

## KINERJA PEMBANGKIT BIOLISTRIK SALT BRIDGE MICROBIAL FUEL CELL VARIASI RASIO KARAGENAN- KARBOKSIMETIL SELULOSA

Bustami Ibrahim<sup>1\*</sup>, Safrina Dyah Hardiningtyas, Steffen

Departemen Teknologi Hasil Perairan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Dramaga, Jalan Agatis, Bogor 16680 Jawa Barat  
Telepon (0251) 8622909-8622906, Faks. (0251) 8622915

Diterima: 8 Februari 2022/Disetujui: 26 Juli 2022

\*Korespondensi: [bibrahim@apps.ipc.ac.id](mailto:bibrahim@apps.ipc.ac.id)

**Cara sitasi (APA Style 7<sup>th</sup>):** Ibrahim, B., Hardiningtyas, S. D., Steffen. (2022). Kinerja Pembangkit Biolistrik Salt Bridge Microbial Fuel Cell Variasi Rasio Karagenan-Karboksimitil Selulosa. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 25(2), 214-225. <http://dx.doi.org/10.17844/jphpi.v25i2.39872>

### Abstrak

Sistem *microbial fuel cell* (MFC) adalah teknologi terbarukan yang dapat mengubah materi organik menjadi energi berupa listrik. Tujuan penelitian ini menentukan rasio karagenan (K): karboksimitil selulosa (KMS) yang optimal pada jembatan garam untuk menghasilkan energi listrik dalam sistem MFC dan menentukan hasil listrik tertinggi dari limbah cair pindang ikan melalui teknologi *microbial fuel cell* (MFC) *salt bridge*. Jembatan garam K:KMS dibuat dengan perlakuan rasio K:KMS 1:1, 0,5:1, 0,6:1 (b/b). Perlakuan terbaik adalah K:KMS dengan perbandingan 1:1 menghasilkan tegangan listrik tertinggi sebesar 0,88 V. Jembatan garam K:KMS dengan perbandingan 0,5:1 menghasilkan kuat arus tertinggi sebesar 1,22 mA, serta daya listrik tertinggi sebesar 0,85 mW. Nilai efisiensi penurunan BOD, dan TAN mengalami penurunan sebesar 90,36%, dan 60,45% pada perlakuan rasio K:KMS 1:1. Sistem *salt bridge* MFC ini menunjukkan kinerja yang sangat baik dan berpotensi untuk dikembangkan di masa depan.

Kata kunci: jembatan garam karagenan-karboksimitil selulosa, limbah cair pindangan ikan, *microbial fuel cell*

## The Performance of Salt Bridge Microbial Fuel Cell Bioelectric Generator in Variated Carrageenan-Carboxymethyl Cellulose Ratio

### Abstract

The microbial fuel cell (MFC) system is a renewable technology that converts organic matter into energy in the form of electricity. The purpose of this study was to determine the highest electrical yield from fish 'pindang' liquid waste through salt bridge microbial fuel cell (MFC) technology and determine the optimal ratio of carrageenan: carboxymethyl cellulose in salt bridges to generate electrical energy in the MFC system. The carrageenan-carboxymethyl cellulose salt bridges were prepared by treating the different carrageenan-carboxymethyl cellulose compositions of 1: 1, 0.6:1, and 0.5: 1 (w/w). The highest electric voltage was produced from the carrageenan-carboxymethyl cellulose salt bridge treatment with a ratio of 1:1 with a value of 0.88 V. The carrageenan-carboxymethyl cellulose salt bridge with a ratio of 0.5:1 was produced the highest current strength of 1.22 mA and the highest electrical power of 0.85 mW. In addition, the reduction efficiency values of BOD and TAN on fishery waste with the treatment of C:CMC ratio of 1:1 were 90.36%, and 60.45%. System salt bridge MFC showed excellent performance and has the potential to be developed in the future.

Keywords: carrageenan-carboxymethyl cellulose salt bridge, fishery waste, microbial fuel cell

## PENDAHULUAN

Bahan bakar fosil dan proses energi tidak terbarukan mendominasi pasokan energi dengan batubara, minyak mentah, dan gas alam yang mewakili lebih dari 80% pada tahun 2018 (Rabaia *et al.*, 2020). Produksi pembangkit listrik Indonesia pada tahun 2018 mencapai 283,8 TWh (DEN 2019). Perkembangan industri dan pertumbuhan ekonomi yang pesat di berbagai belahan dunia telah menghasilkan fenomena pemanasan global dan perubahan iklim akibat dari peningkatan emisi karbondioksida (Mbarek *et al.*, 2018). Emisi gas rumah kaca terus mengalami kenaikan hampir pada setiap tahunnya. Data Badan Pusat Statistik menunjukkan bahwa jumlah total emisi gas tahun 2017 sebesar 1,35 Tg CO<sub>2</sub> meningkat di tahun 1,63 Tg CO<sub>2</sub> (Badan Pusat Statistik [BPS], 2020). Ibrahim *et al.* (2014) menyatakan bahwa limbah cair perikanan dapat digunakan sebagai salah satu sumber energi alternatif yang berpotensi sebagai penghasil energi listrik.

Limbah cair industri perikanan merupakan limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan produk perikanan. Limbah tersebut mengandung banyak bahan organik seperti lemak, protein, dan nutrisi lainnya (Ibrahim *et al.*, 2017). Kandungan bahan organik tersebut dapat menimbulkan masalah lingkungan karena menimbulkan bau yang tidak sedap serta merupakan polusi berat pada perairan (Scott & Hui, 2004). Pencemaran yang disebabkan oleh limbah cair perikanan dapat diatasi dengan memanfaatkan limbah cair itu sendiri. Limbah cair perikanan dapat dimanfaatkan sebagai substrat pada sel elektrokimia berbasis mikroba atau *microbial fuel cell* (MFC) (Ibrahim *et al.*, 2014).

Penelitian menggunakan sistem MFC satu bejana dengan substrat limbah cair perikanan menghasilkan nilai voltase 0,34 V (Ibrahim *et al.*, 2017). Pengoptimalan sistem MFC tersebut diperlukan separator untuk membuat pembangkit listrik yang berkelanjutan. Separator memainkan peran yang sangat penting dalam desain MFC karena dapat meningkatkan produksi daya dan *columbic efficiency* (CE). Bahan separator yang ideal harus memiliki koefisien transfer

proton yang tinggi. Peighambardoust *et al.* (2010) menyatakan bahwa sistem MFC dua bejana pada umumnya menggunakan mediator penukar proton yang berfungsi untuk mengalirkan ion yang dihasilkan dari anoda ke katoda.

