

**KAJIAN PRODUKSI BIOLISTRIK DARI LIMBAH INDUSTRI
HASIL PERIKANAN DENGAN SISTEM *MICROBIAL FUEL
CELL***

BUSTAMI IBRAHIM



**DEPARTEMEN TEKNOLOGI HASIL PERAIRAN
FAKULTAS PERIKANAN DAN ILMU KELAUTAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2022**

KAJIAN PRODUKSI BIOLISTRIK DARI LIMBAH INDUSTRI HASIL PERIKANAN DENGAN SISTEM *MICROBIAL FUEL CELL*

Bustami Ibrahim
Departemen Teknologi Hasil Perairan FPIK IPB

ABSTRAK

Microbial fuel cell (MFC) merupakan suatu teknologi alternatif penghasil energi listrik dari limbah cair. Industri pengolahan produk perikanan menghasilkan limbah cair yang tinggi dengan kandungan bahan organik yang tinggi, yaitu protein dan lemak. Banyak substrat terlibat dalam menghasilkan listrik termasuk karbohidrat, protein, asam volatil, selulosa yang digunakan sebagai umpan nutrisi dalam MFC yang dapat dibandingkan hasilnya dengan limbah cair perikanan. Konstruksi dan analisis MFC membutuhkan pengetahuan di bidang ilmiah dan rekayasa, mulai dari mikrobiologi dan elektrokimia hingga material yang digunakan. Dari hasil kajian disimpulkan bahwa untuk pengembangan lebih lanjut dari teknologi MFC menggunakan substrat limbah cair perikanan bahwa proses berjalan lebih lambat, potensi jenis mikroba yang berperan lebih luas, faktor keterbatasan dan desain konstruksi dalam sistem MFC masih perlu diteliti, sehingga akan hemat biaya dan untuk meningkatkan produksi listrik.

Kata kunci: elektrisitas, energi, limbah cair perikanan, *microbial fuel cell*, substrat

ABSTRACT

Microbial fuel cell (MFC) is an alternative technology to produce electrical energy from liquid waste. The fishery product processing industry produces high liquid waste with high organic matter content, namely protein and fat. Many substrates are involved in generating electricity including carbohydrates, proteins, volatile acids, cellulose which are used as nutrient feeds in MFCs which can be compared with fishery wastewater. The construction and analysis of MFCs requires knowledge in scientific and engineering fields, from microbiology and electrochemistry to the materials used. From the results of the study it was concluded that for further development of MFC technology using fishery wastewater as a substrate that the process runs slower, the potential for microbial species that play a wider role, limitation factors and construction design in the MFC system still need to be investigated, so that it will be cost effective and to improve electricity production.

Keywords: bioelectricity, energy, fishery wastewater, microbial fuel cell, substrate

Latar Belakang

Energi listrik merupakan salah satu energi primer yang penggunaannya tidak dapat dilepaskan dalam kehidupan sehari-hari, baik dalam sektor rumah tangga, instansi negara maupun industri. Kebutuhan energi listrik semakin meningkat dengan semakin bertambahnya jumlah penduduk dan penggunaan peralatan yang menggunakan energi listrik (Juwito *et al.* 2012). Kebutuhan listrik nasional periode 2015-2024 diperkirakan akan meningkat dari 219.1 TWh menjadi 464.2 TWh dengan pertumbuhan energi listrik rata-rata 8.7% per tahun dan peningkatan jumlah pelanggan rata-rata 2.2 juta per tahun (KEPMEN-ESDM 2015). Hal ini dapat menyebabkan krisis energi listrik masa depan sehingga perlu pengembangan teknologi penghasil energi listrik terbaru yang berpotensi sebagai sumber energi listrik seperti teknologi *microbial fuel cell* (MFC). Sumber energi listrik di Indonesia saat ini berasal dari pembangkit listrik yang dapat diperbaharui seperti pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dan yang tidak dapat diperbaharui seperti pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) (Yuliati dan Nurastina 2012). Konsumsi listrik tidak hanya menyebabkan gaya hidup yang lebih baik, tetapi juga memperburuk dampak terhadap lingkungan karena penggunaan yang tidak tepat (Chen 2017). Damm *et al.* (2017) melaporkan bahwa listrik merupakan penyumbang emisi gas rumah kaca lebih banyak daripada sektor lain di Eropa. Tingginya konsumsi listrik menyebabkan semakin tingginya emisi karbon yang dihasilkan dari pembangkit listrik yang menggunakan bahan baku utama berupa bahan bakar fosil. Pembakaran bahan bakar fosil mempengaruhi lingkungan melalui peningkatan permukaan laut, kematian organisme hidup, penipisan lapisan ozon, dan peningkatan gas rumah kaca (Nwosu *et al.* 2019).

