



Pengolahan Limbah Cair Organik dengan Microbial Fuel Cell

Organic Waste Water Treatment by Microbial Fuel Cell

Wahyu Rinaldi^{1*}, Yudha Nurdin², Syahiddin¹, Wulan Windari¹, Cut Putri Agustina¹

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh, Provinsi Aceh, 23111

²Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Syiah Kuala
Jl. Tgk. Syech Abdurrauf No. 7, Banda Aceh, Provinsi Aceh, 23111

*Email: wahyu.rinaldi@che.unsyiah.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengusulkan sebuah prototipe reaktor *microbial fuel cell* (MFC) tanpa membran beraliran kontinyu. Dinding Reaktor dibuat dari pipa PVC dan elektroda dari serat karbon. Mikroba yang ditambahkan di anoda bersumber dari larutan FloTank[®]. Pada penelitian ini digunakan limbah organik artifisial yang dibuat dari glukosa monohidrat dengan konsentrasi 250 mg/L COD. Waktu tinggal limbah divariasikan pada 0,5; 1; 1,5; dan 2 hari. Nilai rata-rata daya listrik yang dihasilkan untuk waktu tinggal limbah 0,5; 1; 1,5; dan 2 hari berturut-turut adalah 38,02; 43,01; 45,35; 46,71 mW/m², dan daya volumetrik yang dihasilkan adalah 111,25; 125,86; 132,71; dan 136,69 mW/m³. Persentase penurunan *Chemical Oxygen Demand* (COD) limbah paling tinggi diperoleh pada waktu tinggal 1,5 hari yaitu sebesar 32,26%.

Kata kunci: elektroda serat karbon, energi listrik, limbah cair organik, *microbial fuel cell*, penyisihan COD

Abstract

This research proposed a prototype of continuous flow membrane-less-microbial-fuel-cell (MFC) reactor. Reactor's wall was made from PVC pipe and electrodes from carbon fiber. Immobilized microbes on anode were found from FloTank[®] solution. In this research an artificial wastewater made from glucose monohydrate with a concentration of 250 mg/L Chemical Oxygen Demand (COD) was used. The residence time was varied at 0.5, 1, 1.5, and 2 days. The average value of the electric power generated to waste residence time of 0.5, 1, 1.5, and 2 days were 8.02, 43.01, 45.35, and 46.71 mW/m², and volumetric power generated was 111.25, 125.86, 132.71, and 136.69 mW/m³, respectively. The highest percentage of COD removal was 32.26% at the residence time of 1.5 days.

Keywords: carbon fiber electrode, COD removal, electric energy, microbial fuel cell, organic waste water

1. Pendahuluan

Microbial fuel cell (MFC) merupakan teknologi yang dapat dikembangkan untuk menyelesaikan permasalahan pencemaran lingkungan sekaligus krisis energi di masa depan. Kemampuan MFC mendegradasi limbah dan menghasilkan listrik secara simultan menjadikan teknologi ini sangat berbeda dengan teknik pengolahan limbah lainnya. Rata-rata volume limbah rumah tangga yang dihasilkan oleh setiap orang adalah 150 liter/hari dengan nilai BOD antara 207 mg/L dan 247 mg/L (Said, 2008). Menurut Logan (2005), suatu kota dengan populasi penduduk 100 ribu jiwa dapat menghasilkan 16.400 m³ limbah yang memiliki potensi menghasilkan 2,3 MW listrik dengan menggunakan pembangkit MFC. Listrik yang dihasilkan dapat dimanfaatkan

untuk memenuhi kebutuhan listrik instalasi pengolahan limbah.

Walaupun ide pemanfaatan elektron yang dilepaskan oleh mikroba sebagai sumber listrik telah lama diketahui, namun teknologi MFC mulai berkembang pesat pada akhir tahun 1990-an. Hal ini disebabkan semakin pentingnya energi alternatif untuk menggantikan energi fosil yang persediaannya semakin berkurang. Sebagai teknologi yang baru berkembang MFC belum sampai pada tahap ekonomis untuk dapat diaplikasikan sebagai sumber energi baru. Beberapa hal yang menjadi tantangan bagi para peneliti dalam mengembangkan MFC adalah untuk meminimalkan tahanan internal dan mendapatkan desain MFC yang mampu menghasilkan *output* besar dengan harga konstruksi yang ekonomis.

