

TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA I
Semester II – 2020/2021

Judul
PEMODELAN BIO-ELEKTROKIMIA UNTUK PREDIKSI
KINERJA *MICROBIAL FUEL CELL* SEBAGAI SUMBER ENERGI
TERBARUKAN

Kelompok C2.2021.B.02

Agi Tri Uzila	13018109
Muhammad Azhar Zeta	13018050

Pembimbing

Ardiyan Harimawan S.T., M.Eng., Ph.D.
Hary Devianto S.T., M.Eng., Ph.D.



PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG
Maret 2021

LEMBAR PENGESAHAN

TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA I
Semester II – 2020/2021.

PEMODELAN BIO-ELEKTROKIMIA UNTUK PREDIKSI KINERJA *MICROBIAL FUEL CELL* SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN

Kelompok C2.2021.B.02

Agi Tri Uzila	(13018109)
Muhammad Azhar Zeta	(13018050)

Catatan Pembimbing

Bandung, Bulan dan Tahun
Disetujui Pembimbing

Ardiyan Harimawan S.T., M.Eng., Ph.D.

Hary Devianto S.T., M.Eng., Ph.D.

SURAT PERNYATAAN
TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA I
Semester II Tahun 2020/2021

Kami yang bertanda tangan di bawah ini:

Kelompok : C2.2021.B.02

Nama (NIM) : Agi Tri Uzila (13018109)

Nama (NIM) : Muhammad Azhar Zeta (13018050)

dengan ini menyatakan bahwa laporan dengan judul:

PEMODELAN BIO-ELEKTROKIMIA UNTUK PREDIKSI KINERJA
***MICROBIAL FUEL CELL* SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN**

adalah hasil penelitian kami sendiri di mana seluruh pendapat dan materi dari sumber lain telah dikutip melalui penulisan referensi yang sesuai. Publikasi yang dibuat berdasarkan materi yang tercakup dalam dokumen penelitian ini **hanya dapat dilakukan dengan sepengetahuan dan seijin dosen pembimbing penelitian.**

Surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan dalam lembar pernyataan ini di kemudian hari diketahui keliru, kami bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Bandung, 24 Mei 2021



Agi Tri Uzila



Muhammad Azhar Zeta

TK4092 PENELITIAN TEKNIK KIMIA I

Pemodelan Bio-elektrokimia Untuk Prediksi Kinerja *Microbial Fuel Cell* Sebagai Sumber Energi Terbarukan

Kelompok C2.2021.B.02

Agi Tri Uzila (13018109) dan Muhammad Azhar Zeta (13018050)

Pembimbing

Ardiyan Harimawan S.T., M.Eng., Ph.D.

Hary Devianto S.T., M.Eng., Ph.D.

ABSTRAK

MFC dapat menjadi sumber energi terbarukan yang sangat menguntungkan karena memanfaatkan limbah untuk menghasilkan listrik. Beberapa faktor dapat mempengaruhi kinerja MFC, di antaranya adalah pH substrat dan jenis mikroba. Percobaan yang dilakukan secara basah untuk meneliti pengaruh faktor-faktor tersebut terhadap kinerja MFC seringkali terhambat dikarenakan beberapa hal, seperti biaya, material, desain, dan aspek bioelektrokimia. Oleh karena itu, pemodelan matematis menjadi opsi yang baik karena dapat mengatasi hambatan-hambatan tersebut. Pada penelitian ini pemodelan bioelektrokimia dilakukan untuk memprediksi pengaruh pH substrat dan jenis mikroba terhadap kinerja MFC.

Pada penelitian ini, terdapat empat tahapan utama dalam pembuatan model, yaitu studi literatur, penentuan dan verifikasi model, penentuan parameter pemodelan dan penyesuaian terhadap kondisi percobaan, serta pengolahan data dan validasi model. Pemodelan dilakukan baik pada kondisi dinamik maupun tunak untuk MFC dua ruang dengan sistem partaian. Pemodelan dinamik dilakukan mengikuti rujukan model dari Esfandyari dkk. (2017), sedangkan pemodelan kondisi tunak mengikuti rujukan model dari Zeng dkk. (2010) dan Oliveira dkk. (2018). Pemodelan dilakukan untuk menentukan pengaruh kondisi pH substrat dan jenis mikroba pada kinerja MFC.

Hasil pemodelan kemudian divalidasi dengan menggunakan data percobaan MFC dua ruang sistem partaian yang menggunakan substrat POME. Dilakukan variasi *pretreatment* POME berupa pH dan penambahan BES untuk mengetahui pengaruh pH dan jenis mikroba pada kinerja MFC. Karakterisasi MFC yang dilakukan adalah pengukuran OCV dan analisis potensiodinamik.

Kata kunci: Jenis mikroba, MFC dua ruang, Pemodelan, pH, POME

TK4092 CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH I

Bio-electrochemical Modeling to Predict the Performance of Microbial Fuel Cells as a Renewable Energy Source

Group C2.2021.B.02

Agi Tri Uzila (13018109) and Muhammad Azhar Zeta (13018050)

Advisor

Ardiyan Harimawan, Ph.D.

Hary Devianto, Ph.D.

ABSTRACT

MFC can be a very profitable source of renewable energy because it uses waste to generate electricity. Several factors can affect the performance of MFCs, including the pH of the substrate and the type of microbes. Laboratory experiments to investigate the influence of these factors on MFC performance are often hampered due to several factors, such as cost, materials, design, and bioelectrochemical aspects. Therefore, mathematical modeling is a good option because it can overcome these obstacles. In this study, bioelectrochemical modeling was carried out to predict the effect of substrate pH and microbial type on MFC performance.

In this study, there are four main stages in modeling, which are literature study, model determination and verification, determination of modeling parameters and adjustment to experimental conditions, and model validation. Modeling was carried out in both dynamic and steady conditions for a two-chamber batch MFC. Dynamic modeling was carried out following model references from Esfandyari et al. (2017), while steady-state modeling follows the reference model from Zeng et al. (2010) and Oliveira et al. (2018). Modeling was carried out to determine the effect of substrate pH conditions and microbial types on MFC performance.

The modeling results were then validated using the two-chamber batch MFC experimental data using POME as substrate. POME pretreatment variations were carried out in several pH conditions and BES concentration to determine the effect of pH and microbial types on MFC performance. The measurement of OCV and potentiodynamic analysis are done for MFC characterization.

Keywords: Modeling, pH, POME, Two-chambered MFC, Types of microbes

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang Maha Esa karena atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan proporsal penelitian berjudul “Pemodelan Bio-elektrokimia Untuk Prediksi Kinerja Microbial Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Terbarukan”. Proposal penelitian ini dibuat dengan tujuan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan mata kuliah TK4092 Penelitian Teknik Kimia I, Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah membantu dengan memberi saran, pertolongan, bimbingan, dan dukungan dalam penyelesaian penulisan proposal penelitian ini. Pada kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada:

1. Dr. Ardiyan Harimawan, selaku dosen pembimbing pertama.
2. Dr. Hary Devianto, selaku dosen pembimbing kedua.
3. Dr. Ir. Isdiriyani Nurdin dan Dr. Pramujo Widiatmoko yang telah memberikan masukan-masukan kepada penulis ketika diadakan *Group Meeting* (GM).
4. Mahasiswa yang tergabung di dalam Laboratorium Keselamatan Proses dan Elektrokimia Energetik (KPEE) dan Laboratorium Teknologi Bioproses sebagai rekan seperjuangan dalam penulisan proposal penelitian ini.
5. Keluarga yang terus memberi dukungan dalam penyelesaian penulisan proposal.

Pada penulisan laporan ini tentunya masih terdapat kekurangan dan belum sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat memperbaiki proposal penelitian ini. Penulis berharap proposal penelitian ini dapat bermanfaat bagi para pembaca.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan dan Sasaran	3
1.4. Ruang Lingkup.....	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Microbial Fuel Cell (MFC)	5
2.1.1. Mekanisme Kerja MFC	7
2.1.2. Konfigurasi MFC.....	9
2.2. Peran dan Pengaruh Substrat pada MFC.....	11
2.3. Peran dan Pengaruh pH pada MFC	12
2.4. Peran dan Pengaruh Jenis Mikroba pada MFC	12
2.5. Pengaruh Pembentukan Biofilm Anoda pada MFC	14
2.6. Peran dan Pengaruh Elektroda pada MFC	15
2.7. Pengaruh Membran Penukar Kation pada MFC	17
2.8. Pemodelan Sistem MFC.....	18
2.8.1. Pemodelan MFC oleh Esfandyari dkk. (2017)	18
2.8.2. Pemodelan MFC oleh Zeng dkk. (2010)	22
2.8.3. Pemodelan MFC oleh Oliveira dkk. (2018)	25
BAB III	29
METODOLOGI PENELITIAN	29

3.1. Tahapan Penelitian	29
3.2. Asumsi Pemodelan MFC	30
3.3. Alur Pemodelan.....	31
3.4. Validasi Pemodelan.....	37
3.4.1. Peralatan Utama Percobaan Basah	37
3.4.2. Alat dan Bahan Percobaan Basah.....	39
3.4.3. Prosedur Kerja Percobaan Basah.....	40
3.5. Jadwal Kerja.....	43
DAFTAR PUSTAKA	46
DAFTAR SIMBOL	51
LAMPIRAN A.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Studi terbaru terkait peningkatan kinerja MFC untuk pengolahan limbah.....	5
Tabel 2.2. Jenis substrat yang digunakan untuk MFC	11
Tabel 2.3. Mikroba yang digunakan untuk MFC.....	13
Tabel 2.4. Material yang sering digunakan untuk anoda	15
Tabel 2.5. Material yang sering digunakan untuk katoda.....	16
Tabel 3.1. Persamaan pemodelan MFC dinamik.	33
Tabel 3.2. Persamaan pemodelan MFC keadaan tunak.	35
Tabel 3.3. Alat dan bahan yang digunakan dalam percobaan.....	39
Tabel 3.4. Variasi percobaan yang dilakukan.	42
Tabel 3.5. Rencana Kerja Penelitian.....	45