Perkembangan industri perikanan selain membawa dampak positif sebagai penghasil devisa dan penyerapan tenaga kerja, namun juga dapat membawa dampak negatif yaitu pencemaran lingkungan akibat buangan limbah padat maupun cair (Muflih 2013). Limbah cair perikanan banyak mengandung senyawa organik yang dapat melebihi batas aman sehingga apabila dibuang langsung ke perairan umum dapat menyebabkan pencemaran seperti menimbulkan bau, eutrofikasi perairan, dan pendangkalan (Ibrahim *et al.* 2009). Industri perikanan Indonesia terus mengalami perkembangan yang sangat pesat. Data volume produksi unit pengolahan hasil perikanan di Indonesia terus meningkat hingga tahun 2017 yaitu sebesar 6 181 997 ton (KKP 2018). Industri perikanan selain menghasilkan produk yang diinginkan, juga menghasilkan limbah baik limbah padat maupun limbah cair. Limbah cair industri perikanan mengandung sebagian besar protein dan lemak. Penelitian Trilaksana *et al.* (2007) menyatakan bahwa limbah cair surimi mengandung 72.12% protein dan 1.50% lemak. Limbah cair tersebut dapat menimbulkan masalah lingkungan sebagai sumber polusi berat pada perairan jika pembuangannya tidak diberi perlakuan yang tepat (Ibrahim *et al.* 2017a). Beban polusi berupa senyawa-senyawa organik pada sistem MFC akan didegradasi dengan bantuan mikroorganisme. Bahan yang mengandung mikroorganisme yang umum digunakan pada sistem MFC untuk mendegradasi senyawa organik yaitu lumpur aktif. Lumpur aktif adalah ekosistem kompleks yang terdiri dari bakteri, protozoa, dan organisme-organisme lain.

Microbial fuel cell (MFC) merupakan suatu teknologi yang menggunakan bakteri sebagai katalis untuk mengoksidasi senyawa organik dan anorganik

sehingga dapat menghasilkan energi listrik. Reaksi antara bakteri dan substrat organik akan menghasilkan elektron yang kemudian ditransfer ke anoda yang terhubung dengan rangkaian listrik dengan resistor dan dialirkan ke katoda. Perbedaan jumlah elektron pada anoda dan katoda menyebabkan beda potensial sehingga menghasilkan listrik (Sitorus 2010). Penemuan fuel cell yang dimulai sejak abad 19 dengan memanfaatkan mikroorganisme telah memberikan harapan untuk memanfaatkan limbah sebagai sumber energi listrik yang ramah lingkungan.

Desain Struktur dan Prorotipe MFC

Konfigurasi dan mode MFC yang berbeda telah dikembangkan dalam upaya untuk mengoptimalkan efisiensi MFC dan mengurangi keterbatasan dalam unit sel bahan bakar. Elektroda, kabel, wadah kaca dan jembatan garam memiliki peran penting dalam konstruksi MFC.

MFC ruang tunggal dan ganda digunakan untuk mengisolasi konsorsium mikroba yang dapat membangkitkan listrik dari limbah organik. Temuan penelitian menunjukkan bahwa *Bacillus sp* dan *Bacillus licheiformis* menghasilkan tegangan masing-masing 0,93 V dan 0,95 V (Barua *et al*, 2018). Keberhasilan penerapan MFC adalah fungsi dari konsentrasi dan biodegradabilitas bahan organik dalam substrat, suhu limbah dan tidak adanya bahan kimia beracun. Santoro *et al* (2017), menunjukkan bahwa keterbatasan MFC dalam pembangkit listrik terkait dengan output daya rendah dan peningkatannya. Barua *et al* (2018) merekomendasikan agar penelitian lebih lanjut diperlukan untuk membuat teknologi MFC lebih efisien, dan diterima secara luas.

MFC ruang ganda (DC-MFC) adalah struktur dan susunan MFC seperti pada Figure 1. DC-MFC terintegrasi dengan ruang anodik, ruang katodik, membran pertukaran proton (PEM) antara ruang, sirkuit listrik eksternal, dan mikroorganisme di anoda. Keuntungan utama dari konfigurasi ini adalah untuk menjaga cairan dari ruang katodik dan ruang anodik tetap terpisah oleh membran. Ruang anodik berada dalam kondisi anaerobik, untuk mendorong pertumbuhan mikroba dan untuk menghindari oksigen menghambat pembangkitan listrik. Mikroorganisme menempel pada permukaan anoda dan membentuk biofilm mikroorganisme eksoelektrogenik, yang melakukan reaksi bio-elektrokimia untuk mengoksidasi bahan organik melalui reaksi metabolisme. Pencernaan anaerobik ini melepaskan elektron, proton, dan karbon dioksida (CO_2) ke larutan. Proton mengalir dari ruang anodik ke ruang katodik melalui membran penukar proton. Ruang katodik dicirikan untuk bekerja dalam kondisi aerobik, karena oksigen bertindak sebagai akseptor elektron yang menghasilkan pembentukan air (Du *et al*, 2007).

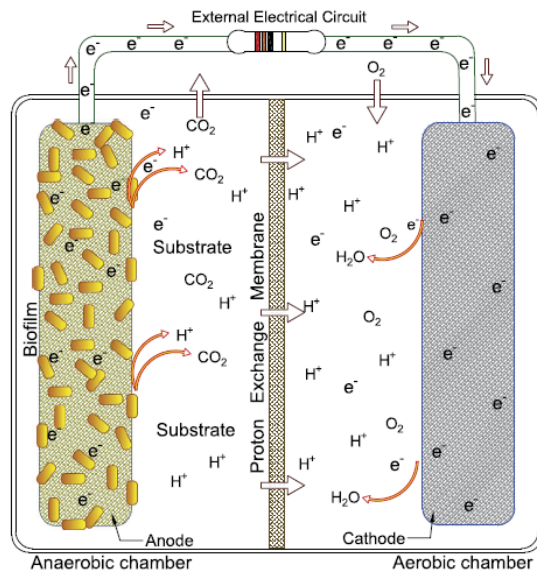


Figure 1. Representasi skematis dari MFC ruang ganda.

