

# Pengaruh Jenis Anoda *Microbial Fuel Cells* Terhadap *Power Density* Dan Penyisihan Kandungan Organik Limbah Cair Industri Tahu

M. Ardiansyah Dwi Tama, Yayok Suryo Purnomo\*, Syadzadhiya Qothrunada Zakiyayasin Nisa'

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

\*Koresponden email: yayoksp.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 16 Agustus 2024

Disetujui: 23 Agustus 2024

## Abstract

Tofu industry production activities generate wastewater from soy milk coagulation and moulding processes. The high content of organic compounds in tofu industry wastewater, including COD, requires treatment before discharge into water bodies. The high organic content in this wastewater can be used as a substrate in MFC systems. This research aims to analyse the effect of different anode types in the combination of MFCs-ABR reactors on the power density ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) and COD removal efficiency of tofu industry wastewater. The research method is quantitative, starting with seeding and acclimatization for 21 days, and then analysing the effect of graphite carbon and stainless steel anodes on the performance of MFCs-ABR reactors with different retention times of 24, 48, 72, 96 hours. The results showed that the graphite carbon anode produced the highest power density of  $204.13 \text{ mW}/\text{m}^2$  and COD removal efficiency of 60.42% at a retention time of 96 hours.

**Keywords:** *microbial fuel cells, electricity production, anode type, cod removal, tofu wastewater*

## Abstrak

Kegiatan produksi di industri tahu menghasilkan air limbah yang berasal dari proses penggumpalan protein susu kedelai dan pencetakan. Tingginya kandungan senyawa organik yang terkandung pada air limbah industri tahu salah satunya yaitu COD, sehingga diperlukannya pengolahan air limbah sebelum dialirkan menuju badan air. Senyawa organik yang tinggi pada air limbah industri tahu dapat digunakan sebagai substrat pada sistem MFCs. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh jenis anoda pada kombinasi reaktor MFCs-ABR terhadap *power density* ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) dan penyisihan kandungan COD air limbah industri tahu. Metode penelitian dilakukan secara kuantitatif dimulai dengan seeding dan aklimatisasi selama 21 hari kemudian menganalisis jenis anoda berupa karbon grafit dan *stainless steel* terhadap kinerja reaktor MFCs-ABR dengan variasi waktu tinggal yaitu 24, 48, 72, 96 jam. Hasil penelitian menunjukkan jenis anoda karbon grafit menghasilkan *power density* tertinggi sebesar  $204,13 \text{ mW}/\text{m}^2$  dan efisiensi penyisihan COD sebesar 60,42% pada waktu tinggal reaktor 96 jam.

**Kata Kunci:** *microbial fuel cells, produksi listrik, jenis anoda, penyisihan cod, air limbah tahu*

## 1. Pendahuluan

Industri tahu telah mengalami pertumbuhan secara berkelanjutan di berbagai daerah di Indonesia dalam skala mikro dengan penerapan proses produksi yang bersifat tradisional. Industri tahu menghasilkan limbah padat dan cair selama proses pembuatan tahu [1] [2]. Industri tahu di Indonesia utamanya yang beroperasi skala kecil masih tidak memiliki IPAL [3]. Karakteristik air limbah industri tahu salah satunya mengandung bahan organik tinggi seperti COD dan kandungan pencemar lainnya. Sehingga perlunya pengolahan terlebih dahulu agar tidak menurunkan kualitas lingkungan [4].

Tingginya kandungan senyawa organik berupa protein, lemak, dan karbohidrat dapat digunakan sebagai substrat pada sistem pengolahan *Microbial Fuel Cells* (MFCs). Mikroorganisme menggunakan substrat untuk pertumbuhan biomassa dan pemeliharaan sel pada tubuhnya [4]. MFCs adalah bentuk teknologi yang dapat menghasilkan listrik oleh bantuan bahan organik pada air limbah dengan memanfaatkan metabolisme mikroorganisme untuk menghasilkan arus listrik [6]. Kemampuan mikroorganisme untuk memecah medium organik dalam reaktor MFCs menghasilkan ion elektron ( $e^-$ ) dan proton ( $H^+$ ). Ion tersebut digunakan untuk menciptakan perbedaan potensial listrik yang kemudian menghasilkan energi listrik [7].

Mikroba anaerobik pada MFCs memiliki peranan penting dalam proses konversi bahan organik menjadi biolistrik [8]. Proses anaerob yang terjadi menghasilkan gas metana sebagai produk samping dari penguraian bahan organik [9]. Akumulasi gas metana di area tertentu dapat berbahaya bagi mikroba, sehingga perlu adanya pengadukan agar terjadi homogenitas dalam reaktor [10]. *Anaerobic Baffled Reactor*

(ABR) merupakan bioreaktor yang memiliki beberapa kompartemen dan dipisahkan oleh sekat-sekat vertikal. Sekat ini berfungsi untuk menciptakan aliran air limbah bergerak naik turun (*upflow-downflow*), sehingga terjadi proses pengadukan secara alami [11]. Selain itu, ABR dapat digunakan untuk proses hidrolisis yang mengubah senyawa organik menjadi senyawa yang jauh lebih sederhana. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kemampuan mikroorganisme dalam mencerna kandungan organik di MFCs sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam menghasilkan energi listrik [12].

Pengolahan *Microbial Fuel Cell* (MFCs) yang menggunakan pasangan elektroda karbon grafit dapat mencapai efisiensi penyisihan COD maksimum sebesar 88% [13]. Selain itu, pengukuran terhadap produksi energi listrik menunjukkan *power density* maksimum sebesar 2292,871 mW/m<sup>2</sup> [8]. Maka, tujuan penelitian ini yaitu menganalisis pengaruh jenis anoda terhadap hasil produksi energi listrik dan penyisihan COD menggunakan kombinasi reaktor MFCs-ABR.