Mediator penukar proton dapat berupa membran atau jembatan garam (*salt bridge*). Membran penukar proton yang digunakan umumnya adalah nafion (Fan *et al.*, 2020) dan CMI-7000 (Di Palma *et al.*, 2020). Membran tersebut mempunyai harga yang sangat mahal serta harus diimpor. Uddin *et al.* (2016) berpendapat bahwa alternatif yang dapat dilakukan adalah membuat jembatan garam menggunakan polimer alami. Agar-agar memiliki kemampuan elektrofisiologis yang dapat membantu menyeimbangkan konsentrasi ion antara elektroda dan dapat mencegah difusi oksigen pada larutan elektrolit (Kreiter & Pohl 2019).

Polimer karagenan-karboksimetil selulosa berpotensi dijadikan jembatan garam. Penelitian Zainuddin *et al.* (2018) menunjukkan konduktivitas optimal polimer elektrolit karagenan: karboksimetil-selulosa (20:80 (b/b)) 10<sup>-7</sup> S/cm dalam bentuk membran. Riset yang dilakukan Ibrahim *et al.* (2020) menggunakan karagenan sebagai membran yang dicampur dengan kitosan (1:1 (b/b)) memiliki konduktivitas 10<sup>-3</sup> S/cm. Penggunaan jembatan garam polimer karagenan-karboksimetil selulosa (K:KMS) sebagai mediator MFC dengan memanfaatkan limbah perikanan berfungsi sebagai pembangkit energi biolistrik. Tujuan penelitian *salt bridge* MFC ini adalah menentukan hasil listrik tertinggi dari limbah cair pindang ikan melalui teknologi *salt bridge microbial fuel cell*, serta menentukan rasio karagenan: karboksimetil selulosa yang optimal pada jembatan garam untuk menghasilkan energi listrik dalam sistem MFC.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan dan Alat

Limbah cair pindang ikan jenis bawean diambil dari lokasi pembuangan limbah CV. Limbah cair pindang ikan yang dipakai dari perebusan lima kali dengan umur satu hari.

Cindy Group Parung, Bogor menggunakan jeriken tanpa penyaringan. Lumpur aktif diambil dari PT Pahala Bahari Nusantara, Karawang. Bahan lain yang digunakan dalam penelitian ini adalah substrat limbah cair perikanan (limbah pengolahan pindang CV Cindy Group Parung, Bogor), lumpur aktif, karagenan (C<sub>24</sub>H<sub>36</sub>O<sub>25</sub>S<sub>2</sub><sup>-2</sup>)<sub>n</sub> (IndoGum), karboksimetil selulosa (C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>)<sub>n</sub> (IndoGum), KCl (Merck), akuades, KOH (Merck), KMnO<sub>4</sub> (Merck), H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Merck), C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O (Merck), C<sub>5</sub>FeN<sub>6</sub>Na<sub>2</sub>O (Merck), NaClO (Merck), lem kaca (Dextone), dan lem akrilik (Fulloc). Alat-alat yang digunakan dalam penelitian antara lain kaca silica (Magi) berbentuk balok dengan dimensi 8×8×40 cm<sup>3</sup> dan tebal 5 mm, kabel (Kabelindo) 10 cm, elektroda tembaga dimensi 1×0,1×7 cm<sup>3</sup> (PUDAK), batang grafit dimensi 1×1×7 cm<sup>3</sup> (IUGIS), aerator (Recent RC-410), multimeter digital (DT 831B), tabung erlenmeyer 50 mL, botol *wrinkle*, timbangan digital (Tanita KD 160), gelas piala, pipa paralon PVC (0,75 inchi), *stopwatch*, buret, oven, *vortex*, kuvet, spektrofotometer *single beam* (Optima SP-300), dan pH meter (ATC).

**Metode Penelitian**

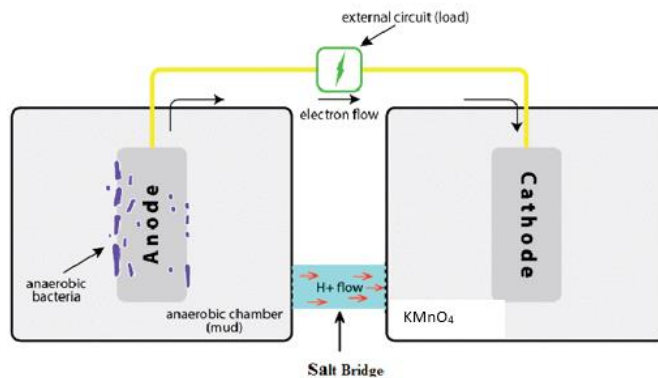
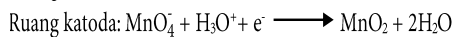
**Prosedur Penelitian**

Prosedur penelitian meliputi lima tahap. Kelima tahapan tersebut yaitu (1) pembuatan *microbial fuel cell* dua bejana, (2) pembuatan jembatan garam, (3) karakterisasi awal limbah cair pindang ikan, (4) pengukuran elektrisitas *salt bridge* MFC, dan (5) karakterisasi beban polutan limbah cair pindang ikan setelah pengukuran elektrisitas MFC selama 120 jam.

**Pembuatan MFC dua bejana**

Model alat MFC yang digunakan mengacu pada Parkash *et al.* (2015) dengan modifikasi. Pembuatan rancangan model dilakukan dengan wadah kaca berukuran 10×10×40 cm<sup>3</sup>. Katoda berbahan dasar grafit berdimensi 1×1×7 cm<sup>3</sup>. Anoda terbuat dari lempeng tembaga dengan dimensi 1×0,1×7 cm<sup>3</sup>. Kedua elektroda dipasangkan di bagian dalam wadah. Elektroda anoda dan katoda dipasang di bagian tengah wadah. Kedua elektroda dihubungkan dengan kawat tembaga yang ditambahkan pencapit tembaga sebagai pengalir listrik ke alat multimeter. Prototipe MFC dua bejana dapat dilihat pada Gambar 1.