Umumnya suatu reaktor MFC terdiri atas ruang anoda dan katoda yang dipisahkan oleh membran penukar proton. Penggunaan membran penukar proton ini dimaksudkan untuk mencegah perpindahan oksigen dari ruang katoda ke anoda dan perpindahan mikroba dari ruang anoda ke katoda. Tapi mahalannya harga membran dan pengotoran (*fouling*) yang dapat terjadi pada membran menjadi permasalahan yang dihadapi pada desain yang menggunakan membran.

Pada penelitian ini diusulkan prototipe reaktor MFC dengan konfigurasi dua ruang beraliran kontinyu tanpa menggunakan membran penukar proton. Reaktor dibuat dari material-material yang mudah diperoleh di pasaran. Dinding reaktor dibuat dari material pipa PVC dan elektroda dibuat dari serat karbon. Mikroba yang digunakan dalam penelitian bersumber dari larutan perawatan septic tank FloTank yang mengandung mikroba *Lactobacillus*, *Acetobacter*, dan *Sacharomyces*. Unjuk kerja prototipe reaktor dalam mereduksi limbah cair rumah tangga dan membangkitkan listrik dipelajari dengan memvariasikan waktu tinggal hidrolis limbah di dalam reaktor. MFC pada prinsipnya merupakan suatu proses pengolahan anaerobik limbah pada elektroda yang dilakukan oleh bakteri. Bakteri mengoksidasi senyawa organik dan melepaskan elektron ke anoda sedangkan proton (H^+) berpindah ke katoda. Di katoda proton mengalami reduksi membentuk air (H_2O) dengan mengikat molekul oksigen (O_2) (Logan, 2005).

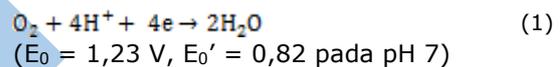
MFC membutuhkan dua kondisi yang berbeda pada bagian anoda dan katodanya. Pada bagian anoda dibutuhkan kondisi anaerobik, sedangkan pada bagian katoda dibutuhkan kondisi aerobik. Untuk menciptakan dua lingkungan yang berbeda tersebut biasanya bagian katoda diaerasi dan digunakan proton exchange membrane (PEM) untuk memisahkan anoda dengan katoda. PEM yang digunakan memungkinkan perpindahan proton namun menghambat perpindahan oksigen dari katoda ke anoda yang dapat mengakibatkan turunnya potensial reduksi anoda karena limbah akan diurai dalam suasana aerobik dan menghasilkan gas metana. Sistem dengan membran pemisah ini dikenal dengan two-chambered MFC.

Menurut Liu dkk. (2005), walaupun PEM merupakan penghantar proton yang lebih baik dibandingkan air, tetap menimbulkan tahanan internal terhadap sistem. Selain itu secara keseluruhan performa MFC dibatasi

oleh difusi proton di dalam air. Pada beberapa penelitian penggunaan PEM dihilangkan untuk meningkatkan *output-power* MFC (Liu dan Logan, 2004; Liu dkk., 2005). Pada penelitian ini digunakan aliran kontinyu dengan arah aliran dari anoda ke katoda sehingga perpindahan proton secara difusi dari anoda ke katoda akan dipercepat oleh desakan aliran air.

Liu dkk. (2004) dengan menggunakan sistem *single chamber microbial fuel cell* (SCMFC) berukuran besar mendapatkan bahwa SCMFC mampu menurunkan kandungan BOD limbah hingga 80% untuk waktu tinggal limbah 12 jam. Sedangkan densitas daya listrik yang dihasilkan sebanding dengan nilai COD limbah. Penelitian tersebut dilakukan menggunakan 60 m² permukaan anoda per meter kubik volume reaktor dan oksigen disuplai secara pasif. Diketahui juga bahwa apabila luas permukaan elektroda diperbesar maka daya persatuan volume reaktor akan meningkat dan mempercepat laju penyisihan BOD limbah.

