

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

[www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

### 2.1 Air Lindi (*Leachate*)

Air yang dihasilkan dari usaha dan/atau kegiatan pengolahan sampah dengan karakteristik yang kaya akan bahan organik, kimia, dan bakteri patogen disebut dengan air lindi (Kementerian PUPR, 2017). Padatan yang dihasilkan dari suatu proses pengendapan larutan disebut dengan sedimen, umumnya mudah ditemukan pada daerah aliran air. Air lindi (*leachate*) merupakan cairan yang melewati tumpukan sampah (merembes) dan membawa material terlarut atau tersuspensi. Air lindi mengangkut banyak bahan organik hasil dekomposisi sampah serta memiliki dampak negatif terhadap permukaan tanah; sumber air tanah; maupun udara atmosfer (Cieřlik, *et al.*, 2015). Pencemaran tersebut dapat terjadi secara langsung, sebab air lindi telah terkontaminasi senyawa kimia organik, anorganik, dan bahan patogen lainnya. Semakin banyak jumlah sampah dan semakin tinggi curah hujan, maka akan semakin meningkat pula kuantitas air lindi yang dihasilkan (Sari, 2017). Agar ketersediaan air tanah tetap terjaga dan berkualitas baik, diperlukan adanya pengelolaan air lindi sebelum dilepas ke badan air. Karakteristik bahan organik dalam air lindi diklasifikasikan seperti pada **Tabel 2.1** berikut ini.



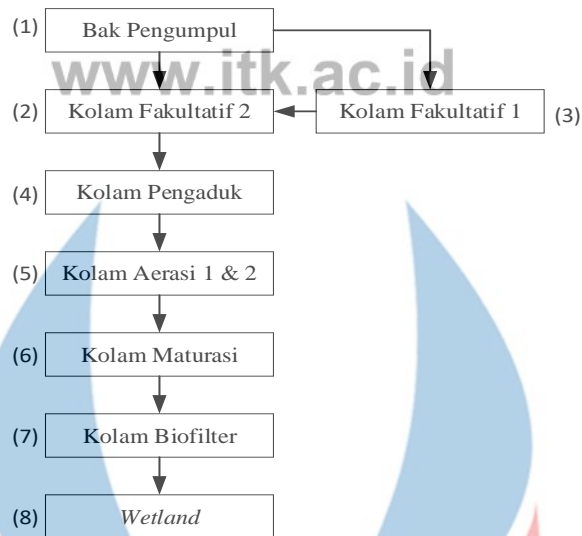
**Tabel 2.1** Karakteristik Air Lindi (*leachate*)

Parameter	Kisaran Nilai (mg/L)
pH	5,3 - 8,5
Padatan:	
Tersuspensi	01 - 70
Organik:	
BOD	2000 - 3000
COD	3000 - 45000
Nitrogen:	
NH <sub>3</sub>	10 - 800
Na	200 - 2000
Lain-lain:	
CaCO <sub>3</sub>	300 - 10000
SO <sub>4</sub>	100 - 1500
Cr	100 - 1500
Alkalinitas:	1000 - 10000

\*) Hartini dan Yulianto, 2018

## 2.2 Pengolahan Air Lindi TPA Manggar

Dalam mengolah air lindi yang dihasilkan dari kegiatan penimbunan sampah, TPA Manggar Kota Balikpapan memiliki 2 unit IPAL yang aktif beroperasi hingga saat ini. IPAL 1 akan menampung air lindi dari zona penimbunan lama (1, 2, 3, dan 4) yang selanjutnya diolah melalui beberapa tahapan. Tahapan yang ada bertujuan agar air efluen dapat sesuai dengan baku mutu air. Adapun alur pengolahan dapat dilihat pada **Gambar 2.2** di bawah ini.



**Gambar 2.2** Alur Pengolahan IPAL 1 TPA Manggar (TPA Manggar, 2018)

Secara desain, bentuk dari tata letak (*layout*) berdasarkan masing-masing tahapan pengolahan dapat dilihat pada **Gambar 2.3** di bawah ini.