Prinsip kerja alat MFC tipe *salt bridge* yang terdiri dari sepasang rangkaian elektroda katoda dan anoda dengan dua chamber adalah sebagai berikut: ruang katodik menggunakan elektroda berupa batang karbon grafit dan ruang anodik menggunakan elektroda berupa batang tembaga. Mikroba di ruang anodik dalam keadaan planktonik atau dengan membentuk biofilm, mengoksidasi substrat menghasilkan elektron, proton, dan metabolit lain sebagai produk akhir. Elektron yang dilepaskan oleh mikroba dikumpulkan oleh anoda dan mengalir ke katoda melalui rangkaian eksternal. Aliran elektron yang melalui rangkaian eksternal menghasilkan arus listrik. Proton mengalir menuju katoda melalui jembatan garam (Das, 2018). Reaksi yang berlangsung pada MFC dengan substrat berupa asam amino bebas dan NAD<sup>+</sup> sebagai elektron aseptor berdasarkan Hermayanti & Nugraha (2014) adalah:



Gambar 1 Prototipe *microbial fuel cell* dua bejana tipe *salt bridge*

Jembatan garam berperan untuk mempertahankan kenetralan muatan listrik antara ruang anoda serta ruang katoda. Kation pada ruang katoda ( $H_3O^+$ ) yang berlebih berdifusi ke jembatan garam, sedangkan elektron berdifusi melalui jembatan garam ke ruang anoda MFC.

### **Pembuatan jembatan garam**

Jembatan garam karagenan dibuat dengan memodifikasi prosedur yang dilakukan oleh Drisya & Manjunath (2017). Pembuatan jembatan garam karagenan menggunakan larutan KCl 1 M. Larutan KCl 1 M dibuat dengan melarutkan 74,55 g KCl dalam 1 L akuades. Rasio karagenan-karboksimetil selulosa yang digunakan untuk jembatan garam antara lain 1:1, 0,6:1, dan 0,5:1 (b/b). Campuran karagenan-karboksimetil selulosa 15 g dengan rasio berbeda masing-masing dicampurkan larutan 100 mL KCl 1 M di dalam beaker glass. Campuran tersebut lalu dipanaskan 70–80 °C selama dua sampai tiga menit, kemudian dituang ke dalam pipa PVC berdiameter 0,75 in dengan panjang 10 cm.

### **Karakterisasi awal limbah cair pemindangan ikan**

Limbah cair pindang ikan jenis bawean diambil dari lokasi pembuangan limbah CV Limbah cair pindang ikan yang dipakai dari perebusan lima kali dengan umur satu hari. Cindy Group Parung, Bogor menggunakan jerigen tanpa penyaringan. Lumpur aktif diambil dari PT Pahala Bahari Nusantara, Karawang menggunakan jerigen dan ditaruh di dalam *coolbox* selama perjalanan. Limbah cair kemudian diaklimatisasi dengan penambahan lumpur aktif dengan perbandingan 3:1 (v/v) selama seminggu di suhu ruang. Proses aklimatisasi lumpur aktif dan limbah cair di dalam wadah tertutup dan diberi aerator. Limbah selanjutnya dikarakterisasi dengan mengukur beberapa parameter seperti pH, *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), dan analisis *Total Ammonia Nitrogen* (TAN).

### **Pengukuran elektrisitas *salt bridge* MFC**

Pengukuran tegangan dan arus listrik dilakukan menggunakan multimeter setiap

jam selama 120 jam. Masing-masing elektroda dihubungkan dengan kabel. Kedua kabel dihubungkan oleh multimeter. Multimeter diatur untuk pengukuran tegangan dan arus listrik pada skala terkecil terlebih dahulu kemudian nilai yang tertera pada layar multimeter diamati pada selang waktu tertentu. Pengukuran nilai tegangan dan arus listrik dilakukan 3 kali ulangan pada masing-masing perlakuan.

### **Karakterisasi beban polutan limbah cair pindang ikan setelah pengukuran elektrisitas MFC selama 120 jam.**

Pengukuran karakterisasi beban polutan limbah cair pemindangan ikan setelah diberikan perlakuan untuk menghasilkan elektrisitas MFC selama 120 jam.

### **Prosedur analisis**

#### **Analisis BOD**

Analisis nilai BOD dilakukan dengan cara sampel limbah dimasukkan ke dalam erlenmeyer lalu diencerkan menggunakan akuades dengan faktor pengenceran 10 sampai 200 mL. Sampel kemudian diaerasi selama 30 menit. Sampel dipisahkan pada dua botol BOD, satu untuk inkubasi dan botol lainnya untuk mengukur DO pada larutan sampel. Botol sampel yang diinkubasi menggunakan botol khusus BOD dan pada saat diinkubasi tidak boleh ada gelembung udara dalam botol BOD tersebut. Sampel kemudian diinkubasi selama lima hari di tempat gelap pada suhu 20 °C. Nilai DO diukur untuk sampel yang telah diinkubasi dan kontrol.

#### **Analisis TAN**

Penentuan nilai total amoniak nitrogen (TAN) dilakukan dengan cara sampel dipipet sebanyak 25 mL dan dimasukkan ke dalam erlenmeyer 50 mL. Sampel kemudian ditambahkan 1 mL larutan fenol lalu dihomogenkan. Sampel selanjutnya ditambahkan 1 mL natrium nitroprusid lalu dihomogenkan. Sampel kemudian ditambahkan 2,5 mL larutan pengoksidasi lalu dihomogenkan. Larutan pengoksidasi dibuat dengan mencampurkan 100 mL larutan alkalin sitrat dengan 25 mL Natrium hipoklorit. Sampel pada erlenmeyer

kemudian ditutup menggunakan plastik atau parafin *film*. Sampel kemudian dibiarkan selama 1 jam sampai terbentuknya warna. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam kuvet pada alat spektrofotometer dengan panjang gelombang 640 nm.

**Rancangan Penelitian dan Analisis Data**

Rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan 1 faktor yaitu rasio jembatan garam karagenan-karboksimetil selulosa 1:1, 0.6:1, dan 0.5:1. Percobaan yang dilakukan sebanyak tiga ulangan. Model rancangan percobaan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.  $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$

Keterangan:

$Y_{ij}$  = nilai pengamatan pada taraf ke- $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) ulangan ke- $j$  ( $j = 1, 2, 3$ )

$\mu$  = nilai tengah atau rata-rata umum pengamatan

$\tau_i$  = pengaruh perlakuan rasio jembatan garam karagenan- karboksimetil selulosa ke- $i$

$\epsilon_{ij}$  = galat pada perlakuan ke- $i$  ulangan ke- $j$   
 Data penelitian ini diuji kenormalan dan kehomogenannya. Uji ANOVA dilakukan jika uji kenormalannya tidak signifikan. Parameter yang dianalisis antara lain COD, BOD, TAN, pH, tegangan, arus, dan daya listrik.

