

ANALISIS PENGARUH VARIASI VOLUME *CHAMBER* TERHADAP PRODUKSI LISTRIK PADA *STACKED MICROBIAL FUEL CELL*

ANALYSIS OF THE EFFECT OF VOLUME CHAMBER VARIATION ON ELECTRICITY PRODUCTION IN STACKED MICROBIAL FUEL CELL

Yan Khairul Akbar¹, M. Ramdhan Kirom², Rahmat Awaludin Salam³

^{1,2,3} Universitas Telkom, Bandung

akbarkhairul@student.telkomuniversity.ac.id¹, mramdhankirom@telkomuniversity.ac.id², awaludinsalam@telkomuniversity.ac.id³

Abstrak

Permintaan akan energi listrik khususnya di Indonesia terus meningkat. Sementara ketersediaan sumber energi fosil semakin menipis. Energi terbarukan berbasis bioelektrokimia dapat dijadikan sebagai solusi. *Microbial Fuel Cell* (MFC) adalah salah satu perangkat berbasis bioelektrokimia. Tujuan yang akan dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengetahui efek variasi volume *chamber* pada *stacked* MFC terhadap produksi listrik. Sistem yang akan dibangun adalah tiga unit *stacked* MFC. Setiap *stacked* MFC terdiri dari dua MFC *dual chamber* dengan ukuran *chamber* masing-masing 10 x 2 x 10 cm pada MFC A, 10 x 3 x 10 cm pada MFC B, dan 10 x 4 x 10 cm pada MFC C. Jenis PEM yang digunakan adalah Nafion 117 dengan ukuran 4 x 4 cm. Kompartemen katoda menggunakan plat tembaga (Cu) 4 x 4 cm dengan aquades sebagai larutan. Kompartemen anoda menggunakan plat seng (Zn) 4 x 4 cm dengan substrat campuran air kolam ikan dan air bilasan bagas tebu dengan perbandingan 5:1. Percobaan dilakukan dengan menghubungkan reaktor *stacked* MFC secara seri dan paralel. Dari hasil pengukuran, didapatkan produksi listrik rata-rata selama 15 hari dengan nilai maksimum yaitu 0,028 V pada *stacked* MFC C rangkaian seri, 0,615 mA pada *stacked* MFC C rangkaian paralel, dan 0,015 mW pada *stacked* MFC C rangkaian seri. Sementara itu, berdasarkan volume substrat dan lebar *chamber* yang digunakan *stacked* MFC A 38% lebih efisien dibandingkan *stacked* MFC B dan 52% dibandingkan *stacked* MFC C.

Kata Kunci: *stacked* MFC, volume *chamber*, tegangan, arus.

Abstract

The demand for electric energy, especially in Indonesia, continues to increase. While the availability of fossil energy sources is dwindling. Bio-electrochemical-based renewable energy can be used as a solution. Microbial fuel cell (MFC) is one of the bio electrochemical-based devices. The goal to be achieved in this study is to find out the effect of chamber volume variations on stacked MFCs on electricity production. The system to be built is three stacked MFC units. Each stacked MFC consists of two MFC dual chambers with chamber sizes of 10 x 2 x 10 cm each in MFC A, 10 x 3 x 10 cm in MFC B, and 10 x 4 x 10 cm in MFC C. The type of PEM used is Nafion 117 with a size of 4 x 4 cm. The cathode compartment uses a copper plate (Cu) of 4 x 4 cm with aquades as a solution. The anode compartment uses a 4 x 4 cm zinc plate (Zn) with a mixed substrate of fish pond water and cane bagas rinse water with a ratio of 5:1. The experiment was conducted by connecting stacked MFC reactors in series and parallels. From the measurement results, the average electricity production for 15 days with a maximum value of 0.028 V in the stacked MFC C series, 0.615 mA on the stacked MFC C parallel circuit, and 0.015 mW on the stacked MFC C series series. Meanwhile, based on substrate volume and chamber width used stacked MFC A is 38% more efficient than stacked MFC B and 52% compared to stacked MFC C.

Keywords: *stacked* MFC, chamber volume, voltage, current.

1. Pendahuluan

Ketersediaan sumber energi sangat penting bagi kehidupan manusia. Sebagian besar aktivitas yang dilakukan manusia tidak lepas dari penggunaan energi listrik. Produksi energi listrik di Indonesia yang bersumber dari fosil (batubara) diprediksi mengalami penurunan dari 57% (RK) pada tahun 2018 hingga 32% (RK) pada tahun 2050 [1]. Hal ini menjadi peringatan bahwa manusia harus mulai berpindah haluan untuk menggunakan energi baru terbarukan (EBT). Salah satu bentuk energi baru terbarukan yang tidak mencemari lingkungan yaitu teknologi

Microbial Fuel Cell (MFC). MFC adalah alat berbasis bioelektrokimia yang dapat menghasilkan energi listrik dengan memanfaatkan senyawa organik serta menggunakan katalis yaitu mikroba [2].

MFC konvensional yang biasa digunakan adalah tipe *dual chamber* dengan membran transfer proton (PEM) yang memisahkan kompartemen anoda dan katoda [3]. Saat ini, dalam mengembangkan MFC tantangan yang dihadapi oleh para peneliti adalah meminimalisir hambatan dalam MFC dan membuat desain sistem MFC yang ringkas serta dapat menghasilkan keluaran listrik yang besar [4]. Salah satu jenis teknologi MFC lainnya adalah *stacked MFC*. *Stacked MFC* adalah gabungan dari beberapa MFC yang dihubungkan secara seri atau paralel untuk meningkatkan keluaran dayanya namun dengan bentuk yang lebih ringkas [5].