**Gambar 2.3** Layout IPAL 1 TPA Manggar (TPA Manggar, 2018)

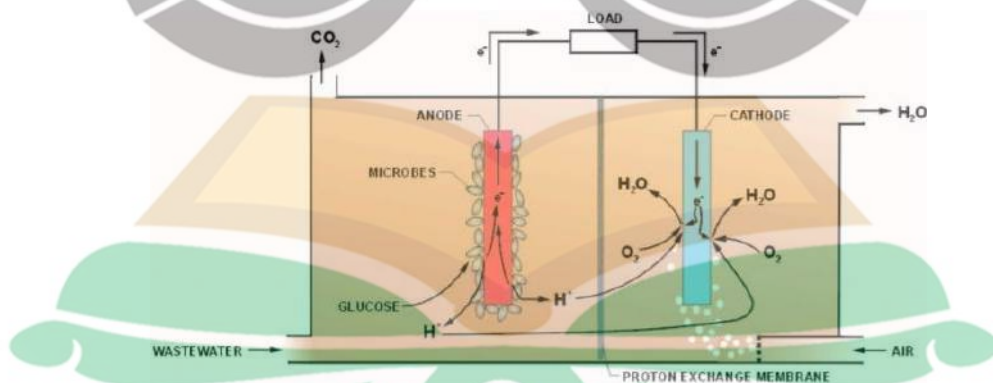
### 2.3 *Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs)*

Metode *Sediment Microbial Fuel Cells (SMFCs)* memanfaatkan konsep aktivitas metabolisme mikroorganisme (*indigenous*) sebagai inti kegiatan. Metode SMFCs akan bekerja secara *catalytic* dari mikroorganisme yang ada, khususnya pada lumpur atau sedimen yang digunakan. Beberapa kunci kemampuan listrik

yang dihasilkan berasal dari konfigurasi reaktor, parameter seperti pH, DO, dan elektrolitnya, serta jenis substrat yang akan digunakan (Kim *et al.*, 2011)

Hasil dari penelitian (Logan *et al.*, 2006) menyebutkan bahwa SMFCs adalah sistem bioelektrokimia yang mampu menghasilkan energi listrik. Energi listrik tersebut berasal dari oksidasi substrat anorganik dan organik yang dibentuk dengan katalis (mikroorganisme). Dapat disederhanakan bahwa energi listrik pada metode SMFCs berasal dari dekomposisi bahan organik dan anorganik oleh mikroorganisme.

Proses pemanfaatan sedimen dan lumpur sebagai sumber listrik potensial pada metode SMFCs memiliki keunggulan dibanding dengan beberapa metode MFC yang ada. Keunggulan tersebut berada pada substrat (media) yang akan digunakan karena dapat berasal dari bahan organik maupun non organik. Namun harus diperhatikan pada jenis rangkaiannya, sebab dapat menjadi pengaruh dalam optimasi energi listrik. Dalam reaktor, anoda berfungsi sebagai biokatalis dan pengoksidasi substrat (media) yang digunakan. Proses oksidasi menghasilkan elektron yang akan bergerak menuju katoda, sedangkan proton hasil oksidasi akan berpindah melalui membran. Apabila proton dan elektron hasil oksidasi telah bercampur dan bereaksi dengan oksigen, maka dapat tercipta air pada reaktor (Das dan Mangwani, 2010). Proses tersebut dapat dilihat pada **gambar 2.1** di bawah ini.



**Gambar 2.1** Skema *Sediment Microbial Fuel Cells* (Włodarczyk dan Włodarczyk, 2019)

Kunci keberhasilan metode SMFCs diklasifikasikan menjadi dua. Pertama ialah ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme yang terdiri dari C (Karbon), N (Nitrogen) dan P (Phospor). Kedua adalah faktor eksternal misalnya pH, oksigen,

kadar air, senyawa kimia penghambat pertumbuhan mikroorganisme, rangkaian alat, dan metode saat proses penelitian dilakukan (Kumalasari, 2017).

Pilihan rangkaian alat terdiri dari beberapa sistem, yakni *single chamber*, *dual chamber*, dan *stack* SMFCs. Ketiga sistem dibedakan berdasarkan jumlah ruang dan jenis rangkaian yang disusun. Keunggulan dari sistem *single chamber* adalah mudah dalam pengaplikasiannya, biaya operasi relatif murah, tidak membutuhkan banyak reaktor, tingkat sensitivitas rangkaian lebih rendah karena berada dalam satu reaktor yang sama, serta mampu menghilangkan kadar COD hingga 1000 mg/L (Tanikkul dan Pisutpaisal, 2015).