## 2. Metode Penelitian

### *Seeding*

Pada penelitian ini tahap *seeding* dilakukan untuk pengembangbiakan mikroorganisme dalam air limbah secara anaerob. Pada proses ini terdapat penambahan *Effective Microorganism* (EM4) sebagai bakteri starter, glukosa sebagai nutrisi, pupuk urea dan pupuk TSP sebagai nutrient yang dapat mendukung proses pertumbuhan mikroorganisme [14]. Komposisi penambahan nutrient sesuai rasio COD:N:P yaitu 100:5:1 [15]. Pengolahan biologis dapat berjalan secara optimal apabila terdapat nitrogen dan fosfor yang memadai [16]. Selama proses *seeding* dilakukan pengamatan terhadap parameter *Mixed Liquor Suspended Solid* (MLSS).

### *Aklimatisasi*

Aklimatisasi adalah penyesuaian oleh suatu organisme agar dapat beroperasi pada lingkungan baru. Prinsip kerja aklimatisasi adalah dengan memasukkan air limbah ke dalam reaktor secara bertahap dari 50% hingga 100% [16]. Pada penelitian ini, terdapat 2 tahapan aklimatisasi yaitu tahap pertama dengan memberi 50% volume air limbah kemudian tahap kedua dengan memberi 100% volume air limbah ke dalam reaktor. Selesaiannya proses aklimatisasi berada pada kondisi *steady state* yang artinya fluktuasi penyisihan kadar COD tidak melebihi 10% [17].

### *Penelitian Utama*

Penelitian diawali dengan mengaktivasi elektroda karbon grafit dan *stainless steel* menggunakan larutan NaOH dan HCL masing-masing direndam selama 1 hari kemudian disimpan dalam aquades. Selanjutnya dilakukan pembuatan jembatan garam sebagai medium perpindahan proton (H<sup>+</sup>) dengan komposisi 100 ml aquades lalu ditambahkan larutan KCL sejumlah 11,099 gram dan nutrient agar sebanyak 2,5 gram [18]. Desain reaktor kombinasi MFCs-ABR terbuat dari akrilik dengan volume total ABR 6815,3 cm<sup>3</sup>, sedangkan katoda MFCs masing-masing mengikuti dimensi ruang anoda yang berada pada salah satu kompartemen ABR yaitu 678,3 cm<sup>3</sup>. Pada penelitian ini, Sistem dari MFCs menggunakan elektroda berupa karbon grafit, *stainless steel*, dan tembaga. Elektroda *Stainless steel* dan karbon grafit diletakkan pada ruang anoda dan elektroda tembaga diletakkan pada ruang katoda yang masing-masing ruangnya dilengkapi dengan penjepit buaya dan dihubungkan pada kabel (sirkuit eksternal).

Kabel dan penjepit buaya kemudian disambungkan dengan multimeter digital dengan tujuan agar dapat mengukur kuat arus listrik dan tegangan yang dihasilkan oleh MFCs. Kuat arus diukur dalam mili Ampere (mA) dan tegangan dalam volt (V). Nilai keduanya menghasilkan *power density* yang diukur dalam satuan miliwatt per meter persegi luas permukaan elektroda (mW/m<sup>2</sup>) [19]. Prosedur perhitungan untuk mendapatkan nilai *power density* dapat dilihat pada persamaan (I) berikut.

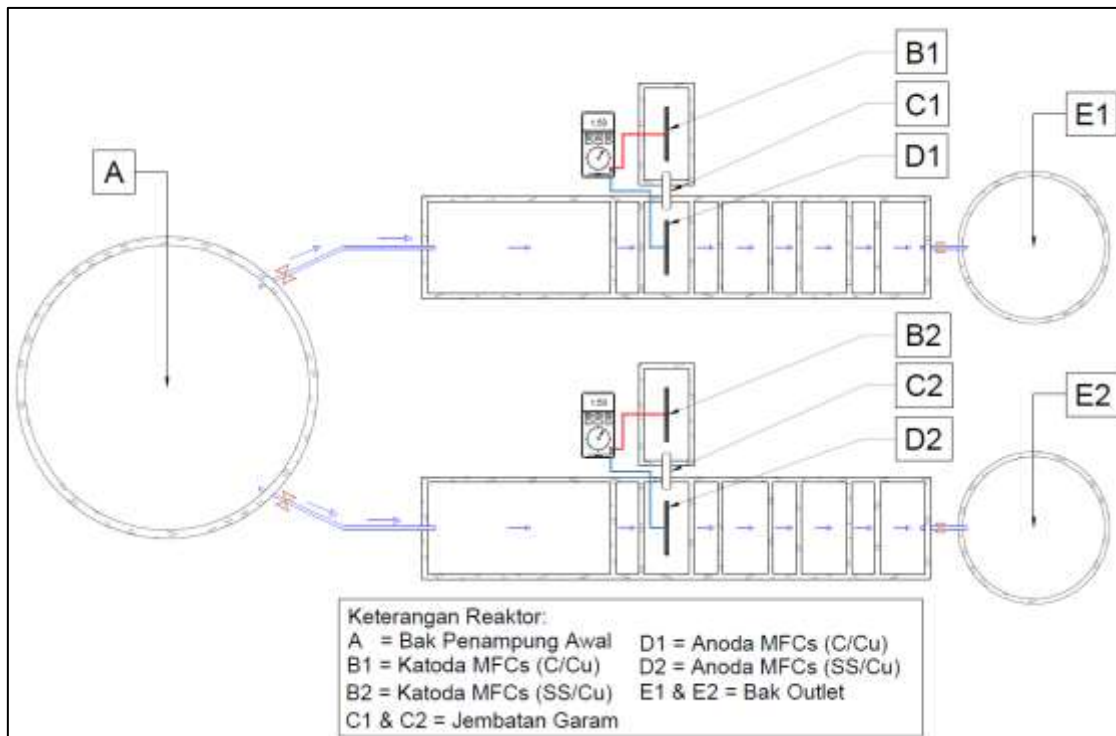
$$P = \frac{V \times I}{A} \dots \dots \dots (I)$$

Keterangan:

- P = Power Density (mW/m<sup>2</sup>)
- V = Tegangan (V)
- I = Kuat Arus (mA)
- A = Luas Permukaan Elektroda (m<sup>2</sup>)

Pada penelitian ini, ruang anoda di ABR terletak pada kompartemen kedua. Kompartemen kedua pada ABR menunjukkan densitas daya tertinggi karena sebagian senyawa organik telah terdegradasi di kompartemen pertama, sehingga dapat mengurangi toksisitas dalam aliran air. Penurunan toksisitas ini

membuat kompartemen kedua memiliki pasokan nutrisi lebih baik dan toksisitas yang rendah terhadap mikroorganisme dibandingkan dengan kompartemen lainnya [20]. Penelitian berlangsung dengan sistem *batch* selama 96 jam dengan mengukur *power density* dan konsentrasi COD. Desain reaktor dapat dilihat pada **Gambar 1** berikut.