Pada MFC, substrat merupakan faktor *biological* yang sangat krusial dan berpengaruh dalam menghasilkan energi listrik [6]. Semakin besar volume *chamber*, maka semakin banyak kuantitas substrat yang dapat diolah oleh reaktor dan semakin banyak pula ruang yang dibutuhkan. Oleh sebab itu, variasi ukuran volume *chamber* akan mempengaruhi volume substrat yang digunakan, sehingga akan diketahui pengaruhnya terhadap produksi energi listrik pada *stacked MFC*. Pada penelitian sebelumnya yang memvariasikan volume reaktor *Solid Phase Microbial Fuel Cell*, terdapat tiga reaktor dengan volume substrat $1/3$, $1/2$, dan $2/3$ dari volume total memiliki nilai puncak rapat daya (*power density*) berturut-turut $17,02 \text{ mW/m}^2$, $52,8 \text{ mW/m}^2$, dan $16,5 \text{ mW/m}^2$ [7]. Berdasarkan data penelitian tersebut, dapat diketahui volume substrat mempengaruhi produksi listrik pada reaktor.

Pada penelitian ini, eksperimen yang dilakukan adalah melihat pengaruh variasi volume *chamber* pada *stacked MFC* terhadap produksi energi listrik dengan menggunakan tiga variasi volume *chamber*. Sehingga, dari ketiga reaktor *stacked MFC* dapat diketahui nilai optimum substrat yang digunakan saat reaktor dioperasikan secara seri dan paralel agar produksi listrik yang dihasilkan maksimal.

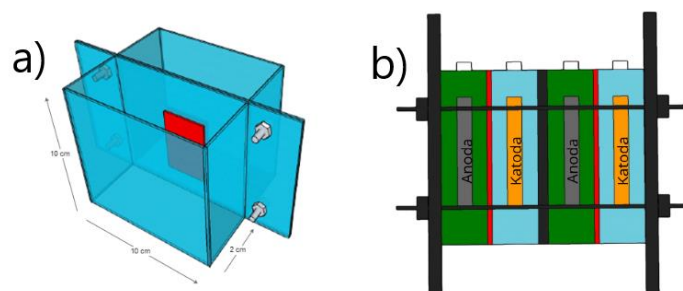
2. Metodologi Penelitian

2.1 *Stacked Microbial Fuel Cell*

Microbial Fuel Cell (MFC) merupakan teknologi yang memanfaatkan mikroba anaerobik sebagai katalisator pada proses perubahan material organik yang terjadi di dalam substrat sehingga dapat memproduksi elektron dan proton sehingga berpotensi untuk dimanfaatkan menjadi sumber energi listrik [8]. Pada umumnya, sistem MFC memiliki komponen utama yaitu kompartemen katoda, anoda, *proton exchange membrane* (PEM), dan sirkuit listrik. Mikroorganisme yang hidup pada kompartemen anoda dapat mengubah glukosa, asetat dan limbah cair menjadi karbon dioksida, proton, dan elektron. *Stacked MFC* merupakan tipe desain dengan gabungan beberapa MFC baik itu *single chamber* ataupun *dual chamber* yang dapat dioperasikan secara seri ataupun paralel. *Stacked MFC* yang dioperasikan secara paralel akan menghasilkan arus listrik yang lebih tinggi dibandingkan jika dioperasikan secara seri. Laju reaksi bioelektrokimia juga berlangsung lebih cepat jika *stacked MFC* dioperasikan secara paralel [5]. Pada penelitian yang dilakukan oleh Ayu Diah Syafaati (2019) tentang potensi produksi energi listrik dalam proses pemanfaatan limbah tahu dengan menggunakan *Stacked MFC* yang memiliki volume *chamber* 1000 mL menghasilkan kuat arus listrik maksimum sebesar 1,3 mA [9].

2.2 Prosedur Penelitian

2.2.1 Pembangunan *Stacked MFC*



Gambar 2. 1 (a) Konstruksi MFC *dual chamber*, dan (b) Desain 2D *stacked MFC*.

Pada penelitian ini akan dirancang tiga buah *stacked MFC*, masing-masing *stacked MFC* terdiri dari dua MFC tipe *dual-chamber* dengan variasi ukuran tiap *chamber* $10 \times 2 \times 10 \text{ cm}$, $10 \times 3 \times 10 \text{ cm}$, dan $10 \times 4 \times 10 \text{ cm}$. Diantara kompartemen anoda dan katoda terdapat lubang dengan ukuran $4 \times 4 \text{ cm}$ untuk menempatkan PEM.

Terdapat jalur udara dan kabel pada bagian atas *chamber* dengan diameter masing-masing 2 cm dan 0,5 cm. Keluar masuk aliran substrat menggunakan sistem semi kontinyu dengan cara manual melalui keran.

2.2.2 Preparasi Substrat

Substrat yang diaplikasikan pada penelitian adalah campuran air kolam ikan dan air bilasan bagas tebu dengan perbandingan 5:1. Air kolam ikan diambil dengan lumpur sedimentasi setebal 1 cm pada setiap dasar *chamber* sebagai substrat utama, sedangkan air bilasan bagas tebu sebagai sumber makanan bakteri pada substrat.

2.2.3 Preparasi Elektroda dan Substrat

Pada penelitian ini jenis PEM (*proton exchange membrane*) yang digunakan adalah Nafion 117 dengan ukuran 4 x 4 cm yang diletakkan diantara kompartemen anoda dan katoda. Elektroda yang diaplikasikan pada ruang katoda dan anoda adalah plat tembaga (Cu) dan seng (Zn) dengan ukuran 4 x 4 cm yang diletakkan sejajar dengan PEM.

