

PENGARUH KONSENTRASI *CHEMICAL OXYGEN DEMAND* (COD) DAN RAGI TERHADAP KINERJA *GRANULAR ACTIVATED CARBON DUAL CHAMBER MICROBIAL FUEL CELLS* (GAC-DCMFCs)

Bimastyaji Surya Ramadan*); Ganjar Samudro **); Sri Sumiyati**)

*) Mahasiswa Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro

*) Dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro, Jl. Prof. H. Sudarto, SH Tembalang – Semarang

ABSTRAK

Microbial fuel cell jika digunakan dalam pengolahan limbah, mampu menghasilkan energi yang bersih sebagai bagian dari pengolahan limbah yang efektif. Namun, beberapa hal yang sangat mempengaruhi kinerja MFC seperti komunitas mikroorganisme dan substrat belum ditemukan titik optimumnya. Penelitian ini menjawab tantangan tersebut dengan mengembangkan sebuah sistem MFC dengan menggunakan variasi konsentrasi COD dan ragi dalam mempengaruhi kinerja MFC. Limbah artifisial digunakan sebagai substrat MFCs karena diinginkan konsentrasi yang sesuai dengan tujuan penelitian. Media filter Granular activated carbon digunakan sebagai media perlekatan bakteri dalam pembentukan biofilm sehingga meningkatkan efisiensi penyisihan kontaminan. Variasi konsentrasi COD yang digunakan adalah 400, 800 dan 1200 mg/l dan konsentrasi ragi 1,5; 3 dan 4,5 g/l yang dioperasikan dalam kondisi batch selama proses seeding dan aklimatisasi dan kontinyu setelah proses aklimatisasi. Penyisihan COD tertinggi dihasilkan oleh reaktor 1200 mg/l dengan penambahan ragi 4,5 g/l yaitu sebesar 5624,6 mg/l atau sebesar 98,2%. Produksi listrik tertinggi dihasilkan pada konsentrasi 800 mg/l dan ragi 3 g/l dengan nilai 281,01 mW/m². Dari perbandingan semua konsentrasi ragi dan COD, dapat disimpulkan bahwa pada range COD 800 – 1200 mg/l dan ragi 3 – 4,5 g/l *microbial fuel cells* menghasilkan penurunan COD dan produksi listrik yang optimum. Hasil menunjukkan bahwa metabolisme dan aktivitas mikroorganisme dalam biofilm sangat mempengaruhi kondisi operasional reaktor GACMFC.

Kata kunci: GAC-DCMFC, COD, Ragi

1. PENDAHULUAN

Populasi manusia di Indonesia mengalami peningkatan sepanjang tahun, bahkan diprediksi pada tahun 2030, jumlah penduduk di Indonesia mencapai 300 juta jiwa atau meningkat 100 juta jiwa selama 20 tahun terakhir terhitung sejak tahun 2010 (BKKBN, 2013). Jumlah limbah yang cukup besar akibat peningkatan populasi ini akan membutuhkan manajemen yang baik sebelum dimusnahkan. Selama akhir abad ini bahan bakar fosil menjadi sumber energi utama, tetapi karena kelangkaan dan tingginya tingkat konsumsi yang diikuti dengan masalah-masalah lingkungan, mendesak pencarian sumber-sumber energi alternatif (Campo et al., 2012). Karena adanya perhatian global terhadap permasalahan lingkungan dan energi fosil yang terbatas, ada ketertarikan untuk mengetahui sumber energi yang bersih dan berkelanjutan dengan penggunaan hidrokarbon yang minimal atau tidak sama sekali. Bakteri dapat dijadikan sebagai bahan bakar untuk mempercepat konversi senyawa organik dalam limbah

menjadi listrik. *Microbial fuel cell* jika digunakan dalam pengolahan limbah, mampu menghasilkan energi yang bersih sebagai bagian dari pengolahan limbah yang efektif (Ghangrekar dan Shinde, 2006).

Teknologi ini mampu mengubah energi yang tersimpan dalam ikatan kimia senyawa organik menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik oleh mikroorganisme (Du et al., 2007). *Microbial fuel cell* menggunakan limbah sebagai substrat yang dapat menggantikan fungsi glukosa sebagai sumber karbon bagi metabolisme mikroba. Penggunaan air limbah dalam sistem *microbial fuel cell* ini mempunyai beberapa keuntungan, seperti kontaminan dalam air limbah dapat menjadi sumber karbon untuk *microbial fuel cell*, dan energi listrik yang dihasilkan cukup untuk digunakan dalam pengolahan air limbah berikutnya dan ini berarti mengurangi konsumsi energi (Kristin, 2012). Hal ini dapat dilihat dalam penelitian yang dilakukan oleh Juang (2012), dimana sistem *microbial fuel cell* yang menggunakan substrat

artifisial yang mengandung glukosa menghasilkan rata-rata power density sebesar $1,2 \text{ mW/m}^2$ pada kondisi $24\text{-}26^\circ\text{C}$, konsentrasi COD diantara 1002 dan 1296 mg/L dan pH 7 . Selain itu, pada penelitian yang dilakukan Ghangrekar (2006) dengan penggunaan substrat artifisial yang mengandung sukrosa, sistem MFC berhasil menurunkan COD dengan efisiensi penyisihan sebesar $92,2\%$ yang lebih tinggi daripada efisiensi *anaerobic digester* dan biofilm konvensional masing-masing sebesar 88% dan $64,58\%$ (Roh, 2006; Suligundi, 2013). Bahkan menurut Logan (2008) diperkirakan bahwa pengolahan air limbah menggunakan sistem anaerobik menggunakan energi sekitar 3% dari daya listrik yang dikonsumsi secara nasional.