**Gambar 1.** Reaktor Kombinasi MFCs-ABR

Sumber: Penelitian (2024)

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Karakteristik Awal Limbah Cair Industri Tahu

Analisis karakteristik awal dilakukan untuk mengetahui konsentrasi COD dan kondisi pH awal yang terkandung pada limbah tahu. Didapatkan limbah tahu memiliki pH dengan kondisi asam dan kadar organik yang cukup tinggi. Berikut adalah hasil pengujian terhadap karakteristik awal limbah tahu yang tercantum pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Uji Awal Karakteristik Limbah Cair Industri Tahu

No.	Parameter	Satuan	Hasil Uji	Baku Mutu
1.	COD	mg/L	7987	300
2.	pH	-	4,09	6-9

Sumber: Data Primer (2024)

Pada penelitian ini, reaktor dioperasikan secara *batch* dimulai dengan memasukkan limbah tahu pada bak penampung awal, kemudian dilakukan netralisasi pH air limbah hingga kondisi netral 6,5 – 8,5. Keseimbangan pH sangat penting dalam semua proses yang melibatkan mikroorganisme. Selain itu, pH juga dapat memengaruhi transfer proton dan reaksi katoda, yang secara langsung memengaruhi kinerja MFCs. Umumnya, MFCs dapat berjalan baik pada pH netral untuk memastikan kondisi optimum bagi pertumbuhan mikroorganisme yang berperan dalam menghasilkan listrik [21].

#### 3.2 Seeding Dan Aklimatisasi

Tahap *seeding* terjadi selama 15 hari dengan menambahkan nutrisi (*feeding*) setiap harinya. Pengamatan terhadap laju pertumbuhan bakteri dilakukan setiap 3 hari sekali dengan menguji parameter *Mixed Liquor Suspended Solid* (MLSS). Batasan proses *seeding* ditandai dengan pertumbuhan mikroorganisme yang telah memenuhi persyaratan dimana minimum massa total mikroorganisme adalah 2000 – 4000 mg/L [22]. Pada penelitian ini, parameter MLSS meningkat setiap dilakukan pengujian selama 3 hari sekali. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan pada laju pertumbuhan mikroorganisme selama

proses *seeding*. Selain itu, pada *seeding* hari ke-15 parameter MLSS telah memenuhi persyaratan minimum massa mikroorganisme dengan konsentrasi 2140 mg/L kemudian penelitian dilanjutkan pada tahap aklimatisasi.

Tahapan aklimatisasi dimulai dengan menambahkan volume air limbah 50% ke dalam kompartemen anoda yang berada di *Anaerobic Baffled Reactor* (ABR) kemudian dilakukan pengamatan terhadap konsentrasi COD setiap hari, apabila penurunan yang terjadi stabil <10% maka dapat dilakukan penambahan volume air limbah menjadi 100%. Efisiensi penurunan yang diperoleh saat volume air limbah 50% dengan konsentrasi COD 6756 mg/L mencapai 19,23% pada hari kedua dan 28,85% pada hari ketiga kemudian untuk volume air limbah 100% dengan konsentrasi COD 7661 mg/L mencapai 20,63% pada hari kelima dan 28,57% pada hari keenam. Hal ini menunjukkan fase aklimatisasi dalam kondisi stabil (*steady state*) yaitu ditandai dengan penurunan konsentrasi COD tidak melebihi 10% [23].

### 3.3 Pengaruh Jenis Anoda dan Waktu Tinggal Terhadap *Power Density*

*Power density* adalah jumlah daya listrik yang diperoleh per satuan luas permukaan elektroda [24]. Daya listrik yang dihasilkan oleh kombinasi reaktor MFCs-ABR dihitung berdasarkan nilai kuat arus listrik (I) dan tegangan (V) pada masing-masing reaktor. Kuat arus listrik dan tegangan asalnya dari aktivitas mikroorganisme pada kompartemen anoda yang menghasilkan elektron kemudian diukur menggunakan multimeter digital. Tegangan listrik merupakan perbedaan potensial elektrik antara dua titik pada rangkaian yang diukur menggunakan satuan volt (V).

Nilai tegangan listrik bisa bervariasi mulai dari sangat rendah hingga sangat tinggi, tergantung pada besar perbedaan potensial antara kedua titik tersebut [25]. Tegangan listrik disebabkan oleh adanya pergerakan muatan negatif dari area dengan potensial rendah menuju area dengan potensial lebih tinggi. Berikut merupakan hasil pengukuran tegangan dengan jenis anoda yang berbeda selama proses penelitian yang tercantum pada **Tabel 2**.