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Konsumsi energi listrik dunia	2
Gambar 2.1. Desain skematik MFC.....	8
Gambar 2.2. Desain skematik MFC konfigurasi satu ruang.....	10
Gambar 2.3. Desain skematik MFC konfigurasi dua ruang	10
Gambar 2.4. Parameter optimisasi biofilm untuk sistem bioelektrokimia	14
Gambar 2.5. Skema percobaan MFC (Esfandiyari dkk., 2017).....	19
Gambar 2.6. Skema percobaan MFC (Zeng dkk., 2010).....	22
Gambar 2.7. Skema pemodelan MFC dua ruang (Oliveira dkk., 2018).....	26
Gambar 3.1. Skema tahapan penelitian.	30
Gambar 3.2. Skema alur pemodelan MFC dinamik	32
Gambar 3.3. Skema alur pemodelan MFC kondisi tunak.....	33
Gambar 3.4 Gambar skema alat MFC.	38

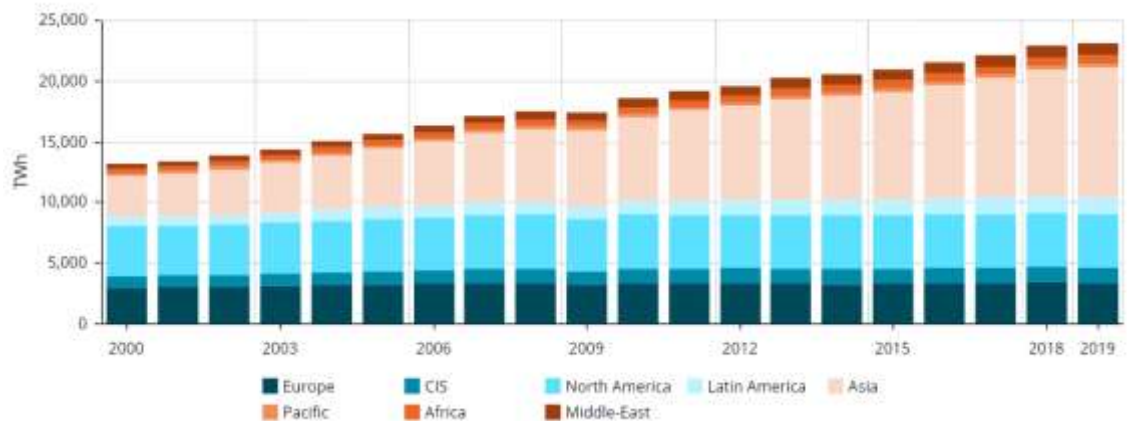
BAB I

PENDAHULUAN

Pada bagian pendahuluan disajikan latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan ruang lingkup penelitian. Pada bagian latar belakang dibahas kebutuhan energi listrik yang besar seiring dengan pertumbuhan populasi manusia dan peran *Microbial Fuel Cell* sebagai solusi sumber energi listrik alternatif yang ramah lingkungan. Pada bagian rumusan masalah dibahas peran penelitian ini dalam memodelkan kinerja MFC terhadap parameter-parameter operasi MFC. Pada bagian tujuan dan sasaran dibahas tujuan dan sasaran penelitian ini. Pada akhir bab dibahas ruang lingkup penelitian.

1.1. Latar Belakang

Populasi manusia di dunia terus bertambah setiap tahunnya. Berdasarkan data yang diambil dari *United Nations, Department of Economic and Social Affairs*, diperkirakan populasi manusia akan mencapai 8,6 milyar pada tahun 2030. Pertumbuhan populasi yang signifikan ini mengakibatkan peningkatan kebutuhan energi listrik. Peningkatan konsumsi energi listrik dari tahun 2000 sampai 2019 dapat dilihat pada Gambar 1.1. Pada tahun 2019, tercatat penggunaan energi listrik di dunia mencapai 23.105 TWh. Sebanyak 85% dari kebutuhan energi dunia bersumber dari bahan bakar fosil seperti minyak bumi, gas alam, batu bara, dan lainnya (Rackley, 2010). Sumber energi ini merupakan sumber yang tidak terbarukan dan menghasilkan emisi polutan udara yang tidak ramah lingkungan.



Gambar 1.1. Konsumsi energi listrik dunia (yearbook.enerdata.net)

Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan sumber energi alternatif yang dapat mengatasi kebutuhan energi manusia serta ramah lingkungan. Salah satu sumber energi alternatif yang dapat digunakan adalah biomassa. Potensi biomassa di Indonesia diperkirakan sebanyak 49.810 MW, yang berasal dari tanaman dan limbah (LIPI, 2013). Pembangkitan energi melalui biomassa dapat dilakukan dengan teknologi *microbial fuel cell* (MFC). MFC merupakan suatu perangkat yang dapat menghasilkan energi listrik secara langsung dari konversi energi kimia pada senyawa organik dengan bantuan mikroorganisme (Logan dkk., 2006). Air limbah juga dapat digunakan karena mengandung berbagai macam senyawa organik, sehingga MFC dapat menjadi solusi atas permasalahan kebutuhan energi listrik dan pengolahan air limbah.

1.2. Rumusan Masalah

Sistem MFC melibatkan banyak fenomena, seperti perpindahan massa, perpindahan panas, reaksi elektrokimia, dan reaksi biokimia. Pemanfaatan MFC banyak mendapat hambatan dikarenakan kurangnya pemahaman terhadap variabel-variabel yang mempengaruhi kinerja MFC. Beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja MFC adalah material elektroda, substrat, mikroba yang digunakan, dan desain. Faktor-faktor ini mempengaruhi densitas arus dan densitas daya yang dihasilkan oleh MFC. Hasil penelitian skala laboratorium seringkali tidak sesuai untuk pemanfaatan dalam skala yang lebih besar. Biaya, material, desain, dan aspek bioelektrokimia seringkali menjadi

penghambat dalam penerapan MFC di lapangan. Pembuatan prototipe dan pemodelan sistem dapat menjadi solusi untuk mengatasi hambatan-hambatan tersebut (Heidrich dkk., 2014). Akan tetapi, kebanyakan penelitian tentang MFC yang ada saat ini masih berupa studi eksperimental dan masih sedikit yang membahas tentang pemodelan sistem MFC.

Melalui pemodelan MFC, pengaruh perubahan parameter terhadap kinerja MFC dapat diprediksi, seperti pengaruh pH substrat dan jenis mikroba yang digunakan. Berbagai substrat yang digunakan pada MFC tentunya memiliki nilai pH yang berbeda. Begitu juga dengan jenis mikroba yang berbeda tentu memiliki kinetika pertumbuhan yang berbeda. Dampaknya, kinerja MFC yang dihasilkan akan berbeda juga. Sehingga perlu diketahui hubungan matematis antara tegangan dan densitas daya yang dihasilkan MFC terhadap densitas arus yang dihasilkan, akibat dari pengaruh pH substrat dan jenis mikroba.

Berdasarkan masalah tersebut, pada penelitian ini dilakukan pemodelan untuk mengetahui pengaruh pH substrat dan jenis mikroba pada kinerja MFC.

1.3. Tujuan dan Sasaran

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pemodelan matematika produksi energi listrik MFC terhadap variasi pH substrat dan jenis mikroba.

Sasaran penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan ketebalan pembentukan biofilm terhadap waktu.
2. Menentukan kurva OCV hasil pemodelan.
3. Menentukan kurva IVP hasil pemodelan.

1.4. Ruang Lingkup

Ruang lingkup dari penelitian Pemodelan Bio-elektrokimia untuk Prediksi Kinerja Microbial Fuel Cell sebagai Sumber Energi Terbarukan adalah sebagai berikut.

1. MFC menggunakan konfigurasi dua ruang dengan anoda dan katoda yang menempel pada membran Nafion 212.
2. Substrat yang digunakan adalah limbah POME.
3. Limbah POME diperoleh dari industri kelapa sawit di Cikasungka, Bogor.
4. Kultur bakteri yang digunakan berupa kultur campuran dari POME.
5. Material elektroda yang digunakan adalah *graphite sheet*.
6. MFC dioperasikan pada tekanan atmosfer dan temperatur ruang secara *batch*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini merupakan tinjauan pustaka pemodelan MFC. Bab ini membahas tentang MFC secara umum yang meliputi mekanisme kerja MFC dan konfigurasi MFC, faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja MFC yang meliputi jenis substrat, jenis mikroba, jenis membran, jenis material elektroda, dan pembentukan biofilm, serta contoh-contoh pemodelan MFC.

2.1. Microbial Fuel Cell (MFC)

Krisis air dan kebutuhan ketahanan energi listrik di masa depan membuka peluang pemanfaatan air limbah sebagai sumber daya penghasil energi listrik melalui sistem bioelektrokimia (Jadhav dkk., 2020). MFC merupakan bioreaktor pengubah energi kimia dari senyawa organik menjadi energi listrik melalui reaksi katalitik mikroorganisme (Esfandyari dkk., 2017). MFC pertama kali ditemukan pada tahun 1931 sebagai upaya pengolahan limbah untuk menghasilkan energi listrik (Cohen, 1931). Penggunaan senyawa organik berbasis limbah menjadikan MFC sebagai teknologi *eco-friendly* yang memberikan dualisme manfaat, yaitu produksi energi listrik dan pengendalian limbah. Penemuan ini menjadi langkah awal pengembangan MFC sebagai sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan. Beberapa hasil penelitian penggunaan MFC untuk mengolah limbah dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Studi terbaru terkait peningkatan kinerja MFC untuk pengolahan limbah (Budihardjo, 2021).