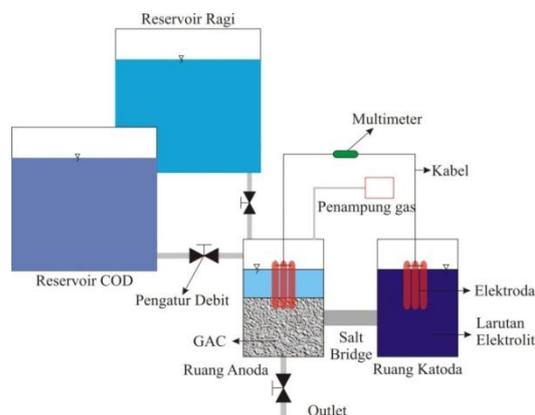
Reaksi biologis dapat terjadi pada beban organik yang berbeda-beda, tergantung toleransi bakteri yang mengolahnya. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Campo et al. (2012) bertambahnya konsentrasi COD meningkatkan aktivitas mikroorganisme sehingga meningkatkan produksi arus listrik. Penelitian yang dilakukan oleh Baikun Li, et al. (2011) juga membuktikan bahwa peningkatan konsentrasi beban COD (range 600 mg/l – 1000 mg/l), menyebabkan peningkatan efisiensi penyisihan COD dan produksi listrik. Penambahan ragi dalam MFC juga dapat meningkatkan performa MFC karena kemampuannya dalam membantu biakan mikroorganisme untuk mengolah substrat. Ragi merupakan mikroorganisme heterotropik, yang mudah ditemukan di alam, bersifat fakultatif anaerob (dapat tumbuh secara cepat dibawah kondisi aerob maupun anaerob), membutuhkan nutrisi yang sederhana, dan dapat mengolah substrat dengan banyak variasi yang membuatnya ideal untuk MFC (Mathuriya, 2012). Penambahan ragi dari 90 g/l ke 270 g/l menunjukkan peningkatan power density sebesar $53,4 \text{ mW/m}^2$ (Khafidiyanto, 2014). Activated carbon memiliki fungsi utama untuk adsorpsi dan sebagai tempat melekatnya bakteri dalam pembentukan biofilm. Dalam penelitian ini digunakan *granular activated carbon* (GAC) karena porositasnya yang tinggi, permukaan

yang luas, dan mudah dalam pengaktifan fungsi adsorpsinya (Lakdawala, 2013). Selain itu, penggunaan GAC dalam MFC dapat menghasilkan energi yang lebih besar daripada MFC konvensional sebagai hasil dari biofilm yang tumbuh di permukaan GAC (Li et al., 2011). Sistem MFC dua kompartemen merupakan sistem yang biasa digunakan untuk skala laboratorium, karena sistem dua kompartemen lebih mudah untuk dibuat dan dapat digunakan untuk menguji lebih banyak variasi untuk anoda, katoda dan membran (Logan, 2008). Dalam konteks ini, tujuan dari penelitian yang akan dilakukan adalah penggunaan MFC yang diberi umpan biakan campuran, untuk mempelajari perilaku mikroorganisme dan performa MFC ketika COD dan ragi digunakan sebagai variabel. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan, variasi COD dan ragi dapat mempengaruhi performa MFC, semakin besar COD yang diolah dan ragi yang ditambahkan ke dalam sistem MFC, maka kinerja MFC semakin baik.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Desain MFC

Dalam penelitian ini digunakan *microbial fuel cells* dengan 2 kompartemen yang dipisahkan dengan jembatan garam. Kompartemen anoda dan katoda dibuat dari plastik yang memiliki volume kerja 600 ml dan volume reaktor 1 liter . Desain tersebut dipilih karena untuk memudahkan dalam proses penelitian yang membutuhkan ruang yang kecil. Elektroda yang digunakan berasal dari grafit batang baterai bekas dan baterai baru dengan perbandingan jumlah $2 : 3$ yang dihubungkan melalui kabel melalui sebuah multimeter DT-830B. Hambatan eksternal tidak digunakan dalam penelitian ini karena ingin mengetahui nilai OCV (*Open Circuit Voltage*) sebagai nilai tegangan tertinggi yang dapat dihasilkan dalam reaktor *microbial fuel cells*. (Logan, 2008).



Gambar 1 Skema Reaktor MFCs

Anoda dipertahankan anaerob agar proses MFCs dapat berlangsung optimal. Ruang katoda diisi dengan KMnO_4 sebagai larutan elektrolit yang kaya akan akseptor elektron. Total reaktor berjumlah 18 pasang reaktor yang terdiri dari 18 reaktor katoda dan 18 reaktor anoda serta 9 pasang reaktor kontrol yang diberi penambahan ragi tanpa GAC dengan konsentrasi COD rendah, sedang dan tinggi.

2.2. Limbah yang Digunakan

Pada penelitian ini digunakan campuran substrat glukosa dan asetat untuk mendapatkan kondisi optimal pengolahan anaerob dalam bentuk rasio BOD/COD (Tchobanoglous et al, 2003) seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Putri (2012) dimana rasio BOD/COD yang optimal untuk pengolahan limbah adalah 0,2. Selain itu, penggunaan kedua substrat ini juga banyak dilakukan dalam penelitian MFC untuk mendapatkan produksi listrik yang tinggi. Asetat sangat mudah digunakan oleh mikroorganisme untuk menghasilkan energi karena memiliki rantai karbon yang paling rendah, (Du et al, 2007) sedikit menghasilkan biomassa, CH_4 dan H_2 yang menjadi penghambat dalam produksi *coulombic efficiency* (Lee et al, 2007). Glukosa juga menjadi salah satu substrat yang paling digunakan dalam MFCs karena menghasilkan *power density* yang lebih besar daripada substrat yang lain walaupun glukosa memiliki *coulombic efficiency* paling rendah karena glukosa merupakan substrat yang dapat difermentasi sehingga elektron yang dihasilkan

lebih banyak digunakan untuk proses metanogenesis dan fermentasi (Lee et al, Du et al, 2007).

Nutrisi pada air limbah dalam bentuk nitrogen dan fosfor juga sangat penting dalam pertumbuhan mikroorganisme. Rasio C:N:P yang tepat juga menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi performa pengolahan limbah baik aerob maupun anaerob. Pada penelitian ini, digunakan rasio paling optimal pada pengolahan biologis yaitu 100 : 5 : 1 (Gray N F, 2004).