Proton yang dilepaskan oleh mikroba berdifusi melalui medium cair menuju katoda dan selanjutnya bereaksi dengan oksigen terlarut pada katoda dan elektron yang mengalir dari anoda membentuk air dengan persamaan reaksi berikut:



Menurut Schnabel dkk. (2005) reaksi tersebut sangat dipengaruhi oleh pH larutan. Potensial listrik yang dihasilkan juga sangat dipengaruhi oleh jumlah oksigen yang tersedia pada katoda untuk melangsungkan reaksi sehingga biasanya pada katoda dilakukan aerasi.

Schnabel dkk. (2005) juga menginformasikan bahwa material katoda mempengaruhi besar potensial yang diperoleh. Platinum merupakan material yang paling baik digunakan sebagai elektroda karena memiliki nilai konduktivitas listrik yang tinggi. Akan tetapi, platinum harganya mahal dan bersifat hidrofilik, yang cenderung membentuk lapisan air pada permukaan katoda yang dapat menghambat proses difusi proton ke katoda. Pada penelitian ini digunakan serat karbon sebagai katoda. Material yang digunakan sebagai anoda juga harus memiliki konduktivitas yang tinggi, tidak korosif, memiliki luas permukaan yang besar (*area per volume*), porositas yang besar, tidak mahal, dan mudah dibuat

(Logan, 2008). Karbon paling sering digunakan sebagai elektroda karena memiliki konduktifitas yang baik, tidak mengalami korosi, dan cocok untuk pertumbuhan mikroba. Pada penelitian ini digunakan serat karbon sebagai anoda.

Sejumlah penelitian menunjukkan hasil positif sistem MFC beraliran kontinyu tanpa membran (Du dkk., 2011; Tardast dkk., 2012; Zhu dkk., 2011). Pada konfigurasi MFC dua ruang tanpa menggunakan membran diusulkan oleh Du dkk. (2011), ruang anoda dan katoda dihubungkan oleh sebuah saluran yang memungkinkan berlangsungnya aliran elektrolit pembawa proton berlangsung secara kontinyu dengan lebih baik. Rancangan ini mampu menghasilkan energi listrik sebesar $24,33 \text{ mW/m}^3$ dengan efisiensi penyisihan COD limbah 90,45% (Du dkk., 2011). Dalam penelitian lainnya, Tardast dkk. (2012) menggunakan reaktor MFC kontinyu tanpa membran bersekat dengan maksimum energi listrik yang dihasilkan sebesar $80,129 \text{ mW/m}^2$ dan penyisihan COD hingga 82% (Tardast dkk., 2012). Sistem MFC aliran kontinyu tanpa membran yang diusulkan oleh Zhu dkk. (2011) berbentuk pipa vertikal dengan aliran umpan dari atas ke bawah (*downflow*). Katoda diletakkan pada bagian atas reaktor dan anoda pada bagian bawahnya. Sistem seperti ini memungkinkan berlangsungnya aerasi alami tanpa menggunakan pompa udara tetapi mampu menghasilkan daya listrik sebesar $37,4 \text{ mW/m}^2$.

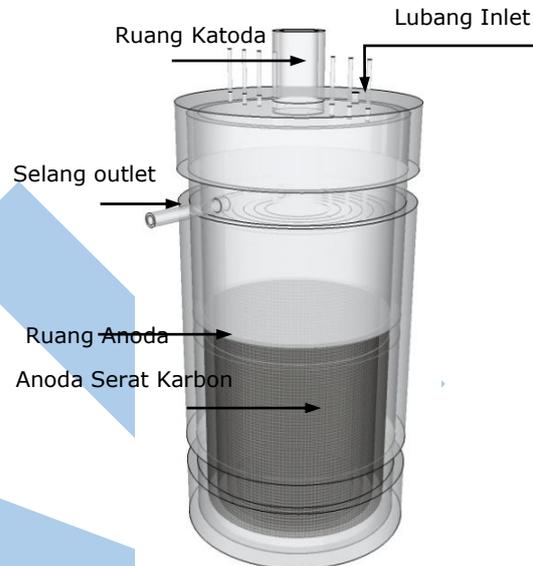
Penelitian ini menghasilkan prototipe reaktor *microbial fuel cell* beraliran kontinyu tanpa membran yang dibuat dari bahan-bahan yang murah dan mudah diperoleh di pasaran. Tujuan penelitian adalah untuk mempelajari pengaruh waktu tinggal hidrolik terhadap kinerja prototipe reaktor yang diusulkan dalam hal penyisihan limbah cair rumah tangga dan pembangkitan energi listrik yang dihasilkan, serta profil perubahannya terhadap waktu.

