

**PEMANFAATAN MOLASSES PADA RANCANGAN TEKNOLOGI  
CONSTRUCTED WETLAND-MICROBIAL FUEL CELL (CW-MFC) DALAM  
PEREDUKSI BAKTERI PATOGEN DAN APLIKASI BIOSENSOR LIMBAH  
GREYWATER SEBAGAI SUMBER PENGAPLIKASIAN FLUSHING WATER**

Ari Adrianto<sup>1</sup>, Resna Aziza<sup>2</sup>, dan Isnaini Arnita Salma Mutiara<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Indonesia.

<sup>2,3</sup>Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Islam  
Indonesia, Indonesia.

<sup>1</sup>[17521087@students.uui.ac.id](mailto:17521087@students.uui.ac.id), <sup>2</sup>[18612084@students.uui.ac.id](mailto:18612084@students.uui.ac.id),

<sup>3</sup>[18612071@students.uui.ac.id](mailto:18612071@students.uui.ac.id)

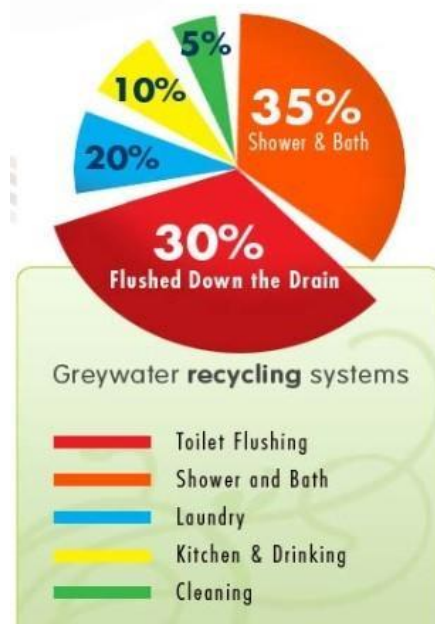
***Abstract***

*Simple greywater waste treatment is considered less effective in processing water sources into clean water. Most of the greywater waste flows without maintenance through a drainage system that flows into the river. The consequences that can arise from the discharge of greywater waste into rivers, among others, cause living things in the river to die, and cause sources of diseases such as cholera, dysentery, and other diseases. So it is necessary to do greywater waste treatment, one of them is constructed wetland (CW) with biosensors from microbial fuel cell. Microbial Fuel Cell (MFC) is a device that generates electricity from the microbial degradation process of organic and inorganic substrates. Constructed Wetland (CW) is a technology for treating various wastewater such as domestic waste, industrial drainage, agricultural wastewater, and leachate. In the CW system, the process of removing pollutants can be done by adding organic substrates to increase the denitrification process. One type of organic substrate that has a high enough absorption potential of pollutants is molasses. Molasses is sugar cane molasses waste which contains abundant bacteria. So that molasses supports the performance of the MFC system as a bioelectrochemical as well as can be applied as a biosensor. Biosensor as a monitoring tool during the processing. So that it can reduce the cost of electricity and improve the performance of management and monitoring of treated greywater waste. Waste that has been treated will be used in the application of flushing water. Seeing the use of flushing water is expensive and only used for fecal transportation. Therefore, the authors offer the idea titled the use of molasses in the design of Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell (CW-MFC) technology in reducing pathogenic bacteria and the application of greywater waste biosensors as a source of flushing water application.*

**Keywords:** *Constructed Wetland, Microbial Fuel Cell, Greywater, Flushing Water, Molasses.*

## Pendahuluan

Tingkat cakupan pelayanan air di Indonesia pada tahun 2011 kurang dari 60%. Pengolahan limbah air sederhana dinilai kurang efektif dalam mengolah sumber air menjadi air bersih. Indonesia saat ini juga menghadapi degradasi lingkungan dengan penurunan kualitas tanah dan abrasi air laut. Selain limbah deterjen, rumah tangga juga menghasilkan limbah yang berasal dari dapur dan bilasan mandi. Ketiga limbah ini tergolong dalam jenis *greywater* atau limbah non kakus. *Greywater* dihasilkan dari aktivitas mencuci, bilasan mandi, dan dapur tetapi tidak termasuk golongan *blackwater* yang bersumber dari toilet dan urinal (Liu *et al.*, 2010). Limbah *greywater* memiliki kandungan mikroorganisme patogen termasuk di dalamnya bakteri dan virus dengan konsentrasi yang cukup tinggi. Kandungan yang terdapat pada limbah *greywater* diantaranya minyak-minyak, deterjen, sabun, nutrisi, garam, rambut-rambut, dan potongan sisa-sisa makanan yang mempengaruhi dalam pengoperasian sistem daur ulang limbah *greywater*. Berdasarkan data literatur, sumber-sumber aliran *greywater* pada umumnya ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sumber-sumber aliran *greywater*.

(Sumber: *United States Agency International Development WHO*, 2011)

Sumber-sumber aliran *greywater* sangat bervariasi dan dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti kebiasaan hidup masyarakat, pendapatan rumah tangga, produk yang digunakan dan sifat instalasi. Rumah tangga berpendapatan tinggi memiliki kecenderungan konsumsi air yang lebih tinggi dan tingkat limbah yang dihasilkan lebih banyak (Firdayati *et al*, 2015). Berdasarkan literatur yang didapatkan, limbah kamar mandi menyumbang 70% dari produksi limbah *greywater* setiap harinya.

Tabel 1. Persentase total limbah *greywater* pada masing-masing sumber aliran.

	Kamar Mandi	Tempat Cucian	Dapur
<b>Presentase Total Limbah Greywater</b>	70% dihasilkan oleh rumah tangga meliputi kegiatan <i>cleaning</i> , <i>flushing toilet</i> dan <i>shower/bath</i> .	20% dihasilkan dari limbah rumah tangga	±10% dihasilkan dari limbah rumah tangga.
<b>Kontaminan</b>	Rambut-rambut, sisa sabun, pasta gigi, body lotion, dan produk pembersih lainnya.	Serat-serat kain, deterjen, zat kimia, sabun dan campuran lainnya.	Sisa-sisa makanan, minyak masakan, deterjen dan bubuk pembersih.

Sebagian besar limbah *greywater* mengalir tanpa perawatan melalui sistem drainase yang mengalir ke sungai. Akibat yang dapat ditimbulkan dari pembuangan limbah *greywater* ke sungai diantaranya menyebabkan makhluk hidup di sungai mati, dan menimbulkan sumber penyakit seperti kolera, disentri, dan penyakit lain. Daur ulang limbah *greywater* berpotensi untuk mempromosikan pelestarian pasokan air bersih sekaligus mengurangi tingkat pencemaran air, sehingga memungkinkan

pengurangan air minum mulai dari 28,7% menjadi 34,8% (Ghisi dan Ferreira, 2007; Liu *et al.*, 2010). Pengolahan limbah *greywater* dapat digunakan sebagai sumber air alternatif tapi tidak dapat diminum (Stec dan Kordana, 2015). Oleh karena itu, dalam paper ini, penulis memiliki dua tujuan untuk mengetahui potensi pengembangan teknologi *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) sebagai pereduksi bakteri patogen dan aplikasi biosensor pada limbah *greywater* sebagai pengaplikasian *flushing water*.