2.3. Kondisi Operasional

Penelitian ini dilakukan dengan metode eksperimental, penelitian yang dilakukan dengan observasi di bawah kondisi buatan (*artificial*) yang dibuat dan diatur oleh peneliti. Di dalam reaktor tersebut terdapat dua proses yang terjadi yakni proses *aerob* di dalam reaktor katoda, dan proses *anaerob* di dalam reaktor anoda. Penelitian dilakukan dengan variabel yang telah ditentukan. Pembenuhan (*seeding*) dilakukan untuk menumbuhkan mikroba yang akan dipakai dalam penelitian sedangkan aklimatisasi digunakan untuk mengadaptasikan mikroba yang terbentuk dengan limbah yang akan diolah. *Seeding* dan aklimatisasi dilakukan secara bersamaan karena pembenuhan langsung di dalam reaktor. (Indriyati, 2003)

Setelah bibit bakteri dimasukkan ke dalam reaktor, reaktor dikondisikan *batch* selama 11 hari. Limbah artifisial dicampur dengan limbah *septic tank* dengan perbandingan COD terlarut 1 : 2 (Septyana, 2013) dan dipertahankan nilai COD-nya dalam kisaran 600 mg/l dengan asumsi mikroba yang ingin ditumbuhkan dapat beradaptasi dengan limbah artifisial yang akan dimasukkan ke dalam reaktor. Selama 11 hari tersebut dikontrol kondisinya dengan pengukuran pH, temperatur, dan COD terlarut. Diasumsikan mikroba telah menempel dan mulai tumbuh dengan melihat kenaikan persentase removal COD hingga mencapai stasioner.

Konsentrasi COD terlarut dalam reaktor dikondisikan bertahap setiap 3 hari sekali sesuai dengan variasi COD yang akan dimasukkan dalam reaktor dari 50 % hingga 100 %

(Himawan, 2013). Hal ini dilakukan agar bakteri tersebut terbiasa dulu dengan konsentrasi yang kecil dahulu, jika sudah mulai kekurangan makanan baru dinaikkan konsentrasi makanannya. Jika pemberian makanan langsung pada konsentrasi yang besar, bakteri yang masih rentan dan belum banyak jumlahnya akan mengalami *shock loading*, karena bakteri belum mampu mendegradasi bahan organik. Aklimatisasi dihentikan ketika penurunan COD sudah mencapai stasioner.

Proses kontinyu dilakukan selama 35 hari penelitian. 6 reservoir masing-masing berukuran 20 liter berisi limbah artifisial dengan konsentrasi COD 400, 800 dan 1200 mg/l serta ragi yang sudah diaktivasi dengan konsentrasi 1,5; 3 dan 4,5 g/l dihubungkan melalui pipa plastik dengan diameter 4 mm ke masing-masing reaktor. Debit masuk (inlet) reaktor dari masing-masing reservoir diatur agar dapat mencapai 0,5 ml/menit sehingga debit masuk menjadi 1 ml/menit. Debit keluar disesuaikan dengan debit masuk sehingga harus diatur sebesar 1 ml/menit.

2.4. Perhitungan dan Analisis

Pengolahan dan analisis data menggunakan perhitungan yang meliputi perhitungan daya / *power density*, *coulombic efficiency*, dan efisiensi penyisihan COD. Data uji bakteriologis didapatkan melalui Balai Laboratorium Kesehatan Kota Semarang. Data yang diolah merupakan data *duplo* sehingga dalam proses analisis, data tersebut diuji homogenitasnya menggunakan software *ms.excel*, apabila persebaran data homogen, data dirata-rata dan apabila tidak homogen, dilakukan pemilihan data yang deviasinya paling kecil.

Arus (I) dan *open circuit voltage* (OCV) diukur setiap hari sekali menggunakan multimeter digital (DT-830B). Nilai kuat arus dan tegangan yang didapatkan kemudian dikonversi ke *power density* P (mW/m²) sesuai dengan rumus di bawah ini.

$$P = \frac{V \times I}{A}$$

dimana I (mA) adalah arus listrik, V (volt) adalah tegangan / beda potensial dan A (m²)

adalah luas permukaan yang digunakan mikroorganisme bertumbuh di anoda grafit batang. Di dalam penelitian ini, luas permukaan anoda dihitung dengan perhitungan selimut tabung tanpa tutup ($2\pi r t + \pi r^2$) sebesar 10,28 cm². Densitas arus juga dihitung dengan membagi arus yang terukur dengan luas permukaan anoda.

$$P = \frac{I}{A}$$

Performa *microbial fuel cells* juga dievaluasi berdasarkan efisiensi penyisihan COD yang dikalkulasikan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$\epsilon = \frac{C_{inlet} - C_{outlet}}{C_{inlet}} \times 100\%$$

Dimana ϵ adalah efisiensi penyisihan COD, C_{inlet} adalah konsentrasi COD awal (mg/l) dan C_{outlet} adalah konsentrasi COD saat waktu tertentu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

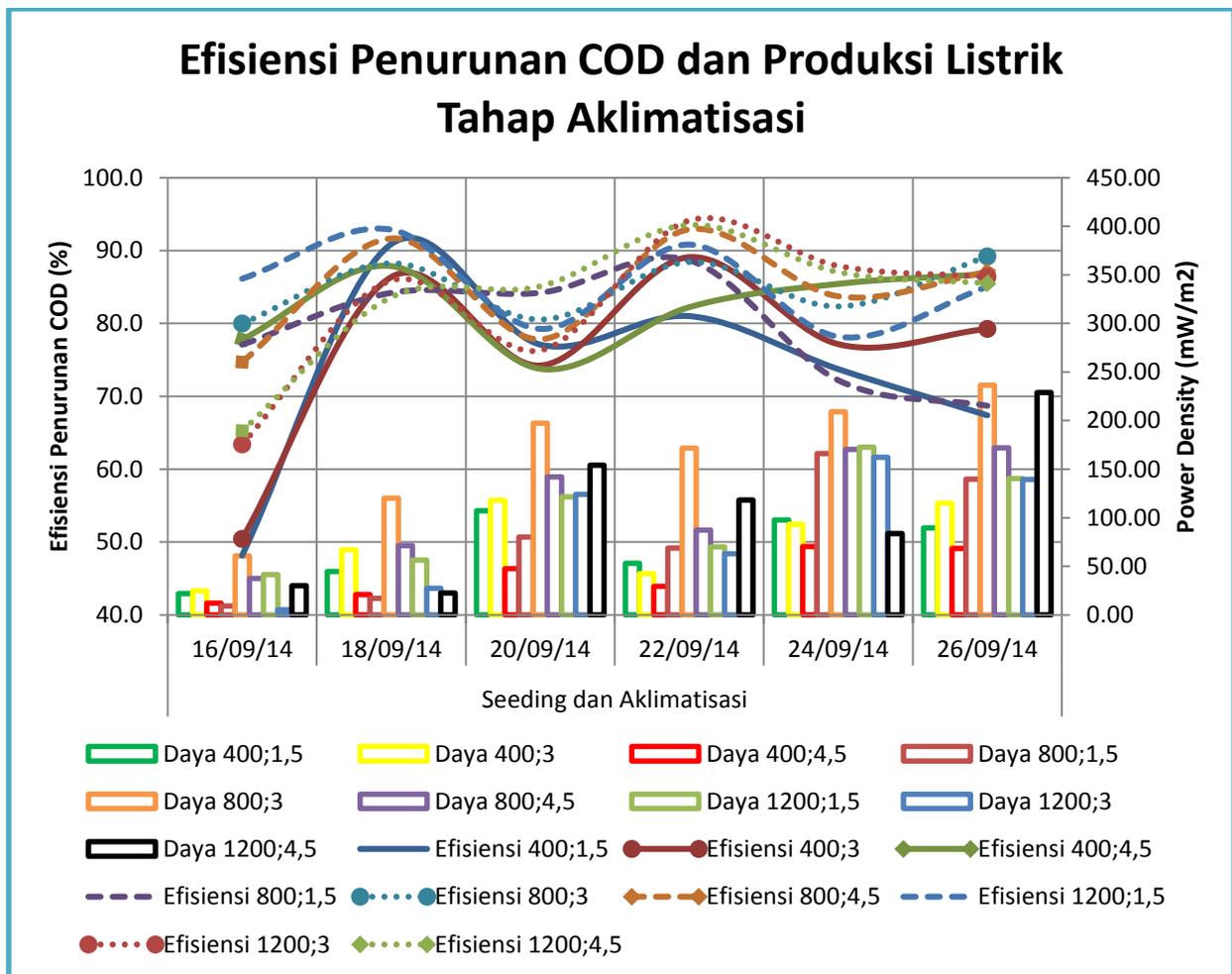
3.1. Performa MFC Dalam Kondisi Batch (Seeding dan Aklimatisasi)

