperimen ini, dilakukan beberapa variasi dalam reaktor bervolume 500 mL berupa variasi nilai hambatan luar (100Ω dan 1000Ω), variasi luas permukaan

katoda ($0,06 \text{ m}^2$, $0,145 \text{ cm}^2$ dan $0,1712 \text{ m}^2$), dan variasi konfigurasi rangkaian reaktor dimana empat buah reaktor dirangkai secara seri, paralel dan campuran seri-paralel.

Pada tahap selanjutnya, dilakukan penelitian menggunakan reaktor bervolume limbah 2000 mL. Reaktor 2000 mL ini akan dibandingkan kinerjanya dengan reaktor volume limbah 500 mL dan dengan empat buah reaktor 500 mL yang dirangkai. Pengukuran COD dilakukan sebelum limbah model maupun limbah industri dicampur dengan penyangga dan elektrolit dan sesudah limbah diolah menggunakan sistem reaktor MFC. Kadar COD diukur dengan metode *close-reflux*, menggunakan nilai absorbansi yang dimasukkan dalam persamaan dari kurva kalibrasi yang telah dibuat sebelumnya (Boyles, 1997).

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi hambatan luar

Data hasil eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi nilai hambatan luar dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penurunan COD dan Tegangan Maksimum pada Variasi Nilai Hambatan

Nilai Hambatan Luar	Limbah Model		Limbah Industri	
	Penurunan COD (%)	Tegangan Maksimum (V)	Penurunan COD (%)	Tegangan (V)
100 Ω	10,423	0,0056	n.a	n.a
1000 Ω	10,79	0,1116	29,3	0,08

Pada data terlihat bahwa reaktor yang diberi hambatan luar lebih besar memiliki kadar penurunan COD dan tegangan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan reaktor yang diberi hambatan luar yang lebih kecil. Namun pada penelitian Katuri dan koleganya yang menggunakan lima hambatan eksternal berbeda, didapatkan degradasi COD tertinggi justru pada hambatan yang paling kecil, meskipun secara statistika perbedaannya tidak terlalu signifikan (Katuri, et.al., 2011). Sementara beberapa penelitian lain tidak ditemukan hubungan yang begitu signifikan antara degradasi substrat dengan hambatan eksternal (Liu dan Ramnarayanan, 2004; Min, et.al., 2005), dengan kata lain variasi hambatan eksternal tidak memberikan pengaruh yang begitu berarti pada degradasi COD.

3.2 Eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi luas permukaan katoda

Data hasil eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi luas permukaan katoda dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Penurunan COD dan Tegangan Maksimum pada Variasi Luas Permukaan Katoda

Luas Permukaan Katoda	Limbah Model		Limbah Industri	
	Penurunan COD (%)	Tegangan Maksimum (V)	Penurunan COD (%)	Tegangan (V)
0,06 m ²	10,423	0,005	29,036 %	0,0118
0,1456 m ²	4,27	0,002	n.a	n.a
0,1712 m ²	5,35	0,00567	n.a	n.a

Reaktor dengan luas permukaan katoda 0,1712 m² memiliki tegangan maksimum paling besar dibandingkan dengan variasi luas permukaan katoda lainnya, namun penurunan kadar COD pada reaktor dengan luas permukaan 0,06 m² justru lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya. Hal ini tidak sesuai dengan hipotesis awal bahwa semakin tinggi tegangan listrik yang dihasilkan maka akan semakin tinggi pula persentase penurunan kadar COD-nya. Namun selain faktor tegangan, terdapat pula faktor lain yang mempengaruhi besarnya kadar COD dalam limbah yang diturunkan dengan sistem MFC yaitu waktu retensi. Jika pada MFC dengan sistem kontinyu, maka akan diberlakukan *Hydraulic Retention Time* (HRT) sedangkan pada MFC dengan sistem *fed-batch* akan diberlakukan waktu siklus (Logan, 2009).