Beberapa peneliti, telah mengembangkan beragam teknologi pengolahan limbah air berkualitas tinggi sebagai upaya dalam perwujudan pelestarian hijau. Salah satu teknologi pengolahan, yang saat ini sedang dikembangkan adalah sistem *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell*. Teknologi ini merupakan penggabungan dari sistem *Constructed Wetland* dan sistem sensor *Microbial Fuel Cell* (MFC). Sistem ini memiliki keuntungan dimana proses yang terjadi secara alami, melewati penyaringan dan adsorpsi oleh tanaman dan degradasi aerob atau anaerob (Kadlec and Wallace, 2008). Namun, penelitian mengenai *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) masih memiliki kekurangan yang perlu ditinjau dari segi efisiensi penghilangan polutan dan daya listrik yang dihasilkan oleh MFC.

MFC merupakan sel bahan bakar yang memanfaatkan materi organik untuk digunakan mikroba sebagai sumber energi dalam melakukan aktivitas metabolismenya. MFC tersusun atas anoda, katoda, dan elektrolit. Pada mekanisme kerja MFC, komponen anoda digunakan sebagai kultur mikroorganisme. Limbah cair telah direkomendasikan sebagai sumber terbarukan untuk menghasilkan energi listrik, bahan bakar dan kimia (Rozendal *et al.*, 2008). Salah satu limbah yang dapat dimanfaatkan adalah limbah industri gula tebu. Selain menghasilkan gula tebu, juga dihasilkan *molasses* yang merupakan produk sampingan selama proses pemutihan gula. Di beberapa pabrik gula, *molasses* ini diekspor keluar negeri dengan harga yang relatif murah. Di banyak tempat limbah ini masih sangat kecil daya gunanya dan sering menjadi masalah lingkungan. *Molasses* merupakan produk sampingan yang masih mengandung senyawa organik dan beberapa kultur bakteri pereduksi. Bakteri

mampu menjadi katalis dan beradaptasi dengan baik terhadap bahan-bahan organik berbeda yang terdapat pada limbah lingkungan sehingga menghasilkan elektron. Solusi lain ditawarkan oleh Zhang (2011) dengan memanfaatkan *Graphene* untuk diubah menjadi *graphene modified SSM* (GMS). Sistem GMS memberikan output daya yang jauh lebih tinggi dibandingkan SSM (*stainless steel mesh*) dan PMS (*polytetrafluoroethylene* (PTFE) modified SSM). Karena dapat meningkatkan luas permukaan elektroda dan efisiensi transfer elektron. Sehingga dapat meningkatkan prospek hasil biaya rendah dengan anoda MFC yang efektif dalam pemanfaatannya dalam *constructed wetland*.

*Constructed wetland* (CW) merupakan teknologi untuk mengolah berbagai jenis limbah cair seperti limbah domestik, drainase industri, air limbah pertanian, dan lindi (Chen *et al.*, 2018; Liang *et al.*, 2017; Zhu *et al.*, 2014). *Constructed wetland* adalah lahan basah buatan dengan memanfaatkan proses filtrasi, adsorpsi, sedimentasi, pertukaran ion, dan penguraian mikroba (Tian, 2011). Sistem pengolahan CW merupakan sistem rekayasa yang telah didesain dengan melibatkan tumbuhan, tanah, dan kumpulan mikroba yang saling berhubungan (Vymazal, 1998). Secara umum CW dibedakan menjadi dua yaitu *Free Water Surface* (SWF) dan *Subsurface Flow* (SSF) (Vymazal, 2010). Dalam menghilangkan atau mengurangi kandungan bahan pencemar, terdapat beberapa proses di dalam CW. Berikut adalah mekanisme penurunan polutan.

Tabel 2. Mekanisme Penurunan Polutan

Polutan	Proses Penurunan
Material organik (diukur dalam bentuk DO)	Proses biologis, sedimentasi, penyerapan oleh mikroba
Kontaminan organik (pestisida)	Adsorbs, <i>volatile</i> , fotolisis, degradasi <i>biotic/abiotic</i>
<i>Suspended solid</i>	Sedimentasi

Berdasarkan literatur yang didapatkan, CW jenis SFS (*Sub Surface Flow*) aliran horizontal memiliki keuntungan dalam pengelolaan limbah *greywater* diantaranya biaya yang lebih murah, pemanfaatan proses secara alami, tidak menimbulkan bau, konstruksinya sederhana, sistem pengoperasian dan pemeliharaan yang mudah, serta proses stabil. Sistem pengolahan CW umumnya dapat dimanfaatkan sebagai sumber air terbarukan. Salah satu air terbarukan pengolahan CW dapat diaplikasikan dalam *flushing water*. *Flushing water* merupakan air bilasan untuk menghilangkan endapan pada toilet. Dalam sistem CW, teknologi CW bertujuan untuk menghasilkan air bebas patogen untuk digunakan kembali pada *flushing water*. Sehingga penerapan *constructed wetland* sebagai flushing water dapat diterapkan.

Dalam CW, sistem rekayasa telah didesain dengan memanfaatkan proses alamiah yang melibatkan tumbuhan, tanah, dan kumpulan mikroba yang saling berhubungan. Kelompok tumbuhan yang bisa digunakan pada proses fitoremediasi adalah tumbuhan yang bersifat tenggelam (*submerged plant*), tumbuhan yang pada akarnya ada di dasar dan sebagian lainnya timbul di permukaan (*emergent*) atau tumbuhan yang seluruh anggota tubuhnya bersifat mengapung di permukaan.

Proses reduksi senyawa nitrogen sangat bergantung pada berbagai kondisi lingkungan dan operasional seperti pH, suhu, oksigen terlarut, sumber karbon organik, waktu retensi hidrolik (HRT), daur ulang nitrogen dan organik, tingkat pembuatan hidrolik, serta cara panen tanaman (Saeed dan Sun, 2012). Proses penghilangan polutan lain dapat dilakukan dengan menambahkan karbon aktif agar dihasilkan limbah cair C/N yang rendah. Karbon dari substrat organik menjadi bahan yang dapat digunakan untuk meningkatkan proses denitrifikasi dengan menyediakan donor elektron (Lin *et al.*, 2002, Zhou *et al.*, 2017a). Beberapa peneliti sebelumnya telah memanfaatkan karbon dengan menggunakan sistem CW. Karbon tradisional yang telah digunakan seperti glukosa, methanol, natrium asetat, dan asam tartarat juga diadopsi untuk menghilangkan polutan dalam menangani pencemaran air (Lin *et al.*, 2002, Hume *et al.*, 2002, Hume *et al.*, 2002b, Rustige dan Nolde, 2007). Namun,