2. Metodologi

2.1. Rancangan Reaktor MFC

Reaktor MFC beraliran kontinyu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 digunakan dalam penelitian. Reaktor dibuat dari clean out PVC 4", socket PVC 4" dan pipa PVC 3/4". Reaktor yang dibuat memiliki volume ruang anoda dan katoda sebesar 1286 ml dan 80,86 ml. Anoda untuk melekatkan mikroba terbuat dari serat karbon dengan ukuran masing-masing 15 cm x 11 cm, 15 cm x

14,2 cm, 15 x 17,3 cm, 15 cm x 20,4 cm, 15 cm x 23,6 cm, 15 cm x 26,7 cm dan 15 cm x 30 cm dan dibentuk menjadi tabung dengan diameter 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 cm menggunakan kawat stainless steel berdiameter 1 mm. Katoda serat karbon yang digunakan berukuran 2 cm x 20 cm dengan salah satu sisinya dilapisi selotip kertas.



Gambar 1. Reaktor MFC yang digunakan dalam penelitian

2.2. Sumber Mikroba

Larutan sumber mikroba dibuat dari larutan Flotank yang diencerkan dengan perbandingan 1:10 dan ditambahkan 1 g glukosa monohidrat. Larutan mikroba ini disirkulasikan selama 21 hari agar mikroba melekat pada permukaan serat karbon di ruang anoda. Setiap 3 hari sekali ditambahkan 3 g glukosa monohidrat ke dalam sediaan sumber mikroba.

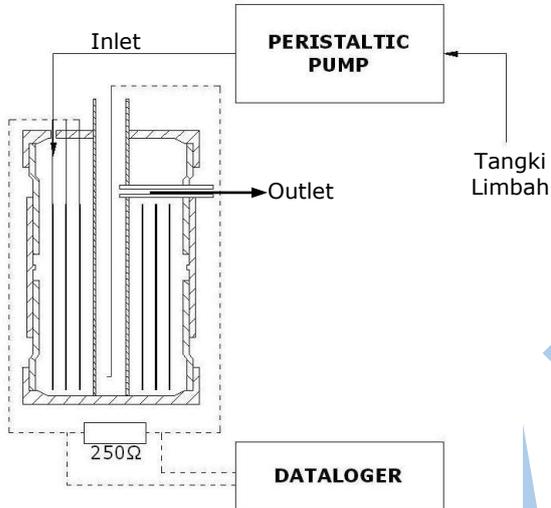
2.3. Larutan Limbah

Limbah yang digunakan dalam penelitian adalah limbah buatan dengan nilai COD 250 ppm dengan pH 7,6. Limbah ini dibuat dari kristal glukosa monohidrat yang dilarutkan ke dalam air. Limbah dialirkan kontinyu ke dalam reaktor menggunakan pompa peristaltik Watson Marflow dengan waktu tinggal hidrolik limbah di dalam reaktor divariasikan 0,5; 1; 1,5; dan 2 hari. Nilai COD limbah keluar reaktor diukur pada hari ke-2, 3, 4, dan 5.

2.4. Rangkaian Peralatan

Peralatan penelitian dirangkai seperti pada Gambar 2. Anoda dan katoda dihubungkan

dengan kabel listrik dan diberikan beban sebesar 250 ohm yang dirangkai secara paralel dengan dataloger DATAQ D710. Dataloger akan merekam besar tegangan yang dihasilkan oleh reaktor MFC pada setiap waktu.



Gambar 2. Susunan rangkaian peralatan penelitian

2.5. Aerasi Pasif

Sistem aerasi untuk mensuplai oksigen ke ruang katoda dilakukan secara alamiah. Bagian atas ruang katoda yang terbuka memungkinkan berlangsungnya aerasi permukaan larutan limbah di ruang katoda. Pengaliran oksigen menggunakan aerator ke ruang katoda dihindari karena dapat menyebabkan hilangnya kondisi anaerobik di ruang anoda.