MFC ruang tunggal (SC-MFC) adalah jenis konfigurasi lain (Figure 2), yang terdiri dari satu ruang di mana anoda dan katoda ditempatkan di sisi yang berlawanan. Katoda terletak dengan satu muka yang bersentuhan langsung dengan elektrolit dan muka yang berlawanan yang bersentuhan langsung dengan udara. Karakteristik paling penting dari SC-MFC adalah pengoperasiannya tanpa menggunakan pemisah atau PEM. Beberapa keuntungan utama menggunakan SC-MFC adalah pengurangan biaya sistem secara keseluruhan, mendukung perpindahan massa dari anoda ke katoda, dan mengurangi volume ruang. Tantangan untuk mengatasi konfigurasi ini adalah pembentukan biofouling pada permukaan katoda udara sisi air.

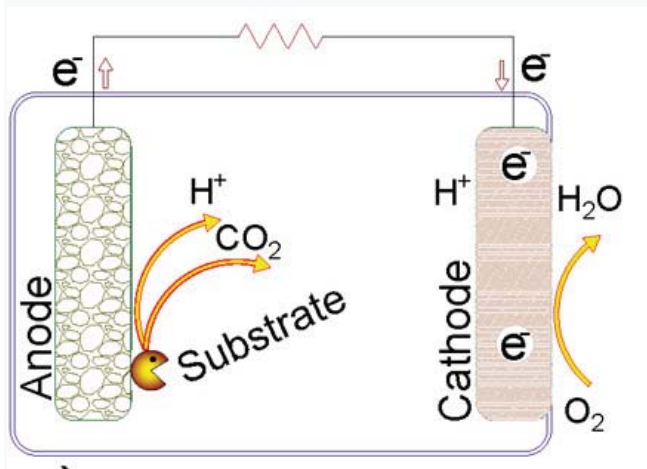


Fig.2. Representasi skematis dari MFC ruang tunggal.

MFC susun adalah jenis konfigurasi lain yang bisa diterapkan, yaitu dengan cara mengkoneksi beberapa MFC, mereka dapat dihubungkan secara seri,

paralel, dan seri/paralel. Tujuan dari konfigurasi susun ini adalah untuk meningkatkan elektrisitas yang dihasilkan oleh sistem MFC susun ini. Kerugian utama menggunakan konfigurasi ini adalah adanya kerugian karena koneksi antara MFC, yang tercermin dalam perbedaan antara tegangan akhir dan jumlah tegangan individu. Namun, penelitian terbaru merekomendasikan penggunaan desain ini sebagai alternatif yang layak pada skala yang lebih besar (Mehrvanfar *et al*, 2019).

Ada juga kombinasi MFC dengan jenis teknologi lain, tujuan utamanya adalah untuk meningkatkan kinerja berbagai teknologi yang terlibat. Strategi peningkatan meliputi penggunaan produksi energi MFC untuk pengoperasian teknologi kopling, dan penggunaan teknologi kopling untuk meningkatkan kualitas pengolahan air limbah. Dalam literatur dilaporkan kombinasi seperti: i) MFC + bioreaktor fluidized bed anaerobik dengan keuntungan meningkatkan efisiensi pengolahan air limbah dengan konsumsi energi yang lebih rendah (Ren *et al*, 2014); ii) MFC + pencernaan anaerobik untuk menghasilkan biohidrogen dan biometana, dan meningkatkan degradasi air limbah (Florio *et al*, 2019); iii) MFC + sel elektrolisis mikroba; dan iv) sel elektrolisis MFC + amonia (Zhang *et al*, 2019)..

Substrat Pada MFC

Dalam MFC, substrat dianggap sebagai salah satu komponen biologis terpenting faktor yang mempengaruhi pembangkit listrik (Liu *et al.*, 2009).

Berbagai macam substrat dapat digunakan dalam MFC untuk produksi listrik mulai dari senyawa murni hingga campuran kompleks dari bahan organik yang ada dalam air limbah. Sejauh ini satu-satunya tujuan dari berbagai proses pengolahan adalah untuk menghilangkan polutan dari air limbah sebelum dibuang secara aman ke lingkungan. Pada masa ini, proses lumpur aktif telah menjadi andalan pengolahan air limbah. Namun, proses ini membutuhkan energi yang intensif dan menurut perkiraan, jumlah listrik yang dibutuhkan untuk menyediakan oksigen di sistem pengolahan dengan lumpur aktif di AS setara dengan hampir 2% dari total konsumsi listrik AS (Pant *et al*, 2010). Pada saat yang sama, pengolahan limbah tahap kedua mengubah status beberapa aliran yang dihasilkan dalam pengolahan limbah cair agroindustri dengan lumpur aktif dari "limbah" menjadi "bahan baku" yang pada akhirnya dapat dimanfaatkan untuk produksi bahan kimia atau energi tertentu (Kleerebezem dan van Loosdrecht, 2007). Selain itu, penekanan pengelolaan limbah saat ini adalah pada penggunaan kembali (re-use) dan pemulihan energi (recovery), yang telah menyebabkan pandangan baru tentang bagaimana pengelolaan limbah cair industri ini harus dilakukan.