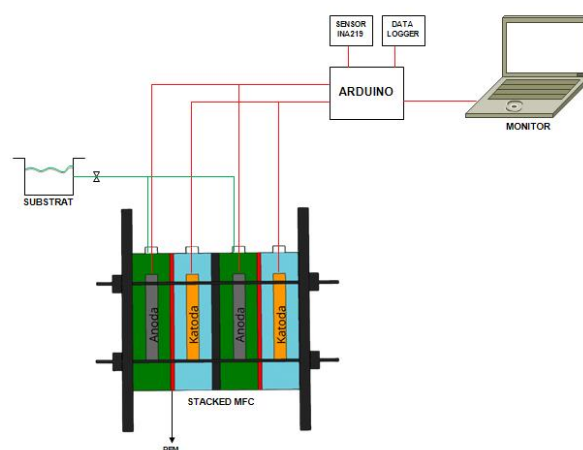
2.3 Eksperimen *Stacked MFC* Semi Kontinyu

Dalam setiap eksperimen, *chamber* akan dibersihkan terlebih dahulu dengan menggunakan Alkohol. Pada eksperimen yang dilakukan, penambahan dan pembuangan substrat dilakukan secara semi kontinyu. Pada penelitian Tagrid (2018) tentang sistem sel tunam mikroba dengan substrat sedimen air kolam dan nasi basi, diketahui lama waktu substrat dapat dipertahankan dalam reaktor pada hari ke-20 [10]. Oleh sebab itu, didapatkan volume penambahan dan pengurangan substrat yang mengacu pada rumus HRT yaitu sebanyak 17,5 mL, 27,5 mL, dan 37,5 mL per-hari seperti pada tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Penambahan dan pembuangan substrat pada masing-masing *stacked MFC*.

Volume Total Reaktor	Volume Penambahan & Pengurangan Substrat Per-Hari
350 mL	17,5 mL
550 mL	27,5 mL
750 mL	37,5 mL

2.4 Pengukuran Tegangan dan Arus Listrik



Gambar 2. 2 Sistem *stacked MFC*.

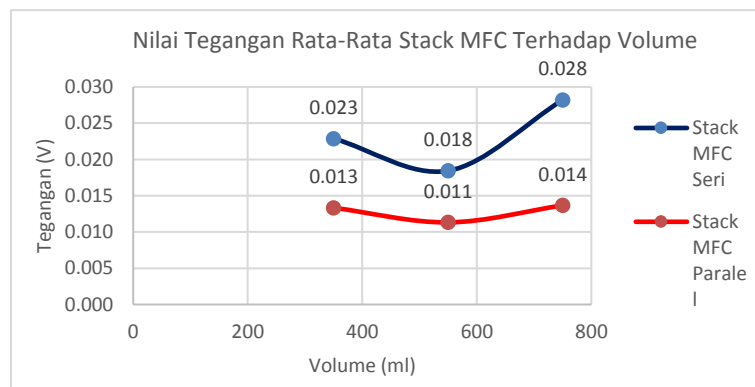
Pengukuran pada penelitian dilakukan selama 2 jam per-hari. Pengukuran tegangan dan arus listrik dilakukan dengan menggunakan resistor eksternal 200 Ohm serta Arduino yang membaca input melalui sensor tegangan dan arus INA219 yang terhubung dengan elektroda. Kemudian, data pengukuran tegangan dan arus akan disimpan oleh *data logger* serta akan dianalisis daya keluaran dari reaktor.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pengukuran Kuat Arus dan Tegangan Pada *Stacked* MFC

Pada eksperimen ini, digunakan reaktor *stacked* MFC A, B, dan C dengan variasi ukuran yaitu 10x2x10 cm pada *stacked* MFC A, 10x3x10 cm pada *stacked* MFC B, dan 10x4x10 cm pada *stacked* MFC C, dengan volume total masing-masing 350 mL, 550 mL, dan 750 mL. Pada setiap reaktor, tegangan dan kuat arus diukur menggunakan mikrokontroler Arduino dan sensor arus-tegangan. Data hasil pengukuran akan tersimpan secara otomatis pada *data logger*. Pengukuran dilakukan selama 15 hari dengan lama waktu pengambilan data 2 jam per-hari. Pengukuran tegangan dan kuat arus dikondisikan dengan menghubungkan *stacked* MFC secara seri dan paralel. Pada percobaan ini, tegangan dan kuat arus diukur dengan menggunakan sistem substrat semi kontinyu. Tegangan dan kuat arus yang diukur merupakan tegangan dan kuat arus *Closed Circuit* (Sirkuit Tertutup) yang menggunakan hambatan eksternal 200 Ohm.

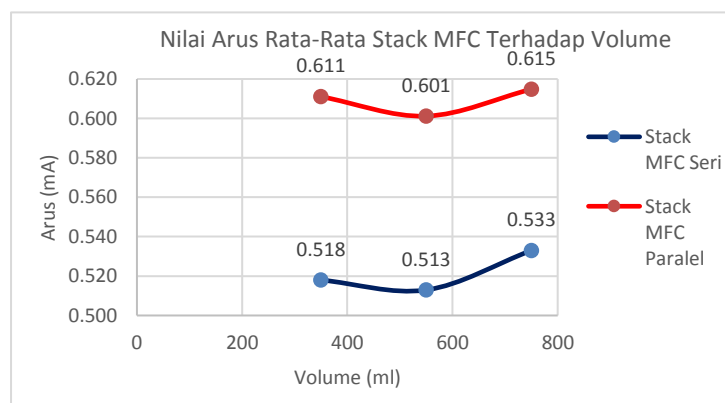
3.1.1 Hasil Pengukuran Tegangan Pada *Stacked* MFC Rangkaian Seri dan Paralel



Gambar 3. 1 Grafik nilai tegangan rata-rata terhadap volume.