Analisis regresi polinomial pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui hubungan antara lamanya waktu pengamatan dengan nilai elektrisitas MFC yang dihasilkan. Model regresi polinomial dapat ditulis sebagai berikut.  $Y_i = b_0 + b_1X + b_2X^2 + \dots + b_kX^k + \epsilon$

Keterangan:

$Y$  = nilai elektrisitas

$b_0$  = intersep

$b_1, b_2, \dots, b_k$  = koefisien-koefisien regresi

$X$  = waktu pengamatan

$\epsilon$  = galat model regresi dikatakan signifikan jika  $p$ -value tidak melebihi  $\alpha = 0,05$

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Karakteristik Limbah Cair Pemindangan Ikan**

Limbah cair yang digunakan pada penelitian ini yaitu limbah pindang ikan yang diambil dari CV Cindy Group, Dramaga, Bogor. Limbah cair pindang ikan mengandung *biochemical oxygen demand* (BOD) serta senyawa nitrogen yang sangat tinggi (Chowdhury *et al.* 2010). Parameter yang dianalisis diantaranya pH, *biochemical oxygen demand* (BOD), *total ammonia nitrogen* (TAN). Karakteristik limbah cair pindang dan lumpur aktif dapat dilihat pada Tabel 1. Karakteristik limbah cair pindang ikan menunjukkan nilai BOD  $216,67 \pm 4,93$  mg/L, TAN  $0,55 \pm 0,05$  mg/L, dan nilai pH  $6,70 \pm 0,10$ . Nilai BOD tersebut dapat berasal dari senyawa karbon dan nitrogen (protein, peptida, dan senyawa volatil). Karakteristik campuran limbah cair pindang ikan dan lumpur aktif melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh Kementerian Lingkungan Hidup (KLH). Nilai pH dan TAN limbah pindang cair masih cenderung di bawah baku mutu limbah cair perikanan yang disarankan oleh KLH, namun jika terus dibuang ke badan sungai dapat menimbulkan risiko serius terhadap ekosistem perairan tersebut.

**Nilai *Biochemical Oxygen Demand* (BOD)**

Persentase penurunan nilai BOD terbesar terdapat pada perlakuan dengan rasio jembatan garam K:KMS 1:1 yaitu sebesar

Tabel 1 Karakteristik limbah cair pindang dan lumpur aktif

Parameter	Limbah cair pindang dan lumpur aktif	Setelah pengoperasian salt bridge MFC pada rasio karagenan : karboksimetil selulosa			Baku mutu limbah cair perikanan (KLH 2014)
		0,5:1	0,6:1	1:1	
pH	$6,70 \pm 0,10$	$8,20 \pm 0,10$	$8,40 \pm 0,10$	$8,60 \pm 0,10$	6—9
BOD (mg/L)	$216,67 \pm 4,93$	$20,88 \pm 1,1$	$19,54 \pm 1,60$	$15,15 \pm 1,00$	75
TAN (mg/L)	$0,55 \pm 0,05$	$0,31 \pm 0,0$	$0,29 \pm 0,00$	$0,22 \pm 0,00$	5

93,01%. Penurunan nilai BOD disebabkan mikroorganisme mendegradasi materi organik limbah pindang ikan. Hasil metabolisme mikroorganisme antara lain karbon dioksida, elektron, dan hidronium (Hermayanti & Nugraha 2014). BOD setelah proses operasi MFC menunjukkan adanya penurunan yang disebabkan oleh aktivitas bakteri pada lumpur aktif. Bakteri memanfaatkan bahan organik dalam limbah sebagai nutrisi bagi hidupnya. Mikroorganisme menguraikan bahan organik menjadi elektron dan proton pada ruang anoda (Jatoi *et al.* 2020).

### Nilai Total Amonia Nitrogen (TAN)

Efisiensi penurunan nilai TAN terbesar terdapat pada perlakuan dengan rasio jembatan garam K:KMS 1:1 yaitu sebesar 60,45%. Penurunan nilai TAN pada limbah cair pindang ikan mengindikasikan adanya bakteri nitrifier pada lumpur aktif. Bakteri nitrifikasi dan denitrifikasi efektif dalam menangani limbah dengan kandungan amonia yang tinggi (Huang *et al.* 2020). Proses degradasi bahan organik menghasilkan proton contohnya hidronium dan amonium. Efisiensi penghilangan TAN dengan transfer ion amonium ke ruang katoda melalui jembatan garam (Kim *et al.*, 2016). Penelitian Akaluka *et al.* (2016) mengenai *salt bridge* MFC yang mampu menurunkan nilai TAN limbah 88,4%. Akaluka *et al.* (2016) menyatakan bahwa penurunan nilai yang TAN disebabkan oleh aktivitas denitrifikasi dan oksidasi amonia yang terjadi di ruang anoda dalam kondisi oksigen tereduksi.

### Nilai pH

Kenaikan nilai pH terbesar terdapat pada perlakuan dengan rasio jembatan garam K:KMS 1:1 yaitu sebesar 28,35%. Nilai pH yang sedikit lebih tinggi biasanya direkomendasikan saat mengoperasikan MFC untuk menyeimbangkan reaksi biologis dan elektrokimia. Kaushik dan Chetal (2013) menyatakan bahwa kisaran pH anodik yang baik di MFC ditemukan bervariasi dari 7 hingga 9. Peningkatan derajat keasaman limbah cair pindang ikan disebabkan oleh penguraian senyawa organik oleh menjadi

trimetilamin dan senyawa volatil (Retnosari & Shovitri 2013).