Jenis limbah	Konfigurasi	Rapat daya maksimum	Referensi
Hidrolisat limbah makanan rumah	Satu ruang	11.800 mW/m ³ per volume kerja anoda	Antonopoulou dkk. (2019)

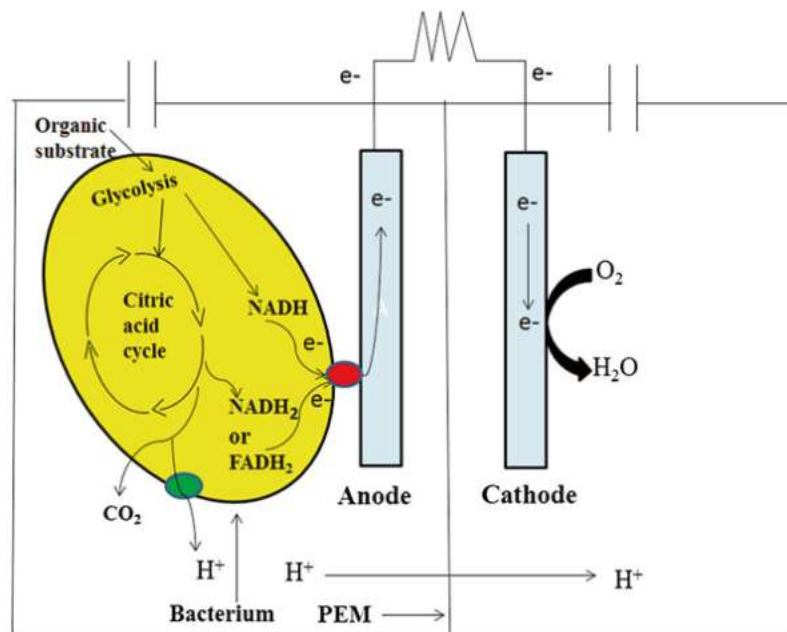
tangga (glukosa)			
Fraksi organik sampah kota	Satu ruang	1,75 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda.	Florio dkk. (2019)
Hidrolisat limbah makanan	Satu ruang	173 mW/m ² per area kerja permukaan anoda.	Xin dkk. (2018)
Sampah kota	Dua ruang	1.817 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Chiu dkk. (2016)
Campuran apel, selada, kacang hijau, dan tanah	Satu ruang	5.29 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Khudzari dkk. (2016)
Lumpur yang dikeringkan	Dua ruang	5.600 mW/m ³ per volume kerja anoda	Yu dkk. (2015)
Limbah dapur dan pekarangan	Satu ruang	39.2 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Moqsud dkk. (2015)
Sekam padi, residu kedelai, residu kopi, jamur daun	Satu ruang	4,6 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Wang dkk. (2015)
Limbah kompos	Satu ruang	47,6 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Karluvah dkk. (2015)
Sampah dapur dan limbah bambu	Satu ruang	60 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Moqsud dkk. (2014)
Hidrolisat limbah makanan	Satu ruang	556 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Jia dkk. (2013)
Rumput, jamur	Dua ruang	394 mW/m ² area	Moqsud. (2013)

daun, dedak padi, ampas minyak, kotoran ayam		permukaan spesifik katoda	
Lumpur got	Satu ruang	38.1 mW/m ³ per volume kerja anoda	Wang dkk. (2013b)
Sekam padi, kulit kacang, limbah kopi bubuk	Satu ruang	264,7 mW/m ² per area permukaan spesifik anoda	Wang dkk. (2013a)

Berdasarkan studi terkait penggunaan limbah untuk MFC menunjukkan bahwa sudah banyak jenis limbah dapat digunakan dan berpotensi sebagai penghasil listrik. Berbagai limbah organik telah diteliti dan ternyata sumber limbah tersebut umumnya berasal dari limbah rumah tangga dan agrikultur. Sehingga, teknologi MFC ini potensial untuk dikembangkan sebagai pengolah limbah organik untuk menghasilkan energi listrik.

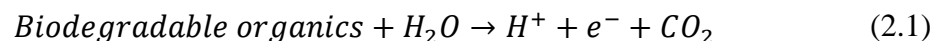
2.1.1. Mekanisme Kerja MFC

MFC adalah sistem bioelektrokimia yang mengonversikan energi kimia dari senyawa organik menjadi energi listrik melalui aktivitas katalitik mikroba. Pada umumnya, MFC terdiri dari satu ruangan anoda dan satu ruangan katoda yang dipisahkan oleh *proton exchange membrane*. Desain skematik MFC ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Desain skematik MFC (Kumar dkk., 2015)

Pada ruang anoda terdapat anoda, mikroorganisme, larutan anolit dan substrat sebagai nutrient dan sumber karbon, Di ruangan ini mikroorganisme tumbuh dan membentuk biofilm di permukaan anoda. Mikroorganisme melangsungkan reaksi oksidasi-reduksi substrat secara anaerobik untuk menghasilkan proton dan elektron. Proton yang dihasilkan melewati membran penukar ion sedangkan elektron melalui sirkuit eksternal bergerak menuju katoda. Reaksi yang terjadi pada anoda adalah sebagai berikut.



Di ruang katoda terdapat katolit, suplai udara (O_2), dan katoda. Pada ruangan ini terjadi reaksi antara oksigen, proton, dan elektron membentuk air sebagai penutup siklus reaksi. Oksigen dipilih sebagai akseptor elektron terakhir di katoda karena memiliki potensial oksidasi-reduksi yang tinggi dengan biaya operasi yang rendah (Chou dkk., 2013; Fitzgerald dkk., 2013). Reaksi yang terjadi pada katoda adalah sebagai berikut.



Ruang anoda dan katoda dipisahkan oleh *proton exchange membrane* (PEM) seperti yang

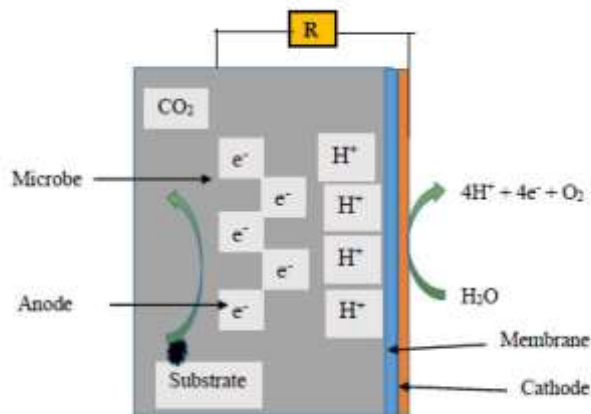
ditunjukkan pada Gambar 2.1. PEM berfungsi sebagai penghalang yang menjaga agar tidak terjadi difusi balik oksigen dari ruang katoda ke anoda, namun dijaga permeabel agar proton dapat mengalir ke katoda tanpa ada substrat yang berpindah ruang ke katoda (Flimban dkk., 2019).

2.1.2. Konfigurasi MFC

MFC dapat dirancang dan dikonfigurasi baik sebagai reaktor satu ruang (*single chamber*) dan dua ruang (*double chamber*). Kedua tipe MFC ini memiliki kesamaan prinsip kerja dan perbedaan kondisi optimasi untuk peningkatan keluaran daya (Obileke dkk., 2021).

2.1.2.1. MFC Konfigurasi Satu Ruang

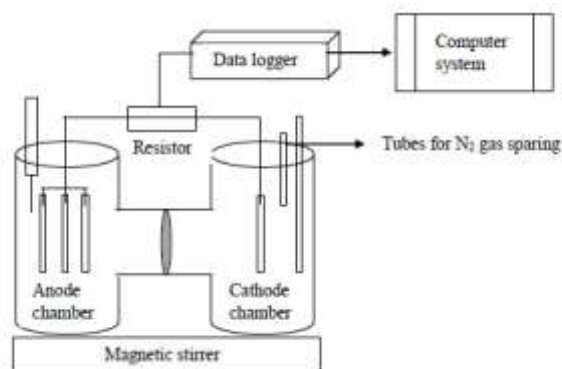
MFC konfigurasi satu ruang terdiri dari anoda dalam bilik persegi panjang yang dihubungkan dengan katoda udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Pada konfigurasi ini, proton berpindah dari larutan anolit ke katoda udara berpori. Inti dari MFC konfigurasi satu ruang adalah menghilangkan kebutuhan ruang katoda dengan memaparkan katoda langsung ke udara. Keunggulan konfigurasi ini yaitu pada sisi biaya produksi, desain sederhana, aerasi ruang katoda, dan produksi daya yang efisien. Kerugian dari konfigurasi MFC ini adanya yaitu difusi balik oksigen dari katoda ke anoda melalui *proton exchange membrane* (Obileke dkk., 2021).



Gambar 2.2. Desain skematik MFC konfigurasi satu ruang (Obileke dkk., 2021)

2.1.2.2. MFC Konfigurasi Dua Ruang

MFC konfigurasi dua ruang terdiri dari dua kompartemen anoda dan katoda yang dipisahkan oleh *proton exchange membrane*. Berbeda dengan konfigurasi satu ruang, konfigurasi ini dioperasikan pada mode katoda air. Keuntungan konfigurasi dua ruang dibandingkan satu ruang yaitu performansi katoda dapat ditingkatkan melalui kontrol pH, pemurnian oksigen, peningkatan laju alir, dan penambahan mediator elektron pada katoda yang meningkatkan performa MFC (Flimban dkk., 2019). Namun, konfigurasi ini menghasilkan keluaran daya yang rendah karena desainnya yang kompleks dan hambatan internal yang tinggi (Obileke dkk., 2021). Skema MFC konfigurasi dua ruang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Desain skematik MFC konfigurasi dua ruang (Obileke dkk., 2021)

2.2. Peran dan Pengaruh Substrat pada MFC

Substrat merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi produksi listrik MFC. Substrat disebut juga dengan anolit, yaitu larutan yang berada pada ruang anoda. Dengan adanya substrat, kebutuhan nutrisi dan sumber energi mikroorganisme dapat terpenuhi.

Berbagai macam substrat dapat digunakan dalam MFC untuk produksi listrik mulai dari senyawa murni hingga campuran kompleks bahan organik yang ada dalam air limbah. Pemilihan jenis substrat biasanya dipilih berdasarkan arus, rapat daya, dan efisiensi faraday (Pant dkk., 2010). Beberapa substrat yang telah digunakan pada MFC diantaranya asetat, air limbah pembuatan bir, biomassa lignoselulosa, air limbah sintesis, air limbah pengolahan pati, limbah *landfill*, air limbah pewarna, dan substrat anorganik. Namun, beberapa studi menunjukkan bahwa asetat dan glukosa adalah substrat yang paling sering digunakan (Obileke dkk., 2021). Beberapa studi terkait penggunaan berbagai macam substrat terhadap kinerja MFC ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Jenis substrat yang digunakan untuk MFC (Obileke, 2021).