Sebagian besar kajian MFC akhir-akhir ini, menggunakan asetat sebagai substrat pilihan untuk pembangkit listrik. Ketika asetat dibandingkan dengan air limbah yang kaya protein sebagai substrat di MFC, berdasarkan konsorsium yang diinduksi asetat mencapai lebih dari 2 kali lipat daya listrik maksimum, dan setengah dari optimal resistensi beban eksternal dibandingkan dengan MFC berdasarkan konsorsium yang disebabkan oleh air limbah yang kaya protein (Liu *et al.*, 2009). Namun, air limbah yang kaya protein menjadi substrat kompleks yang menyediakan kemungkinan memperkaya komunitas mikroba yang lebih beragam daripada asetat. Memiliki komunitas mikroba yang lebih beragam membantu untuk menggunakan berbagai substrat atau untuk mengubah organik kompleks menjadi senyawa lebih sederhana seperti asetat yang digunakan sebagai donor elektron

untuk produksi arus (Pant *et al.*, 2010). Dalam Liu *et al.* (2009) dinyatakan asetat sebagai substrat menghasilkan densitas daya pembangkit listrik mencapai 506 W/m³, 800 mg/L listrik dalam MFC single chamber. Nilai ini cenderung 66% lebih tinggi dari yang dihasilkan jika digunakan butir-butir (305 W/m³, 1000 mg/L).

Faktor yang harus diperhatikan dalam struktur MFC agar menghasilkan energi listrik yang optimal menurut Muftiana *et al.* (2018) salah satunya substrat untuk nutrisi mikroba yang berada dalam *chamber* anoda. Bahan organik yang digunakan sebagai substrat dapat dilakukan dengan memanfaatkan limbah cair industri. Sistem MFC dengan memanfaatkan limbah cair berbeda sebagai nutrisi telah banyak dilakukan seperti limbah cair industri tempe (Rosyadi *et al.* 2017), limbah industri farmaseutika (Nayak dan Ghosh 2018), limbah industri pulp/kertas (Chen *et al.* 2020), limbah industri batik (Polontalo *et al.* 2021), dan limbah cair industri *seafood* (Amrutha dan Mithran 2019). Tegangan listrik yang dihasilkan limbah tersebut secara berurutan adalah 0,320 V; 0,745 V; 0,510 V; 0,332 V; dan 0,988 V. Tegangan listrik yang dihasilkan dari MFC dengan limbah industri perikanan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Kinerja MFC dengan substrat limbah cair industri perikanan

Limbah	Design MFC	Penurunan COD (%)	Penurunan BOD (%)	Tegangan listrik (mV)	Sumber
<i>Saline Seafood Wastewater</i>	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	80.20	-	633	You <i>et al.</i> (2010)
<i>Wastewater Seafood Processing</i>	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	85.10	-	460	Sun (2012)
Limbah Cair Perikanan Buatan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	37.40	32.05	213	Ibrahim <i>et al.</i> (2014) ^a
Limbah Cair Perikanan Buatan	- Wadah tunggal Lumpur aktif	49.90	55.91	534.7	Ibrahim <i>et al.</i> (2014) ^b
<i>Wastewater Seafood Processing</i>	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	91	-	689	Jayashree <i>et al.</i> (2014)
Limbah Cair Perikanan Buatan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	59.34	30.11	230	Ibrahim <i>et al.</i> (2017) ^a
Limbah Pemindangan Ikan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	30.41	20.50	510	Ibrahim <i>et al.</i> (2017) ^b
Limbah Pemindangan Ikan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	9.56	56.54	500	Ibrahim <i>et al.</i> (2017) ^c
Limbah Pemindangan Ikan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	83.50	83	480	Ibrahim <i>et al.</i> (2019) ^a

Limbah Pemindangan Ikan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	33.29	50.78	370	Ibrahim <i>et al.</i> (2019) ^b
Limbah Pemindangan Ikan	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	90	76	970	Ibrahim <i>et al.</i> (2020)
Limbah Industri Fillet Ikan Nila	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	77.92	69.02	550	Safitri <i>et al.</i> (2020)
Wastewater Seafood Processing	- Wadah tunggal - Lumpur aktif	90	-	980	Mamdooh <i>et al.</i> (2020)

Substrat penting untuk setiap proses biologis karena berfungsi sebagai karbon (nutrisi) dan sumber energi. Efisiensi dan kelayakan ekonomi untuk mengubah limbah organik menjadi bioenergi tergantung pada karakteristik dan komponen bahan limbah. Terutama komposisi kimia dan konsentrasi komponen yang dapat diubah menjadi produk atau bahan bakar, sangat penting untuk mempertimbangkan substrat potensial dalam sistem MFC (Pant *et al.*, 2010). Substrat tidak hanya mempengaruhi komposisi integral dari komunitas bakteri dalam biofilm anoda, tetapi juga kinerja MFC termasuk densitas daya (PD) dan efisiensi Coulomb (CE) (Chae *et al.*, 2009).