faktanya sumber karbon tradisional dinilai kurang efisien karena biayanya yang mahal dan ketersediaannya yang terbatas. Substrat organik yang berpotensi menggantikan sumber karbon tradisional adalah *molasses*. Hasil penelitian Pratiwi *et al* (2019) menunjukkan bahwa terjadi perbedaan hasil yang signifikan antara perlakuan dengan penambahan *molasses* dan tanpa *molasses*. Penurunan konsentrasi COD sebesar 97% dan 91%. Disamping itu, kelimpahan bakteri pada perlakuan yang menggunakan *molasses* juga lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan tanpa menggunakan *molasses*. Sehingga, jenis substrat organik ini apabila dikombinasikan memiliki potensi tinggi sebagai penyerap kandungan logam, pemurnian COD dan  $\text{NH}_4 \pm \text{N}$  dalam air limbah sekaligus menjadi solusi alternatif karena sifatnya yang universal, biaya terjangkau, produktivitasnya tinggi, ramah lingkungan, serta mampu mengurangi emisi gas rumah kaca (Drizo *et al.*, 1999, Vohla *et al.*, 2011, Hua *et al.*, 2016).

Berdasarkan studi literatur, kombinasi sistem *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) menggunakan *molasses* dapat digunakan dalam pengolahan limbah *greywater*. Kinerja sistem *Microbial Fuel Cell* dengan substrat *molasses* dapat ditingkatkan menggunakan bahan *graphene* untuk diubah menjadi *Graphene Modified SSM* (GMS). Dimana, GMS akan memberikan output daya yang jauh lebih tinggi. Sedangkan, kinerja sistem *Constructed Wetland* dapat ditingkatkan dengan penambahan substrat organik *molasses* untuk mendegradasi polutan-polutan yang berbahaya dalam limbah *greywater*. Hasil pengolahan limbah *greywater* menggunakan sistem *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* dapat menjadi sumber air bersih daur ulang untuk pemakaian *flushing water* pada toilet skala rumahan. Oleh karena itu, penulis menawarkan gagasan ilmiah yakni Pemanfaatan *Molasses* Pada Rancangan Teknologi *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) dalam Pereduksi Bakteri Patogen dan Aplikasi Biosensor Limbah *Greywater* sebagai Sumber Pengaplikasian *Flushing Water*. Teknologi hijau ini diharapkan memberikan efek komprehensif dari spesies tanaman pada emisi GRK, penghilangan polutan, dan kelimpahan mikroba dalam CW-MFC. Status operasi CW-MFC yang

ideal adalah untuk mendapatkan air limbah yang optimal efisiensi pengolahan dan menghasilkan emisi minimum GRK.

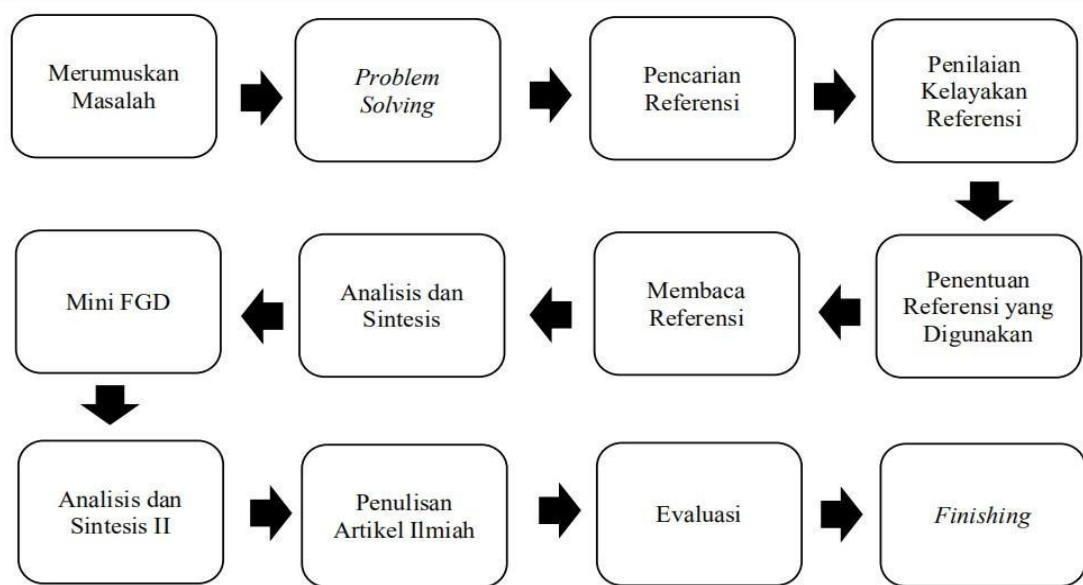


Gambar 2. Desain Perancangan *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell*

### Metode Penulisan

Studi tinjauan pustaka ini berasal dari analisis dan sintesis berbagai referensi terkait atau sering disebut dengan *Literatur Review* melalui media elektronik berupa *textbook*, jurnal serta artikel. Penulis memasukan beberapa kata kunci ke dalam mesin pencarian diantaranya adalah *constructed wetland*, *microbial fuel cell*, *greywater*, *flushing water*, dan *molasses*. Referensi didapatkan dari jurnal yang dipublikasi secara global yakni situs *google scholar*, *sciencedirect*, *nature*, *proquest*, juga *IOSR*. Dengan pendekatan kualitatif dan deskriptif tinjauan pustaka karya ilmiah ini mengacu pada pustaka penelitian yang faktual dan akurat. Metode inklusi dan eksklusi dilakukan berdasarkan analisis kelayakan jurnal kemudian menghasilkan sebuah gagasan kreatif dan solutif atas permasalahan yang ada.





Gambar 3. Skema Metode Penulisan

## Hasil dan Pembahasan

### Rancangan Sistem *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* (CW-MFC) berbasis SSF pada Pengolahan Limbah *Greywater*

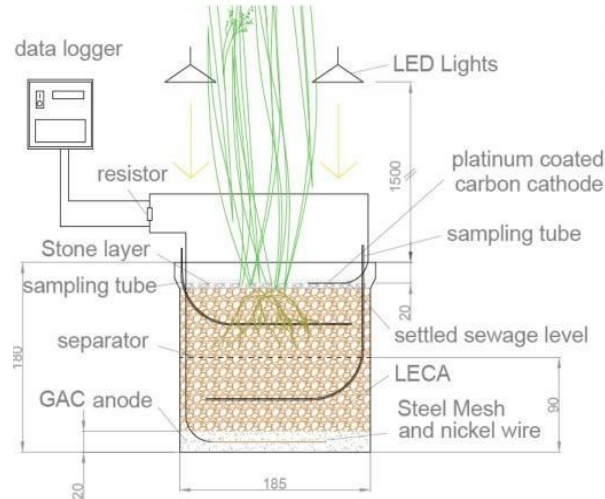
Lahan *Constructed Wetland* dirancang menggunakan prinsip desain yang efektif dan ramah lingkungan dengan memanfaatkan tanaman, mikroba, sinar matahari, dan gravitasi untuk mengubah air limbah *greywater* menjadi air yang dapat digunakan kembali. Pemurnian air CW pada umumnya menggunakan mekanisme penyaringan dengan akar tanaman, sedimentasi fisik, penyerapan biologis, presipitasi, dekomposisi, transformasi nutrisi oleh bakteri anaerob dan anaerobik. Sistem dirancang berbasis *Subsurface Flow* aliran horizontal, dimana air limbah yang dihasilkan tidak bau, tidak terjadi perkembangbiakan nyamuk, dan biaya murah. Kinerja *greywater* tergantung pada karakteristik yang mempengaruhi dan desain tangki.