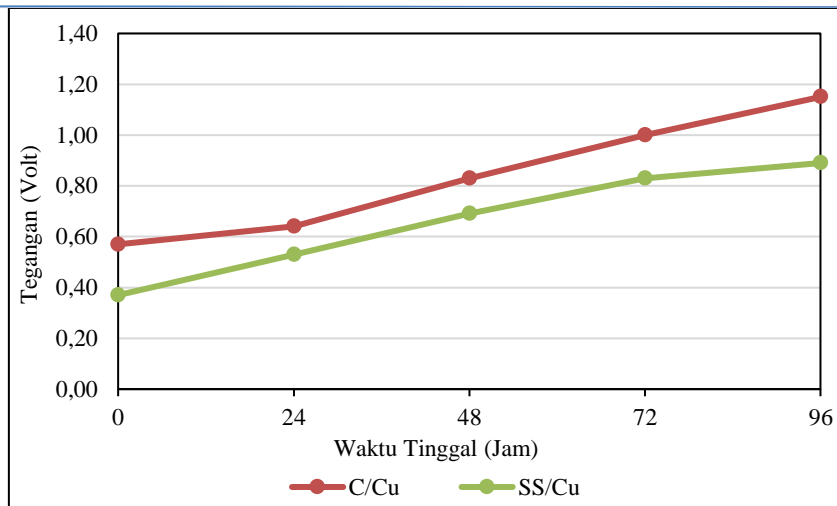
**Tabel 2.** Pengukuran Nilai Tegangan (V)

Waktu Tinggal (Jam)	Jenis Anoda	
	C/Cu	SS/Cu
0	0,57	0,37
24	0,64	0,53
48	0,83	0,69
72	1,00	0,83
96	1,15	0,89

Sumber: Data Primer (2024)

Berdasarkan **Tabel 2** nilai tegangan yang dihasilkan berada pada kisaran 0,30 – 1,15 V. Nilai tegangan listrik yang dihasilkan terbesar berada pada reaktor C/Cu dengan jenis anoda karbon grafit pada waktu tinggal 96 jam yaitu sebesar 1,15 V. Selain itu, reaktor SS/Cu yang menggunakan anoda *stainless steel* menghasilkan nilai tegangan maksimum 0,89 V pada waktu tinggal 96 jam. Hal ini menunjukkan bahwa waktu tinggal memiliki pengaruh terhadap tegangan yang dihasilkan. Peningkatan metabolisme mikroba terjadi karena semakin banyaknya senyawa organik yang dimanfaatkan oleh mikroba, sehingga terjadi peningkatan pula pada jumlah listrik yang dihasilkan. Nilai voltase terkecil pada setiap reaktor terjadi pada waktu tinggal 0 jam yaitu saat air limbah baru dimasukkan ke dalam reaktor dengan reaktor C/Cu sebesar 0,57 V dan reaktor SS/Cu sebesar 0,37 V. Peningkatan voltase dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Berdasarkan **Gambar 2** kedua reaktor mengalami kenaikan voltase sejalan dengan waktu tinggal yang semakin bertambah. Hal ini dikarenakan adanya proses metabolisme oleh mikroorganisme yang meningkat seiring dengan semakin lama waktu tinggal reaktor, ditandai oleh meningkatnya tegangan listrik yang berasal dari elektron (e<sup>-</sup>) hasil metabolisme tersebut. Peningkatan proses metabolisme terjadi karena semakin lama reaktor beroperasi maka senyawa organik akan menjadi lebih sederhana dan berpengaruh pada kinerja *Microbial Fuel Cells* (MFCs). Sehingga efisiensi MFCs akan semakin meningkat jika substrat yang diproses oleh mikroorganisme lebih sederhana [26].



**Gambar 2.** Hubungan Tegangan dan Waktu Tinggal Pada Setiap Reaktor  
 Sumber: Data Primer (2024)

Waktu optimum pengolahan untuk reaktor MFCs adalah 96 jam dikarenakan setelah waktu tersebut nilai tegangan dan kuat arus listrik mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh semakin sedikit substrat yang dapat dioksidasi oleh mikroba, sehingga produksi elektron semakin menurun [13]. Hasil pengukuran terhadap masing-masing reaktor menunjukkan jenis anoda karbon grafit pada reaktor C/Cu mengalami peningkatan voltase yang cenderung stabil dan lebih tinggi dibandingkan reaktor yang menggunakan anoda *stainless steel*. Hal tersebut dikarenakan anoda karbon grafit memiliki nilai potensial standar yang lebih reaktif dibandingkan dengan anoda *stainless steel*. Selain tegangan, pengukuran terhadap kuat arus listrik (I) dilakukan untuk mendapatkan nilai *power density*.

Arus listrik (I) terbentuk akibat terjadinya perbedaan potensial antara dua ujung penghantar listrik yang membutuhkan energi untuk mendorong elektron bergerak dari satu tempat ke tempat lainnya [27]. Selama penelitian berlangsung, pengukuran terhadap kuat arus listrik dalam satuan milliampere (mA) dilakukan secara bersamaan dengan tegangan yaitu setiap 24 jam sekali hingga 96 jam menggunakan multimeter digital. Berikut hasil pengukuran kuat arus listrik pada **Tabel 3**.

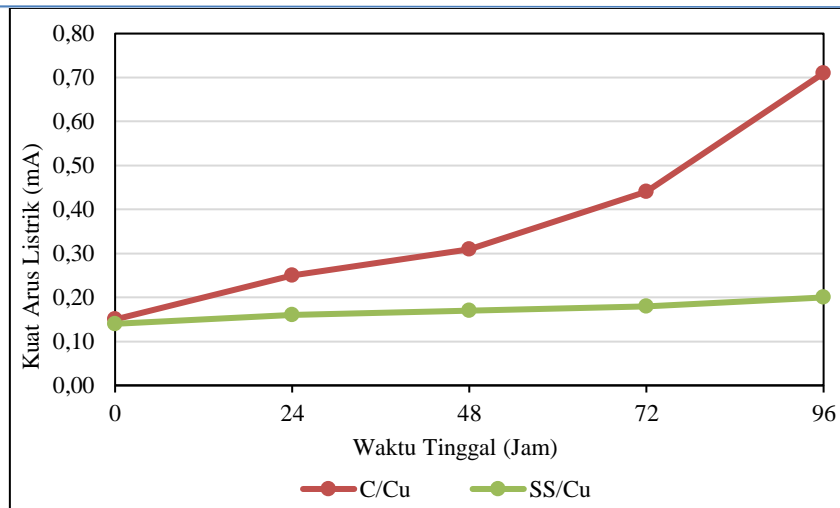
**Tabel 3.** Pengukuran Kuat Arus Listrik (I)