Jenis substrat	Konfigurasi	Rapat daya (W/m ³)	Referensi
Glukosa	Satu ruang	68	Logan (2004)
Asetat	Satu ruang	835	Oh dkk. (2010)
Etanol	Satu ruang	820	Logan (2006)
Air limbah rumah tangga	Dua ruang	114	Jiang dkk. (2014)
Glukosa	Dua ruang	855	Choudhury dkk. (2017)
Asetat	Dua ruang	1926	Inoue dkk. (2010)
Air limbah	Dua ruang	2485	Bermek dkk. (2014)

Hasil yang ada pada tabel memperlihatkan bahwa rapat daya yang dihasilkan sangat

dipengaruhi oleh jenis substrat yang digunakan. Setiap substrat memiliki perbedaan reaksi yang terjadi di anoda, sehingga rapat daya yang dihasilkan berbeda pula. Pemodelan MFC terhadap substrat yang digunakan menjadi sangat penting untuk mengetahui pengaruh jenis substrat terhadap nilai energi listrik yang dihasilkan.

2.3. Peran dan Pengaruh pH pada MFC

Jalilludin dkk. (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh pH anoda terhadap performa MFC dua ruang yang menggunakan substrat *palm oil mill effluent* (POME). Pada penelitian tersebut, MFC dioperasikan pada tiga kondisi, yaitu pada pH 4 (asam), pH 7 (netral), dan pH 8 (alkalin). Berdasarkan penelitian tersebut, MFC yang dioperasikan pada pH 7 menghasilkan densitas daya lebih tinggi dibandingkan MFC yang dioperasikan pada pH 4 dan pH 8. Hal ini menunjukkan bahwa performa MFC yang paling optimum diperoleh jika MFC dioperasikan pada pH netral. Kondisi pH yang asam dapat mempercepat pertumbuhan bakteri asidogenik, sehingga pada MFC yang dioperasikan pada pH 4 jumlah bakteri asidogenik menjadi lebih banyak dan mengakibatkan pembentukan metanol sebagai produk samping yang dapat menurunkan performa MFC. Sementara itu, kondisi pH yang basa pada MFC dapat menurunkan performa MFC karena mikroba yang terdapat pada substrat tidak dapat tumbuh dengan baik pada kondisi tersebut. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pH memiliki pengaruh pada kinerja MFC, sehingga perlu ditentukan kondisi pH yang optimum untuk menghasilkan performa MFC yang paling baik.

2.4. Peran dan Pengaruh Jenis Mikroba pada MFC

Setelah meninjau substrat utama yang digunakan untuk MFC, perlu diperhatikan mikroorganisme yang bertanggung jawab untuk menghasilkan listrik. Mikroorganisme berperan dalam transfer elektron dari senyawa organik ke anoda melalui metabolismenya. Kultur yang digunakan dapat berupa kultur murni atau campuran. Beberapa bakteri dapat menghasilkan listrik dengan cepat tanpa menggunakan mediator, seperti *Geobacter sulfurreducens* dan *Shewanella putrefaciens*. Sedangkan sejumlah bakteri memerlukan mediator yang membantu transfer elektron menuju anoda. Contoh mikroorganisme dengan mode operasi dan media tertentu yang digunakan pada penelitian terkait dapat

dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3. Mikroba yang digunakan untuk MFC (Kumar dkk., 2015)

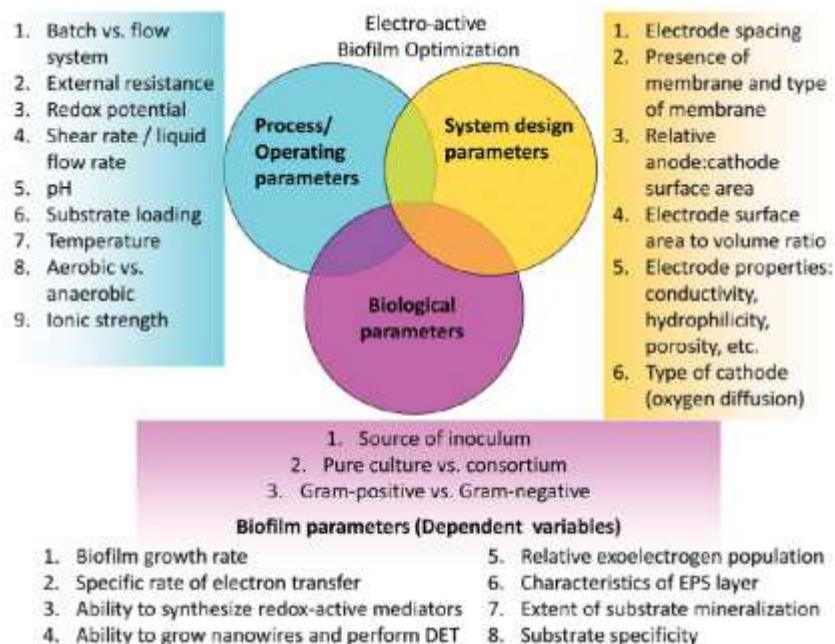
Mikroba MFC	Densitas Arus/Densitas Daya	Protein/Senyawa yang Terlibat dalam Transfer Elektron	Referensi
<i>Geobacter sulfurreducens</i>	3147 mA/m ²	Type IV pili, c-Type cytochrome Z	Inoue dkk., (2010)
<i>Geobacter metallireducens</i>	40 mW/m ²	c-Type cytochromes, I.e. OmcB dan OmcE	Min dkk., (2005)
<i>Shewanella oneidensis</i>	3000 mW/m ²	flavins, riboflavin	Ringeisen dkk., (2006)
<i>Shewanella putrefaciens</i>	4.92 W/m ³	c-Type cytochromes, I.e. MtrC and OmcA	Pandit dkk., (2014)
<i>Rhodospseudomonas palustris</i>	2720 mW/m ²	c-Type cytochromes	Xing dkk., (2008)
<i>Thermincola ferriacetica</i>	12000 mA/m ²	Anthraquinone 2, 6 disulfonate	Prathap dkk., (2013)
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	4310 mW/m ²	Pyocyanin, Phenazine-1-carboxamide	Rabaey dkk., (2004)
<i>Desulfovibrio desulfuricans</i>	233 mA/m ²	c-Type cytochromes	Kang dkk., (2014)
<i>Klebsiella pneumonia</i>	199 mA/m ²	2, 6-Di-tert-butyl-pbenzoquinone	Lifang dkk., (2010)

Berdasarkan Tabel 2.3, spesies mikroba yang menghasilkan densitas arus terbesar adalah *Thermincola ferriacetica*, sedangkan spesies mikroba yang menghasilkan densitas daya terbesar adalah *Geobacter sulfurreducens*. Masing-masing spesies bakteri menghasilkan densitas arus atau densitas daya yang berbeda-beda. Oleh karena itu, pemilihan spesies mikroba yang akan digunakan pada MFC perlu dipertimbangkan agar menghasilkan

kinerja paling baik.

2.5. Pengaruh Pembentukan Biofilm Anoda pada MFC

Kemampuan mikroorganisme untuk membentuk biofilm di anoda merupakan parameter kunci peningkatan produksi energi listrik MFC. Biofilm yang terbentuk dapat berupa lapisan tunggal atau multi lapisan. Pertumbuhan mikroorganisme terhadap pembentukan biofilm bergantung pada metabolisme sel dan faktor lingkungan. Parameter penting dalam upaya optimisasi biofilm dipengaruhi oleh kondisi operasi, desain MFC, dan parameter biologi mikroorganisme seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4 (Borole dkk., 2011).



Gambar 2.4. Parameter optimisasi biofilm untuk sistem bioelektrokimia (Borole dkk, 2011)

Dalam sebuah studi Baranitharan dkk. (2014), dilakukan simulasi pada MFC konfigurasi dua ruang yang menggunakan POME sebagai substrat mikroba. Mikroorganisme yang digunakan adalah kultur gabungan *Pseudomonas aeruginosa*, *Pseudomonas mendocina*, *Pseudomonas viridiivida*, *Acetobacter schilendri*, *Actinobacillus capsulatus*, dan

Brevibacterium paucivorans. Dilakukan analisis perkembangan biofilm dari mikroba selama 20 hari dan diuji performa MFC. Hasil dari penelitiannya yaitu produksi energi listrik meningkat pesat sejak hari ke-3 hingga hari ke-7, yaitu pada rentang hari pembentukan biofilm secara pesat. Setelah mencapai produksi maksimal pada hari ke-7 energi listrik yang dihasilkan menurun hingga hari ke-14. Hal ini diduga karena terdapat akumulasi produk metabolit seperti ion H^+ yang menghambat aktivitas mikroba. Didapati Rapat daya maksimum pada hari ke-7 sebesar 22 mW/m^2 dan turun menjadi 18 mW/m^2 pada hari ke-14. Pembentukan biofilm pada anoda meningkatkan produksi rapat daya dan menurunkan resistansi perpindahan muatan. Nilai resistansi perpindahan muatan sejak hari ke-3 hingga hari ke-14 menurun sebesar 16,9%. Hal ini menunjukkan bahwa perkembangan biofilm mikroba terbukti menurunkan tahanan polarisasi anoda, dan berakibat pada peningkatan produksi energi listrik.

2.6. Peran dan Pengaruh Elektroda pada MFC

Salah satu faktor penting yang bertanggung jawab atas efisiensi MFC adalah elektroda. Elektroda memiliki resistansi tertentu, dan elektroda yang paling efektif untuk MFC adalah yang memiliki resistansi yang paling kecil. Bahan elektroda memiliki resistansi tertentu, namun pemilihan bahan untuk performa MFC tentu menjadi pertimbangan biaya produksi MFC skala besar (Shanmuganathan dkk., 2018).

Bahan elektroda untuk anoda dan katoda MFC harus tidak korosif, non-*fouling*, konduktif alami, dan hemat biaya. Hasil penelitian pengaruh jenis material anoda dan katoda terhadap kinerja MFC ditunjukkan pada Tabel 2.4 dan Tabel 2.5.

Tabel 2.4. Material yang sering digunakan untuk anoda (Obileke dkk, 2021).

