
Microbial fuel cells (MFC): Sebuah teknologi untuk biokonversi energi kimia pada limbah organik menjadi biolistrik

Yohanna Anisa Indriyani^{1*}, Rustam Efendi²

¹Alumni Jurusan Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, IPB University, Indonesia

²Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sulawesi Tenggara, Indonesia

*Corresponding author: mynamemyoha@gmail.com

ABSTRAK

Microbial fuel cells (MFC) adalah alat bioelektrokimia yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik melalui aktivitas katalitik mikrob *electrogen*. Indonesia merupakan negara dengan populasi penduduk terpadat ke-4 di dunia, yang menghadapi tantangan akan kebutuhan energi terbarukan dan pengolahan limbah. Tulisan ini akan fokus pada topik pengolahan limbah di mana MFC menjadi salah satu teknologi alternatif untuk biokonversi limbah organik menjadi energi (biolistrik), serta tantangan-tantangan dalam pengembangannya. Beragamnya limbah organik yang dapat dimanfaatkan sebagai substrat serta besarnya potensi mikrob *indigenous* dari negeri mega-biodiversitas ini untuk dieksplorasi sebagai biokatalisator MFC menunjukkan potensi besar pengembangan teknologi ini di Indonesia. Sejumlah limbah organik lokal telah diteliti dan menunjukkan potensi pengurangan COD (*COD removal*) mencapai 13.33-77.22% dan potensi listrik yang dihasilkan sekitar 7.74-700 mW m⁻². MFC menghadirkan teknologi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, serta menawarkan pemecahan masalah dalam menangani limbah dibandingkan teknologi pengolahan limbah secara fisik-kimia-biologis konvensional yang masih dihadapkan pada sejumlah tantangan, di antaranya boros energi dan biaya. Meski demikian, aplikasi skala besar teknologi MFC masih menghadapi kendala teknis dan ekonomis.

Kata kunci: aktivitas katalitik, elektron, mikrob *electrogen*, teknologi hijau, teknologi ramah lingkungan.

ABSTRACT

Microbial fuel cells (MFC) are bioelectrochemical devices that convert chemical energy to electrical energy through the catalytic activity of electrogenic microbes. Indonesia is the 4th most populous country in the world, which faces the challenges of renewable energy needs and waste treatment. This paper will focus on the topic of waste/wastewater treatments where MFC is one of the alternative technologies for the bioconversion of organic waste into energy (bioelectricity), as well as the challenges in its development. The variety of organic wastes that can be utilized as substrates as well as the potential of indigenous microbes from this mega-biodiversity country to be explored as MFC biocatalysts indicate the great potential for the development of this technology in Indonesia. Several local organic wastes have been investigated and showed COD removal potential between 13.33-77.22% and electricity generation potential around 7.74-700 mW m⁻². MFC presents a technology that is sustainable and environmentally friendly and offers a solution to the problem of dealing with waste compared to conventional physical-chemical-biological waste treatment technologies that are still faced with several challenges, including energy- and cost-intensive. However, large-scale applications of MFC technology still face technical and economic obstacles.

Keywords: catalytic activity, electron, electrogenic microbe, environmentally friendly technology, green technology.

1. PENDAHULUAN

Populasi umat manusia bertambah pesat dan diperkirakan mencapai sembilan milyar pada 2050 [1]. Industrialisasi yang kian pesat hingga era Revolusi Industri 4.0 ini, turut pula memberikan kontribusi besar pada produksi limbah, termasuk limbah organik (baik padat maupun cair). Teknologi untuk mengatasi problem limbah telah banyak dikembangkan, terutama melalui pendekatan fisika, kimia, dan biologi. Dari sekian banyak teknologi konvensional yang telah dikembangkan dan diaplikasikan, beberapa dekade ini telah dikembangkan teknologi *microbial fuel cells* (MFC) untuk memanen energi dari biomassa terlarut [2]. MFC menghasilkan listrik dengan mengkonversi energi kimia yang terkandung di dalam bahan organik, tanpa memerlukan perlakuan khusus terhadap gas yang dihasilkan. Selain itu, biokonversi dapat terjadi pada suhu di bawah 20° C dan pada tingkat konsentrasi substrat yang rendah, sementara degradasi anaerobik umumnya tidak mampu (karena laju reaksi yang rendah dan kelarutan yang tinggi dari metana yang dihasilkan) [3].

Fenomena bioelektrik pertama kali diamati oleh Potter pada tahun 1908 saat mempelajari biodegradasi oleh mikroba. Dengan memanfaatkan *Saccharomyces*, ia menemukan sel bahan bakar mikroba pertama pada tahun 1911. Sekitar dua dekade kemudian, Cohen memperkenalkan MFC bertumpuk (*stacked-MFC*) pada tahun 1931 yang menghasilkan sejumlah besar tegangan, yakni mencapai 35 V. Pengembangan MFC untuk aplikasi lain diperkenalkan oleh DelDuca et al. [4], yakni untuk produksi hidrogen dengan memanfaatkan *Clostridium butyricum* sebagai biokatalis. Masalah utama lainnya yang dihadapi dalam pengembangan MFC adalah biaya senyawa mediator yang mahal. Pada tahun 1999, MFC tanpa mediator pertama kali diperkenalkan oleh Kim et al. [5]. MFC kemudian menjadi topik hangat di kalangan peneliti dan mengalami sejumlah pengembangan, seperti *microbial wetland cells*, *microbial desalination cells*, *microbial metal extraction cells*, dan *microbial waste treatment cells* [6]. Belum banyak studi menyoroti potensi limbah organik lokal sebagai substrat MFC dan listrik yang dihasilkannya. Oleh karena itu, potensi MFC sebagai teknologi biokonversi limbah organik menjadi biolistrik akan menjadi fokus tulisan ini.

2. METODE

Penelitian ini merupakan kajian literatur dari artikel-artikel ilmiah yang terbit 5-25 tahun terakhir yang berkaitan dengan pengolahan limbah organik, khususnya limbah cair organik (*organic wastewater*), dan teknologi MFC dari beberapa database publikasi (Scopus, Web of Science, Google Scholar). Informasi-informasi yang diperoleh dianalisis dan disajikan secara deskriptif, meliputi (1) teknologi pengolahan limbah organik, di antaranya dengan proses fisika, kimia, biologi, (2) tantangan-tantangan pada teknologi yang telah ada, (3) teknologi MFC, dan (4) tantangan pengembangan MFC untuk biokonversi limbah organik dan produksi biolistrik.