Model perencanaan CW berbasis *Subsurface Flow* aliran horizontal berbentuk trapesium. Sistem dimodifikasi dengan arah aliran horizontal yang terdiri dari 3 filter, yaitu dua filter kerikil dan satu filter akar tanaman. Proses beroperasi

secara paralel dan bergantian. Pengolahan limbah *greywater* dilakukan secara primer melalui saluran masuk dan keluar yang telah terhubung oleh media filter berpori (kerikil). Diperlukan media tanaman dan kerikil dalam pembuatan konfigurasi agar memenuhi standar kualifikasi yang baik. Kuffour *et al.* (2009) menyatakan bahwa kerikil jenis granulometri yang lebih kecil (0,1-0,5 mm) menghasilkan *effluent* dua kali lebih sedikit terkonsentrasi jika dibandingkan dengan granulometri yang lebih besar (1-1,5 mm). Kelompok tumbuhan yang bisa digunakan pada proses fitoremediasi adalah tumbuhan yang bersifat tenggelam (*submerged plant*), tumbuhan yang akarnya ada di dasar dan sebagian lainnya timbul di permukaan (*emergent*) atau tumbuhan yang seluruh anggota tubuhnya mengapung di permukaan. *Submerged plant* berperan sebagai tempat menyimpan polutan sementara melalui proses transformasi dan pemisahan yang terjadi dalam substrat. Tumbuhan *emergent* sering ditanam pada media kerikil untuk merangsang penyerapan zat hara dan menciptakan kondisi yang sesuai untuk melakukan proses oksidasi dari substrat organik sehingga proses pengolahan limbah optimum. Andrade *et al.* (2017) menggunakan rumput tifton 85 sebagai media tanam untuk menjerap polutan dalam limbah *greywater*. Rumput tifton terbukti produktif dalam menjerap limbah *greywater* dan mampu melakukan pengeringan lumpur dengan persentase padatan kering 55% dan rasio VTS/TS 0,60.

Penelitian Villasenor (2013) menggunakan *graphite anode horizontal* berbentuk persegi panjang terletak di dasar kerikil dan katoda grafit identik ditempatkan 12 cm di bawah permukaan lahan basah. Kedua elektroda (anoda dan katoda) berada di bawah aliran air dengan jarak 25 cm. Kabel tembaga terisolasi menjadi penghubung untuk kedua elektroda, dengan penambahan resistor. Kemudian, lapisan jenis kalsium bentonit (Bentonil A, dari Su d-Chemie) setebal 0,02 m ditempatkan di tengah untuk memisahkan kompartemen anoda dan katoda sekaligus sebagai pembatas pada tumbuhan akar. Penelitian Yoong *et al* (2015) menyatakan sistem akar pada kompartemen elektroda katoda dapat meningkatkan konsentrasi oksigen dan akibatnya meningkatkan reaksi sel. Mekanisme arah aliran air limbah

*greywater* dengan memasuki sistem kompartemen anoda bawah, melewati kompartemen, dan mengarah ke ujung. Selanjutnya, air limbah *greywater* dipompa ke kompartemen katodik. Setiap anoda dihubungkan ke katoda secara individual untuk mengukur tegangan sistem.



Gambar 3. Pengaturan eksperimental CW-MFC dengan anoda GAC, LECA, baja mesh dan kawat nikel, tingkat pembuangan limbah, lokasi pemisah, karbon berlapis platinum katoda serta tabung sampel ditempatkan pada jarak 50 mm dan 120 mm dari bagian bawah ember. (Sumber: Oodally *et al* (2019))

### Potensi *Constructed Wetland* berbasis SSF (*Sub Surface Flow*)

*Constructed Wetland* dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan alirannya yaitu SFS (*Subsurface Flow System*) dan FWS (*Free Water Surface*). Pada penelitian Putri *et al.* (2016) pengamatan mengenai efektivitas pada SFS (*Subsurface Flow System*) dan FWS (*Free Water Surface*) untuk menurunkan BOD, COD, dan Fosfat. Penelitian menunjukkan bahwa pada *Constructed Wetland* dengan sistem SFS mengalami penurunan kadar BOD dan COD lebih tinggi dibandingkan sistem FWS. Penurunan kadar SFS dipengaruhi oleh arah aliran limbah secara horizontal sehingga limbah laundry lebih dekat dengan akar tanaman cattail dan transfer oksigen lebih banyak terjadi pada air limbah. Sedangkan, pada sistem CW berbasis FWS penurunan

kadar BOD dan COD lebih rendah dikarenakan keran outlet pada media berada sejajar sehingga air tidak melewati media pasir dan kerikil.

Berdasarkan analisa hasil yang diperoleh, sebelum pengolahan FWS hasil BOD, COD, dan Fosfat dalam pengolahan air limbah masing-masing adalah 260,25 mg/l, 823,938 mg/l, dan 10,83 mg/l. Kemudian setelah adanya penambahan konstruksi CW mengalami penurunan kandungan BOD, COD, dan fosfat masing-masing adalah 58,8125 mg/l, 160,375 mg/l, dan 7,545 mg/l. Pada sistem yang menerapkan SFS kadar BOD, COD dan Fosfat masing-masing adalah 260,25 mg/l, 823,938 mg/l, 10,8973 mg/l dan setelah adanya pengolahan berbasis CW mengalami penurunan BOD, COD dan Fosfat masing-masing adalah 29,0625 mg/l, 80,5625 mg/l, dan 4,55 mg/l. Oleh karena itu, sistem berbasis SFS lebih efektif dibandingkan FWS. *Subsurface Flow System* (SFS) merupakan rawa buatan dengan aliran dibawah permukaan tanah berbasis *Constructed Wetland*. Air limbah mengalir melalui tanaman yang ditanam pada media berpori (Putri, 2007). Keuntungan dari penerapan sistem lahan basah buatan berbasis SFS dalam pengelolaan limbah *greywater* diantaranya pembuatan membutuhkan biaya yang lebih murah, pemanfaatan proses secara alami, tidak menimbulkan bau, konstruksinya sederhana, sistem pengoperasian dan pemeliharaan yang mudah, serta proses stabil.