Pada gambar 3.1 menampilkan grafik hasil pengukuran tegangan selama 15 hari yang sudah dirata-ratakan. Berdasarkan eksperimen *stacked* MFC yang telah dilakukan baik itu rangkaian seri atau paralel, secara umum penambahan nilai tegangan tidak linier dengan penambahan volume, hal tersebut bisa terjadi akibat adanya perbedaan aktivitas mikroorganisme dalam proses perubahan menjadi bentuk yang lebih sederhana (dekomposisi) pada masing-masing *stacked* MFC [6]. Berdasarkan grafik data hasil percobaan *stacked* MFC seperti pada gambar 3.1, tegangan rata-rata maksimum yang dihasilkan terdapat pada *stacked* MFC C (750 ml) yang dirangkai seri yaitu sebesar 0,028 V. Kemudian, pada *stacked* MFC yang dirangkai seri menghasilkan nilai tegangan rata-rata yang relatif fluktuatif pada setiap penambahan volumenya, dimana *stacked* MFC C menghasilkan tegangan 19% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC A dan 35% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B serta pada *stacked* MFC A menghasilkan tegangan 20% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B. Sementara itu, pada *stacked* MFC yang dirangkai paralel menghasilkan penambahan nilai tegangan yang tidak terlalu besar pada masing-masing *stacked* MFC, dimana pada *stacked* MFC C menghasilkan tegangan 3% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC A dan 18 % lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B serta pada *stacked* MFC A menghasilkan tegangan 16% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B.

3.1.2 Hasil Pengukuran Kuat Arus Pada *Stacked* MFC Rangkaian Seri dan Paralel



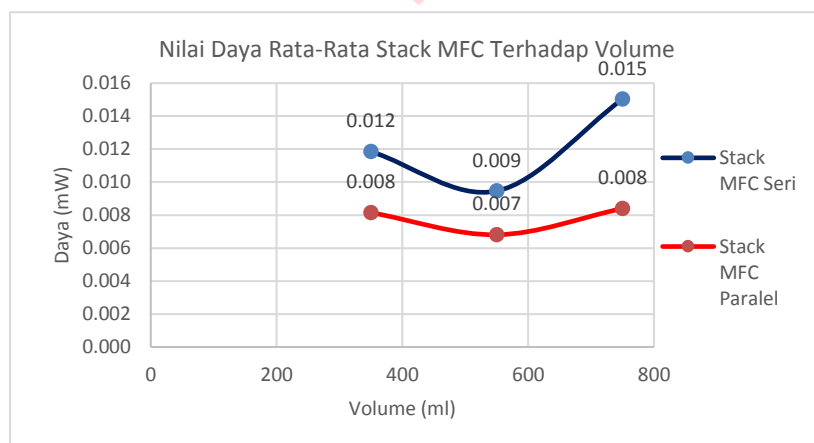
Gambar 3. 2 Grafik nilai arus rata-rata terhadap volume.

Pada gambar 3.2 menampilkan grafik hasil pengukuran arus selama 15 hari yang sudah dirata-ratakan. Pada percobaan ini, sistem substrat semi kontinyu yang diterapkan yaitu mengontrol penambahan dan pengurangan substrat pada reaktor *stacked* MFC selama 15 hari berturut-turut, menyebabkan produksi elektron dari proses metabolisme mikroba menjadi lebih stabil. Sehingga menyebabkan produksi arus listrik yang konstan [8]. Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada gambar 3.2, ketiga reaktor *stacked* MFC yang dioperasikan secara semi kontinyu menghasilkan nilai arus yang relatif konstan ataupun tidak terjadi penambahan nilai arus yang signifikan seiring bertambahnya volume substrat. Hal ini ditunjukkan oleh nilai variansi pada setiap reaktor *stacked* MFC yang mendekati 0 yaitu 0,005 pada *stacked* MFC A, 0,001 pada *stacked* MFC B, dan 0,002 pada *stacked* MFC C.

Berdasarkan grafik yang ditampilkan pada gambar 3.2, didapatkan nilai arus rata-rata maksimum terdapat pada *stacked* MFC (750 ml) C yaitu sebesar 0.615 mA. Pada penelitian ini, sama halnya dengan pengukuran tegangan, nilai arus rata-rata yang dihasilkan oleh masing-masing *stacked* MFC baik yang dirangkai seri ataupun paralel tidak linier seiring bertambahnya volume substrat. Pada *stacked* MFC yang dirangkai seri, dimana *stacked* MFC C menghasilkan arus 3% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC A dan 4% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B serta *stacked* MFC A menghasilkan arus 1% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B. Kemudian, hasil yang tidak jauh berbeda didapatkan pada *stacked* MFC yang dirangkai paralel yaitu *stacked* MFC C menghasilkan arus 1% dan 3% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC A dan B, serta *stacked* MFC A menghasilkan arus 2% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B.

3.2 Hasil Perhitungan Daya Rangkaian Seri dan Paralel Pada *Stacked* MFC

Perhitungan daya rata-rata pada *stacked* MFC ini menggunakan satuan dalam *mW* dari hasil perkalian arus dan tegangan pada *stacked* MFC. Pada gambar 4.5 menampilkan grafik hasil pengukuran daya selama 15 hari yang sudah dirata-ratakan.