Kajian literatur ini juga dilengkapi dengan analisis bibliometrik sederhana terhadap artikel-artikel ilmiah yang terbit tahun 2021-2024 dari database Scopus dengan judul memuat kata "*microbial fuel cell*" dan kata kunci "*energy conversion*" serta kombinasi judul memuat kata "*microbial fuel cell*" dan kata kunci "*organic wastewater*". Artikel-artikel memuat judul dan kata kunci tersebut di-mining menggunakan *software Publish or Perish* versi 8.2.3944.8118. Hubungan *co-occurrence* dari total 395 artikel yang diperoleh disajikan dalam bentuk gambar menggunakan aplikasi VOSViewer versi 1.6.18 untuk melihat topik-topik riset kekinian pada bidang tersebut.

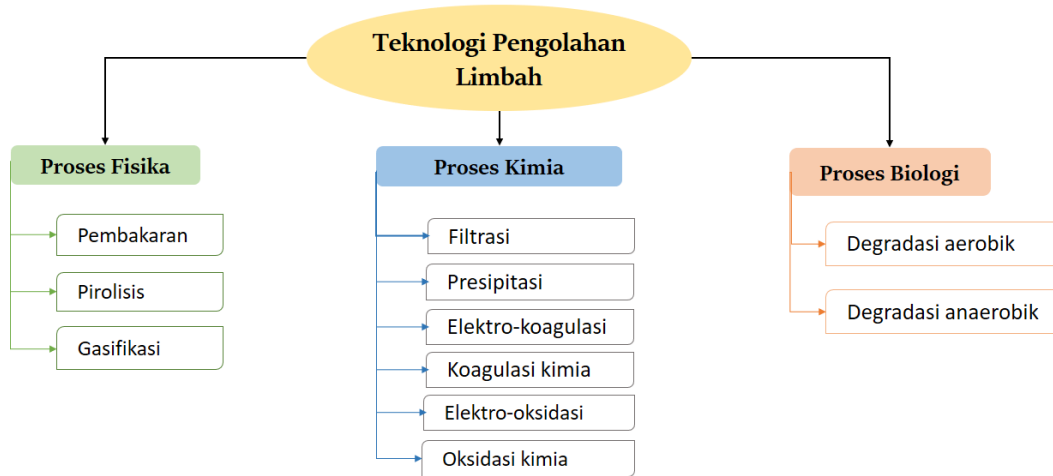
3. PEMBAHASAN

Limbah organik, seperti limbah cair mengandung senyawa-senyawa organik dan limbah biomassa dari aktivitas pertanian, masih mengandung sejumlah besar energi yang terkunci di dalamnya dalam bentuk beragam senyawa organik ($\sim 1.79 \text{ kWh m}^{-3}$), unsur-unsur penting seperti nitrogen dan fosfor ($\sim 0.7 \text{ kWh m}^{-3}$), serta energi panas (*thermal energy*) ($\sim 7 \text{ kWh m}^{-3}$) [7]. Alih-alih dimanfaatkan, sejumlah besar energi harus dikeluarkan untuk mengolah limbah organik ini [8]. Jumlah energi untuk pengolahan limbah dapat mencapai sekitar 3% dari total energi listrik yang dihasilkan Amerika Serikat, juga misalnya di negara-

negara maju di Uni Eropa dan Asia ([7], [9], [10]). Jika potensi energi tersimpan dalam limbah organik dapat dipanen dengan teknologi yang membutuhkan lebih sedikit energi untuk mengolah dan memprosesnya, limbah organik akan menjadi salah satu sumberdaya untuk produksi energi. Proses biodegradasi anaerobik umumnya digunakan untuk mengubah sampah organik menjadi bahan bakar nabati dan metana, yang dapat dikonversi menjadi listrik melalui pembakaran. Namun demikian, efisiensi konversi yang diperoleh masih sekitar 35% [7].

3.1 Teknologi Pengolahan Limbah Organik

Limbah, termasuk di dalamnya limbah cair organik (*organic wastewater*), merupakan salah satu masalah utama masyarakat modern. Jumlah populasi manusia yang terus berkembang dan kebutuhan yang meningkat pesat menghasilkan produk sampingan maupun produk akhir berupa limbah, baik limbah organik maupun inorganik. Sejumlah teknologi dikembangkan untuk pengolahan limbah organik, baik secara fisika, kimiawi, maupun biologis. Teknologi pengolahan limbah secara fisik di antaranya melibatkan proses pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi; secara kimiawi di antaranya memanfaatkan proses filtrasi, presipitasi, elektro-koagulasi dan koagulasi kimia, serta elektro-oksidasi dan oksidasi kimia; dan secara biologis meliputi proses degradasi aerobik maupun anaerobik (**Gambar 1**).



Gambar 1. Teknologi pengolahan limbah melalui proses fisika, kimia, dan biologi

Proses Fisika. Pembakaran (*combustion*) dapat mengurangi volume lumpur limbah dengan mengoksidasi kandungan organik, sementara kandungan anorganik diperoleh sebagai abu. Dalam pirolisis, sampah didegradasi secara termal di lingkungan bebas oksigen pada suhu sekitar 500°C. Proses pirolisis menghasilkan gas yang tidak dapat dikondensasi, cairan (dikenal sebagai minyak nabati), dan padatan (biasanya disebut sebagai biochar) [11]. Pirolisis juga dapat dianggap sebagai proses gasifikasi tidak sempurna, di mana campuran produk gas, cair, dan padat dihasilkan [12]. Gasifikasi adalah proses termokimia di mana biomassa diubah menjadi gas yang mudah terbakar pada suhu yang lebih tinggi (> 600°C) dengan jumlah agen gasifikasi yang terkontrol. Produk yang dihasilkan berupa campuran gas, terdiri dari H₂, CO, CO₂, CH₄, dan N₂; yang dikenal sebagai gas sintesis atau syngas [13].

Proses Kimiawi. Filtrasi (berbasis membran semipermeable) adalah proses penyaringan, yang dibedakan dari teknologi pemisahan (*separation*) konvensional lainnya karena kebutuhan energinya yang relatif rendah, selektivitas pemisahan yang tinggi, dan kinetika reaksi yang sangat cepat [14]. Elektrokoagulasi adalah proses koagulasi dengan memanfaatkan berbagai jenis elektroda logam (misalnya besi, aluminium, dan tembaga); melibatkan reaksi oksidasi-reduksi di mana destabilisasi kontaminan terjadi akibat adanya arus listrik. Teknologi ini dilaporkan mampu mengurangi COD (*chemical oxygen demand*) limbah industri hingga 86% [15]. Elektro-oksidasi merupakan proses elektrokimia yang mirip dengan elektro-koagulasi, namun reagen utama yang digunakan adalah elektron (reagen yang lebih bersih

dibandingkan reagen kimia, karena dapat mengoksidasi senyawa organik tanpa menghasilkan polutan sekunder) [16]. Elektro-oksidasi dilaporkan dapat digunakan dalam pengolahan berbagai limbah cair, seperti penyisihan COD pada pabrik zaitun yang mencapai 99.6% [17], serta penyisihan TOC (*total organic compound*) dan COD limbah kopi sebesar 95% dan 97% [18].