Waktu Tinggal (Jam)	Jenis Anoda	
	C/Cu	SS/Cu
0	0,15	0,14
24	0,25	0,16
48	0,31	0,17
72	0,44	0,18
96	0,71	0,20

Sumber: Data Primer (2024)

Kuat arus listrik (I) yang dihasilkan pada setiap reaktor berkisar antara 0,14 – 0,71 mA. Selama proses *running*, nilai kuat arus listrik (I) terbesar dihasilkan pada reaktor C/Cu yang menggunakan anoda karbon grafit pada waktu tinggal 96 jam yaitu sebesar 0,71 mA. Selain itu, pada reaktor SS/Cu dengan anoda *stainless steel* didapatkan nilai kuat arus listrik maksimum sebesar 0,20 pada waktu tinggal yang sama. Adapun nilai kuat arus listrik terkecil yang dihasilkan oleh ketiga reaktor terjadi pada waktu tinggal yang sama yaitu 0 jam dengan kuat arus yang dihasilkan pada reaktor C/Cu sebesar 0,15 mA dan SS/Cu sebesar 0,14 mA. Hal ini menunjukkan waktu tinggal juga berpengaruh terhadap kuat arus listrik (I) yang dihasilkan oleh reaktor. Berikut grafik kenaikan kuat arus listrik pada **Gambar 3**.

Berdasarkan **Gambar 3** hasil pengukuran kuat arus listrik pada waktu tinggal reaktor 0 jam menghasilkan nilai kuat arus yang relatif rendah. Hal ini dikarenakan pada waktu tinggal ke-0 jam air limbah baru saja dimasukkan ke dalam reaktor sehingga proses metabolisme oleh mikroorganisme masih belum berjalan dengan baik. Peningkatan arus listrik cenderung signifikan yang terjadi pada waktu tinggal ke-48 hingga 96 jam, dikarenakan aktivitas mikroorganisme mulai berperan dengan baik dalam mendegradasi senyawa organik.



**Gambar 3.** Hubungan Kuat Arus dan Waktu Tinggal Pada Setiap Reaktor  
Sumber: Data Primer (2024)

Mikroorganismen berkembang dengan memanfaatkan kandungan organik pada air limbah sebagai sumber nutrisi yang kemudian diubah menjadi energi dan sel-sel mikroorganismen baru [28]. Arus listrik terjadi ketika muatan berpindah melalui sistem konduktor dalam satuan waktu tertentu. Jumlah mikroba yang mengurai senyawa organik dapat memengaruhi produksi elektron, dengan begitu produksi elektron ini dapat berpengaruh terhadap besarnya arus listrik yang dihasilkan [29].

Setelah pengukuran terhadap kuat arus listrik ( $I$ ) dan tegangan ( $V$ ), selanjutnya dapat dilakukan perhitungan untuk memperoleh nilai *power density* ( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) yang merupakan indikasi dari efisiensi konversi energi dalam sistem tersebut. Berikut merupakan hasil pengukuran terhadap *power density* sebagaimana disajikan pada **Tabel 4** berikut.

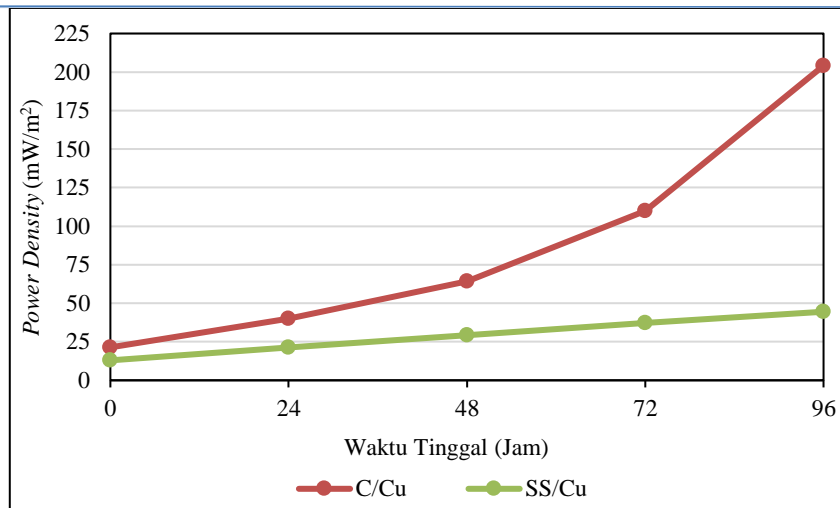
**Tabel 4.** Pengukuran *Power Density* ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )

Waktu Tinggal (Jam)	Jenis Anoda	
	C/Cu	SS/Cu
0	21,38	12,95
24	40,00	21,20
48	64,33	29,33
72	110,00	37,35
96	204,13	44,50

Sumber: Data Primer (2024)

Berdasarkan **Tabel 4** *power density* yang dihasilkan oleh kedua reaktor berada pada rentang antara 12,75 – 204,13  $\text{mW}/\text{m}^2$ . Selama proses berlangsung, nilai *power density* terbesar didapatkan pada reaktor C/Cu dengan anoda karbon grafit yaitu 204,13  $\text{mW}/\text{m}^2$ . Hal ini dikarenakan tegangan dan kuat arus pada reaktor C/Cu cukup tinggi jika dibandingkan dengan reaktor SS/Cu. Adapun pengukuran daya tertinggi pada reaktor SS/Cu yaitu 44,50  $\text{mW}/\text{m}^2$ . Selain itu, didapatkan nilai daya terkecil dari setiap reaktor yang terjadi saat waktu tinggal 0 jam yaitu 21,38  $\text{mW}/\text{m}^2$  pada reaktor C/Cu kemudian 12,95  $\text{mW}/\text{m}^2$  pada reaktor SS/Cu. Terjadi peningkatan terhadap daya listrik seiring bertambahnya waktu tinggal pada reaktor, hal ini sesuai dengan peningkatan tegangan dan kuat arus listrik yang dihasilkan pada setiap reaktor. Peningkatan *power density* selama proses *running* dapat dilihat pada **Gambar 4**.