### **Kinerja Sistem Pengolahan *Constructed Wetland-Microbial Fuel Cell* berbasis SSF pada Pengolahan Limbah *Greywater***

Isu global yang sedang berkembang terkait masalah air adalah pencemaran air, kekurangan air dan degradasi sumber-sumber air. Hal tersebut menjadi masalah serius akibat akumulasi aktivitas manusia yang cenderung merusak lingkungan dan meningkatnya jumlah penduduk terutama di negara-negara berkembang (Vymazal J., 2010).

Norwegia memiliki pengalaman substansial dalam menggunakan sistem yang dipisahkan oleh sumber untuk air limbah, dalam sistem daur ulang berdasarkan pemisahan sumber fraksi air limbah, penghematan air atau toilet kering digunakan,

karena volume *greywater* meningkat hingga > 90% dari total aliran air limbah. Limbah toilet mengandung sebagian besar nutrisi dan hanya 10% dari nitrogen, 26% dari fosfor dan 21% dari kalium yang ditemukan di *greywater* (Vinneras, 2002). *Greywater* mungkin mengandung lebih dari 50% bahan organik di air limbah (Rasmussen *et al.* 1996) dan sejumlah besar bakteri dan virus (Ottosen dan Stenström 2002). Komposisi *greywater* dapat sangat bervariasi, rentang nilai yang luas untuk mikropolutan dan nutrisi telah dipublikasikan misalnya, COD telah dilaporkan antara 13 dan 550 mg/L; BOD 590–360 mg/L; total nitrogen 0,6–74 mg/L dan total fosfor 4–14 mg/L (tergantung penggunaan deterjen dengan atau tanpa fosfat) (Eriksson *et al.*, 2002). Lahan Basah Buatan atau *Constructed Wetland* (CW) mampu mengolah limbah *greywater* rumah tangga (parameter TSS, pH, BOD, COD, Minyak & Lemak, dan Deterjen) dengan persentase tabel penyisihan berkisar antara 95,47%-99,89%.

Tabel 3. Parameter *Greywater* sebelum diolah dan setelah diolah dengan HRT 1 Hari

Parameter	Sat	Mutu Mutu		Uji ke-1			Uji ke-2			Uji ke-3		
		PM	PP kls	3 & 4 Nov'15			15 & 16 Nov'15			26 & 27 Nov'15		
		LH	IV	Inlet	Outlet	%	Inlet	Outlet	%	Inlet	Outlet	%
Temp.	°C	-	-	26,90	27,20		23,20	24,20		26,40	26,30	
TSS	mg/l	100		461,00	2,00	99,56	238,00	2,00	99,16	222,00	10,00	95,47
Ph	-	6-9	5-9	5,17	6,89		6,10	6,50		5,29	6,82	
BOD	mg/l	100	12	496,00	9,49	98,08	850,20	17,20	97,98	528,70	2,19	99,58
COD	mg/l	-	100	1254,00	26,64	97,87	1862,50	37,20	98,00	1252,00	6,10	99,51
Deterjen	mg/l						76,41	0,11	99,86			
M&Lemak	mg/l	10	-	2,20	3,60					4,80	2,60	

Besaran konsentrasi polutan di outlet, yang merupakan hasil pengolahan *greywater*, memenuhi standar baku mutu Peraturan Menteri Lingkungan Hidup no. 4 tahun 2014, dan Peraturan Pemerintah no 82 tahun 2001 kelas IV sebagai air untuk mengairi tanaman dan atau peruntukan lain yang mensyaratkan mutu air yang sama dengan kegunaan tersebut seperti untuk bersih-bersih di *outdoor* dan atau untuk penggelontoran toilet, air hasil pengolahan *greywater* tersebut jika dibuang ke saluran-saluran dapat menetralsir pencemaran air tanah dan air permukaan (sungai). Konsep Lahan Basah Buatan tidak hanya mengatasi problem pencemaran lingkungan, melainkan juga menyediakan sumber air non-konsumsi dan menciptakan kawasan

hijau ramah lingkungan dibanding teknologi konvensional, sistem Lahan Basah Buatan lebih ekonomis, fleksibel dan operasionalnya mudah (Siti *et al.*, 2017). Parameter penghilangan bahan organik ditunjukkan pada Tabel 4, kinerja hasil data konsisten dengan hasil sebelumnya yang dilaporkan dalam literatur untuk unit HSSF-CW (Reed *et al.*, 1995; Kadlec dan Knight, 1996).

Tabel 4. Parameter Penghilangan Bahan Organik  
(*Removal efficiencies of the HSSF-CW*)

Statistics	Removal efficiencies (%)					
	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>t</sub>	COD <sub>f</sub>	TSS	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>3</sub> -N
n	12	12	12	12	12	12
$\bar{y}$	68.5	63.9	49.4	90.4	0.03	22
$\sigma$	6.6	7.6	6.7	3.0	0.20	11.5
CV	0.10	0.12	0.14	0.03	5.35	0.52
n = total data, $\bar{y}$ = average, $\sigma$ = variance, CV = coefficient of variation.						

Secara umum, kebanyakan penulis menyetujui kisaran efisiensi penghilangan bahan organik untuk sistem ini 60–80%. Sementara itu, efisiensi keseluruhan seluruh sistem kolam anaerobik plus HSSF-CW (sebagai sekunder unit perawatan) mencapai penghapusan BODs rata-rata 85%, dan untuk TSS 95% (Reed *et al.*, 1995; Kadlec dan Knight, 1996).

Sistem lahan basah dirancang dengan kolam fakultatif untuk pretreatment, diikuti oleh sel vegetasi FWS (permukaan air bebas), kolam aerobik (tidak ditanami), FWS kedua, lebih kecil sel vegetasi, dan akhirnya strip filter vegetasi. Lahan basah telah secara konsisten efektif dalam menghapus TKN dan TP, rata-rata 72% dan 58%, masing-masing, selama 4 tahun pertama operasi (Crolla dan Kinsley, 2002).

Sistem lahan basah yang dibangun *constructed wetland* (CW) memanfaatkan proses yang terjadi secara alami di lahan basah, memungkinkan perawatan yang mencakup filtrasi dan adsorpsi oleh tanaman dan degradasi aerob/anaerob oleh mikroorganisme (Kadlec dan Wallace, 2008). Dengan demikian, reaksi yang terjadi di lingkungan lahan basah menghasilkan aerobik dan zona anaerob yang dapat

dimanfaatkan untuk implementasi sel bahan bakar mikroba (MFC). MFC adalah sistem bioelektrokimia yang mengubah energi kimia dalam residu organik menjadi listrik (Zhao *et al.*, 2013).