Proses Biologis. Limbah organik masih mengandung sejumlah besar energi dalam bentuk beragam senyawa organik, unsur-unsur penting seperti nitrogen dan fosfor, serta *thermal energy* [7]. Para peneliti di bidang limbah organik banyak memberi perhatian pada teknologi pengurangan kandungan bahan organik, yang berkaitan dengan sejumlah parameter seperti COD, BOD (*biological oxygen demand*), dan TSS (*total suspended solid*). Berkaitan dengan parameter COD, sistem pengolahan limbah secara aerobik lebih tepat digunakan untuk limbah-limbah cair berkekuatan rendah (konsentrasi *biodegradable* COD <1000 mg l⁻¹) sementara sistem anaerobik tepat digunakan untuk limbah cair dengan konsentrasi *biodegradable* COD >4000 mg l⁻¹ [19]. Sistem anaerobik umumnya lebih disukai karena membutuhkan lebih sedikit konsumsi energi, namun dengan potensi bioenergi dan pemulihan nutrisi yang tinggi [20]. Degradasi anaerobik melibatkan serangkaian tiga reaksi utama di mana konstituen kompleks limbah cair (seperti karbohidrat, protein, dan lemak) pertama-tama dikonversi menjadi gula, asam amino, dan asam lemak, melalui proses hidrolisis. Reaksi ini kemudian diikuti dengan konversi menjadi asam lemak volatil, asam lemak rantai pendek, dan hidrogen, melalui asidogenesis dan asetogenesis. Pada reaksi terakhir, produk-produk tersebut akhirnya diubah menjadi metana dan karbon dioksida melalui metanogenesis.

3.2 Tantangan-tantangan pada Teknologi yang Telah Ada

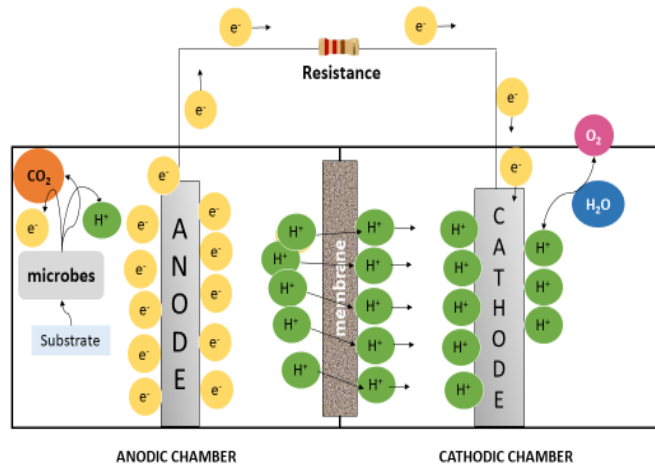
Proses Fisika dan Kimia. Pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi lumpur limbah menunjukkan keuntungan sekaligus tantangan dalam pemrosesan termokimia limbah. Semua rute konversi termokimia menggunakan proses fisika memberikan potensi pengurangan volume lumpur yang efisien, penghilangan mikrob berbahaya, dan pemulihan kandungan energi yang tersimpan. Suhu operasi pirolisis yang ringan memungkinkan retensi sebagian besar logam berat dan nutrisi lain dalam residu padat. Selain itu, proses pirolisis yang terjadi tanpa adanya oksigen menjadikan proses ini mengeluarkan lebih sedikit polutan ke udara. Namun demikian, proses pirolisis sangat endotermik, membutuhkan input energi yang besar. Kebutuhan akan pengeringan bahan baku sebelum proses pirolisis dilakukan semakin meningkatkan kebutuhan akan input energi [21]. Sementara itu, teknologi berbasis gasifikasi menawarkan produksi *syngas* dengan efisiensi tinggi. Namun demikian, kadar air yang tinggi dari lumpur limbah dapat menjadi kendala, karena sebagian besar *gasifier* membutuhkan kadar air bahan baku tidak lebih dari 30% [22]. Selain itu, adanya senyawa polutan organik berat dalam aliran gas buang akan membutuhkan pembersihan gas yang ekstensif untuk aplikasi *syngas*, sehingga menyulitkan konstruksi dan pengoperasian pabrik gasifikasi lumpur. Sementara itu, beberapa teknologi berbasis kimiawi terkadang menjumpai sejumlah kendala dari sisi katalisator atau reagen yang kurang ramah lingkungan, serta kebutuhan akan energi yang relatif besar.

Proses Biologis. Limbah cair organik, yang biasanya diolah melalui proses degradasi anaerobik, menghasilkan biogas dan digestat (baik digestat cair maupun padat). Digestat merupakan limbah cair yang mengandung senyawa-senyawa organik sisa, makronutrien, mikronutrien (terutama nitrogen, fosfor, kalium), dan kontaminan logam berat [23]. Selain itu, proses lanjutan dibutuhkan untuk memproses digestat padat guna memulihkan energi, di antaranya perlakuan termo-kimia seperti pembakaran, pirolisis, atau gasifikasi [24]. Degradasi anaerobik memungkinkan pengolahan limbah biomassa dengan konsentrasi COD rendah maupun tinggi, namun proses ini membutuhkan suhu mesofilik hingga termofilik untuk mencapai *turnover* yang cukup, serta tingkat kelarutan metana yang terbatas. Pada degradasi anaerobik berbasis mikrob metanogen, pertumbuhan biokatalisator (mikrob), temperatur, serta pemisahan fase padat/cair/gas merupakan faktor-faktor utama yang membatasi efisiensi biokonversi.

Tiga pendekatan di atas (pengolahan limbah organik melalui proses-proses fisika, kimiawi, dan biologis) telah dikaji dan diaplikasikan dalam pengolahan berbagai limbah organik. Namun demikian, alternatif teknologi yang lebih murah dengan input energi yang rendah, ramah lingkungan, serta tingkat konversi yang tinggi masih dibutuhkan.