Waktu siklus pada masing-masing perlakuan dalam seluruh variasi yang dijalankan pada penelitian ini memiliki perbedaan. Waktu siklus MFC variasi luas permukaan 0,06 m² ialah 160 jam sementara waktu siklus MFC variasi luas permukaan 0,1712 m² hanya berjalan selama 50 jam. Perbedaan persentase penurunan kadar COD pada variasi luas permukaan katoda 0,06 m² dengan 0,1712 m² sebanding dengan waktu siklus di masing-masing perlakuan tersebut. Waktu siklus yang lama memberikan dampak penurunan kadar COD yang lebih tinggi.

Panjang waktu siklus dapat diartikan sebagai stabilitas hidup mikroorganisme dalam suatu substrat (Logan, 2009). Waktu siklus yang panjang mungkin berarti stabilitas hidup mikroorganisme tersebut telah cukup baik. Mikroorganisme tersebut memiliki laju perkembangbiakan yang stabil sehingga waktu hidup koloninya menjadi semakin panjang. Hal ini berarti semakin banyak pula senyawa organik yang dikonsumsi oleh koloni mikroorganisme tersebut secara terus menerus hingga koloni tersebut mengalami kematian secara keseluruhan. Terlebih lagi mikroorganisme yang terdapat dalam limbah tidak hanya merupakan satu jenis mikroba, tapi merupakan *mixed-culture* sehingga laju metabolismenya tidak mudah ditentukan dengan rinci.

3.3 Eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi konfigurasi rangkaian reaktor

Data hasil eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 500 mL dengan variasi konfigurasi rangkaian reaktor dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Data Penurunan COD dan Tegangan Maksimum pada Variasi Konfigurasi Rangkaian Reaktor

Jenis Konfigurasi	Limbah Model		Limbah Industri	
	Penurunan COD (%)	Tegangan Maksimum (V)	Penurunan COD (%)	Tegangan (V)
Seri	15,002	0,00519	n.a	n.a
Paralel	19,59	0,025	30,707	0,03
Campuran	16,42	0,0055	n.a	n.a

Terlihat bahwa penurunan kadar COD sebanding dengan tinggi tegangan listrik yang dihasilkan. Dibandingkan dengan rangkaian seri dan campuran seri-paralel, rangkaian paralel memiliki tegangan maksimum yang paling tinggi. Persentase kadar penurunan COD terbaik juga didapatkan dari variasi rangkaian reaktor paralel. Rangkaian listrik paralel adalah rangkaian yang input komponennya berasal dari sumber yang sama sehingga apabila satu komponen dalam suatu sistem terganggu atau rusak maka sistem lain akan tetap berfungsi dengan sebagaimana mestinya.

3.4 Eksperimen MFC menggunakan reaktor volume limbah 2000 mL

Berikut adalah data perbandingan hasil antara reaktor bervolume limbah 500 mL, empat reaktor bervolume limbah 500 mL yang dirangkai secara paralel dan reaktor bervolume limbah 2000 mL.

Tabel 4. Data Penurunan COD dan Tegangan Maksimum

Jenis Reaktor	Limbah Model		Limbah Industri	
	Penurunan COD (%)	Tegangan Maksimum (V)	Penurunan COD (%)	Tegangan Maksimum (V)
500 mL	10,432	0,005	29,036	0,0118
Paralel	19,59	0,0258	30,707	0,03146
2000 mL	19,406	0,12286	33,1146	0,08

Empat buah reaktor MFC volume limbah 500 mL yang digunakan pada penelitian variasi jenis konfigurasi rangkaian reaktor memiliki volume total keseluruhan sebesar 2000 mL. Oleh karena itu maka pada tahap penelitian ini penggunaan limbah yang bervolume 2000 mL dirasa perlu untuk dilakukan. Data yang diperbandingkan ialah data tegangan dan penurunan COD dari reaktor bervolume limbah 500 mL, empat reaktor bervolume limbah 500 mL yang dirangkai secara paralel dan reaktor bervolume limbah 2000 mL.