CW adalah teknologi yang diterapkan secara luas untuk mengolah berbagai jenis air limbah hingga aplikasi skala penuh (Zhang *et al.*, 2015). Kebanyakan CW-MFC telah dibangun menggunakan bahan berbasis karbon sebagai elektroda (misalnya grafit dan butiran karbon) karena biayanya yang rendah, tahan korosi dan luas permukaan spesifik yang tinggi. Berbagai tanaman lahan basah telah digunakan, termasuk *Phragmites australis*, biasanya dioperasikan di bawah kondisi upflow untuk memaksimalkan potensi redoks gradien melintasi substratum (Li and Sheng, 2012). Penelitian menunjukkan bahwa CW-MFC menyajikan kinerja yang serupa dengan CW dalam hal efisiensi penghilangan oksigen kimia (COD) (sekitar 75%). Namun, penelitian terbaru menunjukkan hal itu termasuk komponen MFC dalam CW meningkatkan efisiensi penghilangan COD (Doherty *et al.*, 2015). Selain itu, CW-MFC memungkinkan pembangkit energi, melaporkan kepadatan daya maksimum yang mencapai hingga  $302 \text{ mW m}^{-3}$ . Ini menunjukkan bahwa CW-MFC bisa menjadi alternatif berkelanjutan untuk pengolahan *greywater* (Fang *et al.*, 2013).

Tabel 5. *Physicochemical characterization of the influent synthetic greywater*

Parameter	Unit	Mean $\pm$ SD <sup>1</sup>
pH	-	7.1 $\pm$ 0.4
Electrical conductivity	$\mu\text{S/cm}$	277.8 $\pm$ 37.6
Turbidity	NTU	15.4 $\pm$ 8.3
COD, total	mg/L	477.8 $\pm$ 70.3
COD, soluble	mg/L	380.4 $\pm$ 38.7
Total suspended solids	mg/L	95.9 $\pm$ 5.2
Nitrate	mg/L	7.1 $\pm$ 0.8
Phosphate	mg/L	19.9 $\pm$ 2.6

<sup>1</sup> Mean and standard deviation (SD) were calculated using 12 measurements, except for total suspended solids and nutrients (nitrate and phosphate), which considered two and three measurements, respectively.

Studi ini mengevaluasi kinerja CW-MFC sebagai pengolahan *greywater* dan sebagai listrik sistem pembangkitan. Efisiensi penghilangan  $91,7 \pm 5,1\%$ ,  $86,5 \pm 7,1\%$  dan  $56,3 \pm 4,4\%$  diamati untuk COD, nitrat, dan fosfat masing-masing. Hasil ini

menunjukkan efektivitas menggunakan Sistem CW-MFC untuk mengolah *greywater* sintesis. Kepadatan daya meningkat ketika potensi anoda siap pada  $-150 \text{ mV vs Ag / AgCl}$ , mencapai nilai maksimum  $719,57 \pm 67,67 \text{ mW m}^{-3}$ . Ini yang pertama studi yang menunjukkan bahwa CW-MFC bisa menjadi alternatif berkelanjutan untuk pengolahan *greywater* bersama-sama dengan produksi listrik (Ignacio *et al.*, 2018).

Tabel 6. Statistik pada konsentrasi lumpur mentah dan cairan perkolat (limbah unit lumpur) dan pasca-pengolahan (limbah unit meresap) serta efisiensi pemindahan dalam unit lumpur dan perkolasi (Sumber: Andrade *et al.*, (2017))

Parameter	Raw Sludge		Percolated Liquid				Post-treated liquid				Overall efficiency (%)
	Average	Standard Deviation	Effluent		Efficiency (%)	p-level	Effluent		Efficiency (%)	p-level	
			Average	Standard Deviation			Average	Standard Deviation			
TS	2349	10358	1159	914	51	0.000169	1258	646	-	0.71047	46
VTS	1133	9440	545	534	52	-	618	366	-	-	45
COD	2937	7284	515	1316	82	0	490	397	5	0.32934	83
BOD	1074	4355	246	433	77	0.000008	242	294	2	0.79981	77
TKN	88	103	33	24	63	0.000001	24	21	27	0.13264	73
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	82	52	29	23	65	0.000015	24	21	17	0.65901	71
Total coliforms	9.8 x 10 <sup>10</sup>		1.6 x 10 <sup>11</sup>		-	0.883492	8.7 x 10 <sup>10</sup>		46	0.67286	11
Escherichia coli	3.6 x 10 <sup>9</sup>		5.3 x 10 <sup>9</sup>		-	0.783547	3.9 x 10 <sup>9</sup>		26	0.86395	-

### Mekanisme Kerja Molasses dalam Microbial Fuel Cell

*Microbial Fuel Cell* (MFC) merupakan sistem bioelektrik yang memanfaatkan aktivitas metabolisme mikroba untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik (Santoro *et al.*, 2017). Kandungan gula sebagai sumber substrat organik sangat penting sebagai penghasil karbon. Hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya seperti pemanfaatan air tahu sebagai substrat dengan kandungan gula dan laktosa sebesar 0.8% mampu menghasilkan beda potensial sebesar 25,5 mV/100 mL dan 33,3 mV/100 mL (Inayati, 2015 dan Ismawati, 2015). Selain itu, pemanfaatan limbah buah-buahan yang juga mengandung banyak gula menghasilkan kerapatan daya sebesar 201,37 mV/m<sup>2</sup> (Utari, 2014). Oleh karena itu

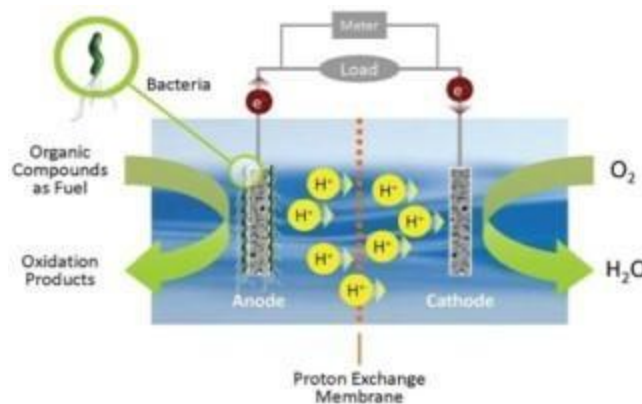


*molasses* dengan kandungan gula yang masih tinggi mampu menghasilkan energi yang lebih besar dibandingkan dengan substrat-substrat yang lainnya yaitu 0,9 Volt dan arus sebesar 0,64 mA.



Gambar 4. *Molasses*

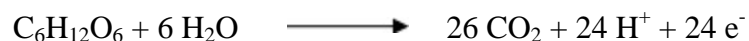
Mikroba pada *molasses* akan menghasilkan energi berupa proton dan elektron dari *molasses* yang kemudian dikonversikan menjadi energi listrik. Mikroba dalam sistem MFC harus berada dalam kondisi pH yang sesuai dan memiliki sumber nutrisi yang cukup agar dapat menghasilkan energi (Logan dan Regan, 2006). Pada ruang anoda terdapat mikroba dan substrat organik dalam kondisi anaerobik, sedangkan pada ruang katoda terdapat air dan gas oksigen. Kedua ruang tersebut disambungkan menggunakan konduktor larutan garam untuk sistem MFC *dual chamber*.