Pada proses seeding dan aklimatisasi ini, produksi listrik terbesar terjadi pada variasi COD 800 mg/l. Pada tahap aklimatisasi ini mikroorganisme masih melakukan penyesuaian terhadap media tumbuh yang baru sehingga produksi listriknya pun cenderung berangsur-angsur dari rendah ke tinggi. Produksi listrik yang tinggi tidak lepas dari penggunaan substrat glukosa dan asetat, karena menurut penelitian sebelumnya, hasil produksi listrik tertinggi dihasilkan oleh MFC dengan substrat asetat dan glukosa hingga 360 mW/m² pada 300 ml asetat (Lee *et al*, 2007). Beban COD 800 mg/l paling optimal menghasilkan listrik sebesar 266,74 mW/m². Sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Daqian Jiang dan Baikun Li (2009) yang menunjukkan hasil produksi listrik tertinggi pada konsentrasi COD 800 mg/l dan kemudian produksi listrik semakin menurun sesuai dengan peningkatan konsentrasi karena adanya faktor lain seperti ketebalan biofilm dan pH yang mempengaruhi proses transfer elektron dan aktivitas mikroorganisme dalam menghasilkan elektron. Kecenderungan penurunan produksi listrik ditunjukkan pada

semua reaktor ketika substrat hampir habis. Konsentrasi karbon yang tinggi sebanding dengan peningkatan arus listrik karena substrat yang dikonversi menjadi elektron semakin banyak (Ghoreysi, 2011). Selama tahap aklimatisasi, reaktor yang paling optimal menurunkan COD dan menghasilkan listrik adalah reaktor COD 800 mg/l dengan ragi 3 g/l sebesar $90 \pm 5\%$ dan $325 \pm 50 \text{ mW/m}^2$.

Hasil ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Daqian Jiang dan Baikun Li (2009) yang menggunakan substrat campuran limbah domestik dan sodium asetat untuk

mendapatkan konsentrasi hingga 1000 mg/l dengan GAC-MFC dan mendapatkan efisiensi pengolahan dari 30%-90% sesuai dengan peningkatan konsentrasi COD pada inlet dalam kondisi *batch*. Salah satu penyebab turunnya COD adalah karena adanya tempat melekat bagi mikroorganisme di elektroda dan karbon aktif sehingga nutrisi yang terkandung dalam air limbah dapat terperangkap dan terdegradasi secara biologis dalam komunitas bakteri di biofilm. (Baikun Li dan Daqian Jiang (2009), Zhou, 2011).