3.3 Microbial Fuel Cells (MFC)

Teknologi elektrokimia berbasis mikrob (*microbial electrochemical technology*, MET) telah mendapat perhatian besar sebagai teknologi yang menjanjikan untuk memanen energi dari sampah organik dan secara langsung menghasilkan listrik. Salah satu teknologi MET tersebut adalah *microbial fuel cells* (MFC). MFC merupakan sistem bioelektrokimia yang memanfaatkan aktivitas katalitik mikrob untuk mengkonversi energi kimia yang tersimpan di dalam substrat (termasuk limbah organik) menjadi energi listrik [25]. MFC memiliki kemiripan dengan baterai atau *fuel cell* pada umumnya, yakni terdiri dari dua elektroda (anoda dan katoda) yang dipisahkan oleh elektrolit (**Gambar 2**). Perbedaan MFC dari *fuel cell* lainnya terletak pada penggunaan senyawa organik sebagai substrat, serta pemanfaatan mikrob sebagai biokatalisator. Mikrob pada ruang anodik MFC mengoksidasi substrat organik serta menghasilkan CO₂, elektron, dan proton. Elektron akan mengalir ke ruang katodik melalui sirkuit listrik eksternal, sedangkan proton akan berdifusi menuju ruang katodik melalui membran penukar proton [2]. Membran penukar proton (*proton exchange membrane*) bersifat permeabel terhadap ion-ion berukuran sangat kecil (seperti proton), namun tidak terhadap oksigen [25]. Pada ruang katodik, proton dan elektron bereaksi dengan oksigen membentuk H₂O [26].



Gambar 2. *Microbial fuel cells* dan gambaran proses yang terjadi di ruang anodik-katodik

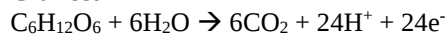
Beberapa reaksi oksidasi-reduksi yang terjadi di ruang anodik dan katodik MFC dengan jenis substrat (elektron donor) dan oksidator (elektron aseptor) berbeda, di antaranya [27]

Reaksi pada ruang anodik MFC dengan jenis elektron donor:

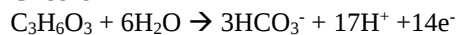
Asetat



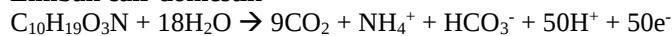
Glukosa



Gliserol

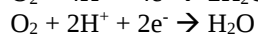
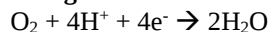


Limbah cair domestik

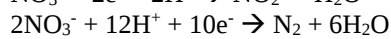
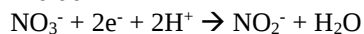


Reaksi pada ruang katodik MFC dengan jenis elektron aseptor:

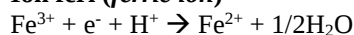
Oksigen



Nitrat



Ion feri (*ferric ion*)



MFC menjadi salah satu teknologi ramah lingkungan yang semakin banyak dikaji untuk beragam tujuan, seperti produksi biolistrik, sebagai biosensor, untuk bioremediasi, detoksifikasi tanah-tanah tercemar, desalinasi, produksi hidrogen, hingga biokonversi limbah organik menjadi energi [28]. Pemanfaatan MFC sebagai teknologi untuk mengatasi problem limbah semakin meningkat beberapa tahun terakhir. Hal ini ditunjukkan pada **Gambar 3** dan **Gambar 4**, yang merupakan citra VOSviewer terhadap analisis bibliometrik artikel-artikel terbaru (tahun 2021-2024) dari database Scopus dengan judul memuat kata “*microbial fuel cell*” dan kata kunci “*energy conversion*” (**Gambar 3**), serta kombinasi judul memuat kata “*microbial fuel cell*” dan kata kunci “*organic wastewater*” (**Gambar 4**).

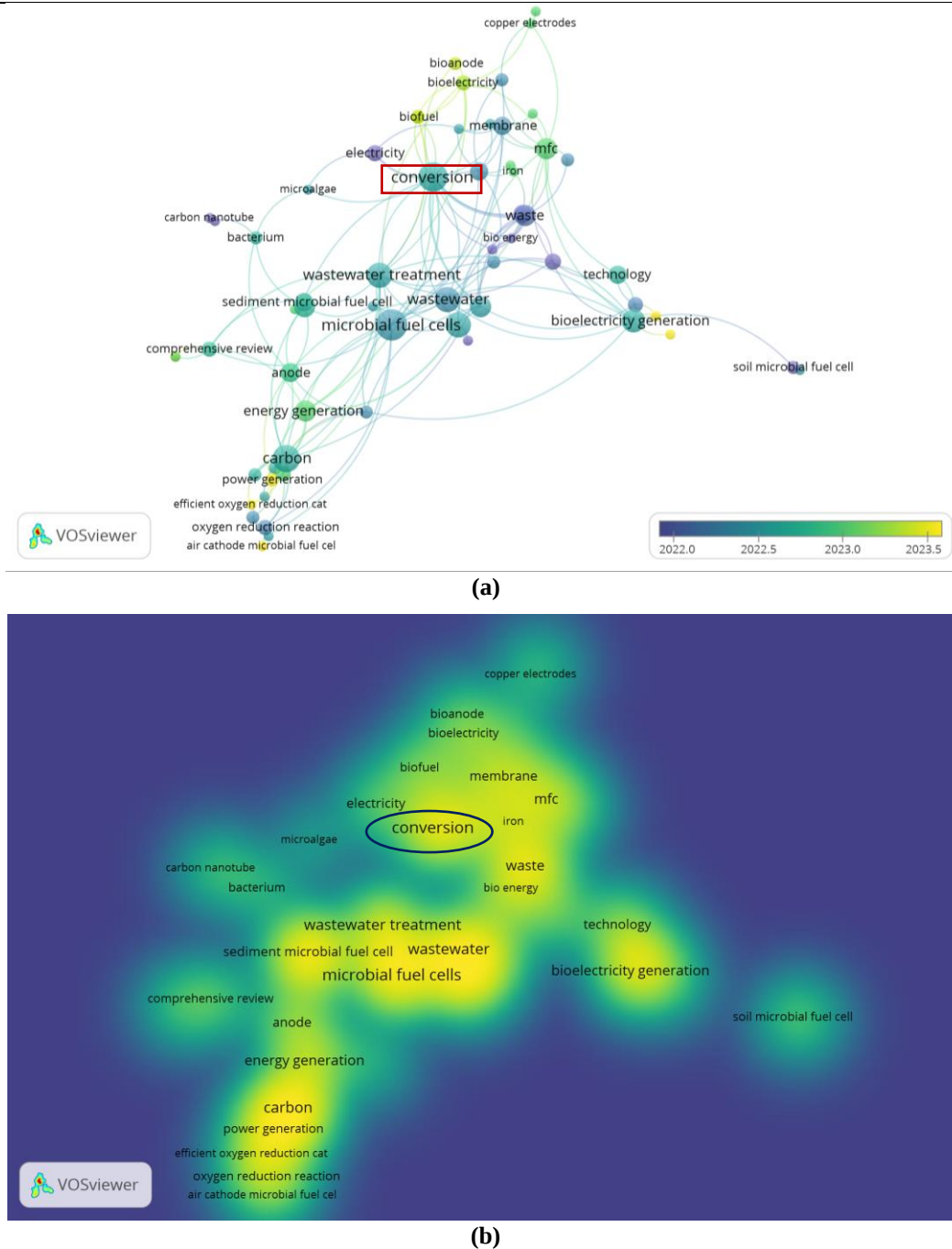
Penelitian MFC telah pula dilakukan oleh banyak peneliti Indonesia, dengan fokus riset didominasi oleh pemanfaatan MFC sebagai teknologi produksi listrik. Namun demikian, MFC juga telah diteliti untuk remediasi logam, biosensor, dan pengolahan limbah organik. Pemanfaatan MFC secara simultan selain untuk produksi listrik saja telah pula dikaji, misalnya untuk produksi listrik sekaligus pengolahan limbah organik, produksi listrik sekaligus produksi biomassa, produksi listrik sekaligus biosensor, dan produksi listrik sekaligus remediasi logam [28]. **Tabel 1** menyajikan beragam limbah organik di Indonesia yang telah dimanfaatkan sebagai substrat pada ruang anodik MFC, untuk produksi listrik maupun untuk pengolahan limbah organik tersebut (dengan pengurangan COD).