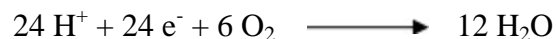
Gambar 5. Skema MFC

Pada gambar di atas yang merupakan skema MFC, ruang anoda dan katoda dipisahkan oleh *proton exchange membrane* atau jembatan garam yang bersifat selektif terhadap proton. Mikroba pada anoda akan menguraikan substrat organik menghasilkan proton, elektron dan karbon dioksida. Elektron akan mengalir dari anoda melalui sebuah kawat sirkuit luar menuju katoda yang menghasilkan arus listrik. Proton yang dihasilkan kemudian dipindahkan menuju katoda melalui *proton exchange membrane* (PEM). Pada katoda proton bereaksi dengan gas oksigen membentuk air. Menurut Guo *et al*, (2012), reaksi yang terjadi pada masing-masing kompartemen adalah sebagai berikut:

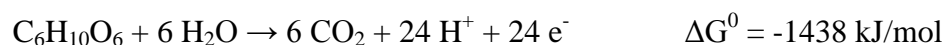
Reaksi di anoda:



Reaksi di katoda:



Bakteri *Escherichia coli* yang terdapat pada kompartemen anoda akan melakukan metabolisme. Substrat organik yang digunakan sebagai sumber nutrisi juga memiliki fungsi sebagai substrat dalam sistem MFC. Kompartemen anoda dalam keadaan tertutup membuat bakteri pada kondisi anaerob dan akan mengonsumsi glukosa yang terkandung pada substrat organik. Hidrogen yang dihasilkan saat bakteri mengonsumsi glukosa pada kondisi anaerob yaitu 12 mol sehingga glukosa akan terkonversi menjadi  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}^+$ , dan elektron. Reaksi yang terjadi dalam reaktor yaitu oksidasi substrat organik. Secara umum reaksi metabolismenya yaitu:



Reaksi pada persamaan diatas menghasilkan nilai perubahan energi bebas Gibbs ( $\Delta G$ ) bernilai negatif. Dalam termodinamika  $\Delta G < 0$  atau negatif menunjukkan bahwa reaksi

kimia akan mudah terjadi, dan dapat berlangsung secara spontan. Sehingga dapat dikatakan bahwa bakteri bermetabolisme dan secara spontan dalam menghasilkan listrik (Cheng, 2009). Penggunaan MFC mempunyai kaitan dengan proses biokimia yang terjadi dalam mikroba yaitu, glikolisis, siklus krebs dan rantai transfer elektron. Pada tahap awal metabolisme, glukosa sebagai nutrisi mikroba masuk ke dalam jalur glikolisis yang terjadi di sitoplasma. Elektron yang dihasilkan dalam proses metabolisme akan mereduksi NADp dalam sel bakteri menjadi NADH. Bakteri yang telah menghasilkan energi dari proses metabolisme, selanjutnya akan mentransfer elektron-elektron yang dihasilkan. Pada transfer elektron mengakibatkan  $H^+$  keluar sel bakteri. Mikroba yang dapat digunakan dalam sistem MFC disebut *exoelectrogenic*, “exo” mengidentifikasikan bahwa mikroba tersebut eksoseluler dan “*electrogen*” menunjukkan mikroba tersebut mampu mentransfer elektron keluar selnya. Banyak mikroba anaerobik yang hanya bisa mentransfer elektron dalam senyawa terlarut seperti asam nitrat, asam sulfat yang bisa berdifusi dari membran sel ke sel lain. Penelitian Manjrekar *et al*, 2018 membuktikan bahwa molases mampu menghasilkan daya listrik lebih tinggi sebesar 365 mV jika dibandingkan dengan limbah dapur dengan nilai 260 mV. Sedangkan, output listrik yang dihasilkan mampu meningkat hingga hari ke-7. Potensi molases lebih menjanjikan karena mengandung sukrosa yang tinggi, penghapusan polutan yang lebih baik, dan banyaknya kandungan mikroba.

## Kesimpulan

Dalam pembahasan pemanfaatan *molasses* pada rancangan teknologi *constructed wetland-microbial fuel cell (CW-MFC)* aliran SSF dalam pereduksi bakteri patogen dan aplikasi biosensor limbah *greywater* sebagai sumber pengaplikasian *flushing water* dapat diperoleh kesimpulan bahwa penggunaan *molasses* terbukti memiliki potensi dalam menurunkan kadar polutan dalam air seperti COD, mampu merombak nitrogen dengan cepat, serta mampu menyediakan donor elektron untuk proses denitrifikasi. Selain itu bakteri yang terkandung dalam

*molasses* dapat digunakan dalam pengoperasian CW-MFC sebagai pengolahan limbah bebas polutan yang cukup tinggi.

### Daftar Pustaka

- Andrade, C. F., Sperling, M. V., & Manjate, E. S. (2017). Treatment of septic tank sludge (doi: 10.4025 actascitechnol.v41i1.39038)
- Araneda, I., Tapia, N. F., Lizama Allende, K., & Vargas, I. T. (2018). Constructed wetland-microbial fuel cells for sustainable greywater treatment. *Water*, 10(7), 940. (doi: 10.3390/w10070940)
- Bullen, R. A., Arnot, T. C., Lakeman, J. B., & Walsh, F. C. (2006). Biofuel cells and their development. *Biosensors and Bioelectronics*, 21(11), 2015-2045. (doi: 10.1016/j.bios.2006.01.030)
- Cheng, K. Y. (2009). Bioelectrochemical systems for energy recovery from wastewater (Doctoral dissertation, Murdoch University).
- Crolla, A. M., & Kinsley, C. B. (2002, September). Use of kinetic models to evaluate the performance of a free water surface constructed wetland treating farmstead runoff. In *Proceedings of the Eighth International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control*, International Water Association, Arusha, Tanzania (pp. 16-19). (doi: 10.3390/w9060397)
- Doherty, L., Zhao, Y., Zhao, X., Hu, Y., Hao, X., Xu, L., & Liu, R. (2015). A review of a recently emerged technology: constructed wetland-microbial fuel cells. *Water research*, 85, 38-45. (doi: 10.1016/j.watres.2015.08.016)
- Drizo, A., Frost, C. A., Grace, J., & Smith, K. A. (1999). Physico-chemical screening of phosphate-removing substrates for use in constructed wetland systems. *Water Research*, 33(17), 3595-3602. (doi: 10.1080/00288231003685843)
- Eriksson, E., Auffarth, K., Henze, M., & Ledin, A. (2002). Characteristics of grey wastewater. *Urban water*, 4(1), 85-104. (doi: 10.1016/S1462-0758(01)00064-4)
- Fang, Z., Song, H. L., Cang, N., & Li, X. N. (2013). Performance of microbial fuel cell coupled constructed wetland system for decolorization of azo dye and bioelectricity generation. *Bioresource technology*, 144, 165-171. (doi: 10.1016/j.biortech.2013.06.073)
- Firdayati, M., Indiyani, A., Prihandrijanti, M., & Otterpohl, R. (2015). Greywater In Indonesia: Characteristic And Treatment Systems. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 21(2), 98-114. (doi: 10.5614/jt.2015.21.2.1)
- Guo, K., Hassett, D. J., & Gu, T. (2012). Microbial fuel cells: electricity generation from organic wastes by microbes. Chapter, 9, 162-189.
- Hua, T., & Haynes, R. J. (2016). Constructed wetlands: fundamental processes and mechanisms for heavy metal removal from wastewater streams. *International Journal of Environmental Engineering*, 8(2-3), 148-178. (doi: 10.22093/wwj.2019.164326.2798)