Gambar 3.3 Grafik nilai daya rata-rata terhadap volume.

Berdasarkan pada gambar 3.3 nilai daya rata-rata pada *stacked* MFC baik rangkaian seri atau paralel memiliki tren grafik yang sama dengan nilai tegangan rata-rata yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh arus yang dihasilkan *stacked* MFC relatif konstan. Sehingga penambahan nilai daya pada masing-masing *stacked* MFC juga tidak linier seiring bertambahnya volume substrat. Dari hasil perhitungan daya rata-rata *stacked* MFC rangkaian seri dan paralel didapatkan perbandingan nilai daya rata-rata. Nilai daya rata-rata tiap *stacked* MFC yang dirangkai seri memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan *stacked* MFC yang dirangkai paralel dengan persentase rata-rata yaitu sebesar 35% serta nilai daya rata-rata terbesar terdapat pada *stacked* MFC C yang dirangkai seri yaitu mencapai 0,015 *mW*. Hal ini disebabkan oleh lebih besarnya presentase nilai tegangan rangkaian seri terhadap rangkaian paralel dibandingkan presentase nilai arus rangkaian paralel terhadap rangkaian seri. Oleh sebab itu, nilai tegangan yang dihasilkan memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan nilai arus.

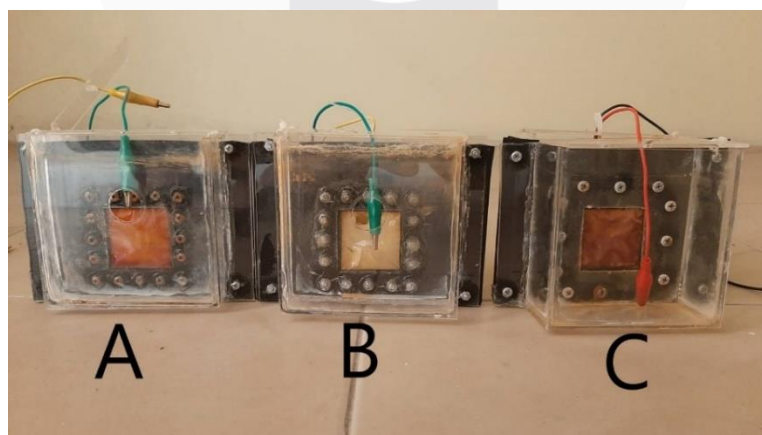
Sementara itu, karena tidak terjadi penambahan nilai daya yang signifikan seiring bertambahnya volume substrat, sehingga jika dilihat dari nilai daya per volume (mW/m^3) pada masing-masing *stacked* MFC, dimana *stacked* MFC yang menghasilkan nilai daya per volume maksimum terdapat pada *stacked* MFC A baik yang dirangkai seri ataupun paralel yaitu masing-masing sebesar $33,8 mW/m^3$ dan $23,2 mW/m^3$. Kemudian, diikuti dengan *stacked* MFC C yang menghasilkan nilai daya per volume sebesar $20 mW/m^3$ (seri) dan $11,1 mW/m^3$ (paralel), serta nilai daya per volume terkecil pada *stacked* MFC B yaitu sebesar $17,2 mW/m^3$ (seri) dan $12,3 mW/m^3$ (paralel).

3.3 Analisis Hasil Produksi Listrik Berdasarkan Variasi Volume Chamber

Setelah diketahui hasil dari *stacked* MFC rangkaian seri dan paralel terbukti dapat meningkatkan produksi listrik, selanjutnya akan dianalisis lebih lanjut terkait produksi listrik berdasarkan variasi dari volume *chamber stacked* MFC. Pada penelitian ini, volume *chamber* yang digunakan yaitu berukuran 10x2x10 cm (MFC A), 10x3x10 cm (MFC B), dan 10x4x10 cm (MFC C). Sementara itu, tebal elektroda yang digunakan yaitu 0,15 mm. Penempatan posisi elektroda yang dikondisikan tepat berada di tengah-tengah *chamber* dan sejajar dengan PEM menyebabkan jarak elektroda akan semakin jauh dengan PEM seiring bertambahnya lebar dari *chamber* pada masing-masing *stacked* MFC. Pada MFC, terdapat nilai *ohmic losses* yang merupakan resistansi linier pada aliran elektron di sirkuit listrik dan elektroda serta resistansi pada aliran ion antara elektroda dan membran pemisah. Nilai *ohmic losses* tersebut dapat dikurangi dengan meminimalkan jarak antara elektroda dan PEM [11]. Proses transfer proton akan berlangsung lebih cepat jika jarak elektroda dan PEM semakin dekat, hal ini berdampak pada efektifitas metabolisme mikroba nantinya. Jika jarak elektroda dan PEM semakin jauh, maka memungkinkan proton tidak bisa melewati PEM. Oleh sebab itu, semakin dekat jarak elektroda dengan PEM, maka dapat meningkatkan efisiensi produksi arus listrik [12].