Tabel 1. Beragam limbah organik yang telah dimanfaatkan sebagai substrat MFC, listrik yang dihasilkan, serta efisiensi biokonversinya

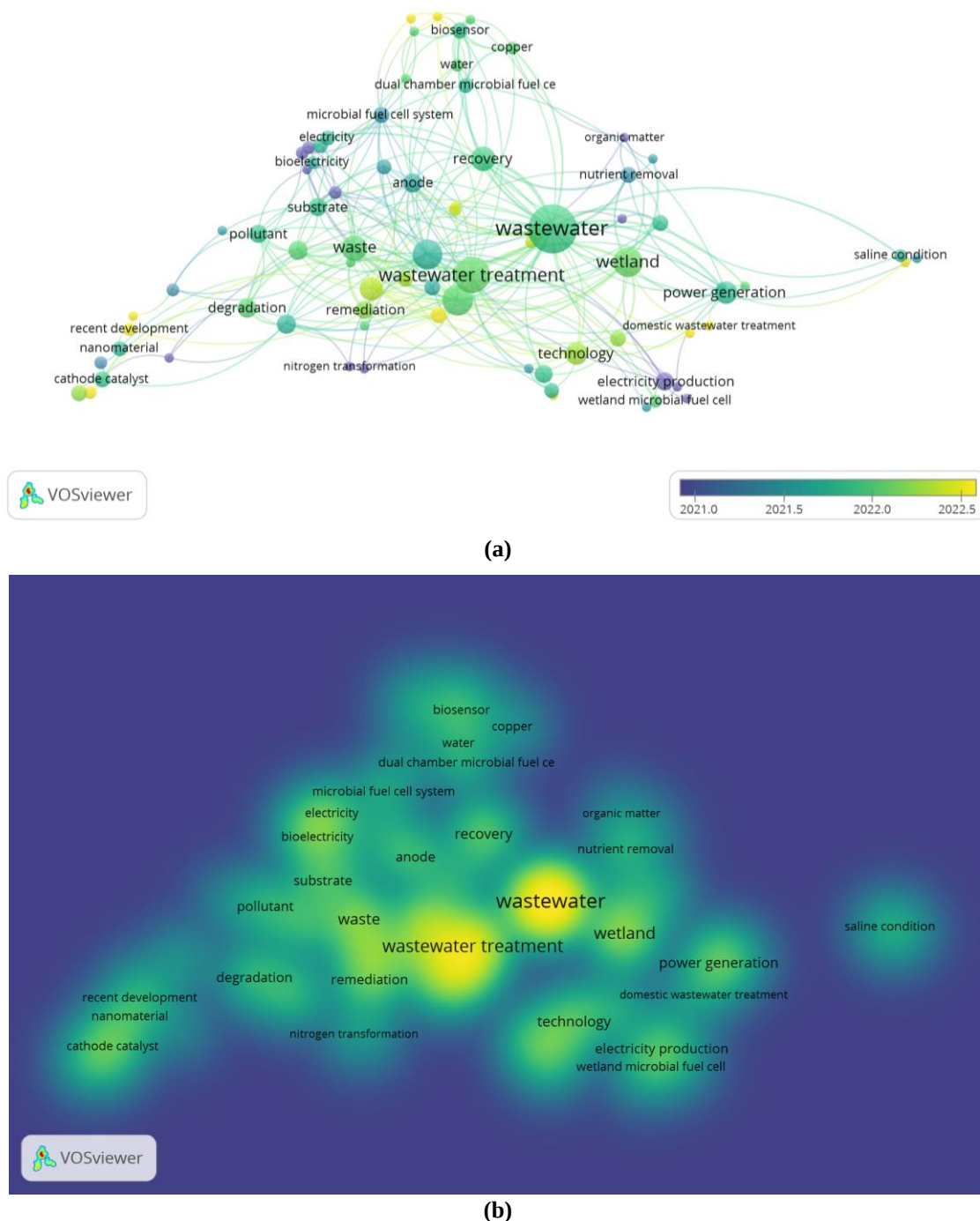
Jenis substrat	Produksi listrik		Efisiensi		Referensi
	$V_{\max}$ (mV)	Power	Coulombic	COD _{removal}	
Limbah tapioka	612	860 $\mu\text{W cm}^{-2}$	89.03%	13.33%	[29]
	676	7.74 mW m^{-2}	NR	35-46%	[30]
Limbah susu	NR	131 mW m^{-2}	NR	76%	[31]
Limbah cair TPH	2400	700 mW m^{-2}	NR	67.9%	[32]
Limbah tempe	NR	NR	NR	18.2%	[33]
	NR	0.04 mW m^{-2}	10 ⁻⁶ %	40%	[34]
Limbah TPS	NR	4 mW m^{-2}	NR	70%	[35]
Limbah kulit pisang dan jeruk	495-563	NR	NR	NR	[36]
Whey keju	529.3	NR	NR	NR	[37]
Ampas sagu	211.7	73.8 mW cm^{-2}	10.7%	NR	[38]
Limbah tahu	757	9.22 $\times 10^{-5}$ kWh	NR	77.22%	[39]
Limbah kafetaria	150	73.7 mW m^{-2}	NR	30.15%	[40]
Limbah gelatin	405.10	NR	NR	81.64 mg/L	[41]
Molase	NR	690.9 mW m^{-2}	NR	33.11%	[42]
Ampas tebu	5	14.88 mW m^{-2}	NR	39.68%	[43]
Limbah pasar tradisional	NR	5.3 A m^{-2}	NR	NR	[44]