Berdasarkan **Gambar 4** peningkatan *power density* berdasarkan reaktor C/Cu anoda karbon grafit cenderung mengalami kenaikan yang signifikan setiap dilakukan pengukuran setiap 24 jam sekali hingga 96 jam kemudian pada reaktor SS/Cu cenderung stabil dari waktu tinggal ke-24 jam hingga 96 jam. Peningkatan *power density* menunjukkan bahwa mikroba sedang mengalami fase pertumbuhan eksponensial. Selama fase ini, mikroorganismen membelah secara cepat dan stabil. Karena jumlah sel mikroba terus bertambah, sehingga jumlah proton ( $\text{H}^+$ ) dan elektron ( $\text{e}^-$ ) yang diperoleh dari metabolisme juga mengalami peningkatan, hal tersebut berdampak pada peningkatan tegangan dan kuat arus listrik yang diperoleh. Sehingga hal ini mencerminkan aktivitas yang lebih intensif dalam menghasilkan energi listrik dalam MFCs [30].



**Gambar 4.** Hubungan *Power Density* Dan Waktu Tinggal Pada Setiap Reaktor  
Sumber: Data Primer (2024)

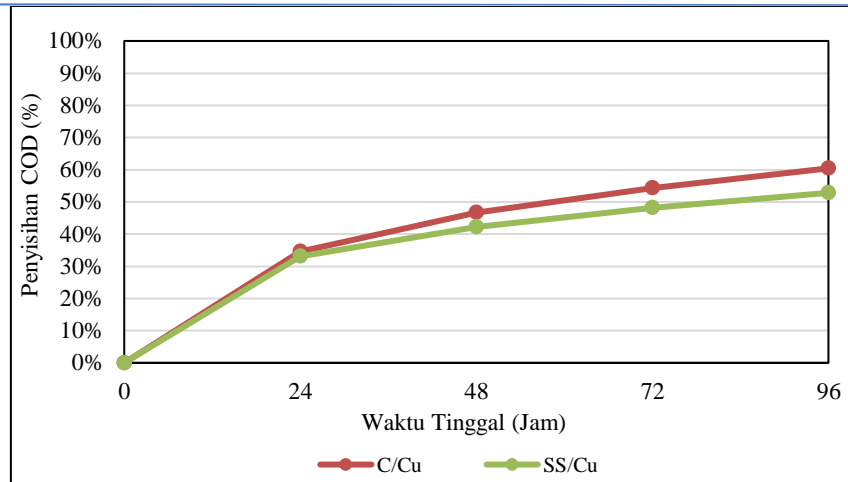
Pemilihan jenis anoda adalah suatu faktor yang dapat memengaruhi produksi energi listrik. Material elektroda sebagai anoda dalam MFCs harus memiliki sifat konduktif untuk memfasilitasi aliran listrik yang efisien, dan juga harus biokompatibel, sehingga sesuai dengan mikroorganisme tanpa mengakibatkan dampak negatif [31]. Pada penelitian ini, didapatkan hasil produksi listrik terbaik pada reaktor C/Cu dengan anoda karbon grafit. Pemilihan material karbon grafit cocok sebagai anoda dikarenakan memiliki sifat konduktivitas yang baik, biokompatibilitas, stabilitas kimia, luas permukaan spesifik, serta harga yang ekonomis [32]. Material karbon grafit memiliki reaktivitas tinggi dan termasuk dalam golongan non logam yang merupakan alotrop karbon yang memiliki nilai potensial standar sebesar  $-1,59$  [27]. Elektroda berbahan karbon juga memiliki konduktivitas tinggi, stabilitas yang baik, struktur yang kuat, sifat permukaan yang mendukung pertumbuhan biofilm, serta luas permukaan yang cukup memadai [33]. Sedangkan material *stainless steel* merupakan senyawa besi (Fe) yang mengandung 10,5% kromium sebagai pencegah korosi [34]. Besi (Fe) merupakan suatu logam yang memiliki kedudukan deret volta pada sisi kiri yang memiliki nilai potensial standar sebesar  $-0,44$  [27].

Semakin berada pada sisi kiri letak suatu logam di deret volta maka akan mudah bereaksi dan melepaskan elektron. Sebaliknya, semakin berada pada sisi kanan letak suatu logam di deret volta maka akan sulit melepas elektron [35]. Sifat reaktivitas tiap elektroda dalam MFCs memberikan area yang lebih luas untuk kontak mikroba dalam proses transfer elektron ke elektroda yang memengaruhi jumlah energi listrik yang dihasilkan [36].

### 3.4 Efisiensi Penyisihan *Chemical Oxygen Demand* (COD)

Efisiensi kombinasi reaktor MFCs-ABR pada tahap ini dinilai berdasarkan penurunan yang terjadi terhadap kadar COD *influent* dengan konsentrasi yang sama pada setiap reaktor. Konsentrasi *influent* yang digunakan untuk *running* penelitian selama 96 jam adalah kadar COD uji awal air limbah yaitu sebesar 7987 mg/L. Aspek penting yang dapat memengaruhi efisiensi penyisihan kadar COD adalah waktu tinggal di dalam reaktor. Dimana, waktu tinggal memiliki pengaruh signifikan terhadap efektivitas proses penyisihan COD [37]. Semakin lama waktu tinggal maka akan semakin banyak kesempatan bagi mikroorganisme menguraikan senyawa organik pada air limbah. Jenis anoda dan waktu tinggal berpengaruh terhadap efisiensi penyisihan kadar COD sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 5**.

Berdasarkan **Gambar 5** efisiensi penurunan COD terbesar dihasilkan pada reaktor C/Cu yaitu sebesar 60,42% dengan konsentrasi COD yang tersisa 3162 mg/L kemudian pada reaktor SS/Cu terjadi penurunan terbesar 52,80% dengan konsentrasi COD 3770 mg/L. Efisiensi tertinggi pada setiap reaktor C/Cu dan SS/Cu terjadi pada waktu tinggal yang sama yaitu 96 jam. Hal ini menunjukkan efisiensi penurunan COD meningkat seiring dengan bertambahnya waktu tinggal dalam reaktor, dikarenakan adanya kontak yang lebih lama antara mikroorganisme dan air limbah memungkinkan proses pengolahan berlangsung dengan lebih optimal dan efektif [38].