## 2.4 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Proses SMFCs

### 2.4.1 Elektroda

Elektroda adalah bahan yang dimanfaatkan sebagai konduktor listrik. Elektroda sebagai media yang menghubungkan non-logam dan logam pada suatu sirkuit agar menciptakan arus listrik. Definisi umum elektroda dinyatakan sebagai katoda ataupun anoda dalam satuan sel elektrokimia. Kemampuan elektroda dikategorikan berdasarkan fungsinya yang menyatakan bahwa katoda akan menyebabkan masuknya elektron sel dan terjadi reduksi. Sedangkan anoda berfungsi mengatur elektron agar meninggalkan sel sehingga terjadi oksidasi. Pada implementasinya, elektroda sebagai anoda ataupun katoda bergantung pada arus yang akan melalui sel (Harish, *et al.*, 2016).

Secara teori, besaran energi listrik yang dihasilkan sebelum penelitian dapat dihitung berdasarkan jenis elektrodanya menggunakan metode GGL sel dalam satuan volt.

$$E^{\circ}_{\text{sel}} = E^{\circ}_{\text{katode}} - E^{\circ}_{\text{anode}} \quad 2.1$$

Tentunya nilai ini tidak dapat dijadikan sebagai acuan, sebab segala sesuatu bisa saja mempengaruhi besaran potensial listrik yang dihasilkan selama kegiatan penelitian berlangsung.

Pandangan lain terkait anoda dan katoda ialah material pendukung yang berfungsi untuk menangkap elektron ( $e^-$ ) yang dilepaskan dari proses oksidasi oleh mikroorganisme. Elektron ini terus bergerak secara eksternal melalui media penghubung dan selanjutnya akan mengurangi kadar oksigen yang ada di atas substrat. Besaran efisiensi dari transfer elektron dan oksigen yang direduksi termasuk dalam faktor yang berpengaruh, selain kerapatan arus dan daya untuk setiap jenis bahan elektroda yang digunakan (Ren *et al.*, 2013).

Berbagai jenis elektroda yang baik digunakan untuk penelitian MFC, *Soil*-MFCs, ataupun *Sediment*-MFCs berupa baja tahan karat, tembaga, karbon, dan grafit. Material elektroda yang digunakan dapat berbentuk cetakan, batangan, ataupun serbuk. Jenis-jenis tersebut dapat dikombinasikan agar mampu menjadi anoda ataupun katoda. Hal yang sebaiknya diperhatikan dalam penentuan elektroda adalah tingkat konduktivitas, bersifat anti korosif, biaya murah, reversibilitas redoks yang baik, luas permukaan, serta memiliki stabilitas terhadap lingkungan (Januarita, *et al.*, 2012). Apabila elektroda yang dipilih tidak memenuhi kriteria yang disebutkan, maka persentasi keberhasilan kemungkinan tidak dapat meningkat. Sebagai contoh pada penelitian Wang, *et al* Tahun 2015 yang menggunakan elektroda berukuran 5 cm x 10 cm x 0,5 cm, didapatkan daya maksimal 4,6 mW/m<sup>2</sup>. Saat proses metabolisme mikroorganisme berlangsung, maka plat anoda dapat menyusut. Hal tersebut karena proses oksidasi dan metabolisme mikroorganisme akan dominan terjadi di anoda.



Selain beberapa jenis anoda dan katoda yang ada, terdapat beberapa jenis lainnya berdasarkan bahan material yang tersedia.

**Tabel 2.2** Bahan Material Anoda dan Katoda (Singh *et al.*, 2010)

Jenis	Material
Anoda	<i>RVC, Pt black, Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt</i>
Katoda	<i>RVC, Pt black, Graphite, graphite felt, carbon paper, carbon-cloth, Pt</i>
Anoda Chamber	<i>Plexiglas, Glass, Polycarbonate</i>
Katoda Chamber	<i>Plexiglas, Glass, Polycarbonate</i>
Proton Exchange System	<i>Proton exchange membrane: Ultrex, Polyethylene, Nafion, solely electrolyte, salt bridge</i>
Electrode Catalyst	<i>Polyaniline, Pt-black, MnO<sub>2</sub>, Pt</i>

#### 2.4.2 pH

*Power of Hydrogen* atau umum dikenal dengan pH merupakan satuan yang menjelaskan konsentrasi hidrogen pada suatu larutan atau padatan. Interval pH berada pada 1-6 untuk kondisi asam, 7 untuk kondisi netral, dan 8-14 untuk kondisi basa. Jika kondisi pH mengalami penurunan menuju asam, maka mikroorganisme dominan mengeluarkan asam selama proses metabolisme dan sebaliknya. Apabila nilai pH kurang atau melebihi dari batas netral, dapat mempengaruhi perkembangbiakan mikroorganisme dan berdampak pada kemampuan dalam proses dekomposisi untuk menghasilkan energi listrik (Salvin *et al.*, 2015).