Keterangan: TPH: tempat penyembelihan hewan, TPS: tempat pembuangan sampah (organik), NR: tidak dilaporkan (*not reported*)

Tabel 1 menunjukkan beragam limbah organik dapat dimanfaatkan oleh mikroba dalam ruang anodik MFC, untuk dikonversi menjadi energi listrik (yang terukur sebagai voltase, kuat arus, atau *power/power density*). Efisiensi biokonversi nampak dari parameter efisiensi Coulombic dan penghilangan COD (COD *removal*). Limbah cair TPH menunjukkan produksi listrik tertinggi sebagai substrat MFC, yakni mencapai 2.4 V dan 700 mW m^{-2} , sementara limbah ampas tebu dilaporkan menghasilkan voltase terendah (5 mV). Sementara itu, efisiensi biokonversi (berupa COD *removal*) dari limbah yang diuji dilaporkan mencapai 13.33%-77.22%. Beragamnya nilai potensi listrik dan efisiensi biokonversi yang dihasilkan sangat bergantung pada beberapa faktor, di antaranya (1) jenis substrat, (2) jenis mikroba dan kemampuan biokatalitiknya, (3) sistem MFC [konfigurasi chamber, jenis elektroda, jenis larutan ruang katodik, dan sebagainya], serta (4) temperatur-suhu-pH.



Gambar 3. (a) Overlay visualization dan (b) Density visualization menggunakan VOSviewer terhadap artikel-artikel dari sumber data Scopus (tahun 2021-2024) yang menggunakan judul memuat kata “*microbial fuel cell*” dan kata kunci “*energy conversion*”. Warna yang semakin terang pada *overlay visualization* menunjukkan topik riset pada tahun-tahun terbaru. Warna terang (kuning) pada *density visualization* menunjukkan suatu topik riset telah banyak dilakukan, sementara warna yang semakin gelap menunjukkan belum banyaknya penelitian pada topik tersebut.



Gambar 4. (a) Overlay visualization dan (b) Density visualization menggunakan VOSviewer terhadap artikel-artikel dari sumber data Scopus (tahun 2021-2024) yang menggunakan judul memuat kata “microbial fuel cell” dan kata kunci “organic wastewater”. Warna yang semakin terang pada *overlay visualization* menunjukkan topik riset pada tahun-tahun terbaru. Warna terang (kuning) pada *density visualization* menunjukkan suatu topik riset telah banyak dilakukan, sementara warna yang semakin gelap menunjukkan belum banyaknya penelitian pada topik tersebut.

3.4 Tantangan Pengembangan MFC untuk Biokonversi Limbah Organik dan Produksi Biolistrik

Ketersediaan substrat (di antaranya limbah/sampah organik) yang melimpah serta beragamnya mikrob yang potensial menjadi biokatalisator MFC menjadikan teknologi ini berpeluang besar untuk terus dikaji dan dikembangkan. Hal ini karena aplikasi MFC sebagai teknologi praktis dan dalam skala besar, khususnya untuk menghasilkan listrik atau produksi energi, masih menghadapi sejumlah tantangan. Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan keluaran daya pada MFC, namun hasil yang diperoleh masih dianggap belum memuaskan [45]. Karena itu, pengembangan MFC banyak diarahkan pada upaya peningkatan kinerja sistem [46], khususnya dengan mempertimbangkan kemampuan biokatalitik mikrob dan sirkuit/rangkaian elektrokimia.

Eksplorasi dan isolasi mikrob *electrogen* (sebagai biokatalisator MFC) dengan kemampuan katalitik tinggi dan stabil penting untuk dilakukan. Beberapa bakteri dilaporkan telah diisolasi dan diidentifikasi dari sejumlah ekosistem tergenang (*waterlogged ecosystem*) di Indonesia, yang menunjukkan potensi tersebut [28, 47-49]. Evaluasi kinerja MFC dengan metode yang tepat penting pula dilakukan untuk mengkaji potensi MFC sebagai teknologi untuk produksi listrik. Hal ini karena MFC merupakan sistem yang sangat dinamis karena digerakkan oleh makhluk hidup (mikrob), sehingga output listrik yang dihasilkan bergantung proses-proses metabolisme yang dinamis di dalam sel [50-51].

Pada prinsipnya, sel elektrokimia dapat menghasilkan voltase atau arus listrik lebih tinggi ketika dirangkai secara seri atau paralel. Akan tetapi, munculnya fenomena *shunt current* [52], *current reversal* [53], atau *voltage reversal* [54-55], saat sejumlah sel atau reaktor MFC dirangkai seri atau paralel menjadi tantangan berikutnya, yang berpengaruh terhadap kemampuan biokonversi mikrob katalisator. Beragam desain reaktor telah dicoba untuk meningkatkan efisiensi sistem dan berbagai upaya telah dilakukan dalam memperbesar skala aplikasi MFC dari skala laboratorium hingga skala lebih dari 50 liter [56]. Adanya tantangan-tantangan ini mengarahkan riset MFC untuk lebih difokuskan pada aplikasi simultan (secara bersamaan dengan produksi listrik), misalnya untuk pengolahan limbah atau degradasi berbagai polutan kompleks.

4. KESIMPULAN

MFC menjadi salah satu teknologi potensial untuk pengolahan limbah karena beberapa keuntungan, di antaranya konsumsi energi yang rendah (memanfaatkan mikrob sebagai biokatalisator yang dapat bekerja dalam kondisi *mild*), mikrob dalam ruang anodik MFC dapat memanfaatkan beragam jenis substrat (tergantung kemampuan katalitik mikrob yang digunakan) termasuk berbagai sumber limbah organik, dan produk akhir yang dihasilkan bersifat ramah lingkungan. Kajian literatur ini menunjukkan MFC dengan substrat limbah organik lokal memiliki efisiensi pengurangan limbah (COD *removal*) mencapai 13.33-77.22% dan potensi listrik yang dihasilkan sekitar 7.74-700 mW m⁻². Namun demikian, aplikasi skala besar teknologi ini masih menjumpai kendala teknis dan ekonomis. Pemanfaatan jenis limbah organik yang lebih beragam dan mikrob *indigenous* yang belum dieksplorasi, modifikasi desain chamber yang efisien, modifikasi rangkaian listrik untuk *men-scale up* produksi listrik MFC, membuka peluang studi lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] United Nations, Population Division, World Population Prospects, 2015, <http://esa.un.org/unpd/wpp/DVD/>
- [2] K. Rabaey and W. Verstraete, "Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation," *Trends in Biotechnology*, vol. 23, no. 6, pp. 291-298, 2015.
- [3] W. Verstraete, F. Morgan-Sagastume, S. Aiyuk, K. Rabaey, M. Waweru, and G. Lissens, "Anaerobic digestion as a core technology in sustainable management of organic matter," *Water Sci Technol.* vol. 52, pp. 59-66, 2005.
- [4] M. DelDuca, J. Friscoe, and R. Zurilla, "Developments in industrial microbiology," *Am. Inst. Biol. Sci.* vol. 4, pp. 81-84, 1963.
- [5] B.H. Kim, H.J. Kim, M.S. Hyun, and D.H. Park, "Direct electrode reaction of Fe (III)-reducing bacterium, *Shewanella putrefaciens*," *J. Microbiol. Biotechnol.* vol. 9, pp. 127-131, 1999.