**Gambar 5.** Hubungan Penyisihan COD Dan Waktu Tinggal Pada Setiap Reaktor  
Sumber: Data Primer (2024)

Penurunan kadar COD yang lebih optimal terjadi pada reaktor dengan jenis elektroda karbon grafit, karena material karbon memiliki struktur pori-pori yang meningkatkan kemampuan adsorpsi. Mikroorganisme dalam reaktor cenderung tumbuh dan melekat pada anoda karbon grafit, yang secara signifikan mendukung proses degradasi COD dalam air limbah. Karbon grafit juga dikenal sebagai bahan yang biokompatibel, sehingga sangat cocok digunakan sebagai medium pertumbuhan mikroorganisme yang melekat sehingga pada akhirnya meningkatkan efisiensi pengolahan limbah [31].

#### 4. Kesimpulan

Jenis anoda mampu memengaruhi power density dan penyisihan COD selama proses *running*. Pada penggunaan anoda karbon grafit dihasilkan *power density* optimum sebesar 204,13 mW/m<sup>2</sup>, sehingga nilai tersebut dapat dikatakan lebih tinggi jika dibandingkan dengan anoda *stainless steel*. Hal ini dikarenakan karbon grafit memiliki reaktivitas tinggi dan golongan non logam dari alotrop karbon dengan nilai potensial standar sebesar -1,59 sehingga lebih mudah untuk melepaskan elektron. Selain itu, penyisihan COD tertinggi juga terjadi pada reaktor dengan jenis anoda karbon grafit sebesar 60,42%.

#### 5. Referensi

- [1] Purwono., Hermawan., & Hadiyanto. Penggunaan Teknologi Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) dalam Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu untuk Menghasilkan Energi Listrik. *Jurnal Presipitasi*. 12 (2): 57 – 65. 2015.
- [2] Syafaati, A. D., & Wulan, D. R. Potensi Perolehan Energi Listrik dalam Proses Pengolahan Limbah Tahu Melalui Microbial Fuel Cell (MFC). *Alkimia: Jurnal Ilmu Kimia dan Terapan*. 3 (2). 2019.
- [3] Rasmito, A., Hutomo, A., & Hartono, A. P. Pembuatan Pupuk Organik Cair dengan Cara Fermentasi Limbah Cair Tahu, Starter Filtrat Kulit Pisang dan Kubis, dan Bioaktivator EM4. *Jurnal Iptek Media Komunikasi Teknologi*. 23 (1): 55 – 62. 2019.
- [4] Sitohang, A. R., Yuliati, S., & Hasan, A. Pengaruh PAC dan Variasi Tekanan Pada Pemurnian Limbah Cair Tahu Menggunakan Membran Polisulfon Ultrafiltrasi. *Jurnal Pendidikan dan Teknologi Indonesia (JPTI)*. 2 (9): 411 – 416. 2022.
- [5] Yeni, E., Meryandini, A., & Sunarti, T. C. Penggunaan substrat whey tahu untuk produksi biomassa oleh *Pediococcus pentosaceus* E 1222. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 26(3), 284–293. 2016.
- [6] Dewi, A. K., Djajakirana, G., & Santosa, D. A. Potensi Limbah Tahu untuk Menghasilkan Listrik Pada Sistem Microbial Fuel Cell (MFC). *J. Il. Tan. Lingk.*, 22 (1): 29 – 34. 2020.
- [7] Novriandy, M., Tamjidillah, M., & Ramadhan, N. Pengaruh Mikroorganisme Terhadap Produktivitas Energi Listrik MFC Dengan Variasi Limbah Pabrik Tahu Dan Limbah Perikanan. *Jtam Rotary*, 3(1), 107. 2021.
- [8] Logan, B., & Rabaey, K. Conversion of Wastes into Bioelectricity and Chemicals by Using Microbial Electrochemical Technologies. *Science* (New York, N.Y.). 337. 2012
- [9] Angraini, B., Sutisna, M., & Pratama, Y. Pengolahan Limbah Cair Tahu secara Anaerob. *Jurnal Institut Teknologi Nasional*, 2(1): 1 – 10. 2014.
- [10] Yuwono, C. W., & Soehartanto, T. Perancangan Sistem Pengaduk Pada Bioreaktor Batch untuk Meningkatkan Produksi Biogas. *Jurnal Teknik Pomits*. 2 (1). 2013.