Meskipun memiliki jumlah volume yang sama dengan ukuran total anoda dan katoda yang sama pula, hasil listrik dan penurunan COD dari kedua sistem MFC tersebut memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh struktur

desain reaktor yang berbeda pula. Kerumitan reaktor mempengaruhi besarnya hambatan dalam pada reaktor yang dapat mempengaruhi metabolisme mikroorganisme sehingga berdampak pada hasil listrik serta kadar COD yang diturunkan.

Reaktor besar MFC volume limbah 2000 mL ini dapat pula diperbandingkan dengan reaktor MFC volume limbah 500 mL karena dimensi reaktor besar tersebut merupakan perbesaran empat kali lipat dari reaktor kecil. Perbandingan terhadap reaktor besar ini dilakukan pada reaktor MFC volume limbah 500 mL dengan hambatan luar 100 Ω yang dilakukan pada penelitian variasi nilai hambatan luar yang telah dilakukan sebelumnya. Diperoleh bahwa hasil listrik dan penurunan kadar COD pada reaktor besar lebih baik dibandingkan dengan reaktor kecil.

Memperbesar ukuran reaktor otomatis akan mengubah ukuran dan penempatan elektroda sehingga berdampak pada daya listrik akibat perubahan hambatan dalamnya (Liu, et.al., 2008). Penelitian Liu dan koleganya menunjukkan bahwa daya keluaran listrik pada MFC dapat ditingkatkan dengan *scale-up*. Pada penelitian tersebut, MFC dengan total volume 28 mL menghasilkan daya sebesar 16 W/m³. Lebih besar dibandingkan dengan daya listrik yang dihasilkan oleh reaktor MFC yang memiliki volume 520 mL, yaitu 14 W/m³ (Liu, et.al., 2008). Perbedaan hasil listrik ini disebabkan oleh berbagai macam faktor, diantaranya luas permukaan anoda yang dikenai oleh mikroorganisme. Semakin luas permukaan anoda tentu saja akan semakin memperbanyak mikroorganisme yang menempel pada anoda, membentuk biofilm lalu melakukan metabolisme yang menghasilkan listrik (Liu, et.al., 2008). Telah banyak penelitian yang menunjukkan bahwa semakin luas permukaan anoda maka akan semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan oleh sistem MFC tersebut (Ahn dan Logan, 2012; Chae, et.al., 2008; Li, et.al., 2011).

3.5 Potensi Microbial Fuel Cell sebagai Sistem Pengolah Limbah Cair

Tabel 5 memuat data parameter biokimia dan elektrokimia yang dapat dirangkum dari penelitian ini.

Tabel 5. Parameter Biokimia dan Elektrokimia

Sistem MFC	Tegangan Maksimum (V)	Penurunan Kadar COD (%)	Densitas Daya (mW/m ²)	Efisiensi Coulomb /CE (%)	PGCR (W/gCOD _R)
500 mL	0,0118	29,036	0,1118	0,154	5,697 x 10 ⁻⁷
Paralel	0,031	30,7	0,1983	0,053	9,74 x 10 ⁻⁷
2000 mL	0,8011	33,1146	1,1286	0,213	5,78 x 10 ⁻⁶

Tegangan listrik yang dihasilkan dan persentase kadar penurunan COD saja tidak cukup untuk menyimpulkan apakah suatu sistem MFC baik untuk digunakan sebagai pengolah limbah cair. Untuk itulah dilakukan perhitungan efisiensi Coulomb

(*Coulombic Efficiency/CE*) dan hasil daya per gram penurunan kadar COD (*Power Generation per Gram COD Removed/PGC_R*) (Larrosa-Guerrero, 2010).

Data tersebut menunjukkan bahwa reaktor dengan volume limbah 2000 mL memiliki nilai CE yang paling tinggi dibandingkan ketiga sistem lainnya namun nilai PGC_R yang lebih besar dimiliki oleh reaktor yang dirangkai paralel. Perbedaan ini disebabkan mungkin oleh hambatan dalam yang dimiliki oleh sistem tersebut yang menyebabkan adanya perbedaan efisiensi masing-masing sistem dalam aplikasinya sebagai pengolah limbah. Namun sejauh ini, dilihat dari besarnya penurunan kadar COD dan tegangan maksimum yang dihasilkan, reaktor MFC volume limbah 2000 mL memiliki potensi yang paling tinggi dibandingkan dengan reaktor lain pada penelitian ini sebagai pengolah limbah cair tempe.