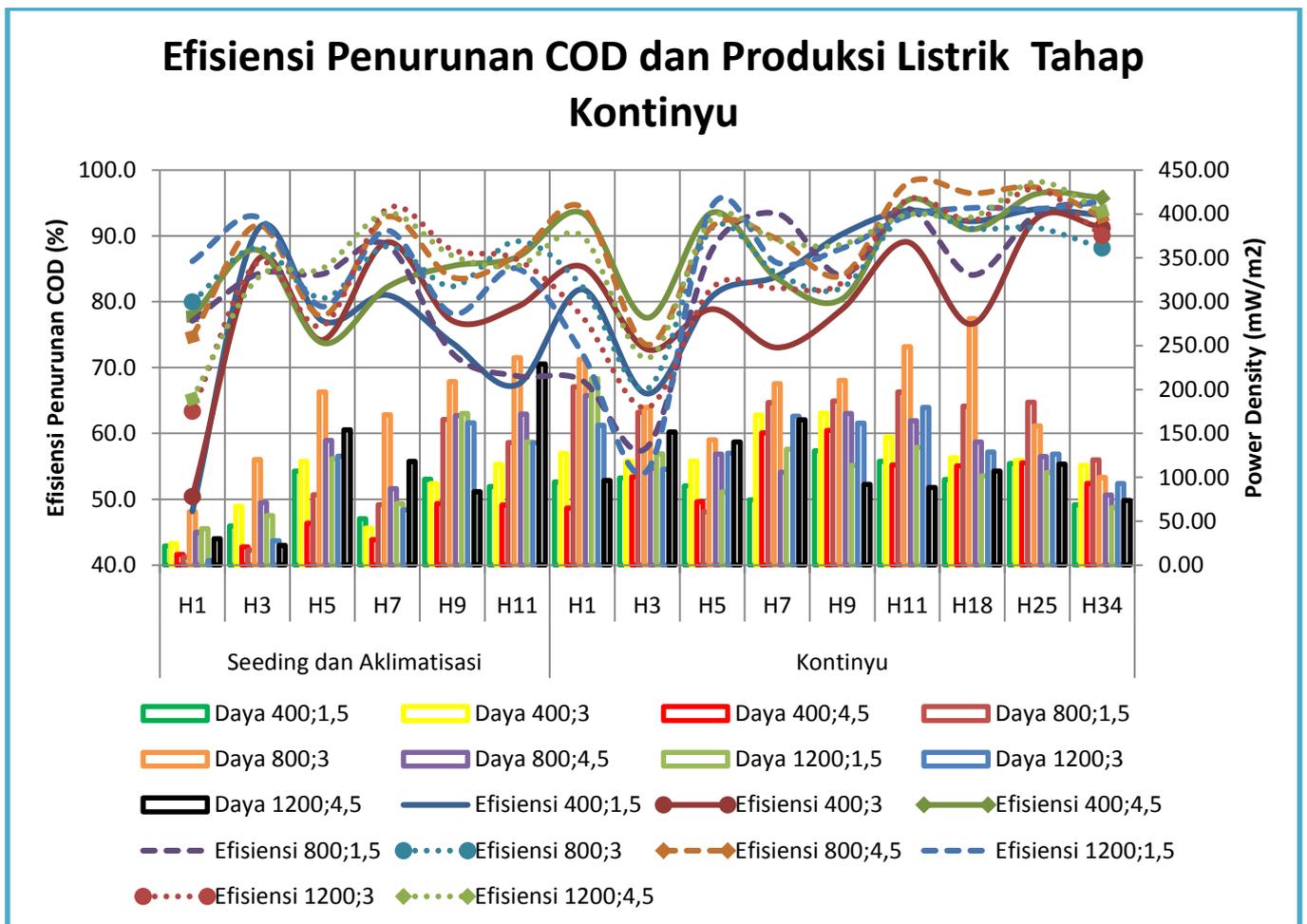


Gambar 2 Grafik Efisiensi Penurunan COD dan Produksi Listrik Tahap Aklimatisasi

3.2. Performa MFC dalam Kondisi Kontinyu

Penyisihan COD tertinggi dihasilkan oleh reaktor 1200 mg/l dengan penambahan ragi 4,5 g/l yaitu sebesar 5624,6 mg/l atau sebesar 98,2%. Hal ini menunjukkan adanya korelasi semakin besar konsentrasi substrat dan pengolah substratnya dalam hal ini ragi dan kultur mikroba yang sudah diinokulasikan di

dalam reaktor, semakin besar pula penyisihannya karena tidak ada kompetisi dalam bermetabolisme. Kompetisi terjadi pada reaktor dengan variasi konsentrasi inlet COD 400 mg/l dan ragi 4,5 g/l. persaingan antar mikroorganisme menyebabkan mikroorganisme yang kalah dapat mati dan akibatnya proses bioremediasi menjadi tidak optimal karena metabolisme diperlukan mikroorganisme untuk menghasilkan energi dalam proses pertumbuhan sel baru (Jasmiyati, 2010). Efisiensi terendah terjadi pada reaktor 1200 mg/l COD dan 1,5 g/l ragi, pada hari ketiga kontinyu yaitu sebesar 54,3% yang terjadi karena konsentrasi substrat yang besar tidak diimbangi dengan pengolah substrat / mikroorganisme yang cukup sehingga substrat yang terolah tidak terlalu banyak. Efisiensi yang dihasilkan cukup fluktuatif dimana pada hari ketiga dan hari ketujuh efisiensi mengalami penurunan tetapi cenderung meningkat pada hari selanjutnya dan stabil mulai hari ke-18 kontinyu.



Gambar 3 Grafik Efisiensi Penurunan COD dan Produksi Listrik Tahap Kontinyu

Selain dapat menurunkan kandungan beban organik yang terdapat dalam air limbah, *Microbial fuel cells* dapat menghasilkan produk sampingan berupa energi listrik dari proses penangkapan elektron yang dihasilkan melalui proses metabolisme yang mengalir melalui akseptor elektron eksternal. Hasil produksi listrik diukur menggunakan multimeter digital, dan dilihat berdasarkan nilai tegangan dan kuat arus listrik sehingga menimbulkan daya dalam satuan luas penampang elektroda (mW/m^2). Produksi listrik optimum dihasilkan oleh reaktor *microbial fuel cells* pada konsentrasi 800 mg/l dan ragi 3 g/l dengan nilai 281,01 mW/m^2 . *Power density* terkecil terdapat pada reaktor dengan variasi konsentrasi 400 mg/l dan ragi 4,5 g/l yang terjadi karena beberapa faktor yaitu rusaknya jepit buaya sebagai penghantar elektron dari elektroda

ke *external wires* dan semakin rusaknya jembatan garam sehingga hanya sedikit elektron yang dapat mengalir melalui kabel (ditunjukkan dengan adanya nilai kuat arus yang mendekati 0) tetapi memiliki voltase / beda potensial yang besar.

Selain itu, kompetisi yang mempengaruhi penurunan COD juga berpengaruh secara signifikan terhadap produksi listrik yang rendah. Pada penelitian ini, produksi listrik yang dihasilkan mengalami kestabilan pada hari yang sama yaitu sekitar hari ke-28 atau setelah mengalami proses kontinyu selama 16 hari. Produksi listrik pada reaktor MFCs dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu oksidasi substrat, transfer elektron, hambatan internal dan reaksi di katoda (Nwogu, 2009). Pada proses aklimatisasi, metabolisme sel masih menjadi batasan faktor yang mempengaruhi hasil listrik dimana metabolisme mikroba sebanding dengan energi listrik yang dihasilkan (Lee et al, 2010). Tetapi setelah memasuki masa kontinyu, metabolisme bukan menjadi faktor pembatas lagi, ketebalan biofilm, *fouling* di jembatan garam, polarisasi di elektroda, dan gas hidrogen yang menutupi permukaan anoda (Zahara, 2011).

3.3. Hubungan Antara Efisiensi Penurunan COD Terhadap Produksi Listrik

Penurunan COD di reaktor MFC terjadi akibat adanya proses metabolisme mikroorganisme. Proses metabolisme ini membutuhkan akseptor elektron untuk menghasilkan energi yang kemudian dalam sistem MFC dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Septyana dan Ardhianto (2014), terdapat hubungan antara penurunan COD dan produksi listrik dimana semakin besar penurunan COD, semakin besar pula produksi listrik yang dihasilkan.