Demikian pula, kinerja empat substrat yang berbeda diselidiki dalam hal efisiensi coulombik (CE) dan output daya. Hasilnya menunjukkan bahwa MFC yang diberi substrat asetat menunjukkan CE tertinggi 72,3%, diikuti oleh butir (43,0%), propionat (36,0%) dan glukosa (15,0%) (Chae *et al.*, 2009). Untuk MFC yang dioperasikan dengan lumpur aktif, kisaran tegangan listrik yang dihasilkan adalah antara 0,079 V hingga 0,396 V. Operasi MFC dengan menggunakan substrat POME (*Palm Oil Mill Effluent*) menghasilkan tegangan listrik pada kisaran 0,053 V hingga 0,444 V. Selanjutnya, produksi tegangan listrik saat menggunakan substrat lindi berkisar antara 0,198 V dan 0,455 (Yusoh *et al.*, 2013).

Elektrisitas MFC Limbah Cair Perikanan

Microbial fuel cell (MFC) merupakan alat untuk mengkonversi energi kimia menjadi energi listrik dengan bantuan reaksi katalis dari mikroorganisme. Mikroorganisme yang digunakan pada MFC diperoleh dari penambahan lumpur aktif. Mikroorganisme pada lumpur aktif yang berperan dalam proses MFC adalah bakteri eksoelektrogen. Bakteri eksoelektrogen mampu mendegradasi bahan organik pada limbah sehingga menghasilkan CO₂, ion H⁺ dan elektron (Roy *et al.*, 2017). Perbedaan muatan elektron pada anoda dan katoda apabila dihubungkan dengan sirkuit konduktor akan menghasilkan energi listrik (Logan *et al.*, 2006).

Penelitian Simanungkalit (2021) yang menggunakan substrat limbah industri pengolahan ikan pindang dengan sistem MFC jembatan garam

menghasilkan rata-rata tegangan listrik berkisar antara $1,25 \pm 0,19$ V sampai $1,39 \pm 0,10$ V dengan variasi konsentrasi na-alginat pada jembatan garamnya. Steffen (2021) dengan sistem MFC yang sama menghasilkan tegangan listrik $0,88 \pm 0,04$ V dengan variasi karaginan dan karboksimetil selulose pada jembatan garamnya. Nair *et al.* (2013) yang menggunakan agar-agar sebagai jembatan garam dan limbah hotel sebagai substrat menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 0.95 V. Penelitian Jatoi *et al.* (2016) juga menghasilkan tegangan yang lebih kecil yaitu 0.67 V pada konsentrasi agar-agar 10%, sedangkan penelitian Hermayanti dan Nugraha (2014) memperoleh tegangan sebesar 0.787 V pada limbah cair tahu. Perbedaan hasil tersebut disebabkan oleh perbedaan jenis polimer dan limbah yang berbeda.

Kuat arus listrik yang dihasilkan berada pada kisaran tertinggi terdapat pada perlakuan konsentrasi na-alginat 20% yaitu sebesar 2.36 ± 0.26 mA sampai 3.01 ± 0.34 mA pada konsentrasi alginat pada jembatan garamnya 10 sampai 20% (Simanungkalit, 2021). Hasil penelitian Nair *et al.* (2013) menunjukkan bahwa arus listrik tertinggi yang dihasilkan pada konsentrasi agar-agar 10% yaitu sebesar 0.97 mA. Penelitian Jatoi *et al.* (2016), Hermayanti dan Nugraha (2014) yang juga menggunakan agar-agar sebagai media jembatan garam memperoleh arus listrik sebesar 0.0642 mA dan 0.88 mA.

Nilai daya listrik tertinggi dihasilkan oleh perlakuan konsentrasi na-alginat 20% dan nilai daya listrik terendah dihasilkan oleh perlakuan na-alginat 10% dengan masing-masing nilai sebesar 4.21 ± 0.72 mW dan 2.99 ± 0.66 mW. Penelitian Nair *et al.* (2013) yang menggunakan agar-agar sebagai jembatan garam menghasilkan nilai daya listrik tertinggi sebesar 0.92 mW. Perbedaan nilai daya listrik disebabkan oleh jenis limbah dan polimer yang digunakan.

Perbedaan nilai elektrisitas setiap perlakuan konsentrasi na-alginat disebabkan oleh perbedaan tingkat polimerisasi gel na-alginat. Jatoi *et al.* (2016) menyatakan bahwa konsentrasi polimer yang semakin tinggi menyebabkan gel semakin terpolimerisasi sehingga efektif dalam transfer proton dan menghambat tercampurnya kedua larutan serta mencegah difusi oksigen dari ruang katoda dengan demikian menjaga ruang anoda tetap anaerobik sehingga mendorong pertumbuhan bakteri anaerob untuk peningkatan pelepasan elektron. Penelitian Nair *et al.* (2013) menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *agarose* dari 7%-10% dapat meningkatkan nilai tegangan yang dihasilkan, namun pada konsentrasi *agarose* 11%-12% terjadi penurunan tegangan listrik yang disebabkan karena gel sangat terpolimerisasi sehingga mencegah transfer proton yang efektif dan membuat ruang anoda menjadi lebih asam sehingga mempengaruhi kinerja metabolisme mikroorganisme.