- [6] M.N. Naseer, A.A. Zaidi, H. Khan, S. Kumar, M.T. Owais, J. Jaafar, N.S. Suhaimin, Y.A. Wahab, K. Dutta, M. Asif, S.F.W.M. Hatta, and M. Uzair, "Mapping the field of microbial fuel cell: A quantitative literature review (1970-2020)," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 4126-4138, 2021.
- [7] P.L. McCarty, J. Bae, and J. Kim, "Domestic wastewater treatment as a net energy producer- can this be achieved?" *Environ Sci Technol*, vol. 45, pp. 7100-7106, 2011.
- [8] B.E. Logan and K. Rabaey, "Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies," *Science*, vol. 337, pp. 686-690, 2012.
- [9] S.T. Oh, J.R. Kim, G.C. Premier, T. Lee, C. Kim, and W.T. Sloan, "Sustainable wastewater treatment: how might microbial fuel cells contribute," *Biotechnol Adv*, vol. 28, pp. 871-881, 2011.
- [10] MOE, "Policies for zero energy WWTP construction," Ministry of Environment, Korea, 2010.
- [11] P. Manara and A. Zabaniotou, "Towards sewage sludge-based biofuels via thermochemical conversion - A review," *Renew Sustain. Energy Rev*, vol. 16, no. 5, pp. 2566-2582, 2012.
- [12] W. Feng, H.J. van der Kooi, and J.D.S. Arons, "Biomass conversions in subcritical and supercritical water: driving force, phase equilibria, and thermodynamic analysis," *Chem Eng Proc*, vol. 43, pp. 1459-1467, 2004.
- [13] M. Hosseini, I. Dincer, and M.A. Rosen, "Steam and air fed biomass gasification: comparisons based on energy and exergy," *Hydrog Energy*, vol. 37, pp. 16446-16452, 2012.
- [14] V. Petrov and V. Nenov, "Removal and recovery of copper from wastewater by a complexation-ultrafiltration process," *Desalination*, p. 162, 2004.
- [15] I. Zongo, B. Merzouk, K. Palm, J. Wethe, A.H. Maiga, J.P. Leclerc, and F. Lapique, "Study of an electrocoagulation (EC) unit for the treatment of industrial effluent of Ouagadougou, Burkina Faso," *Adv in Appl Sci Res*, vol. 3, no. 1, pp. 572-582, 2012.
- [16] G.B. Raju, M.T. Karupiah, S.S. Latha, S. Parvathy, and S. Prabhakar, "Treatment of wastewater from synthetic textile industry by electrocoagulation-electrooxidation," *Chem Engineer*, vol. 144, pp. 51-58, 2008.
- [17] U.T. Un, U. Altay, A.Z. Koparal, and U.B. Ogutveren, "Complete treatment of olive mill wastewaters by electrooxidation," *Chem Engineer*, vol. 139, pp. 445-452, 2008.
- [18] O.T. Can, E. Gengec, and M. Kobya, "TOC and COD removal from instant coffee and coffee products production wastewater by chemical coagulation assisted electrooxidation," *Wat Proc Engineer*, vol. 28, pp. 28-35, 2019.
- [19] Y.J. Chan, M.F. Chong, C.L. Law, and D.G. Hassell, "A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater," *Chem Eng*, vol. 155, pp. 1-18, 2009.
- [20] F.Y. Cakir and M.K. Stenstrom, "Greenhouse gas production: a comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology," *Water Research*, vol. 39, pp. 4197-4203, 2005.
- [21] S.E. Hosseini and M.A. Wahid, "Utilization of palm solid residue as a source of renewable and sustainable energy in Malaysia," *Renew Sust Energy Rev*, vol. 40, pp. 621-632, 2014.
- [22] A.A.P. Susastriawan, H. Saptoadi, and Purnomo, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," *Ren. Sus. Energ. Rev*, vol. 76, pp. 989-1003, 2017.
- [23] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, "The Biogas Handbook: Science, Production, and Applications," 2013.
- [24] C.A. Salman, S. Schwede, E. Thorin, H. Li, and J. Yan, "Identification of thermochemical pathways for the energy and nutrient recovery from digested sludge in wastewater treatment plants," *Ener Proced*, vol. 158, pp. 1317-1322, 2019.
- [25] B.E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schröder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete, and K. Rabaey, "Microbial fuel cells: Methodology and technology," *Environ Sci Technol*, vol. 40, no. 17, pp. 5181-5192, 2006.
- [26] Y. Sharma and B. Li, "The variation of power generation with organic substrates in single chamber microbial fuel cells (SCMFCs)," *Bioresour Technol*, vol. 101, no. 6, pp. 1844-1850, 2010.
- [27] E.O. Koroglu, H.C. Yoruklu, A. Demir, and B. Ozkaya, "Scale-up and commercialization issues of the MFCs: Challenges and implications," In: *Microbial Electrochemical Technology*, Ed. SV Mohan et al, Elsevier B.V, 2019.