Material	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Kertas karbon	Konduktivitas tinggi	Area spesifik kecil, mahal	Guo dkk., (2012)
<i>Stainless steel</i>	Konduktivitas tinggi, murah	Penempelan bakteri sulit, daya yang	Guo dkk., (2012)

		dihasilkan rendah	
<i>Carbon cloth</i>	Fleksibel, area spesifik besar	Rapuh	Guo dkk., (2012)
<i>Graphite fibre brush</i>	Porositas dan konduktivitas tinggi	Mahal	Guo dkk., (2012)
<i>Graphite rod</i>	Konduktivitas tinggi, luas permukaan terukur	Tidak kuat	Guo dkk., (2012)
Polimer konduktif	Area permukaan besar	Konduktivitas rendah	Guo dkk., (2012)
<i>Graphite granules bed</i>	Murah, porositas tinggi, area spesifik besar	Resistansi kontak tinggi	Guo dkk., (2012)

Tabel 2.5. Material yang sering digunakan untuk katoda (Obileke dkk, 2021).

Material	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
Platinum	Kemampuan katalisis baik	Mahal	Logan, (2008)
Grafrit dan Karbon	-	Katalis yang buruk untuk reduksi oksigen	Logan, (2008)
Mangan oksida, timbal dioksida, kompleks kobalt	Daya yang dihasilkan besar	Umur pakai pendek	Mao dkk., (2003)

Setiap jenis material katoda maupun anoda memiliki kelebihan dan kekurangan masing-masing. Beberapa material dapat menghantarkan listrik dengan baik, seperti material grafit, karbon ataupun *stainless steel*. Akan tetapi, material yang terbuat dari grafit dan karbon cenderung rapuh. Sementara itu, beberapa material mahal harganya, seperti platinum dan *Graphite fibre brush*. Oleh karenanya, sifat-sifat dari material anoda

maupun katoda perlu dipertimbangkan dalam pembuatan MFC.

2.7. Pengaruh Membran Penukar Kation pada MFC

Anoda dan katoda pada MFC dapat dihubungkan langsung oleh substrat yang sekaligus berperan sebagai jembatan elektrolit atau dipisahkan oleh *proton exchange membrane*. Melalui *proton exchange membrane*, proton yang dihasilkan dari metabolisme anaerobik pada anoda akan berpindah ke katoda. Beberapa hal terkait *Proton exchange membrane* yang dapat mempengaruhi kinerja MFC adalah resistansi membran, difusi oksigen dari katoda ke anoda, difusi substrat dari anoda ke katoda, dan *biofouling* pada membran (Leong dkk., 2013).

Membran dengan resistansi yang tinggi memiliki kapasitas penukaran ion yang rendah, sehingga menyebabkan difusi proton dari anoda ke katoda menurun. Hal ini juga mengakibatkan penurunan arus dan densitas daya MFC (Ji dkk., 2011). Membran konduktif umumnya digunakan agar resistansi membran rendah (Daud dkk., 2013). Difusi oksigen dari katoda ke anoda dapat menurunkan voltase keluaran dan efisiensi coulomb MFC (Oh dkk., 2009). Difusi oksigen dapat diminimalisasi dengan menggunakan membran yang *non-porous* atau menambahkan senyawa yang dapat bereaksi dengan oksigen di anoda, seperti sistein (Leong dkk., 2013).

Substrat yang berdifusi dari anoda ke katoda dapat menyebabkan pembentukan biofilm oleh mikroba aerobik pada katoda yang dapat menghambat reduksi oksigen pada katoda. Penggunaan membran yang hanya selektif terhadap kation dapat mencegah difusi substrat dari anoda ke katoda (Leong dkk., 2013). *Biofouling* pada *proton exchange membrane* dapat terjadi karena adanya penempelan mikroba ataupun substrat. Untuk mencegah *biofouling*, membran dapat dimodifikasi, sehingga memiliki sifat anti-mikrobia dan anti-adhesi (Liu dkk., 2010). Membran yang memiliki sifat anti-mikrobia dapat membunuh mikroba yang menempel pada membran, sedangkan membran yang memiliki sifat anti-adhesi dapat mencegah adsorpsi substrat dan adhesi sel pada membran.

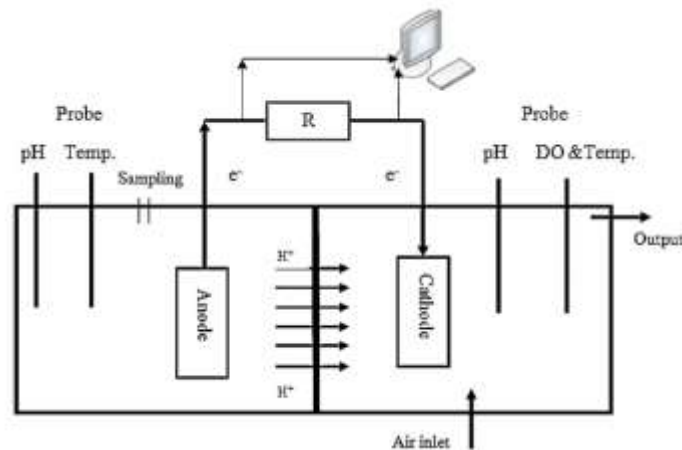
2.8. Pemodelan Sistem MFC

MFC adalah sistem yang kompleks karena melibatkan interaksi berbagai fenomena bersamaan dalam satu sistem, seperti perpindahan massa, muatan, energi dan panas, reaksi elektrokimia anoda dan katoda, metabolisme mikroorganisme, dan elektron transfer. Beberapa fenomena dan parameter sulit dan tidak dapat diukur dengan eksperimen, sehingga pengembangan model matematika dapat memberikan kontribusi yang besar. Pemodelan bermanfaat untuk memahami fenomena kerja MFC, karena memungkinkan untuk simulasi proses yang berbeda, dan memprediksikan pengaruhnya terhadap kinerja MFC (Oliveira dkk., 2018).

Model MFC yang sudah ada dan dapat menggambarkan sistem MFC di antaranya model Zeng dkk. (2010), Esfandyari dkk. (2017) dan Oliveira dkk. (2018). Ketiga model menggambarkan fenomena reaksi elektrokimia, perpindahan biomassa, reaksi biokimia, dan fenomena pada anoda dan katoda. Model-model lain yang telah ada biasanya mengabaikan fenomena ruang katoda dan menetapkan asumsi-asumsi umum untuk fenomena yang terjadi. Model Esfandyari dkk. (2017) dijelaskan lebih lanjut pada subbab 2.7.1 sebagai pemodelan MFC pada kondisi tidak tunak, sedangkan model Zeng dkk. (2010) dan Oliveira dkk. (2018) dijelaskan lebih lanjut pada subbab 2.7.2 dan 2.7.3 sebagai pemodelan MFC pada kondisi tunak,

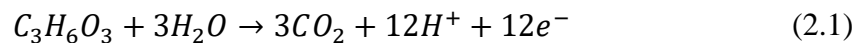
2.8.1. Pemodelan MFC oleh Esfandyari dkk. (2017)

Esfandyari dkk. (2017) mengusulkan model untuk MFC dua ruang dengan sistem kontinu. Percobaan dilakukan dengan substrat asam laktat dan bakteri *Shewanella* pada anoda, sedangkan akseptor elektron pada katoda adalah oksigen. Skema percobaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Skema percobaan MFC (Esfandyari dkk., 2017)

Pada model yang diusulkan, reaksi yang terjadi di anoda dan katoda ditunjukkan oleh Persamaan 2.1 dan 2.2.



Menurut Chae dkk (2009), substrat berpengaruh pada komposisi komunitas bakteri yang terdapat pada biofilm anoda dan kinerja MFC, yang menyangkut rapat daya dan efisiensi coulomb. Hubungan konsentrasi substrat dan produksi arus MFC mengikuti model Monod apabila tidak ada faktor pembatas kinerja mikroorganisme pada biofilm anoda (Borole, 2011). Model monod secara empiris cocok dengan berbagai data dan merupakan model pertumbuhan mikroba yang paling umum digunakan (Shuler dan Kargi, 2002).

$$\mu = r_{max} \cdot \frac{C_S}{K_S + C_S} \quad (2.3)$$

Pada MFC, donor elektron (substrat) dan akseptor elektron (biofilm konduktif) memiliki pengaruh yang besar dalam konsumsi substrat dan laju pembentukan elektron. Dengan menggabungkan persamaan Nernst dan Monod, laju konsumsi substrat akan mengikuti Persamaan 2.4 (Marcus dkk., 2007; Merkey dan Chopp, 2012).

$$r_s(t) = \mu \left(\frac{1}{1 + \exp(-\frac{F}{RT} \eta_{act})} \right) \phi_a \quad (2.4)$$

Substrat diasumsikan terdifusi dari *bulk liquid* anoda ke biofilm kemudian dioksidasi oleh biomassa aktif. Produksi CO₂ dan H⁺ didifusikan Kembali ke *bulk liquid*. Oleh karena itu, terdapat lima elemen penyusun neraca massa biofilm, yaitu biomassa aktif, biomassa tidak aktif, substrat, CO₂ dan H⁺ (Kazemi dkk., 2015). Persamaan neraca massa biomassa aktif, biomassa inaktif, substrat, CO₂ dan H⁺ berturut-turut ditunjukkan pada Persamaan 2.6 sampai 2.10. Persamaan laju perubahan ketebalan biofilm ditunjukkan pada Persamaan 2.11.

$$\frac{d}{dt}(\phi_a(t)) = Y_{ac}r_s(t) - b_{ina}\phi_a(t) + \frac{\phi_a(t)}{L(t)}\delta(t) - \frac{\phi_a(t)}{L(t)}\frac{d}{dt}(L(t)) \quad (2.6)$$

$$\frac{d}{dt}(\phi_i(t)) = b_{ina}\phi_a(t) + \delta(t)\frac{\phi_i(t)}{L(t)} - \frac{\phi_i(t)}{L(t)}\frac{d}{dt}(L(t)) \quad (2.7)$$

$$\frac{d}{dt}(C_s(t)) = \frac{D_s}{L_l L(t)}(C_{sb}(t) - C_{sb}(t)) - \rho r_s(t) - \frac{C_s(t)}{L(t)}\frac{d}{dt}(L(t)) \quad (2.8)$$

$$\frac{d}{dt}(C_{CO_2}(t)) = \frac{D_{CO_2}}{L_l L(t)}(C_{CO_2b}(t) - C_{CO_2}(t)) + 4\rho r_s(t) - \frac{C_{CO_2}(t)}{L(t)}\frac{d}{dt}(L(t)) \quad (2.9)$$

$$\frac{d}{dt}(C_H(t)) = \frac{D_H}{L_l L(t)}(C_{Hb}(t) - C_H(t)) + 12\rho r_s(t) - \frac{C_H(t)}{L(t)}\frac{d}{dt}(L(t)) \quad (2.10)$$

$$\frac{dL(t)}{dt} = Y_{ac}r_s(t)L(t) + \delta(t) \quad (2.11)$$

Pada anolit terjadi perubahan volume anolit terhadap laju perubahan ketebalan biomassa, sehingga laju perubahan volume anolit terhadap ketebalan biomassa mengikuti Persamaan 2.12.