Kesimpulan dan Prospek Masa Depan

Kajian ini memberikan deskripsi tentang penggunaan limbah industri perikanan sebagai substrat yang telah digunakan dalam MFC untuk membangkitkan bioelektrik dibandingkan dengan penggunaan substrat dan limbah industri yang lain. Limbah industri perikanan yang digunakan sebagai substrat pada MFC menghasilkan elektrisitas yang tidak terlalu tinggi tetapi tidak terlalu rendah bila dibandingkan dengan substrat konvensional (karbohidrat sederhana) seperti: glukosa, asetat, dan laktat yang umumnya digunakan.

Limbah industri perikanan mengandung protein dan lemak yang tinggi dan cukup beragam dari jenis produk yang dihasilkan. Senyawa organik yang kompleks ini menyebabkan reaksi menjadi lambat dan energi yang dihasilkan menjadi rendah. Dibutuhkan mikroorganisme yang lebih efektif untuk melakukan biodegradasi senyawa kompleks tersebut sehingga lebih efektif dan efisien.

Teknologi MFC dengan substrat limbah cair industri perikanan masih perlu dikembangkan sebelum dapat diimplementasikan sebagai bentuk biolistrik dan pengolahan air limbah (misalnya, biaya bahan katoda, output daya kecil karena luas permukaan anoda, dan resistansi internal, dan substrat). Namun, itu telah terbukti bahwa penggunaan limbah industri perikanan pada operasional MFC merupakan teknologi yang berharga karena kemampuannya yang telah terbukti dapat menghasilkan energi terbarukan melalui sistem pengolahan limbah cair industri perikanan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amrutha KM, Mithran A. 2019. Bioelectricity production from seafood processing wastewater using microbial fuel cell. *International Research Journal of Engineering and Technology*. [diakses 2022 Jan 27]; 6(6):376-379. [https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=Bioelectricity+production+from+seafood+processing+wastewater+microbial+fuel+cell&btnG=#d=gs_qabs&u=%23p%3Dw3cL9C3KH3EJ.Chen YT. 2017. The factors affecting electricity consumption and the consumption characteristics in the residential sector. *Sustainability*. \[diakses 2021 Nov 12\]; 9\(8\): 1-6. <https://doi.org/10.3390/su9081484>.](https://scholar.google.com/scholar?hl=id&as_sdt=0%2C5&q=Bioelectricity+production+from+seafood+processing+wastewater+microbial+fuel+cell&btnG=#d=gs_qabs&u=%23p%3Dw3cL9C3KH3EJ.Chen%20YT.2017.The+factors+affecting+electricity+consumption+and+the+consumption+characteristics+in+the+residential+sector.+Sustainability.2021.Nov+12%3B9(8):1-6.+https://doi.org/10.3390/su9081484)
- Barua E, Hossain MS, Shaha M, Islam E, Zohora FT, Protity T, Mukharjee SK, Sarkar PK, Salimullah M, Hashem A. 2018. Generation of electricity using microbial fuel cell (MFC) from sludge, *Bangladesh J Microbiol* 35(1): 23-26
- Chae KJ, Choi MJ, Lee JW, Kim KY, Kim IS. 2009. Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells. *Biores. Technol.* 100, 3518–3525.
- Chen F, Zeng S, Luo Z, Ma J, Zhu Q, Zhang S. 2020. A novel MBBR-MFC integrated system for high-strength pulp/paper wastewater treatment and bioelectricity generation. *Separation Science and Technology*. [diakses 2022 Mar 17]; 55(14): 2490-2499. <https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1641519>.
- Damm A, Koberl J, Prettenthales F, Rogler N, Toglhofer C. 2017. Impacts of +2°C global warming on electricity demand in Europe. *Climate Services*. [diakses 2021 Nov 5]; 7:12-30. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.07.001>.
- Du Z, Li H, Gu T. 2007. A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for wastewater treatment and bioenergy, *Biotech-nol. Adv.* 25(5):464–482. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0734975007000547>.