- [11] Rambe, S. M. Penentuan Model Kinetika Reaksi Hidrolisis Pada Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit Dengan Anaerobic Baffle Reactor. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*. 26(2) : 77 – 84. 2015.
- [12] Velasquez-Orta, S. B., Curtis, T. P., & Logan, B. E. Energy from Algae Using Microbial Fuel Cells. *Biotechnology Bioengineering*. 103: 1068 – 1076. 2009.
- [13] Safitri, V. W. M. Pengaruh Jenis Elektroda Terhadap Power Density Pada Microbial Fuel Cells Dengan Penambahan Granular Activated Carbon. *Jurnal Envirotek*. 2020.
- [14] Armesta, L., Aprianti, M., & Astuti, U. P. Analisis Seeding dan Aklimatisasi pada Anaerobic Baffled Reactor – Anaerobic Biofilter (ABR – AF). *Conference Proceeding on Waste Treatment Technology*. 2023.
- [15] Gray, N. How nature deals with waste. In *Biology of wastewater treatment 2nd Edition*, (pp. 1–131). London: *Imperial College Press*. 2004.
- [16] Samudro, G., Sumiyati, S., Ramadan, B. S., & Iradati, L. Pengaruh Dosis Ragi Dan Beban Organik Terhadap Kinerja DCMFCs Dan GAC-DCMFCs Dalam Produksi Listrik Dan Efisiensi Penurunan COD. 2015.
- [17] Herald, D. Pengaruh Variasi Rasio Waktu Reaksi terhadap Waktu Stabilisasi pada Penyisihan Senyawa Organik dari Air Buangan Pabrik Minyak Kelapa Sawit dengan Sequencing Batch Reactor Aerob. Universitas Andalas: Sumatera Barat. 2010.
- [18] Widodo, Aerani Arifani., Ali, Munawar. Biokonversi Bahan Organik Pada Limbah Cair Rumah Pemotongan Hewan Menjadi Energi Listrik Menggunakan Microbial Fuel Cell. *Jurnal Envirotek*, 11(2), 30 – 37. 2019.
- [19] Ramadan, B. S., Samudro, G., & Sumiyati, S. Pengaruh Konsentrasi Chemical Oxygen Demand (COD) dan Ragi Terhadap Kinerja Granular Activated Carbon Dual Chamber Microbial Fuel Cells (GAC-DCMFCs). Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Diponegoro. 2015.
- [20] Liu, N., Yun, Y., Hu, L., Xin, L., Han, M., & Zhang, P. Study on Start-Up Membraneless Anaerobic Baffled Reactor Coupled with Microbial Fuel Cell for Dye Wastewater Treatment. *ACS Omega*, 6(36), 23515–23527. 2021.
- [21] Zulfikar, E. S., Tamjidillah, M., & Ramadhan, M. N. Produktivitas Listrik Microbial Fuel Cell pada Substrat Limbah Air Rebusan Mie Instan. *Jurnal Tugas Akhir Mahasiswa*. 3(1), 69 – 80. 2021.
- [22] Metcalf., & Eddy. *Wastewater Engineering Treatment and Reuse*, 4th Edition. New York: McGraw-Hill. 2003.
- [23] Ananda, R. A., Hartati, E., & Salafudin. Seeding dan Aklimatisasi pada Proses Anaerob Two Stage System menggunakan Reaktor Fixed Bed. *Jurnal Online Insitut Teknologi Nasional*. 6(1), 1 – 9. 2017.
- [24] Yogaswara, R. R., Farha, A. S., Khairunnisa, K., Pusfitasari, M. D., & Gunawan, A. Studi Penambahan Mikroorganisme Pada Substrat Limbah Pome Terhadap Kinerja Microbial Fuel Cell. *Jurnal Teknik Kimia*, 12(1). 2017.
- [25] Huda, N., & Khamami, F. Modifikasi Sistem Kendali sepeda Listrik Listrik Hybrid. *Jurnal Cahaya Bagaskara*, 1(1). 2017.
- [26] Velasquez-Orta, S. B., Yu, E., Katuri, K. P., Head, I. M., Curtis, T. P., & Scott, K. Evaluation of Hydrolysis and Fermentation Rates in Microbial Fuel Cells. *Bioenergy and Biofuels*. 90: 789 – 798. 2011
- [27] Sari, N., Widiyani, A., Nurhamidah, N., & Sairi, A. P. Perbandingan Tegangan Dan Kuat Arus Listrik Pada Sifat Asam Buah Nanas Dan Jeruk. *OPTIKA: Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 121 – 127. 2023.
- [28] Fauzi, A. (2012). Penentuan Konduktivitas dan Resistivitas Air Laut dengan Pengukuran Tidak Langsung. *Jurnal Materi dan Pendidikan Fisika*. 2(1) : 37 – 41.
- [29] Ibrahim, B., Suptijah, P., & Adjani, Z. N. Kinerja Microbial Fuel Cell Penghasil Biolistrik Dengan Perbedaan Jenis Elektroda Pada Limbah Cair Industri Perikanan. *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 20(2), 296. 2017
- [30] Utami, L., Lazulva, L., & Fatisa, Y. Produksi Energi Listrik Dari Limbah Kulit Pisang (*Musa Paradisiaca L.*) Menggunakan Teknologi Microbial Fuel Cells Dengan Permanganat Sebagai Katolit. *al-Kimiya*, 5(2), 62 – 67. 2018.
- [31] Hermayanti, A., & Nugraha, I. Potensi perolehan energi listrik dari limbah cair industri tahu dengan metode salt bridge microbial fuel cell. *Jurnal Sains Dasar*, 3(2), 162 – 168. 2014.
- [32] Wei, J., Liang, P., Huang, X. Recent Progress in Electrodes for Microbial Fuel Cells. *Biosource Technology*. 102: 9335 – 9344. 2011.
- [33] Bachry, I. M. Potensi Biolistrik Limbah Industri Tahu Menggunakan Sistem Microbial Fuel Cell.

- 
- Skripsi. Program Studi Teknik Kimia, Universitas Bosowa, Sulawesi Selatan. 2019.
- [34] Kusminah, I. L., & Aadziima, A. F. Pengaruh Salinitas Air Laut Terhadap Nilai Potensial Proteksi Anoda Dengan Metode ICCP. 251 – 258. 2018.
- [35] Nasution, M. Kajian Tentang Hubungan Deret Volta Dan Korosi Serta Penggunaannya Dalam Kehidupan Sehari-Hari. *Semnastek UISU*. 2019.
- [36] Scott, K., Rimbu, G. A., Katuri, K. P., Prasad, K. K., & Head, I. M. Application of Modified Carbon Anodes in Microbial Fuel Cells. *International Chemical Engineers*. 85(5): 481 – 488. 2007.
- [37] Septyana, I., & Samudro, R. A. G. Pengaruh Variasi Debit dan Jumlah Elektroda terhadap Penurunan COD dan Produksi Listrik dalam Reaktor Microbial Fuel Cells (MFCs) Studi Kasus: Air Limbah Rumah Potong Hewan (RPH) Kota Salatiga. *DIPA IPTEKS*. 1(1): 44 – 48. 2013.
- [38] Susilo, F. A. P., Suharto, B., & Susanawati, L. D. Pengaruh Variasi Waktu Tinggal Terhadap Kadar BOD dan COD Limbah Tapioka dengan Metode Rotating Biological Contactor. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 2(1) : 21 – 26. 2015.