$$\frac{dV_L(t)}{dt} = -A_m \frac{dL(t)}{dt} \quad (2.12)$$

Sistem diasumsikan memiliki pH anolit yang konstan, sehingga neraca massa yang dapat dibentuk pada anolit yaitu terhadap substrat dan CO₂ seperti yang ditunjukkan pada

Persamaan 2.13. Pada ruangan katoda diasumsikan pH konstan, sehingga perubahan yang terjadi di ruangan katoda hanya oksigen terlarut. Neraca massa oksigen terlarut di ruangan katoda ditunjukkan pada Persamaan 2.14.

$$\frac{d}{dt}(C_{sb}(t)) = \frac{1}{V_L(t)} \left(-\frac{A_m D_s}{L_l} (C_{sb}(t) - C_s(t)) \right) \quad (2.13)$$

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = k_l a (C_{O_2}^* - C_{O_2}) - q_{O_2} C_{O_2} \quad (2.14)$$

Model elektrokimia memperkirakan voltase yang dihasilkan oleh suatu MFC. Voltase MFC nyata bernilai kurang dari voltase teoritis, yang disebabkan oleh adanya overpotensial ohmik, konsentrasi, dan aktivasi (Logan, 2008).

$$E_{output} = E_{thermo} - \eta_{ohm} - \eta_{con} - \eta_{act} \quad (2.15)$$

Voltase teoritis adalah beda potensial antara anoda dan katoda. Voltase anoda dan katoda memenuhi persamaan-persamaan berikut ini (Logan, 2008).

$$E_{cathode} = E_{0,cathode} - \frac{RT}{mF} \ln \left(\frac{1}{C_{O_2} C_{HC}^4} \right) \quad (2.16)$$

$$E_{anode} = E_{0,anode} - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{C_{CO_2}^3 C_H^{11}}{C_S} \right) \quad (2.17)$$

Overpotensial aktivasi memenuhi Persamaan 2.18 (Katuri dan Scott, 2011).

$$\eta_{act} = \frac{b}{2,303} \sinh^{-1} \left[\frac{i}{2i_{0,ref} C_S} \right] \quad (2.18)$$

Overpotensial ohmik memenuhi Persamaan 2.19 (Zeng dkk., 2010).

$$\eta_{ohm} = \left(\frac{d_m}{k_m} + \frac{d_{cell}}{k_{aq}} \right) i \quad (2.19)$$

Overpotensial konsentrasi memenuhi Persamaan 2.20 (Basu dan Basu, 2013).

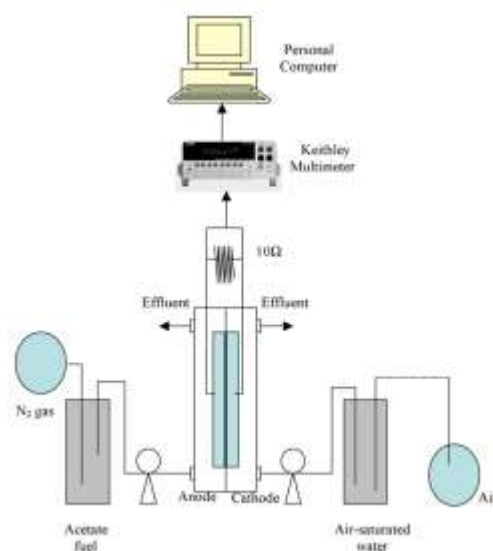
$$\eta_{con} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_l}{i_l - i} \right) \quad (2.20)$$

i_l adalah *limited current* yang memenuhi Persamaan 2.21 (Basu dan Basu, 2013).

$$i_l = \frac{nFD_s C_{Sb}}{L_l} \quad (2.21)$$

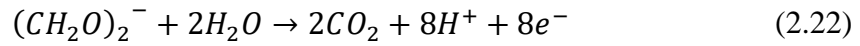
2.8.2. Pemodelan MFC oleh Zeng dkk. (2010)

Zeng dkk. (2010) mengusulkan model untuk MFC dua ruang dengan sistem kontinu. Pada percobaan yang dilakukan Zeng dkk. (2010) substrat yang digunakan pada anoda adalah asetat, sedangkan akseptor elektron pada katoda adalah oksigen. Skema percobaan tersebut ditunjukkan oleh Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Skema percobaan MFC (Zeng dkk., 2010)

Pada model yang diusulkan, reaksi yang terjadi di anoda dan katoda ditunjukkan oleh Persamaan 2.22 dan 2.23.



Reaksi balik yang terjadi pada anoda ataupun katoda diasumsikan tidak berpengaruh. Biomassa yang terlibat dalam reaksi dianggap hanya satu jenis. Persamaan kinetika yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.24 diperoleh menggunakan persamaan monod dan Butler-Volmer.

$$r_1 = k_1^0 \exp\left(\frac{\alpha F}{RT} \eta_a\right) \frac{C_{Ac}}{K_{Ac} + C_{Ac}} X \quad (2.24)$$

Model kinetika pada katoda dianggap mirip dengan persamaan monod. Konsentrasi air diasumsikan sangat melimpah, sehingga konsentrasi air konstan. Persamaan kinetika pada katoda ditunjukkan oleh Persamaan 2.25.

$$r_2 = -k_2^0 \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \exp\left((1 - \beta) \frac{F}{RT} \eta_c\right) \quad (2.25)$$

Pada model yang diusulkan Zeng dkk. (2010) ruang anoda dan katoda diasumsikan memenuhi karakteristik *continuous stirred tank reactor* (CSTR). Perpindahan massa diasumsikan terjadi sangat cepat dibandingkan dengan reaksi biokimia dan reaksi redoks yang terjadi, sehingga konsentrasi senyawa pada permukaan elektroda dapat dianggap sama dengan konsentrasi keseluruhan larutan. Karbon dioksida dan asetat diasumsikan tidak berdifusi melewati membran. M^+ mewakili semua kation yang terlibat dalam sistem MFC. Kation-kation ini dapat berasal dari senyawa-senyawa lain yang pada MFC, seperti nutrisi-nutrisi yang digunakan untuk pertumbuhan mikroba. M^+ berdifusi menuju katoda melewati membran untuk menjaga kenetralan elektrik dalam MFC. Senyawa-senyawa yang terlibat dalam reaksi pada anoda dan katoda adalah asetat, karbon dioksida, hidrogen, biomassa, oksigen, ion hidroksi, dan kation M^+ . Neraca massa masing-masing

komponen tersebut ditunjukkan oleh Persamaan 2.26 sampai 2.32, berturut-turut.

$$V_a \frac{dC_{Ac}}{dt} = Q_a(C_{Ac}^{in} - C_{Ac}) - A_m r_1 \quad (2.26)$$

$$V_a \frac{dC_{CO_2}}{dt} = Q_a(C_{CO_2}^{in} - C_{CO_2}) + 2A_m r_1 \quad (2.27)$$

$$V_a \frac{dC_H}{dt} = Q_a(C_H^{in} - C_H) + 8A_m r_1 \quad (2.28)$$

$$V_a \frac{dX}{dt} = \frac{Q_a}{f_x} (X^{in} - X) + A_m Y_{ac} r_1 - V_a K_{dec} X \quad (2.29)$$

$$V_c \frac{dC_{O_2}}{dt} = Q_c(C_{O_2}^{in} - C_{O_2}) - A_m r_2 \quad (2.30)$$

$$V_c \frac{dC_{OH}}{dt} = Q_c(C_{OH}^{in} - C_{OH}) + 8A_m r_1 \quad (2.31)$$

$$V_c \frac{dC_M}{dt} = Q_c(C_M^{in} - C_M) + A_m N_M \quad (2.32)$$

Fluks total semua kation memenuhi Persamaan 2.32.

$$N_M = \frac{3600 i_{cell}}{F} \quad (2.33)$$

Kesetimbangan muatan pada anoda dan katoda ditunjukkan oleh Persamaan 2.34 dan 2.35, dengan C_a dan C_c menunjukkan kapasitansi anoda dan katoda, berturut-turut.

$$C_a \frac{d\eta_a}{dt} = 3600 i_{cell} - 8F r_1 \quad (2.34)$$

$$C_c \frac{d\eta_c}{dt} = 3600 i_{cell} - 4F r_2 \quad (2.35)$$

Pada model yang diusulkan Zeng dkk. (2010), kerugian ohmik hanya dipengaruhi oleh resistensi pada larutan dan membran, serta resistansi pada rangkaian diabaikan. Nilai tegangan sel dapat dijabarkan seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.36, dengan d^m adalah ketebalan membran, k^m adalah konduktivitas membran, d_{cell} adalah jarak antar elektroda, dan k^{aq} adalah konduktivitas larutan elektrolit.