Mikroorganisme membutuhkan substrat organik untuk tumbuh, tetapi terlalu banyak substrat dapat menyebabkan biofilm yang terlalu tebal yang dapat menyebabkan bertambahnya hambatan internal sehingga produksi listrik menurun (Li, 2011).

Ketika memasuki tahap aklimatisasi, berbagai faktor muncul dalam menghambat proses transfer elektron ke elektroda.

Diantaranya ketebalan biofilm, jembatan garam yang mengalami *fouling*, polarisasi di elektroda, dan anoda yang tertutup H_2 (Zahara, 2011). Selain itu menurut Baikun Li (2011), penghasilan elektron di anoda harus sama dengan jumlah penerima elektron di katoda. Temperatur, pH, debit, dan konduktivitas anoda juga menjadi faktor yang mempengaruhi performa anoda. Walaupun begitu, pada penelitian ini diperkirakan ketebalan biofilm menjadi faktor utama dalam penurunan produksi listrik dan menyebabkan penurunan COD tidak sebanding dengan kenaikan produksi listrik. Hambatan internal yang terjadi akibat biofilm yang terlalu tebal ini dapat diminimalkan dengan cara meningkatkan aktivasi katalis, menjaga stabilitas pH dan suhu.

4. PENUTUP

4.1. Kesimpulan

- a. Konsentrasi COD dan ragi berpengaruh dalam produksi listrik dan efisiensi penurunan COD dimana semakin besar konsentrasi COD dan ragi yang ditambahkan, semakin besar pula produksi listrik dan efisiensi penurunan COD-nya. Metabolisme dan aktivitas mikroorganisme dalam biofilm sangat mempengaruhi kondisi operasional reaktor GACMFC.
- b. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi konsentrasi COD 1200 mg/l merupakan konsentrasi yang paling baik menurunkan beban pencemar, sedangkan produksi listrik terbaik pada konsentrasi 800 mg/l. Variasi konsentrasi ragi paling optimum dalam menurunkan COD adalah pada konsentrasi 4,5 g/l sedangkan produksi listrik terbaik pada konsentrasi 3 g/l. Secara keseluruhan, variasi konsentrasi COD dan ragi dengan range 800 - 1200 mg/l dan 3 - 4,5 g/l optimum dalam meningkatkan produksi listrik dan efisiensi penurunan COD.

4.2. Saran

- a. Limbah di bak penampung harus diganti setiap hari karena adanya proses pengolahan jika tidak tertutup dengan rapat
- b. Jika penelitian ini diterapkan dalam skala besar, sebaiknya dilakukan penelitian lanjutan skala *pilot*.

DAFTAR PUSTAKA

- Ardhianto, Rachmad. 2013. *Pengaruh Variasi Debit Dan Konsentrasi KMNO₄ Terhadap Penurunan COD Dan Produksi Listrik Di Dalam Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) Studi Kasus. Air Limbah Rumah Potong Hewan (RPH) Kota Salatiga (Skripsi)*. e-prints.undip.ac.id. Undip. Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro : Semarang.
- Barua Pranab K dan Deka D. 2010. *Electricity Generation from Biowaste Based Microbial Fuel Cells*. International Journal of Energy Information and Communications Vol 1. Issue 1. November, 2010. Tezpur University : India.
- Cahyani, Nur Farida. 2011. *Tapioca Waste Water For Electricity Generation in Microbial Fuel Cell (MFC) System*. IPCBEE Volume 6. Sekolah Tinggi Teknologi MIGAS. Balikpapan.
- Campo AGD, J. Lobato, P Canizares, MA Rodrigo, FJ Fernandez Morales. 2012. *Short-term effects of temperature and COD in a microbial fuel cell*. University of Castilla-La Mancha. Spain.
- Cheng Shaoan, Hong Liu, Bruce E Logan. 2006. *Increased Performance of Single-chamber Microbial Fuel Cells using an Improved Cathode Structure*. Electrochemistry Communications 8 (2006) 489-494. Pennsylvania State University : USA.
- Damiano Lisa dan Jambeck Jenna R. 2010. *Microbial Fuel Cells in Landfill Applications*. University of Georgia : Georgia.
- Das Surajit dan Manwani Neelam. 2010. *Recent Developments in Microbial Fuel Cells : a Review*. Journal of Scievtific & Industrial Research Vol 69 Oct 2010 pp 727-731. National Institute of Technology : India.
- Du Zhuwei, Haoran Li, Tingyue Gu. 2007. *A State Of The Art Review On Microbial Fuel Cells. A Promising Technology For Wastewater Treatment And Bioenergy*. Biotechnology Advances Volume 25 Halaman 464–482. Institute of Process Engineering. China.
- Ganesh, Khrishnadas. 2009. *Continuous Power Generation And Treatment Of Landfill Leachate Using Microbial Fuel Cells*. Ph.D Thesis. Anna University. India.
- Ghangrekar dan Shinde. 2006. *Performance of membrane-less microbial fuel cell treating wastewater and effect of electrode distance and area on electricity production*. Indian Institute of Technology. India.
- Ghoreyshi AA, T Jafary, GD Najafpour, F Haghparast. 2011. *Effect of type and concentration of substrate on power generation in a dual chambered microbial fuel cell*. Babol Noshirvani University. Iran.
- Gil Geun-Cheol, In-Seop Chang, Byung Hong Kim, Mia Kim, Jae-Kyung Jang, Hyung Soo Park, Hyung Joo Kim. 2002. *Operational Parameters Affecting The Performance Of A Mediator-Less Microbial Fuel Cell*. Biosensors and Bioelectronics 18 (2003) 327/334. Korea Institute of Science and Technology : Korea Selatan.
- Godwin Jonathan M, Richard W Evitts, Glyn F Kennell. 2012. *Microbial fuel cell with a polypyrrole/poly(methylene blue) composite electrode*. Electrochemistry Volume 2 Halaman 3–11. University of Saskatchewan. Kanada.
- Gunardi, Wani Devita. 2014. *Peranan Biofilm dalam Kaitannya dengan Penyakit Infeksi*. Fakultas Kedokteran Ukrida : Jakarta Barat.
- Gray NF. 2004. *Biology of Wastewater Treatment Secon Edition*. Dublin University : Ireland.
- Handayani Murni dan Sulistyono Eko. 2009. *Uji Persamaan Langmuir dan Freundlich pada Penyerapan Limbah Chrom (VI) oleh Zeolit*. Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR – BATAN Bandung. LIPI : Banten.
- Himawan, Ditto. 2013. *Studi Pengaruh Volumetric Loading Rate Dan Upflow Velocity Terhadap Penurunan Parameter*