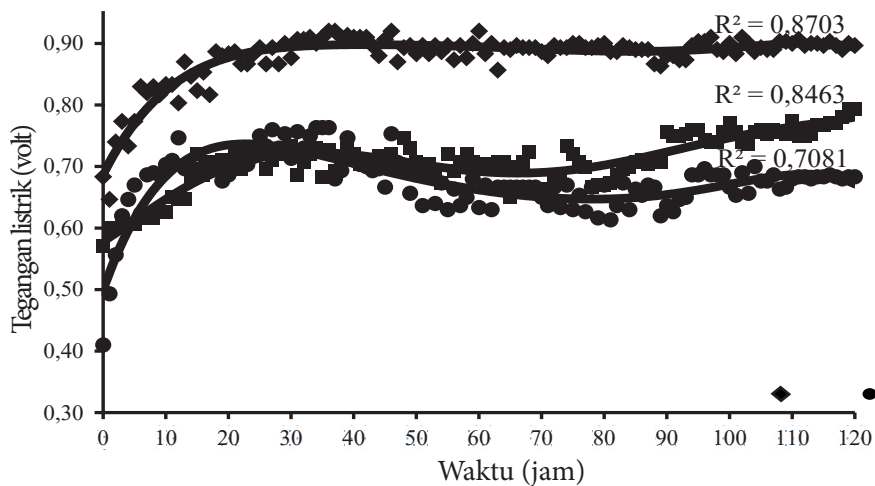
Zhang *et al.* (2020) menyatakan bahwa kenaikan nilai pH juga dapat disebabkan oleh menurunnya jumlah oksigen yang digunakan oleh bakteri saat menguraikan bahan organik. Metabolisme bakteri biasanya mengarah pada produksi senyawa asam lemah untuk mempertahankan pH intraselulernya (He *et al.* 2008). Peningkatan nilai pH dalam ruang anoda menyebabkan potensi anoda menjadi lebih negatif yang meningkatkan kinerja MFC. Nilai pH yang sedikit lebih tinggi biasanya direkomendasikan saat mengoperasikan MFC untuk menyeimbangkan reaksi biologis dan elektrokimia (Das 2018). Penelitian Sivakumar (2021) menunjukkan nilai pH limbah akhir sistem *salt bridge* MFC  $7,4 \pm 0,6$ .

### Nilai Tegangan Listrik

Perbedaan potensial listrik antara katoda dan anoda menghasilkan tegangan yang diukur dengan satuan volt. Hasil tegangan listrik yang terukur dari alat MFC dengan jembatan garam dapat dilihat pada Gambar 2.

Rataan nilai tegangan listrik sistem *salt bridge* MFC fluktuatif selama pengamatan. Perlakuan jembatan garam dengan dengan rasio jembatan garam K:KMS=1:1 menghasilkan nilai rata-rata tegangan listrik tertinggi yaitu sebesar  $0,88 \pm 0,04$  V. Perlakuan jembatan garam dengan dengan rasio jembatan garam K:KMS = 0,6:1 menghasilkan nilai rata-rata tegangan listrik terendah yaitu sebesar  $0,68 \pm 0,05$  V. Nilai voltase *salt bridge* MFC pada jam ke-0 disebabkan perbedaan muatan potensial pada kedua chamber. Muatan ion Na<sup>+</sup> dan Cl<sup>-</sup> pada limbah cair ikan pindang merupakan pengaruh terbesar perbedaan potensial *salt bridge* MFC jam ke-0 (Hassan *et al.* 2016). Nilai tegangan pada jam berikutnya dipengaruhi oleh bakteri yang mengubah bahan organik (Jatoi *et al.* 2016).

Riset Sivakumar (2021) dengan sistem MFC dua bejana pada limbah industri susu dengan menggunakan jembatan garam agar menghasilkan tegangan listrik paling besar 0,73 V. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh jenis komposit yang

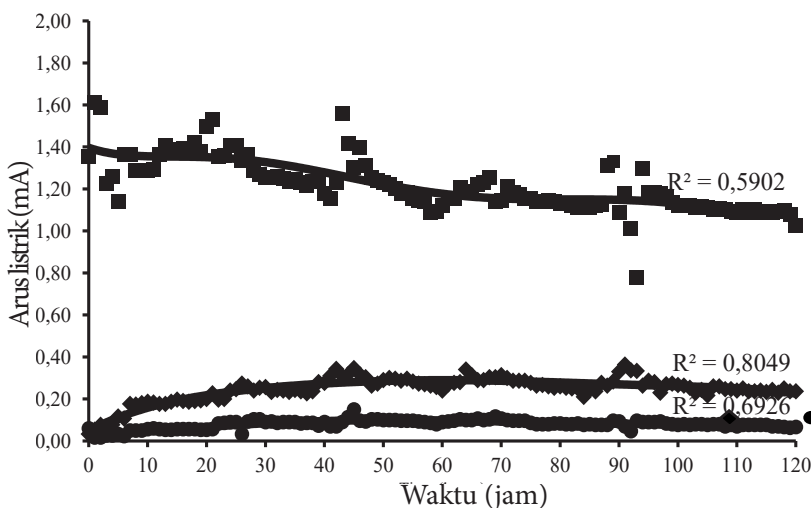


Gambar 2 Hasil tegangan listrik yang terukur dari alat MFC dengan jembatan garam rasio karagenan : karboksimetil selulosa yang berbeda-beda; (♦) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinom 1:1; (—) polinom 0,6:1; (—) polinom 0,5:1.  $R^2$  menunjukkan koefisien determinasi.

digunakan pada sistem MFC dua bejana. Christwardana *et al.* (2020) mengaplikasikan komposit K:KMS sebagai membran pada *yeast* MFC dengan substrat glukosa. Nilai tegangan listrik yang dihasilkan 0,67 V. Penelitian Hermayanti & Nugraha (2014) menghasilkan voltase sebesar 0,83 V dengan MFC agar *salt bridge* dengan bantuan oksidator  $KMnO_4$  0,1 M. Perbedaan nilai tegangan dengan literatur dapat disebabkan *salt bridge* dan limbah yang berbeda.

### Nilai Arus Listrik

Arus listrik adalah aliran elektron yang bergerak atau mengalir dalam satuan waktu yang arahnya berlawanan dengan arah elektron. Elektron akan mengalir dari kutub negatif ke kutub positif, karena elektron yang bermuatan negatif akan tertarik oleh kutub bermuatan positif. Nilai arus listrik yang terjadi pada MFC jembatan garam pada rasio karagenan dan karboksimetil selulosa dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Nilai arus listrik yang terjadi dari alat MFC dengan jembatan garam rasio karagenan : karboksimetil selulosa yang berbeda-beda; (♦) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinom 1:1; (—) polinom 0,6:1; (—) polinom 0,5:1.  $R^2$  menunjukkan koefisien determinasi.

Nilai rata-rata arus listrik tertinggi dihasilkan oleh perlakuan dengan perbandingan 0,5:1 yaitu sebesar  $1,22 \pm 0,13$  mA. Perlakuan jembatan garam dengan dengan rasio jembatan garam K:KMS = 0,6:1 menghasilkan nilai rata-rata arus listrik terendah yaitu sebesar  $0,08 \pm 0,02$  mA. Penelitian Sivakumar (2021) dengan sistem MFC dua bejana pada limbah industri susu menggunakan jembatan garam agar menghasilkan tegangan listrik paling besar menghasilkan arus listrik paling besar 15,91 mA. Arus listrik didefinisikan banyaknya muatan listrik yang mengalir tiap satuan waktu (Naik & Jujjavarappu, 2018). Muatan ion pada limbah pindang berupa ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  yang berbeda dengan bejana katoda yang berisikan  $\text{KMnO}_4$  (l) 1M menciptakan perbedaan potensial, sehingga muatan—muatan tersebut bergerak dan terbaca pada multimeter sebagai arus listrik (Apse-Apsitis *et al.*, 2018).