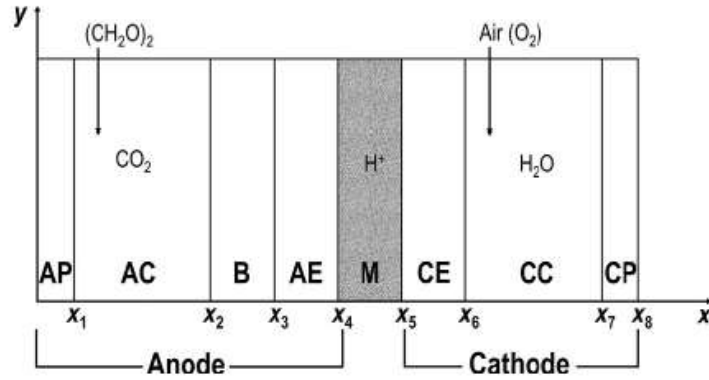
$$U_{cell} = U^0 - \eta_a + \eta_c - \left(\frac{d^m}{k^m} + \frac{d_{cell}}{k^{aq}} \right) i_{cell} \quad (2.36)$$

2.8.3. Pemodelan MFC oleh Oliveira dkk. (2018)

Pada model Oliveira dkk. (2018) digunakan pendekatan persamaan matematis yang menggambarkan MFC secara umum, yaitu:

- Persamaan Monod untuk menggambarkan konsumsi substrat dan pertumbuhan mikroorganisme.
- Hukum Fick untuk menggambarkan fenomena difusi dan perpindahan masa karena gradien konsentrasi.
- Persamaan Tafel untuk menggambarkan kinetika di anoda dan katoda, biasanya dikombinasikan dengan persamaan Monod.
- Persamaan Butler-Volmer untuk menghitung rapat arus listrik melalui potensial sel anoda dan katoda.
- Hukum Ohm untuk menghitung keluaran arus dan tegangan MFC.
- Persamaan Nernst untuk menggambarkan reaksi elektrokimia.

Pemodelan dilakukan untuk sistem MFC dua ruang yang tersusun dari ruang anoda dengan elektroda, membran penukar kation yang memisahkan antar kompartemen, dan ruang katoda dengan elektrolit. Selain itu, sel terbagi menjadi beberapa bagian, bagian anoda yang terbuat dari plat akrilik (AP), ruang anoda (AC), biofilm (B), elektroda anoda (AE), membran pemisah ruangan (M), Elektroda ruang katoda (EC), ruang katoda (CC), dan bagian katoda yang terbuat dari plat akrilik (CP), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema pemodelan MFC dua ruang (Oliveira dkk., 2018).

Substrat yang digunakan diasumsikan murni asetat. Reaksi oksidasi substrat terjadi di anoda dan membentuk proton, elektron, serta CO_2 . Elektron berpindah ke katoda melalui sirkuit eksternal sedangkan proton berpindah ke katoda melalui membran penukar kation. Di katoda, terjadi reaksi reduksi oksigen dan membentuk air. Nilai fluks yang dihasilkan baik di anoda maupun katoda ditunjukkan pada Persamaan 2.37.

$$N = \frac{I_{sel}}{nF} \quad (2.37)$$

Dari skema sistem yang digambarkan, proses perpindahan massa pada anoda dapat dianggap sebagai CSTR. Persamaan neraca massa untuk substrat (asetat) dan biomassa dapat digambarkan dengan Persamaan 2.38 dan Persamaan 2.39.

$$N_A = \frac{q^{AF}}{A^S} (C_A^0 - C_A^{AC}) \quad (2.38)$$

$$N_A = \frac{V^{AC} K_{dec} C_X}{A^S Y_{X/A}} - \frac{q^{AF}}{A^S} (C_{O_2}^0 - C_{O_2}^{CC}) \quad (2.39)$$

Persamaan neraca massa untuk bagian katoda juga dapat dianggap sebagai CSTR. Dengan nilai fluks yang dihasilkan dapat diperoleh melalui Persamaan 2.40.

$$N_{O_2} = \frac{q^{CF}}{A^S} (C_{O_2}^0 - C_{O_2}^{CC}) \quad (2.40)$$

Persamaan kinetika pada anoda melibatkan persamaan monod yang menunjukkan hubungan antara metabolisme mikroba dengan aktivitas elektrokimia yang tergambarkan dalam persamaan tafel. Kinetika pada anoda dapat menggunakan dua persamaan yaitu Persamaan 2.41 dan Persamaan 2.42.

$$N_A = \frac{I_{sel}}{8F} \quad (2.41)$$

$$N_A = k \exp\left(\frac{\alpha_a \eta_a F}{RT}\right) \frac{C_A^{AC}}{K_A + C_A^{AC}} C_X + k \exp\left(\frac{\alpha_a \eta_a F}{RT}\right) \frac{C_A^{AB}}{K_A + C_A^{AB}} C_X \quad (2.42)$$

Pada katoda terdapat fluks oksigen. Sehingga kinetika pada katoda dapat menggunakan dua persamaan yaitu Persamaan 2.43 dan 2.44.

$$N_{O_2} = \frac{I_{sel}}{4F} \quad (2.43)$$

$$N_{O_2} = I_{0,ref}^{O_2} \frac{C_{O_2}^{CE}}{C_{O_2,ref}^{CE}} \exp\left(\frac{\alpha_a \eta_a F}{RT}\right) \quad (2.44)$$

Tegangan sel (V_{sel}) digambarkan dengan tegangan teoritis pada kondisi kesetimbangan potensial termodinamik (E_{sel}) dikurangi dengan beberapa kerugian yang berasal dari:

- Overpotensial aktivasi ($\eta_{aktivasi}$) yang berkaitan dengan laju reaksi di elektroda.
- Overpotensial ohmik (η_{ohm}) yang berkaitan dengan hambatan aliran elektron dan ion melalui elektrolit dan sirkuit listrik eksternal.
- Overpotensial konsentrasi ($\eta_{konsentrasi}$) yang berkaitan dengan fenomena perpindahan massa spesi berbeda yang bergerak dari atau menuju elektroda.

Sehingga tegangan sel diestimasi dengan Persamaan 2.45.

$$V_{sel} = E_{sel} - \eta_{aktivasi} - \eta_{konsentrasi} - \eta_{ohm} \quad (2.45)$$

Dimana η_{ohm} (overpotensial ohmik) adalah hambatan dalam sel yang dapat dihitung melalui Persamaan 2.46 dan Persamaan 2.47.

$$\eta_{ohm} = I_{sel} \times R_{sel} \tag{2.46}$$

$$R_{sel} = \frac{\delta^M}{\kappa} \tag{2.47}$$

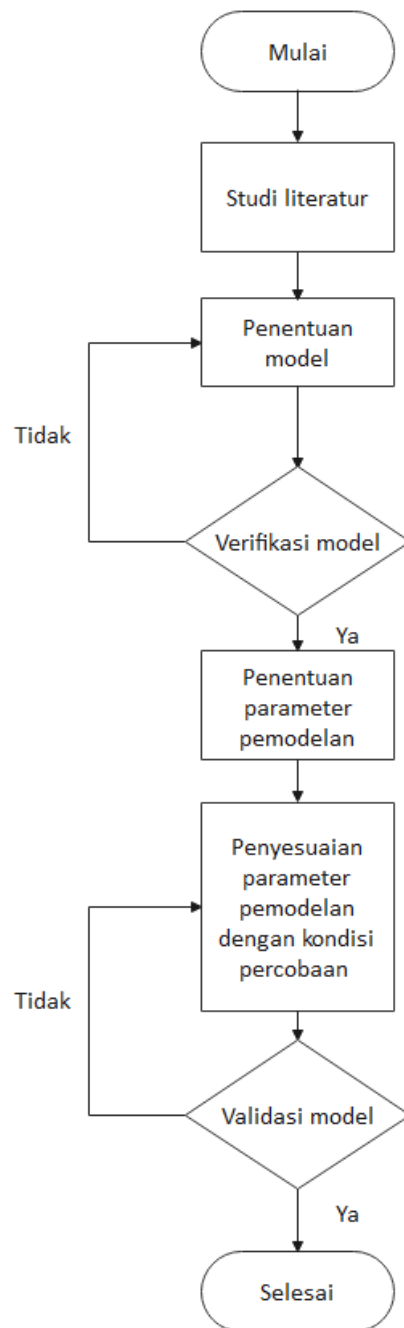
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan dijelaskan teknis pelaksanaan penelitian yang meliputi tahapan penelitian, asumsi pemodelan, alur pemodelan, validasi pemodelan, dan jadwal pelaksanaan penelitian.

3.1. Tahapan Penelitian

Penelitian ini terbagi menjadi empat tahapan utama, yaitu studi literatur pemodelan, penentuan dan verifikasi model, penentuan parameter pemodelan dan penyesuaian terhadap kondisi percobaan, serta pengolahan data dan validasi model. Pemodelan dilakukan untuk data percobaan yang menggunakan MFC konfigurasi dua ruang sistem partaian. Rujukan utama pemodelan dinamik berasal dari Esfandyari dkk. (2017), sedangkan untuk pemodelan kondisi tunak berasal dari literatur Zeng dkk. (2010), dan Oliveira dkk. (2018). Dilakukan penentuan dan modifikasi parameter pemodelan untuk menyesuaikan perbedaan sistem MFC yang dirancang pada percobaan ini terhadap literatur. Kemudian hasil pemodelan yang diperoleh dibandingkan dengan data percobaan untuk validasi model. Skema alur tahapan pemodelan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Skema tahapan penelitian.

3.2. Asumsi Pemodelan MFC

Sistem MFC dimodelkan dalam persamaan matematis dan akan diselesaikan menggunakan piranti lunak Microsoft Excel dan Matlab. Pemodelan dinamik mengikuti rujukan pemodelan yang telah dilakukan oleh Esfandyari dkk. (2017), sedangkan

pemodelan tunak mengikuti model MFC yang diusulkan oleh Zeng dkk. (2010) dan Oliveira dkk. (2018). Asumsi yang digunakan dalam pemodelan yang dilakukan adalah sebagai berikut.