2.6. Densitas Daya listrik

Data yang terekam pada data logger adalah voltase (E_{cell}) yang dihasilkan oleh pasangan elektroda. Pada rangkaian dipasang resistor 250 Ω sebagai tahanan eksternal (R_{ext}). Daya listrik yang dihasilkan dihitung dengan persamaan

$$P = IE_{cell} \quad (2)$$

Keterangan:

P : daya listrik (Watt)

I : arus listrik (Ampere)

E_{cell} : voltase (Volt)

Sesuai dengan hukum Ohm ($E_{cell} = IR_{ext}$) maka

$$P = \frac{E_{cell}^2}{R_{ext}} \quad (3)$$

Keterangan:

P : daya listrik (Watt)

E_{cell} : voltase (Volt)

R_{ext} : tahanan eksternal (Ohm)

Densitas daya menyatakan besar daya listrik yang dihasilkan persatuan luas permukaan elektroda. Densitas daya yang dinyatakan terhadap luas permukaan katoda dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_{kat} = \frac{E_{cell}^2}{A_{kat} R_{ext}} \quad (4)$$

Keterangan:

P_{kat} : densitas daya listrik (Watt/m²)

E_{cell} : voltase (Volt)

A_{kat} : luas katoda (m²)

R_{ext} : tahanan eksternal (Ohm)

Daya volumetrik dihitung untuk mengetahui jumlah daya yang dihasilkan persatuan volume total reaktor.

$$P_v = \frac{E_{cell}^2}{v R_{ext}} \quad (5)$$

Keterangan:

P_{kat} : densitas daya listrik (Watt/m²)

E_{cell} : voltase (Volt)

v : volume total reaktor (m³)

R_{ext} : tahanan eksternal (Ohm)

2.7. Penyisihan COD Limbah

Kemampuan Reaktor MFC menyisihkan senyawa organik yang terdapat di dalam limbah ditentukan dengan membandingkan penurunan COD limbah setelah pengolahan dengan nilai awal COD limbah.

$$\text{Penyisihan COD} = \frac{COD_{awal} - COD_{akhir}}{COD_{awal}} \times 100\% \quad (6)$$

3. Hasil dan Pembahasan

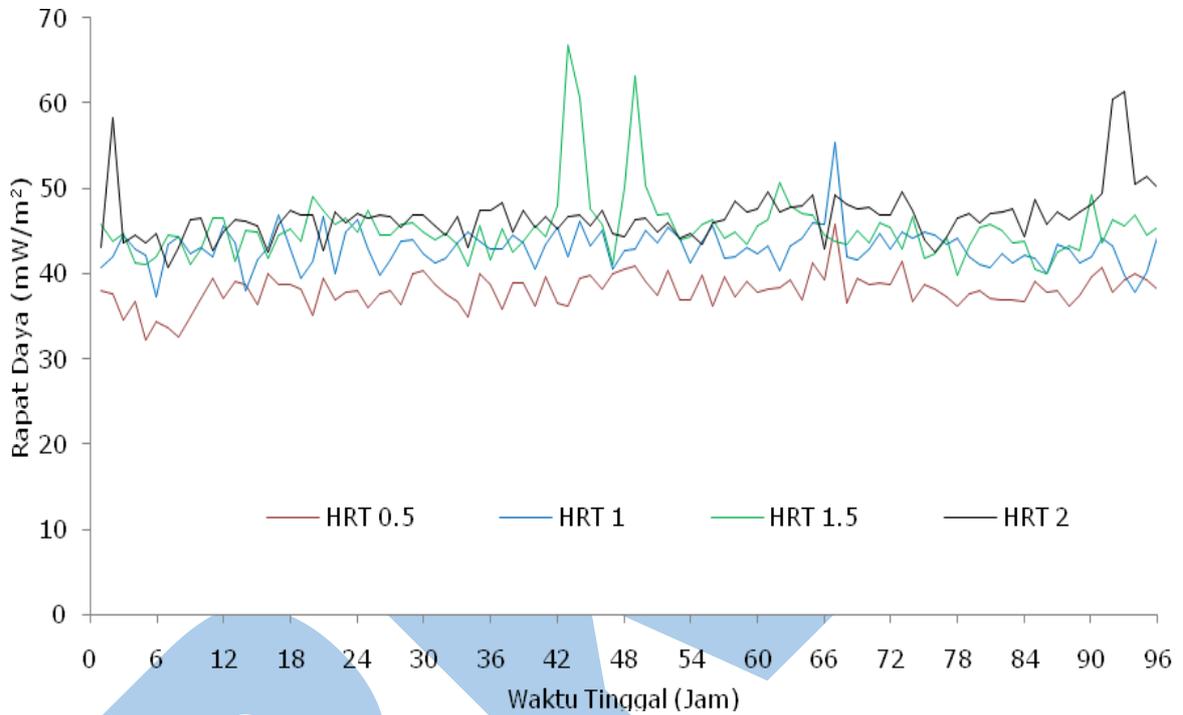
Unjuk kerja prototipe reaktor MFC yang diusulkan dalam penelitian didasarkan pada rapat daya, daya volumetrik, dan penyisihan COD. Secara umum, prototipe reaktor MFC mampu melangsungkan penguraian komponen limbah dan pembangkitan arus listrik secara simultan. Hanya saja, penurunan nilai COD limbah belum mendekati proses-proses pengolahan konvensional yang telah dijalankan saat ini.