- BOD, COD, TSS, dan Nitrat Dalam Limbah Cair Domestik Artificial Menggunakan Reaktor UASB (Skripsi)*. e-prints.undip.ac.id Universitas Diponegoro : Semarang.
- Hoogers, Gregor. 2003. *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press. United States of America.
- Ilyas, Nur Ilman. 2012. *Penurunan Kadar TDS Pada Limbah Tahu Dengan Teknologi Biofilm Menggunakan Media Biofilter Kerikil Hasil Letusan Gunung Merapi Dalam Bentuk Random*. e-prints.undip.ac.id Universitas Diponegoro : Semarang.
- Indriyati. 2003. *Proses Pembenihan (Seeding) Dan Aklimatisasi Pada Reaktor Tipe Fixed Bed*. Jurnal Teknologi Lingkungan P3TL-BPPT. Volume 2 Halaman 54-60
- Jasmiyati; Sofia Anita; Thamrin. 2010. *Bioremediasi Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Efektif Mikroorganisme (EM4)*. Universitas Riau: Pekanbaru.
- Jayasinghe Nadeera. 2011. *Metabolic Modeling of Spatial Heterogeneity of Biofilms in Microbial Fuel Cells*. Thesis. University of Toronto : USA.
- Jiang Daqian dan Li Baikun. *Granular Activated Carbon Single-Chamber Microbial Fuel Cells (GAC-SCMFCs). A Design Suitable For Large-Scale Wastewater Treatment Processes*. Biochemical Engineering Journal Volume 47 Halaman 31–37. University of Connecticut United States.
- Juang PCY, TH Kuo. 2012. *Effects of flow rate and chemical oxygen demand removal characteristics on power generation performance of microbial fuel cells*. International Journal of Environment Science and Technology Volume 9 Hal 267–280. Meihu University. China.
- Kalathil, Shafeer; Jintae Lee dan Moo Hwan Cho. 2011. *Granular Activated Carbon Based Microbial Fuel Cell For Simultaneous Decolorization Of Real Dye Wastewater And Electricity Generation*. New Biotechnology Volume 29, Nomor 1. Yeungnam University. Korea.
- Kasam; Andik Yulianto; Titik Sukma. 2005. *Penurunan COD (Chemical Oxygen Demand) dalam Limbah Cair Laboratorium Menggunakan Filter Karbon Aktif Arang Tempurung Kelapa*. ISSN. 1410-2315 Volume 2 Nomor 2. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Kasem, Enas Taha; Yuka Saito; Takuya Tsujiguchi; dan Nobuyoshi Nakagawa. 2010. *Effect of Anode Material on the Performance and Characteristics of Ragi Operated Microbial Fuel Cell*. The 2nd International Conference on Energy Engineering ICEE-2. Gunma University. Japan.
- Kristin, Ester. 2012. *Produksi Energi Listrik Melalui Microbial Fuel Cell Menggunakan Limbah Industri Tempe (Skripsi)*. Universitas Indonesia. Jakarta.
- Khafidiyanto Bagus. 2014. *Pemanfaatan Limbah Buah-buahan Sebagai Penghasil Energi Listrik Dengan Teknologi Microbial Fuel Cells Variasi Penambahan Glukosa dan Ragi (Skripsi)*. e-prints.undip.ac.id. Universitas Diponegoro : Semarang.
- Kim In S, Kyu-Jung Chae, Mi-Jin Choi, dan Willy Verstaete. 2008. *Microbial Fuel Cells : Recent Advances, Bacterial Communities and Application Beyond Electricity Generation*. Environ Eng. Res. Vol 13 No 2 pp 51-65, 2008. Gwangju Institute of Science and Technology (GIST) : Korea.
- Lakdawala dan Lakdawala JM. 2013. *Comparative Study of Effect of PAC and GAC on Removal of COD Contributing Component of Sugar Industry waste water*. Research Journal of Recent Sciences ISSN 2277-2502 Volume 2 (ISC-2012), 90-97. SPT Arts and Science College. India.
- Lee Hyung-Sool, Prathap Parameswaran, Andrew Kato-Marcus, Cesar I. Torres, Bruce E. Ritmann. 2007. *Evaluation of Energy-Conversion efficiencies in microbial fuel cells (MFCs) utilizing fermentable and non-fermentable substrates*. Arizona State University : USA. Elsevier Water Research. 2007.10.036.
- Li, Baikun; Karl Scheible; Michael Curtis. 2011. *Electricity Generation From Anaerobic Wastewater Treatment In Microbial Fuel Cells*. NYSERDA . USA.
- Logan, Bruce E. 2008. *Microbial Fuel Cells*. Willey, Penn State University . USA.
- Logan Bruce E, Bert Hamelers, Rene Rozendal, Uwe Schroder, Jurg Keller, Stefano