Pada penelitian ini, berdasarkan gambar 3.2 nilai arus rata-rata *stacked* MFC A rangkaian paralel yaitu 1% lebih kecil dibandingkan nilai arus rata-rata *stacked* MFC C rangkaian paralel dan 2% lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B. Sementara itu, volume substrat yang digunakan pada *stacked* MFC A hanya 47% dari volume substrat pada *stacked* MFC C dan 63 % dari *stacked* MFC B. Hal ini menunjukkan bahwa *stacked* MFC A lebih efisien 52% dibandingkan *stacked* MFC C dan 38% dibandingkan *stacked* MFC B dalam memproduksi arus listrik berdasarkan volume substrat dan lebar *chamber* yang digunakan. Begitu pula dengan *stacked* MFC B yang menghasilkan arus rata-rata rangkaian paralel 3% lebih kecil dibandingkan nilai arus rata-rata *stacked* MFC C dan volume substrat yang digunakan 73% dari volume substrat pada *stacked* MFC C, dengan demikian *stacked* MFC B 24% lebih efisien dalam memproduksi arus listrik. Sementara itu, untuk nilai daya per volume maksimum terdapat pada *stacked* MFC A yaitu $33,8 \text{ mW}/\text{m}^3$ yang menandakan MFC dengan ukuran paling kecil paling efisien dalam memproduksi listrik.

Kemudian, jika berbicara mengenai volume substrat maka tidak jauh dari pembahasan mengenai aktivitas bakteri. Secara teoritis, banyaknya aktivitas bakteri sangat bergantung pada jumlah substrat. Tetapi, secara aktual pada suatu substrat terdapat nilai optimum dalam memproduksi listrik yang maksimal [7]. Hal ini mengindikasikan bahwa tidak selalu jumlah substrat berbanding lurus dengan jumlah bakteri didalamnya. Pada penelitian ini, berdasarkan pada grafik gambar 3.3, nilai daya rata-rata pada *stacked* MFC A, B, dan C tidak berbanding lurus dengan volume substrat yang digunakan. Nilai daya rata-rata pada *stacked* MFC B lebih kecil yaitu $0,009 \text{ mW}$ pada rangkaian seri dan $0,007 \text{ mW}$ pada rangkaian paralel dibandingkan *stacked* MFC A yang volume substratnya lebih kecil yaitu $0,012 \text{ mW}/\text{m}^2$ pada rangkaian seri dan $0,008 \text{ mW}$ pada rangkaian paralel. Hal tersebut disebabkan oleh lebih sedikitnya aktivitas bakteri pada *stacked* MFC B dibandingkan *stacked* MFC A dan C. Pada MFC yang menggunakan PEM, dalam penelitian ini yaitu Nafion 117, aktivitas bakteri dalam proses metabolisme senyawa organik ditandai dengan terbentuknya biofilm pada membran [13].

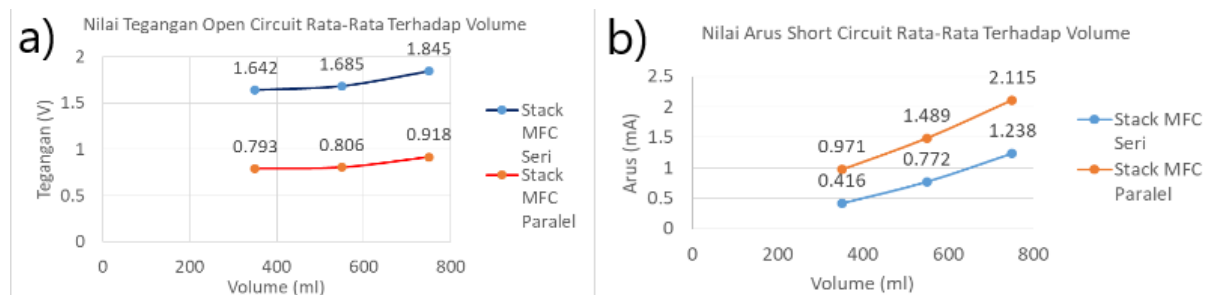


Gambar 3. 4 Reaktor *stacked* MFC setelah eksperimen.

Pada Gambar 3.4, merupakan bentuk fisik dari reaktor *stacked* MFC A, B dan C setelah dilakukannya eksperimen. Dari gambar diatas dapat dilihat perbedaan tingkat kepekatan biofilm yang menempel pada membran Nafion 117. Semakin pekat warna dari biofilm menandakan semakin banyak aktivitas bakteri yang terjadi pada *stacked* MFC. Pada MFC B, warna dari PEM terlihat paling jernih dibandingkan MFC A dan C. Hal ini

mengindikasikan bahwa sedikitnya aktivitas bakteri pada MFC B sehingga berdampak pada produksi arus listriknya.

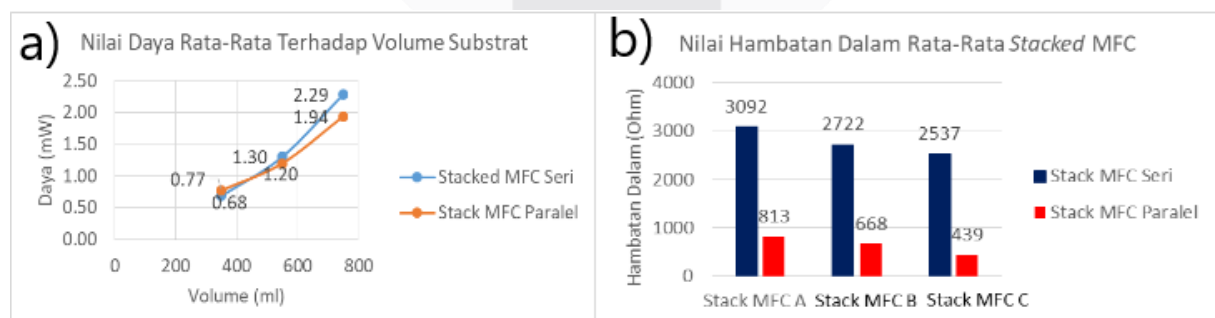
3.4 Hasil Pengukuran Tegangan *Open Circuit* dan Arus *Short Circuit* Rangkaian Seri dan Paralel Pada *Stacked MFC*



Gambar 3.5 (a) Grafik tegangan *open circuit* rata-rata terhadap volume, dan (b) Grafik arus *short circuit* rata-rata terhadap volume.