3.1. Pengaruh Waktu Tinggal terhadap Rapat Daya dan Daya Volumetrik

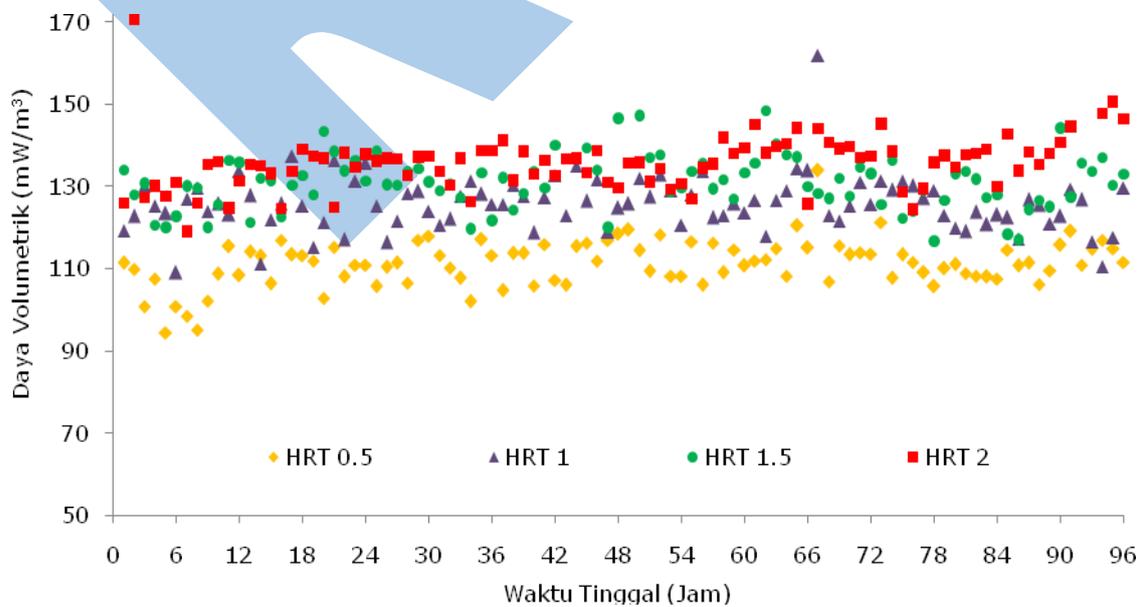
Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu tinggal hidrolik limbah di dalam reaktor

mempengaruhi besar rapat daya dan daya volumetrik yang dapat dihasilkan oleh reaktor MFC. Semakin lama waktu tinggal limbah di dalam reaktor, semakin tinggi nilai rapat daya dan daya volumetrik yang dihasilkan (Gambar 3 dan Gambar 4). Nilai rata-rata rapat daya listrik yang dihasilkan untuk waktu tinggal limbah 0,5; 1; 1,5; dan