Penelitian Christwardana *et al.* (2020) mengaplikasikan komposit K:KMS sebagai membran pada *yeast* MFC dengan substrat glukosa. Nilai arus listrik yang dihasilkan 1,89 mA. Penelitian Hermayanti & Nugraha (2014) menghasilkan kuat arus sebesar 0,89 mA dengan MFC agar *salt bridge* dengan bantuan oksidator  $\text{KMnO}_4$  0,1M. Perbedaan nilai tegangan dengan literatur dapat disebabkan *salt bridge* dan limbah yang berbeda.

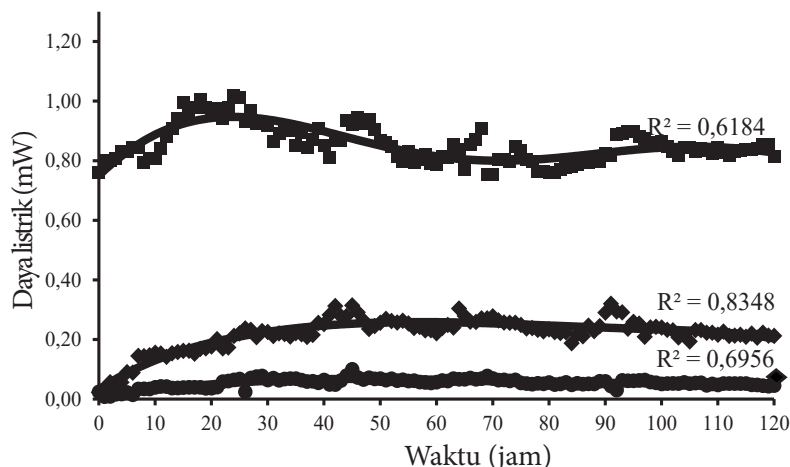
Rasio K:KMS 0,5:1 berbeda nyata antara rasio 1:1 dan 0,6:1. Perbedaan tersebut

disebabkan oleh nilai zeta potensial. Zeta potensial merupakan potensial listrik yang mampu memindahkan partikel bermuatan dari elektroda satu ke elektroda lainnya (Sapsford *et al.*, 2011). Nilai zeta potensial untuk karagenan dan karboksimetil selulosa secara berturut-turut adalah -30 mV (Barbosa *et al.*, 2019) dan -15 mV (Cai *et al.*, 2013) pada pH 8. Zeta potensial pada rasio K:KMS yang berbeda memengaruhi jumlah muatan listrik yang bergerak pada sistem MFC ini. Komposit antara karagenan dan karboksimetil selulosa memiliki daya tarik elektrostatis yang efektif sehingga dapat digunakan untuk menangkap fluoroquinolones dari dalam air (Li *et al.*, 2022).

### Nilai Daya Listrik

Sumber energi berupa tegangan listrik akan menghasilkan daya listrik. Sistem MFC dengan jembatan garam yang memiliki tegangan listrik dan menghasilkan arus listrik menunjukkan adanya daya listrik seperti dapat dilihat pada Gambar 4.

Rataan daya listrik tertinggi dan terendah dihasilkan oleh perlakuan dengan perbandingan 0,5:1 yaitu sebesar  $0,85 \pm 0,06$  mW. Perlakuan jembatan garam dengan dengan rasio jembatan garam K:KMS= 0,6:1 menghasilkan nilai rata-rata daya listrik terendah yaitu sebesar  $0,05 \pm 0,01$  mW. Nilai daya listrik yang dihasilkan pada riset Sivakumar (2021) dengan sistem MFC dua



Gambar 4 Daya listrik yang terjadi dari alat MFC dengan jembatan garam rasio karagenan : karboksimetil selulosa yang berbeda-beda; (◆) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinomial 1:1; ( ) polinomial 0,6:1; ( ) polinomial 0,5:1.  $R^2$  menunjukkan koefisien determinasi.



bejana pada limbah industri susu dengan menggunakan jembatan garam agar sebesar 11,69 mW.

Christwardana *et al.* (2020) mengaplikasikan komposit K:KMS sebagai membran pada yeast MFC dengan substrat glukosa. Nilai arus listrik yang dihasilkan 1,26 mW. Penelitian Hermayanti & Nugraha (2014) menghasilkan kuat arus sebesar 0,07 mW dengan MFC agar *salt bridge* dengan bantuan oksidator  $\text{KMnO}_4$  0,1M. Perbedaan nilai tegangan dengan literatur dapat disebabkan *salt bridge* dan limbah yang berbeda.

Nilai elektrisitas yang berbeda tiap perlakuan dapat disebabkan jumlah gugus alkil bermuatan negatif. Selulosa yang berada dalam matriks karagenan kemungkinan besar teroksidasi menjadi oksidasi-karboksimetil selulosa karena berada dalam kondisi asam untuk waktu yang lama. Asam tersebut berasal dari asam organik dari proses anaerobik oleh bakteri (Christwardana *et al.*, 2020).

Potensi MFC perlahan menurun karena terjadi fase lag di mana bakteri beradaptasi dengan lingkungan baru. Potensi meningkat secara eksponensial, diikuti oleh fase stationary hingga potensi menurun sebelum akhir siklus karena penipisan substrat dan denitrifikasi. Hal ini menyebabkan sifat anolit berubah menjadi lebih basa dan berpengaruh pada potensi anoda. Mook *et al.* (2012) menyatakan bahwa denitrifikasi yang berlangsung optimal pada pH 7-8. Nilai pH sistem MFC yang meningkat akan menyebabkan penurunan nilai elektrisitas (Purwono *et al.*, 2015).

Gugus karboksil pada oksiselulosa membantu meningkatkan mobilitas elektron. Christwardana *et al.* (2020) berpendapat keberadaan oksidasi-selulosa berperan penting dalam aktivitas transfer elektron dan sedikit mengubah kondisi lingkungan pada sistem anoda. Polimer komposit K:KMS memiliki ikatan rangkap terkonjugasi pada rantai utama K:KMS yang dapat menginduksi konduktivitas listrik (Zainuddin *et al.*, 2018).