- Hua, G., Kong, J., Ji, Y., & Li, M. (2018). Influence of clogging and resting processes on flow patterns in vertical flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 621, 1142-1150. (doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.113)
- Oodally, A., Gulamhussein, M., & Randall, D. G. (2019). Investigating the performance of constructed wetland microbial fuel cells using three indigenous South African wetland plants. *Journal of Water Process Engineering*, 32, 100930. (doi: 10.1016/j.jwpe.2019.100930)
- Inayati, N. S., Aminin, A. L., & Suyati, L. (2015). The Bioelectricity of Tofu Whey in a Microbial Fuel Cell System with *Lactobacillus bulgaricus*. *Jurnal Sains dan Matematika*, 23(1), 32-38. (doi: 10.20884/1.mib.2020.37.2.1147)
- Ismawati, N., Aminin, A. L., & Suyati, L. (2015). Whey Tahu sebagai Penghasil Bio Elektrisitas pada Sistem Microbial Fuel Cell dengan *Lactobacillus Plantarum*. *JURNAL SAINS DAN MATEMATIKA*, 23(2), 43-49.
- Kadlec, R. & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. CRC Press/ Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press.
- Li, W. W., & Sheng, G. P. (2011). Microbial fuel cells in power generation and extended applications. In *Biotechnology in China III: Biofuels and Bioenergy* (pp. 165-197). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Liu, B., Liu, X. B., Wang, C., Li, Y. S., Jin, J., & Herbert, S. J. (2010). Soybean yield and yield component distribution across the main axis in response to light enrichment and shading under different densities. *Plant, Soil and Environment*, 56(8), 384-392. (doi: 10.17221/189/2009-PSE)
- Logan, B. E., & Regan, J. M. (2006). Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *TRENDS in Microbiology*, 14(12), 512-518. (doi: 10.1016/j.tim.2006.10.003)
- Manjrekar, Y., Kakkar, S., & Durve-Gupta, A. (2018). Bio-Electricity Generation Using Kitchen Waste And Molasses Powered MFC. (ISSN : 2394-4099).
- Ottoson, J., & Stenström, T. A. (2003). Faecal contamination of greywater and associated microbial risks. *Water research*, 37(3), 645-655. (doi: 10.1016/S0043-1354(02)00352-4)
- Pratiwi NTM., Haryadi S., Ayu IP., Apriyadi T., Iswantari A., Wulandari D, (2019), Management of Organic Matter Content From Proline Laboratory Waste Water Using Several Combinations of Bioremediation Agent, *Jurnal Biologi Indonesia*, halaman. 89-95.
- Putri, M. H., Nurjazuli, N., & Dangiran, H. L. (2016). Perbedaan Efektivitas Constructed Wetlands subsurface Flow System Dan Free Water Surface Pada tanaman Cattail Untuk Menurunkan Bod, Cod Dan Fosfat Limbah Laundry Di Kelurahan Tembalang, Kota Semarang. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal)*, 4(5), 19-26. (ISSN: 1412-1867)
- Putri, O N, 2007. "Perencanaan Constructed Wetland untuk Pengolahan Air Limbah Domestik (Studi Kasus : Saluran Sidomulyo)". Tugas Akhir. Surabaya :

Jurusan Teknik Lingkungan ITS.

- Qomariyah, S., Sobriyah, S., Koosdaryani, K., & Muttaqien, A. Y. (2017). LAHAN BASAH BUATAN SEBAGAI PENGOLAH LIMBAH CAIR DAN PENYEDIA AIR NON-KONSUMSI. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 1(1), 25-32. (ISSN: 2579-7999)
- Rasmussen, G., P.D. Jenssen and L. Westlie. (1996). Greywater treatment options. In: J. Staudenmann, et al. ed. *Recycling the resource: Proceedings of the second international conference on ecological engineering for wastewater treatment*, Waedenswil, Switzerland, Sept. 18-22 1995. *Env. Research volumes* 5-6, Transtec, pp. 215-220.
- Reed, S. C., Crites, R. W., & Middlebrooks, E. J. (1995). *Natural systems for waste management and treatment* (No. Ed. 2). McGraw-Hill, Inc.
- Rozendal, R. A., Hamelers, H. V., Rabaey, K., Keller, J., & Buisman, C. J. (2008). Towards practical implementation of bioelectrochemical wastewater treatment. *Trends in biotechnology*, 26(8), 450-459. (doi: 10.1016/j.tibtech.2008.04.008)
- Santoro, C., Arbizzani, C., Erable, B., & Ieropoulos, I. (2017). Microbial fuel cells: from fundamentals to applications. A review. *Journal of power sources*, 356, 225-244. (doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.109)
- Staudenmann, J., Schoenborn, A., & Etnier, C. (1996, July). Recycling the resource. In *Ecological Engineering for Wastewater Treatment. Proceedings of the second int. conf. on Ecological Engineering for Wastewater Treatment*, Wädenswil.
- Vinnerås, B. (2002). Possibilities for sustainable nutrient recycling by faecal separation combined with urine (Vol. 353).
- Vohla, C., Kõiv, M., Bavor, H. J., Chazarenc, F., & Mander, Ü. (2011). Filter materials for phosphorus removal from wastewater in treatment wetlands—A review. *Ecological Engineering*, 37(1), 70-89. (doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.08.003)
- Vymazal J, Brix H, Cooper P F, Green M B, Haberl R, (1998). *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe*. Leiden: Backhuys Publishers. (doi: 10.1002/iroh.19980830517)
- Vymazal, J. (2002). The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience. *Ecological Engineering*, 18(5), 633-646. (doi: 10.1016/S0925-8574(02)00025-3)
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549. (doi: 10.3390/w2030530)
- Wu, H., Zhang, J., Ngo, H. H., Guo, W., Hu, Z., Liang, S., ... & Liu, H. (2015). A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: design and operation. *Bioresource technology*, 175, 594-601. (doi: 10.1016/j.biortech.2014.10.068)
- World Health Organization. (2011). United States Agency for International Development. Joint position paper on the provision of mobility devices in

less resourced settings.

Zhao, Y., Collum, S., Phelan, M., Goodbody, T., Doherty, L., & Hu, Y. (2013). Preliminary investigation of constructed wetland incorporating microbial fuel cell: batch and continuous flow trials. *Chemical Engineering Journal*, 229, 364-370. (doi: 10.1016/j.cej.2013.06.023).