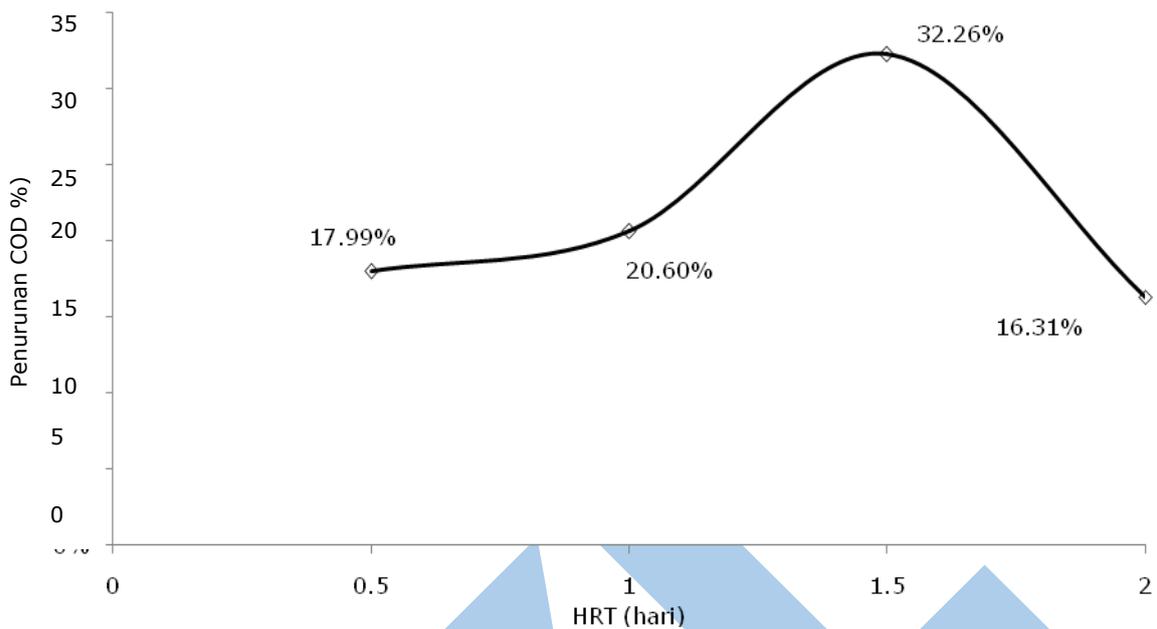
2 hari berturut-turut adalah 38,02; 43,01; 45,35; dan 46,71 mW/m^2 , sedangkan daya volumetrik yang dihasilkan adalah 111,25; 125,86; 132,71; dan 136,69 mW/m^3 . Hal ini karena semakin lama waktu tinggal akan menyebabkan semakin banyak senyawa organik yang didegradasi menjadi H^+ oleh mikroba di dalam reaktor.



Gambar 3. Rapat daya pada berbagai waktu tinggal hidrolis



Gambar 4. Daya volumetrik pada berbagai waktu tinggal hidrolis



Gambar 5. Penyisihan COD pada berbagai waktu tinggal

Pola lain yang terlihat adalah kecenderungan bertambah besarnya energi listrik yang dapat dihasilkan oleh reaktor dari hari ke hari. Ini menunjukkan bahwa pada waktu awal mikroba melakukan penyesuaian kondisi terhadap perubahan laju alir limbah ke dalam reaktor. Kecenderungan rapat daya dan daya volumetrik yang terus meningkat dari hari ke hari juga mengindikasikan bahwa reaktor belum mencapai kondisi optimum dalam batasan waktu 5 hari yang ditetapkan. Energi listrik yang dihasilkan akan terus bertambah besar sampai tercapainya kondisi *steady*, waktu aklimatisasi ini biasanya kurang dari 10 hari (Rodrigo dkk., 2007).