- Florio C, Nastro RA, Flagiello F, Minutillo M, Pirozzi D, Pasquale V, Ausiello A, Toscano G, Jannelli E, Dumontet S. 2019. Biohydrogen production from solid phase-microbial fuel cell spent substrate: a preliminary study, *J. Clean. Prod.* 227: 506–511, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652619310327>.
- Hermayanti A, Nugraha I. 2014. Potensi perolehan energi listrik dari limbah cair industri tahu dengan metode *salt bridge microbial fuel cell*. *Jurnal Sains Dasar.* 3(2):162-168.
- Ibrahim B. 2005. Kaji ulang sistem pengolahan limbah cair industri hasil perikanan secara biologis dengan lumpur aktif. *Buletin Teknologi Hasil Perikanan.* 8(1): 31-41.
- Ibrahim B, Suptijah P, Prantommy. 2009. Pemanfaatan kitosan pada pengolahan limbah cair industri perikanan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia.* 12(2): 154-166.
- Ibrahim B, Salamah E, Alwiansyah R. 2014a. Pembangkit biolistrik dari limbah cair industri perikanan menggunakan *microbial fuel cell* dengan jumlah elektroda yang berbeda. *Jurnal Dinamika Maritim.* 4(1): 1-9.
- Ibrahim B, Suptijah P, Rosmalawati S. 2014b. Kinerja rangkaian seri sistem *microbial fuel cell* sebagai penghasil biolistrik dari limbah cair perikanan. *JPHPI.* 17(1): 71-79.
- Ibrahim B, Suptijah P, Adjani ZN. 2017a. Kinerja *microbial fuel cell* penghasil biolistrik dengan perbedaan jenis elektroda pada limbah cair industri perikanan. *JPHPI.* 20(2): 296-304.
- Ibrahim B, Suptijah P, Agung BS. 2017b. Pengaruh jarak elektroda *microbial fuel cell* pada limbah cair pemindangan ikan terhadap elektrisitas dan beban pencemaran. *JPHPI.* 20(3): 559-567.
- Ibrahim B, Suptijah P, Syahreza F. 2017c. Kinerja *microbial fuel cell* pada pengolahan limbah cair pemindangan dengan membran separator campuran polimer kitosan/PVA. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian.* 27(3): 235-241.
- Ibrahim B, Desniar, Suptijah P, Anwar C. 2019a. Characteristics and Performance of Biofilm On The Electrode of Bioelectrical Systems within Industrial Wastewater in Fisheries. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science.* 278: 1-8.
- Ibrahim B, Uju, Mukti AC. 2019b. Densitas biofilm pada elektroda berpengaruh positif terhadap produksi biolistrik *microbial fuel cell* limbah cair perikanan. *JPHPI.* 22(1): 71-79.
- Ibrahim B, Uju, Soleh AM. 2020. Kinerja membran komposit kitosan-karagenan pada sistem *microbial fuel cell* dalam menghasilkan biolistrik dari limbah pemindangan ikan. *JPHPI.* 23(1): 137-146.
- Jatoi AS, Mahar HS, Aziz S, Siddiq M, Furqan, Malik AA, Hussain S, Kakar E. 2016. To investigate the optimized conditions of salt bridge for bioelectricity generation from distillery waste water using microbial fuel cell. *Journal of Engineering Science.* 9(2): 29-34.

- Juwito AF, Pramonohadi S, Haryono T. 2012. Optimalisasi energi terbarukan pada pembangkit tenaga listrik dalam menghadapi desa mandiri energi di Margajaya. *Jurnal ilmiah semesta teknika*. 15(1): 22-34.
- [KEPMEN-ESDM] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral. 2015. Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 0074 Tahun 2015 Tentang Pengesahan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT PLN (Persero). Jakarta (ID): Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Kerr PG, Huang L. 2010. Review: Membranes for haemodialysis. *Nephrology*. 15(1): 381–385.
- [KLH] Kementerian Lingkungan Hidup. 2014. Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah. Jakarta (ID): Kementerian Lingkungan Hidup Republik Indonesia.
- Liu Z., Liu J., Zhang S., Su Z. 2009. Study of operational performance and electrical response on mediator-less microbial fuel cells fed with carbon- and protein-rich substrates. *Biochem. Eng. J.* 45, 185–191.
- Logan BE, Hamelers B, Rozendal E, Schroder U, Keller J, Freguia S, Aelterman P, Verstraete W dan Rabaey K. 2006. Microbial Fuel Cell: Methodology and Technology. *Environmental Science and Technology*. 40(17): 5181-5192.
- Mehravanfar H, Mahdavi MA, Gheshlaghi R. 2019. Economic optimization of stacked microbial fuel cells to maximize power generation and treatment of wastewater with minimal operating costs, *Int. J. Hydrog. Energy* 44(36) 20355–20367, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319919322219>.
- Muralidharan A, Babu OKA, Nirmalraman K, Ramya M. 2011. Impact of salt concentration on electricity production in microbial hydrogen based salt bridge fuel cells. *Indian Journal of Fundamental and Applied Life Sciences*. 1(2): 178-184.
- Nair R, Renganathan K, Barathi S, 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*. 2(5): 326-330.
- Nayak JK, Ghosh UK. 2018. An innovative mixotrophic approach of distillery spent wash with sewage wastewater for biodegradation and bioelectricity generation using microbial fuel cell. *Journal of Water Process Engineering*. [diakses 2022 Mar 14]; 23: 306-313. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.04.003>.
- Nwosu CN, Obot E, Onuu MU. 2019. Fossil fuel combustion and global warming abatement using nanomaterials and associated technologies. *Journal of the Nigerian Association of Mathematical Physics*. [diakses 2021 Nov 5]; 43:475-388. <http://e.nampjournals.org/product-info.php?pid3274.html>.
- Obasi LA, Opara CC, Okpala K, Oji A. 2013. Effect of sodium alginate on proton conductivity of cassava starch in a microbial fuel cell. *Greener Journal of Biological Sciences*. 3(2): 74-83.