Perbedaan rasio K:KMS berimplikasi terhadap nilai voltase, arus, dan daya listrik *salt bridge* MFC. Gugus  $-\text{CH}_2\text{OH}$  dalam karboksimetil selulosa dioksidasi menjadi  $-\text{COOH}$  (karboksil) dengan melepaskan ion hidronium (proton) dan mendapatkan

oksigen dari asam. Variasi rasio K:KMS pada jembatan garam menyebabkan mobilitas elektron berbeda-beda.

Fluktuasi aliran listrik terjadi dapat karena interaksi ion dalam ruang anoda dan katoda. Ion-ion  $\text{Na}^+$  dan  $\text{Cl}^-$  dalam larutan limbah cair pindang ikan dapat mengganggu aliran  $\text{H}_3\text{O}^+$  ke ruang katoda (Hassan *et al.* 2016). Penurunan atau peningkatan elektrisitas (kuat arus dan tegangan listrik) memiliki hubungan dengan TEA (*Terminal Electron Acceptor*) seperti oksigen, nitrit, nitrat, dan sulfat yang berdifusi melalui sel (Logan *et al.*, 2005). Elektron tersebut ditangkap oleh anoda dan proton menuju katoda sehingga menghasilkan biolistrik. Ketidakseimbangan konsentrasi proton dalam sistem MFC yang menyebabkan fluktuasi arus (Hassan *et al.*, 2016). Rasio K:KMS terbaik adalah 0,5:1 karena menghasilkan daya listrik terbesar dibandingkan perlakuan lainnya.

## KESIMPULAN

Limbah cair pindang ikan mampu menghasilkan listrik melalui konfigurasi *salt bridge* MFC. Rasio K:KMS terbaik adalah 0,5:1 dengan nilai rata-rata daya listrik yang dihasilkan sebesar  $0,85 \pm 0,06$  mW, nilai rata-rata tegangan listrik  $0,79 \pm 0,04$  V, dan nilai rata-rata kuat arus  $1,22 \pm 0,13$  mA. Energi listrik yang dihasilkan sistem MFC ini didapatkan dari pemecahan substrat organik, sehingga menurunkan nilai, BOD, dan TAN limbah cair proses pindangan ikan. Nilai pH pada limbah cair pindang ikan setelah pengoperasian *salt bridge* MFC meningkat hingga 8,2—8,6.

## DAFTAR PUSTAKA

- Apse-Apsitis, P., Vitols, K., Grinfogels, E., Senfelds, A., & Avotins, A. (2018). Electricity meter sensitivity and precision measurements and research on influencing factors for the meter measurements. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 7(2), 48—52.
- Akaluka, C. K., Orji, J. C., Braide, W., Egbadon, E. O., & Adeleye, S. A. (2016). Abattoir wastewater treatment and energy recovery using a ferricyanide-catholyte microbial fuel cell. *International Letters of*

- Natural Sciences*. 55, 68—76.
- Barbosa, J. A., Abdelsadig, M.S., Conway, B.R., & Merchant, H.A. (2019). Using zeta potential to study the ionisation behaviour of polymers employed in modified-release dosage forms and estimating their pKa. *International Journal of Pharmaceutics X*. 24(1), 1—11.
- Badan Pusat Statistik. (2020). Statistik Lingkungan Hidup Indonesia: Air dan Lingkungan.
- Cai, T., Yang, Z., Li, H., Yang, H., Li, A., & Cheng, R. (2013). Effect of hydrolysis degree of hydrolyzed polyacrylamide grafted carboxymethyl cellulose on dye removal efficiency. *Cellulose*. 20(5), 2605—2614.
- Chowdhury, P., Viraraghavan, T., & Srinivasan, A. 2010, Biological treatment processes for fish processing wastewater. *Bioresource Technology*. 101:439—449.
- Christwardana, M., Handayani, A. S., & Yudianti, R. (2020). Cellulose-carrageenan coated carbon felt as potential anode structure for yeast microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 1(1), 1—11.
- Das D. (2018). *Microbial Fuel Cell: A Bioelectrochemical System that Converts Waste to Watts*. Springer.
- Dewan Energi Nasional. (2019). Outlook Energi Indonesia (OEI) 2019. <https://www.esdm.go.id>.
- Di Palma, L., Bavasso, I., Sarasini, F., Tirillò, J., Puglia, D., Dominici, F., Torre, L.. (2018). Synthesis, characterization and performance evaluation of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/PES nano composite membranes for microbial fuel cell. *European Polymer Journal*. 99, 222—229.
- Drisy, C. M., & Manjunath, N. T. (2017). Impact of nanoparticle incorporated *salt bridge* on bioelectricity production and treatment efficiency of microbial fuel cell. *International Journal for Scientific Research and Development*. 5(6), 2104—2107.
- Fan, L., Shi, J., & Xi, Y. (2020). PVDF-modified Nafion membrane for improved performance of MFC. *Membranes*. 10(8), 1—14.
- Hassan, H., Jin, B., Dai, S., Ma, T., & Saint, C. (2016). Chemical impact of catholytes on *Bacillus subtilis*-catalysed microbial fuel cell performance for degrading 2, 4-dichlorophenol. *Chemical Engineering Journal*. 301, 103—114.
- He, Z., Huang, Y., Manohar, A. K., & Mansfeld, F. (2008). Effect of electrolyte pH on the rate of the anodic and cathodic reactions in an air-cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*. 74, 78—82.
- Hermayanti, A., & Nugraha, I. (2014). Potensi perolehan energi listrik dari limbah cair industri tahu dengan metode *salt bridge* microbial fuel cell. *Sains Dasar*. 3(2), 162—168.
- Huang, S., Zhu, G., & Gu, X. (2020). The relationship between energy production and simultaneous nitrification and denitrification via bioelectric derivation of microbial fuel cells at different anode numbers. *Environmental Research*. 184:1—7.
- Ibrahim, B., Salamah, E., & Alwinsyah, R. (2014). 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., & Adzani, Z. N. (2017). Kinerja microbial fuel cell penghasil biolistrik dengan perbedaan jenis elektroda pada limbah cair industri perikanan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*. 20(2), 296—304.
- Ibrahim, B., Uju, & Soleh, A. M. (2020). Kinerja membran komposit kitosan-karagenan pada sistem microbial fuel cell dalam menghasilkan biolistrik dari limbah pemandangan ikan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*. 23(1), 137—146.
- Jatoi, A. S., Baloch, A. G., Jadhav, A., Nizamuddin, S., Aziz, S., Soomro, S. A., Nazir, I., Abro, M., Baloch, H. A., Ahmed, J., & Mubarak, N. M. (2020). Improving fermentation industry sludge treatment as well as energy production with constructed dual chamber microbial fuel cell. *Springer Nature Applied Sciences*. 2(1), 2—9.