#### 2.4.3 Salinitas

Salinitas merupakan kadar garam-garam terlarut dalam 1 (satu) kilogram air laut. Semakin banyak konsentrasi salinitas (kadar garam) yang terionisasi dapat mengakibatkan semakin meningkat pula nilai hantar listriknya, dampaknya akan memaksimalkan tegangan listrik yang ada (Ngurah *et al.*, 2014).

#### 2.4.4 TDS

TDS (*Total Dissolved Solid*) ialah banyaknya padatan yang terlarut dalam suatu sedimen. Banyaknya jumlah padatan yang terlarut akan mempengaruhi besarnya jumlah konsentrasi ion pada suatu larutan. Semakin banyak ion, maka mengakibatkan konduktivitas listrik akan semakin meningkat. Selain itu nilai TDS akan linier dengan nilai salinitas dan daya listrik yang dihasilkan. (Das dan Mangwani, 2010).

#### 2.4.5 EC

Konduktivitas listrik atau EC (*Electricity Conductivity*) merupakan suatu satuan ukur kemampuan larutan untuk menghantarkan listrik. Arus listrik dihantarkan oleh ion dalam konsentrasi larutan, sehingga nilai dari EC akan menampilkan total konsentrasi ion dalam larutan. Dengan demikian dapat disederhanakan bahwa EC dalam penelitian SMFCs ini adalah kemampuan energi listrik yang dihantarkan dari suatu substrat yang digunakan (lumpur IPAL) (Manalu, 2014).

#### 2.4.6 Volatile Solid (VS)

Dalam suatu padatan akan terbagi menjadi *fixed solid* (FS) dan *volatile solid* (VS). Nilai VS merupakan banyaknya jumlah padatan yang hilang selama proses pengabuan yang berupa karbon (C) (Standard Method SMWW 2540, 2005). Pengukuran nilai VS dapat dilakukan untuk menghitung dan merepresentasikan banyaknya nilai C-organik yang mengalami penurunan.

### 2.5 Jenis-jenis Mikroba dalam Penelitian MFCs

Mikroba yang dimanfaatkan umumnya bersumber dari jenis media yang digunakan tanpa dilakukan pengklasifikasian sebelumnya, namun agar memaksimalkan elektron ( $e^-$ ) maka dapat ditambahkan dengan bakteri lainnya. Beberapa jenis bakteri tersebut misalnya *Rhodospirillum rubrum*, *Geobacter*



*metallireduncens*, *Shewanella putrefaciens* dan *Escherichie coli* atau yang akrab disebut bakteri *E. coli*. [www.itk.ac.id](http://www.itk.ac.id)

Mikroorganisme yang menjadi kunci keberhasilan metode SMFCs ini adalah bakteri yang dapat menghasilkan listrik. Beberapa jenis umum misalnya *Geobacter sp*, *Shewanella sp*, dan *Escherichia Coli* (Januarita, et al., 2012). Penentuan jenis mikroorganisme dapat disesuaikan untuk memaksimalkan potensi energi listrik. Dapat dilihat pada **Tabel 2.3** terkait mikroorganisme beserta beberapa substratnya.

**Tabel 2.3** Jenis Bakteri Beserta Substratnya (Budihardjo et al., 2021)

<b>Mikroba</b>	<b>Substrat</b>	<b>Metode Pemanfaatan</b>
<i>Lactobacillaceae</i> , <i>Bacillaceae</i> , <i>Clostridia</i> , <i>Pseudomonadaceae</i>	Sampah Organik di TPA	Fermentasi
<i>Gammaproteobacteria</i> dan <i>Bacilli</i>	Sampah sisa dapur	Pengomposan
<i>Actinobacillus succionogenes</i>	Glukosa	<i>Activated Sludge</i>
<i>Escherichia coli</i>	Media yang banyak mengandung glukosa dan sukrosa	Fermentasi
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	Sukrosa	<i>Anaerobic digested sludge</i>

## 2.6 Pengukuran Energi Listrik yang Dihasilkan

Besaran daya listrik yang dihasilkan pada pemanfaatan metode SMFCs ditentukan dari proses elektrokimia ataupun biologi dalam sebuah rangkaian. Selama proses elektrolisis berlangsung, besaran energi (*Joule*) yang tercipta akan dihitung berdasar lama waktu elektrolisis dan daya yang dihasilkan (Muler, 2015). Adapun persamaan-persamaan yang dapat digunakan adalah sebagai berikut:

$$E = P \times t \quad 2.2$$

Dimana E adalah energi dengan satuan *Joule*, P adalah daya dalam satuan watt, dan t adalah waktu dalam satuan detik (s).