- [28] Y.A. Indriyani, I. Rusmana, S. Anwar, G. Djajakirana, and D.A. Santosa, "Harvesting bioelectricity from microbial fuel cells (MFCs) powered by electroactive microbes," *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (JTEP)*, vol. 12, no. 3, pp. 583-596, 2023.
- [29] R.M. Rachma, V. Reinaldo, A. Muhyinsyah, and T. Setiadi, "Electricity generation from tapioca wastewater using a microbial fuel cell (MFC)," *Southeast Asian Water Environment*, vol. 4, pp. 115-120, 2010.
- [30] A. Harimawan, H. Devianto, D. Shofinita, and T. Setiadi, "Influence of electrode distance on electrical energy production of Microbial Fuel Cell using tapioca wastewater," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 50, no. 6, pp. 841-855, 2018.
- [31] E. Retnaningrum, and W. Wilopo, "Performance and bacterial composition of anodic biofilms in microbial fuel cell using dairy wastewater," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1744, no. 1, 2016.
- [32] A.K. Prabowo, A.P. Tiarasukma, M. Christwardana, and D. Ariyanti, "Microbial fuel cells for simultaneous electricity generation and organic degradation from slaughterhouse wastewater," *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 5, no. 2, pp. 107-112, 2016.
- [33] R. Arbianti, T.S. Utami, V. Leondo, Elisabeth, S.A. Putri, and H. Hermansyah, "Effect of biofilm and selective mixed culture on microbial fuel cell for the treatment of tempeh industrial wastewater," *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 316, pp. 012073, 2018.
- [34] M.A.H.V. Kurnia, T.S. Utami, and R. Arbianti, "Sodium percarbonate addition as electrolyte and buffer to produce electricity economically using industrial-tempeh-wastewater based microbial fuel cell," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 105, no. 1, pp. 012100, 2018.
- [35] G. Samudro, Syafrudin, D.W. Nugraha, E. Sutrisno, B.I. Priyambada, H. Muthi'ah, N.G. Sinaga, and T.R. Hakiem, "The effect of COD concentration containing leaves litter, canteen and composite waste to the performance of solid phase microbial fuel cell (SMFC)," *E3S Web Conference*, vol. 31, pp. 02008, 2018.
- [36] Elviliana, O.S.L. Toding, C. Virginia, and S. Suhartini, "Conversion banana and orange peel waste into electricity using microbial fuel cell," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 209, no. 1, pp. 012049, 2018.
- [37] M.D. Darmawan, L.C. Hawa, and B.D. Argo, "Performance of microbial fuel cell double chamber using mozzarella cheese whey substrate," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 131, no. 1, pp. 012047, 2018.
- [38] M.A. Jenol, M.F. Ibrahim, K.E. Bahrin, S.W. Kim, and S. Abd-Aziz, "Direct bioelectricity generation from sago hampas by *Clostridium beijerinckii* SR1 using microbial fuel cell," *Molecules*, vol. 24, no. 13, pp. 2397, 2019.
- [39] D. Permana, and Djaenudin, "Performance of single chamber microbial fuel cell (SCMFC) for biological treatment of tofu wastewater," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 277, no. 1, pp. 012008, 2019.
- [40] S.A. Motto, M. Christwardana, and Hadiyanto, "Potency of yeast- microalgae Spirulina collaboration in Microalgae-Microbial Fuel Cells for cafeteria wastewater treatment," *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, vol. 209, pp. 012022, 2018.
- [41] R. Irnawati, D. Surilayani, R.P. Aditia, A. Maldini, S. Jusamatalaisi, and G. Pratama, "Electricity production from gelatin wastewater using single-chamber microbial fuel cells," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 404, no. 1, pp. 012026, 2020.
- [42] I.F. Nuryana, R. Puspitasari, and S.R. Juliastuti, "Study of electrode modification and microbial concentration for microbial fuel cell effectivity from molasses waste and reduction of heavy metal Cr (VI) by continue dual chamber reactor," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 823, no. 1, pp. 012016, 2020.
- [43] M. Christwardana, J. Joelianingsih, and L.A. Yoshi, "Performance of yeast microbial fuel cell integrated with sugarcane bagasse fermentation for COD reduction and electricity generation," *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, vol. 16, no. 3, pp. 446-458, 2021.
- [44] U. Mardiana, "Microbial fuel cell-based biocatalyst from traditional market waste water for energy production," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 819, no. 1, pp. 012016, 2021.
- [45] Z. Ge, J. Li, L. Xiao, Y. Tong, and Z. He, "Recovery of electrical energy in microbial fuel cells," *Environmental Science & Technology Letters*, vol. 1, no. 2, pp. 137-141, 2014.

-
- [46] H. Philamore, J. Rossiter, A. Stinchcombe, and I. Ieropoulos, "Row-bot: An energetically autonomous artificial water boatman. 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)," 28 Sept.-2 Oct, pp 3888-3893, 2015.
- [47] Y.A. Indriyani, "Eksplorasi, Seleksi, dan Identifikasi Mikrob *Electricigens* dari Ekosistem di Indonesia untuk *Microbial Fuel Cell* (MFC)," [Thesis]. Bogor: IPB University, 2017.
- [48] Y.A. Indriyani, I. Rusmana, S. Anwar, G. Djajakirana, and D.A. Santosa, "Bioelectrochemical assessment of a novel electrogenic *Bacillus altitudinis* AC11.2 for electricity generation in microbial fuel cell (MFC) system," *J Appl Electrochem.* vol. 54, pp. 977-997, 2024.
- [49] Y.A. Indriyani, I. Rusmana, S. Anwar, G. Djajakirana, and D.A. Santosa, "Isolation and electrochemical evaluation of electrogenic bacteria from the sediment of two waterlogged-ecosystems," *Biota: Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, vol. 10, no. 1, pp. 22-32, 2025.
- [50] Y.A. Indriyani, R. Efendi, E. Rustami, I. RusmanaI, S. Anwar, G. Djajakirana, and D.A. Santosa, "Affordable ESP32-based monitoring system for microbial fuel cells: real-time analysis and performance evaluation (ESP32-based data logger as a monitoring system for microbial fuel cell)," *Int J Energ Water Res*, vol. 8, pp. 199-212, 2024.
- [51] Y.A. Indriyani, E. Rustami, I. Rusmana, S. Anwar, G. Djajakirana, and D.A. Santosa, "Bioelectricity production of microbial fuel cells (MFCs) and the simultaneous monitoring using developed multi-channels Arduino UNO-based data logging system," *J Appl Electrochem*, vol. 54, pp. 503-518, 2024.
- [52] J. An, J. Nam, B. Kim, H.S. Lee, B.H. Kim, and I.S. Chang, "Performance variation according to anode-embedded orientation in a sediment microbial fuel cell employing a chessboard-like hundred-piece anode," *Bioresour Technol.* vol. 190, pp. 175-181, 2015.
- [53] S. Wu, H. Li, X. Zhou, P. Liang, X. Zhang, Y. Jiang, and X. Huang, "A novel pilot-scale stacked microbial fuel cell for efficient electricity generation and wastewater treatment," *Water Res*, vol. 98, pp. 396-403, 2016.
- [54] S. Chen, S.A. Patil, R.K. Brown, and U. Schröder, "Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation," *Appl Energ*, vol. 233-234, pp. 15-28, 2019.
- [55] Y.A. Indriyani, "Eksplorasi dan Uji Efisiensi Mikrob Electrogen dari Sedimen Tiga Ekosistem di Indonesia untuk MFC (*Microbial Fuel Cell*)," [Disertasi]. Bogor: IPB University, 2023.
- [56] Y. Dong, Y. Qu, W. He, Y. Du, J. Liu, X. Han, and Y. Feng, "A 90-liter stackable baffled microbial fuel cell for brewery wastewater treatment based on energy self-sufficient mode," *Bioresour Technol.* vol. 195, pp. 66-72, 2015.