- Freguia, Peter Aelterman, Willy Verstraete, dan Korneel Rabaey. 2006. *Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology*. Journal of Environmental Science & Technology Vol. 40, No. 17, 2006. Penn State University : USA.
- Lovley, Derek R. 2008. *The Microbe Electric: Conversion Of Organic Matter To Electricity*. Current Opinion in Biotechnology 2008, 19:1–8.
- Mathuriya, Abhilasha Singh dan V.N. Sharma. 2010. *Electricity Generation by Saccharomyces cerevisiae and Clostridium acetobutylicum via Microbial Fuel Cell Technology. A Comparative Study*. Advances in Biological Research 4 Volume 4 Halaman 217-223, 2010 ISSN 1992-0067. Meerut Institute of Engineering and Technology. India.
- Mifbakhuddin. 2010. *Pengaruh Ketebalan Karbon Aktif sebagai Media Filter terhadap Penurunan Kesadahan Air Sumur Artetis*. Eksplanasi Volume 5 Nomor 2. Universitas Muhammadiyah Semarang. Semarang
- Munawaroh Ulum, Mumu Sutisna, Kancitra Pharmawati. 2013. *Penyisihan Parameter Pencemar Lingkungan pada Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Efektif Mikroorganisme 4 (EM4) serta Pemanfaatannya*. Institut Teknologi Nasional : Bandung. Rela Lingkungan No.2 Vol.1 September 2013.
- Muralidharan; OK Ajay Babu; K Nirmalraman; dan M. Ramy. 2011. *Impact of Salt Concentration on Electricity Production in Microbial Hydrogen Based Salt Bridge Fuel Cells*. Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences ISSN. 2231-6345 Volume 1. SRM University. Chennai.
- Nair, Ramya; Renganathan K; S. Barathi dan Venkatraman K. 2013. *Performance of salt-bridge microbial fuel cell at various agarose concentrations using hostel sewage waste as substrate*. International Journal of Advancements in Research & Technology, Volume 2, Issue 5, Nomor 326 ISSN 2278-7763. SRM University. India.
- Novitasari, Deni. 2011. *Optimasi Kinerja Microbial Fuel Cell (MFC) Untuk Produksi Energi Listrik Menggunakan Bakteri Lactobacillus Bulgaricus (Skripsi)*. Universitas Indonesia. Depok.
- Nwogu, Nwachukwu Gift. 2009. *Microbial Fuel Cells and Parameters Affecting When Generating Electricity*. Michigan State University. Microbial and Molecular Genetics 445 Basic Biotechnology eJournal, 2007.
- Oliveira VB, M. Simoes, LF Melo, AMFR Pinto. 2013. *Overview on the Developments of Microbial Fuel Cells (Review)*. Biochemical Engineering Journal 73 (2013) 53-64.
- Pandey; V. Mishra; dan S. Agrawal. 2011. *Production of bio-electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell*. International Journal of Engineering, Science and Technology Volume 3 Nomor 4 Halaman 42-47. Malaviya Engineering College. India.
- Pohan, Nurhasmawaty. 2008. *Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Dengan Proses Biofilter Aerobik (Thesis)*. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Powers, Crystal Ann. 2007. *Microbial Fuel Cell Operation And Use With Anaerobic Digestion For Power Production From Dairy Manure (Thesis)*. Cornell University.
- Purba, Renaldi. 2013. *Pengaruh Penambahan Limbah Udang Pada Pupuk Cair Dari Fermentasi Urin Sapi Terhadap Kualitas Unsur Hara Makro (Skripsi)*. e-prints.undip.ac.id. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Putri, Arifani Rakhma. 2013. *Penentuan Rasio BOD/COD optimal pada reaktor Aerob, Fakultatif dan Anaerob (Skripsi)*. Universitas Diponegoro : Semarang.
- Reddy, Veeranjanya; S. Pradeep Kumar; dan Young-Jung Wee. 2010. *Microbial Fuel Cells (MFCs) - a novel source of energy for new millennium*. Vemana University. India.
- Roh Sung-Hee, Young Nam Chun, Jae-Woon Nah, Hyun-Jae Shin, dan Sun-Il Kim. 2006. *Wastewater Treatment by Anaerobic Digestion Coupled with Membrane Processing*. J. Ind. Eng. Chem Volume 12 No 3 Halaman 489-493. Chosun University. Korea.
- Septyana, Ian. 2014. *Pengaruh Variasi Debit Dan Jumlah Elektroda Terhadap Penurunan Cod Dan Produksi Listrik Di*

- Dalam Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) Studi Kasus. Air Limbah Rumah Potong Hewan (RPH) Kota Salatiga (Skripsi).* e-prints.undip.ac.id. Universitas Diponegoro. Semarang.
- Servais, Pierre. 1994. *Biological Colonization of Granular Activated Carbon Filters in Drinking-Water Treatment.* American Society of Civil Engineers. USA
- Silika, Raja., 2013, *Jual Karbon Aktif Coconut Based dan Coal Based*, [online], (<http://www.pasirsilika.com/2013/09/jual-karbon-aktif-coal-based-dan-coconut-based.html>), diakses tanggal 16 Desember 2014)
- Sugiyono. 2008. *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D.* CV. Alfabeta Halaman 215. Bandung.
- Suligundi, Bonifasi Tripina. 2013. *Penurunan Kadar COD (Chemical Oxygen Demand) Pada Limbah Cair Karet Dengan Menggunakan Reaktor Biosand Filter Yang Dilanjutkan Dengan Reaktor Activated Carbon.* Jurnal Teknik Sipil UNTAN / Volume 13 Nomor 1. Universitas Tanjungpura. Pontianak.
- Sumantri, Jujun S. 2003. *Filsafat Ilmu, Sebuah Pengantar Populer.* Pustaka Sinar Beta : Jakarta. Halaman 322 – 342.
- Tcbobanoglous George, Franklin L. Burton, H. David Stensel. 2004. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (Fourth Edition).* Metcalf & Eddy Incorporation.
- Topayung, Daud. 2011. *Pengaruh Arus Listrik Dan Waktu Proses Terhadap Ketebalan Dan Massa Lapisan Yang Terbentuk Pada Proses Elektroplating Pelat Baja.* Jurnal Ilmiah Sains Vol.11 No.1 April 2011. Politeknik Negeri Manado : Manado.
- Utari Nareswati Dwi. 2014. *Pemanfaatan Limbah Buah-buahan Sebagai Penghasil Energi Listrik Dengan Teknologi Microbial Fuel Cells Variasi Penambahan Asetat dan Ragi (Skripsi).* e-prints.undip.ac.id. Universitas Diponegoro : Semarang.
- Utami, Anggia Rizkita. 2013. *Pengolahan Limbah Cair Laundry dengan Menggunakan Biosand Filter dan Activated Carbon.* Jurnal Teknik Sipil UNTAN Volume 13 Nomor 1. Universitas Tanjungpura. Pontianak
- You Shijie, Qingliang Zhaoa, Jinna Zhang, Junqiu Jiang, Shiqi Zhaob. 2006. *A Microbial Fuel Cell Using Permanganate As The Cathodic Electron Acceptor.* Journal of Power Sources 162 (2006) 1409-1415. Harbin Institute of Technology : China.
- Zahara, Nova Chisilia. 2011. *Pemanfaatan Saccharomyces Cerevisiae dalam Sistem Microbial Fuel Cell Untuk Produksi Energi Listrik (Skripsi).* Universitas Indonesia. Depok.
- Zhang, Yifeng. 2012. *Energy recovery from waste streams with microbial fuel cell (MFC)-based technologies (Thesis).* Technical University of Denmark. Denmark.
- Zhou Minghua, Meiling Chi, Jianmei Luo, Huanhuan He, Tao Jin. 2011. *An Overview Of Electrode Materials In Microbial Fuel Cells.* Nankai University : China. Journal of Power Sources 196 (2011) 4427-4435