- Pant D, Van Bogaert G, Diels L, Vanbroekhoven K. 2010. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource Technology* 101(6): 1533-1543
- Polontalo NF, Joelyna FA, Hadiyanto H. 2021. Production of bioelectricity from microalgae microbial fuel cell (MMFC) using *Chlorella pyrenoidosa* and batik wastewater. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [diakses 2022 Mar 16]; 1053(1): 1-10. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1053/1/012096>.
- Pour HR, Mirghaffari N, Marzban M, Marzban A. 2014. Determination of biochemical oxygen demand (BOD) without nitrification and mineral oxidant bacteria interferences by carbonate turbidimetry. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological, and Chemical*. 5(5): 90-95.
- Purwono, Hermawan, Hadiyanto. 2015. Penggunaan teknologi reaktor microbial fuel cell dalam pengolahan limbah cair industri tahu untuk menghasilkan energi listrk. *Jurnal Presipitasi*. 12(2): 57-65.
- Rosyadi FA, Laily EN, Sitoresmi S, Yushardi. 2017. Pemanfaatan alga hijau sebagai biokatoda pada PMFC (*photosynthetic microbial fuel cell*). *Jurnal Teknik Kimia*. [diakses 2022 Mar 8]; 12(1):4-8 <https://doi.org/10.33005/tekkim.v12i1.837>.
- Roy S, Marzorati S, Schievano A dan Pant D. 2017. Microbial Fuell Cells: Harvesters of Chemical Energy. *Encyclopedia of Sustainable Technologies*: 245-259.
- Ren L, Ahn Y, Logan BE. 2014. A two-stage microbial fuel cell and anaerobic fluidized bed membrane bioreactor (MFC-AFMBR) system for effective domestic wastewater treatment, *Environ. Sci. Technol*. 48(7): 4199–4206.
- Sahubawa L. 2011. Analisis dan prediksi beban pencemaran limbah cair pabrik pengalengan ikan. *Journal Manusia dan Lingkungan*. 18(1): 9-18.
- Santoro C, Arbizzani C, Erable B, Ieropoulos I. 2017. Microbial fuel cells: from fundamentals to applications. A review. *J. Power. Sources*, 356: 225–244.
- Sevda S, Sreekrishnan TR. 2012. Effect of salt concentration and mediators in salt bridge microbial fuel cell for electricity generation from synthetic wastewater. *Journal of Environmental Science and Health*. 47(1): 878–886.
- Simanungkalit NP. 2021. Produksi Biolistrik Limbah Cair Pemindangan Dengan Sistem *Salt Bridge Microbial Fuel Cell* Berbahan Natrium Alginat. [Skripsi]. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor.
- Sitorus B. 2010. Diversifikasi sumber energi terbarukan melalui penggunaan air buangan dalam sel elektrokimia berbasis mikroba. *Jurnal ELKHA*. 2(1): 10-14.
- Sivakumar D. 2020. Wastewater treatment and bioelectricity production in microbial fuel cell: salt bridge configurations. *International Journal of Environmental and Technology*. 1(1): 1-16.

- Steffen. 2021. Kinerja Pembangkit Biolistrik *Salt Bridge Microbial Fuel Cell* Variasi Rasio Karagenan- Karboksimetil Selulosa. [Skripsi]. Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Institut Pertanian Bogor.
- Sudaryati NL, Kasa IW, Suyasa IWB. 2012. Pemanfaatan sedimen perairan tercemar sebagai bahan lumpur aktif dalam pengolahan limbah cair industry tahu. *Jurnal Echotropic*. 3(1): 21-29.
- Sun H.L. 2012. Electricity generation from seafood wastewater in a single- and dual-chamber microbial fuel cell with CoTMPP oxygen-reduction electrocatalyst. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 1-6.
- Wafiroh S, Suyanto S, Yuliana Y. 2016. Pembuatan dan karakterisasi membran komposit kitosan sodium alginat terfosforilasi sebagai *proton exchange membrane fuel cell* (PEMFC). *Jurnal Kimia Riset*. 1(1): 14-21.
- Yuliati LN, Nurasrina I. 2012. Pesan, kesadaran, dan perilaku hemat listrik rumah tangga. *Jurnal Ilmu Keluarga dan Konsumen*. 5(1): 88-95.
- Yusoh S, Anuar N, Suja F, Ismail A, Basri NEA. 2013. Microbial Fuel Cells Using Different Types Of Wastewater For Electricity Generation And Simultaneously Removed Pollutant. *Journal of Engineering Science and Technology* 8(3): 316 – 325
- You S.J, Zhang J.N, Yuan Y.X, Ren N.Q, Wang X.H. 2010. Development of microbial fuel cell with anoxic/oxic design for treatment of saline seafood wastewater and biological electricity generation. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 85: 1077-1083.
- Zhang G, Zhou Y, Yang F.2019. Hydrogen production from microbial fuel cells-ammonia electrolysis cell coupled system fed with landfill leachate using Mo₂C/N-doped graphene nanocomposite as HER catalyst, *Electrochim. Acta* 299: 672–681, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013468619300684>.