Agar dapat mengukur besaran daya (P) yang dihasilkan, maka akan berbanding lurus terhadap tegangan (V) dan arus (I) sebagai berikut:

$$P = V \times I \quad 2.3$$

Besaran daya di atas, akan dihubungkan menggunakan tahanan (R) dalam satuan Ohm ( $\Omega$ ) dengan memanfaatkan hukum Ohm sebagai berikut:

$$V = I \times R \quad 2.4$$

Proses penghitungan besaran kuat arus (I) diperoleh dari besaran tegangan (V) yang diukur serta besaran tahanan (R) eksternal yang diketahui menggunakan Hukum Ohm. Jika kuat arus (I) tidak diukur secara langsung, maka untuk mengetahui besaran daya (P) dapat menggunakan **persamaan 2.3**. Dalam menghitung kerapatan daya (*power density*) ataupun kerapatan arus (*current density*), dapat diketahui berdasarkan perhitungan daya (P) dan luas permukaan ( $L_p$ ) pada anoda yang digunakan. Nilai  $L_p$  diambil dari anoda yang digunakan sebab menjadi tempat dimana reaksi biologis dominan terjadi (Logan *et al.*, 2006; Muler, 2015). Beberapa persamaan yang digunakan sebagai berikut:

$$L_p = (\text{berdasarkan bentuk elektroda yang digunakan}) \quad 2.5$$

$$CD = \frac{I}{L_p} \quad 2.6$$

$$PD = \frac{P}{L_p} \quad 2.7$$

## 2.7 Keuntungan SMFCs

Melalui pemanfaatan konsep SMFCs dalam menghasilkan energi listrik, terdapat keuntungan lain yang dapat dihasilkan. Keuntungan yang dimaksud contohnya proses pengomposan. Metode SMFCs memiliki beberapa komponen berupa kadar air, kondisi penelitian (aerobik atau anaerobik), nutrisi (rasio C/N), ketersediaan mikroorganisme dan bahan baku yang mirip dengan dengan proses pengomposan (Wang, *et al.*, 2015). Berdasarkan kemiripan tersebut, maka dalam proses SMFCs akan menghasilkan produk sampingan berupa kompos.

Metode kompos adalah proses pengolahan sampah organik yang paling umum dan sederhana dalam penerapannya. Metode kompos atau dapat disebut pengomposan adalah serangkaian proses yang mengolah sampah organik menjadi bahan baru seperti halnya humus (pupuk organik). Pengomposan akan melalui proses fermentasi oleh mikroorganisme agar mendekomposisi bahan organik (Faatih, 2012).

Nutrisi pada pengomposan berupa rasio C/N akan berbeda-beda tergantung komposisi bahan yang diolah. Namun berdasarkan *data base* ECN Phyllis2 Tahun 2021, didapatkan bahwa rasio C/N sampah organik suatu TPA sebesar 48:1. Nilai rasio C/N gabungan beberapa jenis material dapat dihitung secara manual menggunakan persamaan di bawah ini.

$$R = \frac{Q1 (C1 x(100-M1))+Q2 (C2 x(100-M2))+Qn (Cn x(100-Mn))}{Q1 (N1 x(100-M1))+Q2 (N2 x(100-M2))+Qn (Nn x(100-Mn))} \quad 2.8$$

Sedangkan nilai rasion C/N sampah organik berdasarkan jenisnya disajikan pada **Tabel 2.4** berikut ini.