Selanjutnya, pada penelitian ini dilakukan eksperimen selama 10 hari untuk mengukur tegangan *open circuit* dan arus *short circuit* menggunakan substrat baru dengan komposisi yang sama. Kemudian dilakukan perhitungan nilai hambatan dalam pada masing-masing *stacked MFC*. Pada gambar 3.5 (a) dan (b) menampilkan nilai tegangan *open circuit* dan arus *short circuit* terhadap volume substrat yang sudah dirata-ratakan selama 10 hari dari masing-masing *stacked MFC*. Berdasarkan gambar 3.5 (a), dari hasil perhitungan tegangan *open circuit* rata-rata terhadap volume substrat, pada *stacked MFC* yang dirangkai seri dan paralel didapatkan nilai tegangan *open circuit* maksimum pada *stacked MFC C* (seri) yaitu sebesar 1,845 V. Kemudian, jika dilihat dari tegangan yang dihasilkan terhadap penambahan volume substrat, dapat dilihat bahwa penambahan nilai tegangan pada *stacked MFC A* dan B tidak signifikan, dimana hanya memiliki selisih 0,043 V. Sementara itu, di sisi lain terjadi penambahan tegangan yang cukup besar pada *stacked MFC B* dan C dimana selisih nya mencapai 0,16 V. Hal yang sama juga terjadi pada *stacked MFC* yang dirangkai paralel, dimana nilai tegangan yang dihasilkan pada *stacked MFC A* dan B tidak jauh berbeda yaitu hanya memiliki selisih sebesar 0,013 V serta pada *stacked MFC B* dan C memiliki selisih tegangan sebesar 0,112 V. Artinya, semakin besar volume substrat memungkinkan semakin besar penambahan nilai tegangan yang dihasilkan, hal ini disebabkan oleh semakin banyak ruang yang tersedia bagi bakteri dalam melakukan proses metabolisme.

Berdasarkan gambar 3.5 (b), dari hasil perhitungan arus *short circuit* rata-rata terhadap volume substrat, pada *stacked MFC* yang dirangkai seri dan paralel didapatkan nilai arus *short circuit* maksimum pada *stacked MFC C* (paralel) yaitu sebesar 2,115 mA. Kemudian, jika dilihat dari arus yang dihasilkan terhadap penambahan volume substrat, dapat dilihat bahwa penambahan nilai arus pada *stacked MFC* rangkaian seri dan paralel relatif signifikan. Dimana pada *stacked MFC* rangkaian seri selisih nilai arus antara *stacked MFC A* dan B serta B dan C yaitu masing-masing sebesar 0,356 mA dan 0,466 mA. Begitu pula hasil yang didapatkan pada *stacked MFC* rangkaian paralel, dimana selisih nilai arus antara *stacked MFC A* dan B serta B dan C secara berturut-turut yaitu sebesar 0,518 mA dan 0,626 mA.



Gambar 3.6 (a) Grafik daya rata-rata terhadap volume, dan (b) Grafik hambatan dalam rata-rata.

Berdasarkan gambar 3.6 (a), pada masing-masing *stacked MFC* baik rangkaian seri ataupun paralel, didapatkan nilai daya maksimum yang terdapat pada *stacked MFC C* (seri) yaitu sebesar 2,29 mW. Kemudian, dari nilai daya yang dihasilkan terhadap penambahan volume pada masing-masing *stacked MFC* terjadi

penambahan nilai daya yang lebih besar pada *stacked* MFC B dan C dibandingkan *stacked* MFC A dan B yaitu masing-masing sebesar 0,99 mW dan 0,77 mW pada rangkaian seri, serta 0,74 mW dan 0,52 mW pada rangkaian paralel. Hal ini disebabkan nilai selisih tegangan dan selisih arus yang dihasilkan pada *stacked* MFC A dan B tidak lebih besar dibandingkan *stacked* MFC B dan C.

Kemudian, pada percobaan ini dilakukan perhitungan nilai hambatan dalam dari masing-masing *stacked* MFC seperti yang ditampilkan pada gambar 3.6 (b). Nilai hambatan dalam pada *stacked* MFC rangkaian seri cenderung lebih besar dibandingkan *stacked* MFC rangkaian paralel. Dalam teorinya, nilai hambatan dalam (R_{in}) pada suatu sumber yang dirangkai seri merupakan penjumlahan dari nilai hambatan (R_{in}) masing-masing sumber yang dalam kasus ini adalah MFC [14]. Kemudian, nilai hambatan dalam ini berdampak pada nilai daya yang dihasilkan, dimana semakin besar nilai hambatan dalamnya, maka semakin kecil nilai daya yang dihasilkan. Secara sederhana dapat dijelaskan bahwa apabila arus yang mengalir pada sirkuit eksternal MFC adalah I dan hambatan dalam MFC adalah R_d , berdasarkan hukum Ohm pada MFC akan mengalami penurunan tegangan sebesar I dikalikan R_d , hal ini menyebabkan tegangan terminal pada MFC berkurang sebesar I dikalikan R_d dari nilai tegangan rangkaian terbukanya (*open circuit*).

4. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan hasil pembahasan yang telah dilakukan, dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. *Stacked* MFC yang dirangkai seri memperoleh energi listrik maksimum yaitu 0,028 V untuk tegangan pada *stacked* MFC C, 0,533 mA untuk arus pada *stacked* MFC C, dan 0,015 mW untuk daya pada *stacked* MFC C.
2. *Stacked* MFC yang dirangkai paralel memperoleh energi listrik maksimum yaitu 0,014 V untuk tegangan pada *stacked* MFC C, 0,615 mA untuk arus pada *stacked* MFC C, dan 0,008 mW untuk daya pada *stacked* MFC A dan C.
3. Pada *stacked* MFC yang dirangkai seri menghasilkan penambahan nilai tegangan dan arus terbesar dari setiap penambahan volumenya yaitu masing-masing 35% dan 4% lebih besar pada *stacked* MFC C dibandingkan *stacked* MFC B. Sementara itu, pada *stacked* MFC rangkaian paralel, menghasilkan nilai penambahan tegangan dan arus terbesar dari setiap penambahan volumenya yaitu masing-masing 18% dan 3% lebih besar pada *stacked* MFC C dibandingkan *stacked* MFC B.
4. Produksi arus listrik berdasarkan volume substrat dan lebar *chamber* yang digunakan *stacked* MFC A 38% lebih efisien dibandingkan *stacked* MFC B dan 52% dibandingkan *stacked* MFC C.
5. Semakin besar volume substrat belum tentu semakin banyak populasi bakteri di dalamnya, produksi energi listrik dari MFC sangat dipengaruhi oleh populasi bakteri yang ada pada substrat dan *supply* makanan yang diberikan.
6. Pada pengukuran tegangan *open circuit*, arus *short circuit*, dan daya didapatkan nilai maksimum yaitu masing-masing 1,845 V pada *stacked* MFC C rangkaian seri, 2,115 mA pada *stacked* MFC C rangkaian paralel, dan 2,29 mW pada *stacked* MFC C rangkaian seri.

REFERENSI

- [1] Suharyati, S. H. Pambudi, J. L. Wibowo and N. I. Pratiwi, "OUTLOOK ENERGI INDONESIA 2019," Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, Jakarta, Indonesia., 2019.
- [2] R. Kumar, L. Singh and A. W. Zularisam, "Microbial Fuel Cells: Types and Applications," Universiti Malaysia Pahang (UMP), Pahang, 2017.
- [3] F. Li, Y. Sharma, Y. Lei, B. Li and Q. Zhou, "Microbial Fuel Cells: The Effects of Configurations, Electrolyte Solutions, and Electrode Materials on Power Generation.," in *Humana Press*, Storrs, 2009.
- [4] W. Rinaldi, Y. Nurdin, S. W. Windari and C. P. Agustina, "Pengolahan Limbah Cair Organik dengan Microbial Fuel Cell," *Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan*, vol. 10, no. 2, pp. 92-98, 2014.
- [5] Z. Du, H. Li and T. Gu, "A State Of The Art Review On Microbial Fuel Cells A Promising Technology For Wastewater Treatment and Bioenergy," *ScienceDirect*, vol. 25, pp. 464-482, 2007.

- [6] D. R. Sari and C. Hidayah, "Studi Pemanfaatan Lumpur Sebagai Sumber Alternatif Energi Dengan Menggunakan Microbial Fuel Cells (MFCs)," Fakultas Teknik Industri, Institut Teknologi Surabaya., Surabaya, 2017.
- [7] R. T. Hakiem, G. Samudro and M. A. Budiharjo, "Pengaruh Volume Sampah Daun Terhadap Kinerja Solid Phase Microbial Fuel Cell (SMFC)," in *Prosiding SNST ke-8, Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim*, Semarang, 2017.
- [8] B. E. Logan, B. Hamelers, R. Rozendal, U. Schroder, J. Keller, S. Freguia, P. Aelterman, W. Verstraete and K. Rabaey, "Microbial Fuel Cells : Methodology and Technology," *Environmental Science & Technology*, vol. 40, no. 17, pp. 5181-5192, 2006.
- [9] A. D. Syafaati, D. R. Wulan and I. Nugraha, "Potensi Perolehan Energi Listrik dalam Proses Pengolahan Limbah Tahu Melalui Microbial Fuel Cell (MFC)," *Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*, vol. 3, no. 2, pp. 41-50, 2019.
- [10] T. Ruwaida, M. R. Kirom and A. Qurthobi, "STUDI POTENSI PENGARUH PENAMBAHAN NASI BASI PADA SEDIMEN KOLAM IKAN UNIVERSITAS TELKOM SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK MELALUI SISTEM SEL TUNAM MIKROBA (STM)," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 2372-2379, 2018.
- [11] E. O. Koroglu, H. C. Yoruklu, A. Demir and B. Ozkaya, "Scale-Up and Commercialization Issues of the MFCs: Challenges and Implications," Elsevier B.V, Istanbul, 2019.
- [12] Y. Choi, E. Jung, H. Park, S. R. Paik, S. Jung and S. Kim, "Construction of Microbial Fuel Cells Using Thermophilic Microorganisms, *Bacillus licheniformis* and *Bacillus thermoglucosidasius*," *Bull. Korean Chem. Soc.*, vol. 25, no. 6, pp. 813-818, 2004.
- [13] K. J. Chae, M. Choi, F. F. Ajayi, W. Park, I. C. Seop and I. S. Kim, "Mass Transport through a Proton Exchange Membrane (Nafion) in Microbial Fuel Cells," *Energy and Fuels*, vol. 22, pp. 169-176, 2008.
- [14] M. O. Yusuf and N. B., "A novel electron acceptor for microbial fuel cells: Nature of circuit connection on internal resistance.," Sevas Educational Society , Port Harcourt, 2010.