3.2. Penurunan Nilai COD

Kemampuan prototipe reaktor MFC untuk menurunkan nilai COD limbah secara umum masih belum begitu baik (Gambar 5). Dengan berbagai variasi waktu tinggal yang dilakukan hanya diperoleh persentase maksimum penurunan COD limbah sebesar 32,36%, yang didapatkan pada waktu tinggal hidrolis limbah 1,5 hari. Pada waktu tinggal 0,5 hingga 1,5 hari, penurunan COD yang dihasilkan cenderung meningkat, dari rata-rata 17,99% menjadi 32,26%. Sedangkan pada waktu tinggal 2 hari, persentase penurunan COD limbah turun menjadi 16,31%. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh tidak terdistribusinya dengan baik limbah di dalam reaktor karena laju alir limbah yang terlalu kecil. Sedangkan

pada waktu tinggal 0,5 hari dan 1 hari, aliran limbah terlalu cepat mengalir melewati reaktor sehingga hanya sebagian kecil yang dapat diurai oleh mikroorganisme. Menurut Mahendra dan Mahavarkar (2013), rendahnya penyisihan COD pada sistem MFC juga dapat disebabkan oleh rendahnya nilai COD limbah.

4. Kesimpulan

Prototipe reaktor MFC yang diusulkan mampu mengurai kontaminan di dalam limbah dan membangkitkan arus listrik secara simultan. Dengan variasi waktu tinggal hidrolis limbah di dalam reaktor pada 0,5; 1; 1,5; dan 2 hari diperoleh nilai rata-rata rapat daya listrik yang berturut-turut sebesar 38,02; 43,01; 45,35; dan 46,71 mW/m², dan daya volumetrik sebesar 111,25; 125,86 132,71; dan 136,69 mW/m³. Persentase penurunan COD limbah paling besar diperoleh pada waktu tinggal 1,5 hari yaitu sebesar 32,36%, sedangkan pada waktu tinggal 0,5; 1; dan 2 hari, penurunan COD yang dihasilkan adalah 17,99%, 20,60% dan 16,31%. Perbaikan terhadap rancangan reaktor MFC beraliran kontinyu ini masih perlu dilakukan dan dipelajari pengaruhnya. Sistem aerasi permukaan yang dipilih dalam penelitian membutuhkan luas penampang ruang katoda yang lebih besar sehingga aerasi permukaan dapat berlangsung dengan lebih baik.

Daftar Pustaka

- Du, F., Xie, B., Dong, W., Jia, B., Dong, K., Liu, H. (2011) Continuous flowing membraneless microbial fuel cells with separated electrode chambers, *Bioresource Technology*, 102, 8914-8920.
- Logan, B. E. (2005) Simultaneous wastewater treatment and biological electricity generation, *Water Science & Technology*, 52, 31-37.
- Logan, B. E. (2008) *Microbial Fuel Cells*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- Liu, H., Logan, B.E. (2004) Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane, *Environmental Science & Technology*, 38, 4040-4046.
- Liu, H., Ramnarayanan, R., Logan, B.E. (2004) Production of Electricity during Wastewater Treatment Using a Single Chamber Microbial Fuel Cell, *Environmental Science & Technology*, 38, 2281-2285.
- Liu, H., Cheng, S., Logan, B. E. (2005) Production of electricity from acetate or butyrate in a single chamber microbial fuel cell, *Environmental Science & Technology*, 39, 658-662.
- Mahendra, B. G., Mahavarkar, S. (2013) Treatment of Wastewater and Electricity Generation Using Microbial Fuel Cell Technology, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 277-282.
- Rodrigo, M. A., Canizares, P., Lobato, J., Paz, R., Saez, C., Linares, J. J. (2007), Production of electricity from the treatment of urban wastewater using a microbial fuel cell, *Journal of Power Sources*, 169, 198-204.
- Said, N.I., (2008) *Pengolahan Air Limbah Domestik di DKI Jakarta: Tinjauan Permasalahan, Strategi dan Teknologi Pengolahan*, BPPT, Jakarta.
- Schnabel, H. D., Baselt, T., Gemende, B., Gerbeth, A., Spiegel, J. (2005) Microbial Fuel Cells Overview and First Simple Experiments, *Proceeding of Environmental Impacts of Power Industry*, University of West Bohemia, June 17 2005, 16-23.
- Tardast, A., Najafpour, G. D., Rahimnejad, M., Amiri, A. (2012) Bioelectical Power Generation in a Membrane less Microbial Fuel Cell, *World Applied Sciences Journal*, 16 (2), 179-182.
- Zhu, F., Wang, W., Zhang, X., Tao, G. (2011) Electricity generation in a membrane-less microbial fuel cell with downflow feeding onto the cathode, *Bioresource Technology*, 102, 7324-7328.