- Jatoi, A. S., Mahar, H., Aziz, S., Siddique, M., Memon, F., Malik, A. A., Hussain, S., & Kakar, E. (2016). To investigate the optimized conditions of *salt bridge* for bio-electricity generation from distillery waste water using microbial fuel cell. *NUST Journal of Engineering Sciences*. 9(2), 29–34.
- Kaushik, A., & Chetal, A. (2013). Power generation in microbial fuel cell fed with post methanation distillery effluent as a function of pH microenvironment. *Bioresource Technology*. 147, 77–83.
- Kementerian Lingkungan Hidup. (2014). Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah.
- Kim, T., An, J., Lee, H., Jang, J. K., & Chang, I. S. (2016). pH-dependent ammonia removal pathways in microbial fuel cell system. *Bioresource Technology*. 215, 290–295.
- Kreiter, J., & Pohl, E. E. (2019). A micro-agar *salt bridge* electrode for analyzing the proton turnover rate of recombinant membrane proteins. *Journal of Visualized Experiments*. 143, 1–6.
- Li, N., Gao, B., Yang, R., & Yang, H. (2022). Simple fabrication of carboxymethyl cellulose and  $\kappa$ -carrageenan composite aerogel with efficient performance in removal of fluoroquinolone antibiotics from water. *Front. Environ. Sci. Eng.* 16, 133 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11783-022-1568-x>.
- Logan, B. E., Murano, C., Scott, K., Gray, N. D., & Head, I. M. (2005). Electricity generation from cysteine in a microbial fuel cell. *Water Research*. 39(5), 942–952.
- Mbarek, M. B., Saidi, K., & Rahman, M. M. (2018). Renewable and non-renewable energy consumption, environmental degradation and economic growth in Tunisia. *Quality & Quantity*. 52(3), 1105–1119.
- Mook, W. T., Chakrabarti, M. H., Aroua, M. K., Khan, G. M. A., Ali, B. S., Islam, M. S., & Hassan, M. A. (2012). Removal of total ammonia nitrogen (TAN), nitrate and total organic carbon (TOC) from aquaculture wastewater using electrochemical technology: A review. *Desalination*. 285, 1–13.
- Naik, S., & Jujavarappu, E. S. (2018). Simultaneous bioelectricity generation from cost-effective MFC and water treatment using various wastewater samples. *Environmental Science and Pollution Research*. 27(22), 27383–27393.
- Parkash, A., Aziz, S., & Soomro, S. A. (2015). Impact of salt concentrations on electricity generation using hostel sludge based dual chambered microbial fuel cell. *Journal Bioprocess Biotech*. 5(8), 1–6.
- Peighambardoust, S. J., Rowshanzamir, S., & Amjadi, M. (2010). Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *International Journal of Hydrogen Energy*. 35, 9349–9384.
- Purwono, Hermawan, & Hadiyanto. (2015). Penggunaan teknologi reaktor microbial fuel cell dalam pengolahan limbah cair industri tahu untuk menghasilkan energi listrik. *Jurnal Presipitasi*. 12(2), 57–65.
- Rabaia, M. K. H., Abdelkareem, M. A., Sayed, E. T., Elsaid, K., Chae, K. J., Wilberforce, T., & Olabi, A. G. (2021). Environmental impacts of solar energy systems: A review. *Science of the Total Environment*. 754:1–19.
- Retnosari, A. A., & Shovitri, M. (2013). Kemampuan isolat *Bacillus* sp. dalam mendegradasi limbah tangki septik. *Jurnal Sains dan Seni ITS*. 2(1), 7-11.
- Sapsford, K. E., Tyner, K. M., Dair, B. J., Deschamps, J. R., & Medintz, I. L. (2011). Analyzing nanomaterial bioconjugates: a review of current and emerging purification and characterization techniques. *Analytical Chemistry*. 83(12), 4453–4488.
- Sivakumar, D. (2021). Wastewater treatment and bioelectricity production in microbial fuel cell: *salt bridge* configurations. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18(6), 1379-1394.
- Türker, O. C., & Yakar, A. (2017). A hybrid constructed wetland combined with microbial fuel cell for boron (B) removal and bioelectric production. *Ecological Engineering*. 102, 411–421.
- Uddin, S. S., Roni, K. S., & Shatil, A. H. M.

- (2016). Double compartment microbial fuel cell design using salt bridge as a membrane with sucrose and starch as a substrate. *International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering*. 1(1), 1—4.
- Wang, J., Song, X., Wang, Y., Abayneh, B., Li, Y., Yan, D., & Bai, J. (2016). Nitrate removal and bioenergy production in constructed wetland coupled with microbial fuel cell: Establishment of electrochemically active bacteria community on anode. *Bioresource Technology*. 221, 358—365.
- Zainuddin, N.K., Saadiah, M. A., Abdul Majeed, A. P. P., & Samsudin, A. S. (2018). Characterization on conduction properties of carboxymethyl cellulose/kappa carrageenan blend-based polymer electrolyte system. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 23(4), 321—330.
- Zhang, Y., Xu, Q., Huang, G., Zhang, L., & Liu, Y. (2020). Effect of dissolved oxygen concentration on nitrogen removal and electricity generation in self pH-buffer microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 45(58), 34099—34109.

## FIGURE AND TABLE TITLES

- Figure 1* Characteristics of fish boiled processing wastewater and active sludge
- Figure 2* Electrical voltage of salt bridge MFC with different K:KMS ratio; (◆) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinom 1:1; (—) polinom 0,6:1, (—) polinom 0,5:1. R<sup>2</sup> shows the determination of coefficient
- Figure 3* Electrical current of salt bridge MFC with different K:KMS ratio; (◆) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinom 1:1; (—) polinom 0,6:1, (—) polinom 0,5:1. R<sup>2</sup> shows the determination of coefficient
- Figure 4* Electrical power of salt bridge MFC with different K:KMS ratio; (◆) 1:1; (●) 0,6:1; (■) 0,5:1; (—) polinom 1:1; (—) polinom 0,6:1, (—) polinom 0,5:1. R<sup>2</sup> shows the determination of coefficient
- Table 1* The scheme of salt bridge MFC prototype