4 Kesimpulan

Penurunan kadar COD dalam limbah berhubungan dengan tegangan listrik yang dihasilkan. Hampir pada setiap variasi yang diberikan, semakin tinggi tegangan listrik yang dihasilkan, semakin tinggi pula persentase penurunan kadar COD yang dihasilkan. Reaktor *single-chamber* MFC volume limbah 2000 mL menghasilkan tegangan listrik maksimum paling tinggi diantara lainnya yaitu 0,80 V serta persentase penurunan kadar COD paling tinggi diantara variasi lainnya yaitu 33,12%. Namun sayangnya pengolahan limbah cair menggunakan MFC secara tunggal belum memungkinkan untuk diaplikasikan pada industri tempe dikarenakan limbah tempe memiliki kadar COD yang sangat tinggi sedangkan efisiensi penurunan kadar COD pada MFC dalam penelitian ini masih cukup rendah.

Kadar COD pada limbah tempe yang telah diolah belum memenuhi baku mutu yang ditetapkan yaitu Kep-51/MENLH/10/1995 tentang baku mutu limbah cair industri. Konsentrasi COD terkecil diperoleh pada pengolahan MFC bervolume reaktor 2000 mL yaitu 11211,33 mg/L sedangkan pada peraturan tersebut ditetapkan bahwa kadar COD yang memenuhi syarat baku mutu sebesar 300 mg/L.

5 Daftar Pustaka

- Ahn, Yongtae & Logan, Bruce E. 2012. "A multi-electrode continuous flow microbial fuel cell with separator electrode assembly design" *Appl. Microbiol Biotechnol.* 93: 2241-2248
- Boyles, Wayne. 1997. The science of chemical oxygen demand. Technical Information Series. Booklet No. 9. Hach Company.
- Chae, K., Choi, M., & Verstraete, W. 2008. "Microbial Fuel Cells: Recent Advances" *Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation* 13(2): 10–15
- Katuri, K. P., Scott, K., Head, I. M., Picioreanu, C., & Curtis, T. P. 2011. "Bioresource Technology Microbial fuel cells meet with external resistance" *Bioresource Technology* 102(3): 2758–2766

-
- Kim, B. H., Chang, I. S., & Gadd, G. M. 2007. "Challenges in microbial fuel cell development and operation" *Applied microbiology and biotechnology*, 76(3): 485–94
- Larrosa-Guerrero, A et al. 2010. "Effect of temperature on the performance of microbial fuel cells" *Fuel* 89: 3985-3994
- Li, Baikun., Scheible, Karl., & Curtis, Michael. 2011. Electricity generated from anaerobic wastewater treatment in microbial fuel cell. New York State Energy Research and Development Authority Agreement 11095.
- Liu, H., Cheng, S., Huang, L., & Logan, B. E. 2008. "Scale-up of membrane-free single-chamber microbial fuel cells" 179: 274–279
- Liu, H., & Ramnarayanan, R. 2004. "Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell" 38(7): 2281–2285
- Logan, B. E. 2009. "Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells" *Nature Reviews Microbiology* 7(5): 375–381
- Min, B., Kim, J., Oh, S., Regan, J. M., & Logan, B. E. 2005. "Electricity generation from swine wastewater using microbial fuel cells" 39: 4961–4968
- Rahimnejad, M., Ghoreyshi, A. A., Najafpour, G., & Jafary, T. 2011. "Power generation from organic substrate in batch and continuous flow microbial fuel cell operations" *Applied Energy* 88(11): 3999–4004
- Ren, Z., Yan, H., Wang, W., Mench, M. M., & Regan, J. M. 2011. "Characterization of Microbial Fuel Cells at Microbially and Electrochemically Meaningful Time scales" 2435–2441