**Tabel 2.4** Nilai Rasio C/N Berdasarkan Jenis Sampah (Wang, et al., 2015)

No.	Substrat	Rasio C/N
1	Sisa Kedelai	3:4:1
2	Sisa Fermentasi Dedaunan	60:1
3	Sisa Bubuk Kopi	20:1
4	Sekam Padi	71:1

## 2.8 Penelitian Terdahulu

Salah satu bentuk pengembangan dari metode MFCs adalah SMFCs. Metode tersebut pertama kali ditetapkan sebagai salah satu metode penghasil energi listrik pada tahun 1911 oleh ilmuwan bernama Potter. Potter memanfaatkan elektroda berupa platinum dan mikroorganisme yang digunakan adalah *E. coli* dan *Saccharomyces*. Bermula dari penelitian tersebut yang hingga saat ini terus dikembangkan menjadi salah satu metode energi listrik alternatif. Keunggulan dari MFCs adalah metode yang berpotensi, ramah lingkungan, serta dapat digunakan sebagai opsi dalam mengolah limbah hasil aktivitas makhluk hidup (Budihardjo *et al.*, 2021).

Penelitian lainnya dilakukan pada Tahun 2013 yang berorientasi untuk mencari pengaruh dari *Chemical Oxygen Demand* (COD), serta suhu *stress-tests* dengan variasi suhu 20°C dan 40°C yang dinaikkan setiap 5°C. Kesimpulan yang didapatkan dari kegiatan tersebut adalah terjadinya peningkatan arus listrik secara eksponensial (Campo *et al.*, 2013).

Selain dengan memanfaatkan mikroorganisme yang ada pada suatu substrat, metode MFCs juga dapat dilakukan dengan menggunakan bantuan tanaman padi tanah untuk meningkatkan potensi energi listrik yang dihasilkan. Metode ini pernah diterapkan di Sharif University of Technology, Iran. Dalam penelitian tersebut dijelaskan bahwa tanah yang digunakan menembus masuk anoda (*graphite*) dan dapat mengikat serat grafik. Hasil penelitian tersebut mendapatkan energi listrik maksimal sebesar 89,2 mW/m<sup>2</sup> (Kim *et al.*, 2011).

Adapun beberapa bentuk penelitian yang pernah dilakukan berdasarkan jenis dan konsepnya dapat dilihat pada **Tabel 2.5** di bawah ini.

**Tabel 2.5** Penelitian Terdahulu Terkait Konsep MFC

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
1	Florio <i>et al.</i> , 2019	<b>Metode:</b> SMFCs <i>single chamber</i> menggunakan elektroda <i>graphite</i> dan substrat sampah organik TPA. <b>Hasil:</b> Setelah penelitian selama 4 minggu dengan menggunakan elektroda <i>graphite</i> berukuran 56 cm <sup>2</sup> , didapatkan arus maksimal 42,3 mA/m <sup>2</sup> dan daya 1,98 mW/m <sup>2</sup> .
2	Moqsud <i>et al.</i> , 2015	<b>Metode:</b> PMFCs <i>single chamber</i> menggunakan elektroda serat karbon dengan substrat sampah dapur dan taman. <b>Hasil:</b> Setelah penelitian selama 14 minggu dengan penambahan sampah organik mampu meningkatkan nilai arus, daya, dan pertumbuhan tanaman padi sebagai parameternya. Nilai maksimal tegangan yang dihasilkan sebesar 700 mV dan daya sebesar 3920 mW/cm <sup>2</sup> .
3	Salvin <i>et al.</i> , 2015	<b>Metode:</b> <i>Benthic Microbial Fuel Cells</i> (BMFCs) pada substrat berupa lumpur. <b>Hasil:</b> Dengan menggunakan elektroda <i>carbon</i> dan substrat lumpur yang terdapat bentos selama 10 hari, mampu menghasilkan tegangan hingga 455 mV.

No	Nama dan Tahun Publikasi	Hasil
4	Ömeroğlu dan Sanin, 2016	<p><b>Metode:</b> Melakukan <i>review</i> dari beberapa jurnal penelitian terkait substrat, elektroda, dan metode untuk menghasilkan energi listrik dari lumpur IPAL.</p> <p><b>Hasil:</b> Metode MFC tepat digunakan dalam pengolahan air limbah, sebab selain mengurangi konsentrasi polutan terlarut juga mampu menghasilkan energi listrik.</p>
5	Mulyono <i>et al.</i> , 2020	<p><b>Metode:</b> SMFCs <i>single chamber</i> menggunakan elektroda karbon (5 cm x 7 cm) dengan substrat tanah pertanian dan sedimen saluran irigasi.</p> <p><b>Hasil:</b> Setelah penelitian selama 35 hari, didapatkan penurunan daya listrik akibat aktivitas mikroba yang rendah. Peningkatan dilakukan dengan menambahkan sayur buncis sebagai nutrient sehingga menaikkan daya menjadi 120-140 mW/m<sup>2</sup>.</p>