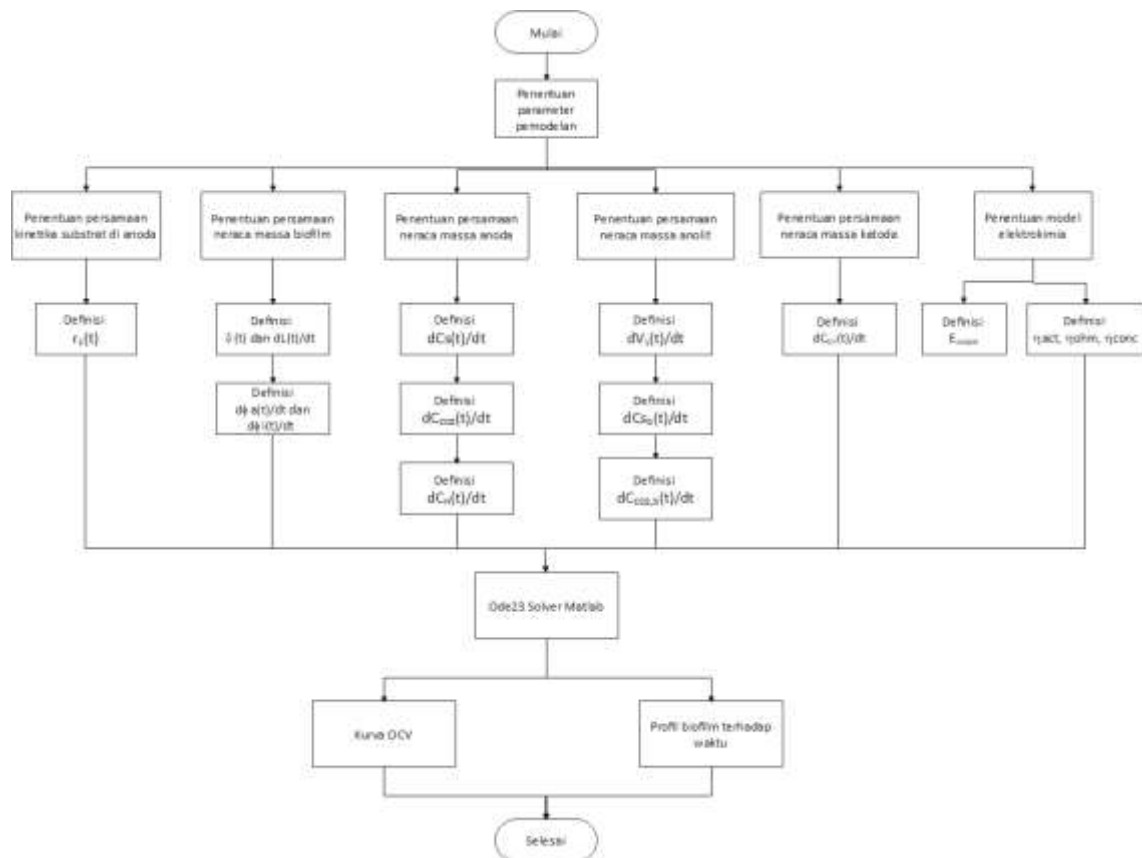
1. Konfigurasi MFC yaitu dua ruang (*two chamber*) dengan sistem partaian (*batch*).
2. Model yang digunakan adalah model satu dimensi.
3. Substrat yang digunakan dalam MFC merupakan POME yang diasumsikan terdiri dari asam asetat dan propionat.
4. Pemodelan dinamis pada MFC terdiri atas tiga bagian, yaitu pada biofilm di permukaan elektroda, larutan anolit pada anoda, dan larutan katolit pada katoda.
5. Pada pemodelan tunak, perpindahan massa terjadi jauh lebih cepat dibandingkan dengan reaksi biokimia dan reaksi redoks, sehingga konsentrasi senyawa pada permukaan elektroda dapat dianggap sama dengan konsentrasi larutan secara keseluruhan.
6. Perpindahan massa menuju elektroda hanya terjadi secara difusi.
7. Tekanan dan temperatur percobaan konstan.
8. Asetat, palmitat, karbon dioksida, dan KMnO_4 tidak berdifusi melewati membran.
9. Resistansi pada elektroda dan membran penukar ion diabaikan.

3.3. Alur Pemodelan

Alur pemodelan MFC dinamik mula-mula terbagi menjadi enam bagian, yaitu menentukan persamaan kinetika substrat di anoda, penentuan neraca massa biofilm, neraca massa anoda, neraca massa anolit, neraca massa katoda, dan pemodelan elektrokimia. Dari keenam tinjauan tersebut diselesaikan dengan menggunakan *solver* Ode23 Matlab untuk mendapatkan kurva OCV dan profil biofilm terhadap waktu. Skema alur pemodelan MFC dinamik dapat dilihat pada Gambar 3.2.

Alur pemodelan MFC kondisi tunak mula-mula terbagi menjadi empat bagian, yaitu menentukan tegangan sel pada kondisi kesetimbangan termodinamik, overpotensial anoda, overpotensial katoda, dan overpotensial ohmik. Dari empat parameter tersebut ditentukan nilai tegangan sel, dan dilanjutkan dengan pembuatan kurva I-V-P. Skema

alur pemodelan dapat dilihat pada Gambar 3.3.



Gambar 3.2. Skema alur pemodelan MFC dinamik

6.	$r_{s_2}(t) = \mu \left(\frac{1}{1 + \exp(-\frac{F}{RT} \eta_{act_2})} \right) \phi_a$	$r_{s_2}(t)$
7.	$\frac{d}{dt}(C_{S_1}(t)) = \frac{D_{S_1}}{L_l L(t)} (C_{Sb_1}(t) - C_{S_1}(t)) - \rho r_{s_1}(t) - \frac{C_{S_1}(t)}{L(t)} \frac{d}{dt}(L(t))$	$\frac{d}{dt}(C_{S_1}(t))$
8.	$\frac{d}{dt}(C_{S_2}(t)) = \frac{D_{S_2}}{L_l L(t)} (C_{Sb_2}(t) - C_{S_2}(t)) - \rho r_{s_2}(t) - \frac{C_{S_2}(t)}{L(t)} \frac{d}{dt}(L(t))$	$\frac{d}{dt}(C_{S_2}(t))$
9.	$\frac{d}{dt}(C_{CO_2}(t)) = \frac{D_{CO_2}}{L_l L(t)} (C_{CO_2b}(t) - C_{CO_2}(t)) + 2\rho r_{s_1}(t) + 3\rho r_{s_2}(t) - \frac{C_{CO_2}(t)}{L(t)} \frac{d}{dt}(L(t))$	$\frac{d}{dt}(C_{CO_2}(t))$
10.	$\frac{d}{dt}(C_H(t)) = \frac{D_H}{L_l L(t)} (C_{Hb}(t) - C_H(t)) + 8\rho r_{s_1}(t) + 13\rho r_{s_2}(t) - \frac{C_H(t)}{L(t)} \frac{d}{dt}(L(t))$	$\frac{d}{dt}(C_H(t))$
11.	$\frac{dV_L(t)}{dt} = -A_m \frac{dL(t)}{dt}$	$\frac{dV_L(t)}{dt}$
12.	$\frac{d}{dt}(C_{Sb_1}(t)) = \frac{1}{V_L(t)} \left(-\frac{A_m D_{S_1}}{L_l} (C_{Sb_1}(t) - C_{S_1}(t)) \right)$	$\frac{d}{dt}(C_{Sb_1}(t))$
13.	$\frac{d}{dt}(C_{Sb_2}(t)) = \frac{1}{V_L(t)} \left(-\frac{A_m D_{S_2}}{L_l} (C_{Sb_2}(t) - C_{S_2}(t)) \right)$	$\frac{d}{dt}(C_{Sb_2}(t))$
14.	$Gr_k = \frac{g \Delta C_r L^3}{C_r v_r^2}$	Gr_k
15.	$Sc_k = \frac{v_r}{D_r}$	Sc_k
16.	$\frac{h_{mass}^r L}{D_r} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_k^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Sc_k} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]$	h_{mass}^r
17.	$\frac{dC_r}{dt} = \frac{A_m}{V_k(t)} (h_{mass}^r (C_r^0 - C_r) - r_k(t))$	$\frac{dC_r}{dt}$
18.	$E_{output} = E_{thermo} - \eta_{ohm} - \eta_{con_1} - \eta_{con_2} - \eta_{act_1} - \eta_{act_2}$	E_{output}
19.	$E_{cathode} = E_{0,cathode} - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[MnO_2]}{[H^+]^4 [MnO_4^-]} \right)$	$E_{cathode}$
20.	$E_{anode} = E_{0,anode} - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{[CO_2][HCO_3^-][H^+]^8}{[CH_3COO^-]} \right)$	E_{anode}
21.	$\eta_{act_1} = \frac{b}{2,303} \sinh^{-1} \left[\frac{i}{2i_{0,ref} C_{S_1}} \right]$	η_{act_1}
22.	$\eta_{act_2} = \frac{b}{2,303} \sinh^{-1} \left[\frac{i}{2i_{0,ref} C_{S_2}} \right]$	η_{act_2}
23.	$\eta_{ohm} = \left(\frac{d_m}{k_m} + \frac{d_{cell}}{k_{aq}} \right) i$	η_{ohm}

24.	$\eta_{con_1} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_{l_1}}{i_{l_1} - i} \right)$	η_{con_1}
25.	$\eta_{con_2} = \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{i_{l_2}}{i_{l_2} - i} \right)$	η_{con_2}
26.	$i_{l_1} = \frac{nFD_{s_1}C_{sb_1}}{L_l}$	i_{l_1}
27.	$i_{l_2} = \frac{nFD_{s_2}C_{sb_2}}{L_l}$	i_{l_2}

Tabel 3.2. Persamaan pemodelan MFC keadaan tunak.

No.	Persamaan	Keluaran
1.	$E_{sel} = E_{katoda} - E_{anoda}$	E_{sel}
2.	$E_{anoda} = E_a^0 - \frac{RT}{n_a F} \ln \left(\frac{[CO_2][HCO_3^-][H^+]^8}{[CH_3COO^-]} \right)$	E_{anoda}
3.	$E_{katoda} = E_k^0 - \frac{RT}{n_k F} \ln \left(\frac{[MnO_2]}{[H^+]^4[MnO_4^-]} \right)$	E_{katoda}
4.	$r_{a,1} = \frac{I}{n_{a,1}F}$	$r_{a,1}$
5.	$r_{a,2} = \frac{I}{n_{a,2}F}$	$r_{a,2}$
6.	$Ra_{a,1} = Gr_{a,1} \times Sc_{a,1}$	$Ra_{a,1}$
7.	$Ra_{a,2} = Gr_{a,2} \times Sc_{a,2}$	$Ra_{a,2}$
8.	$Gr_{a,1} = \frac{g\Delta C_{s,1}L^3}{C_{s,1}v_{s,1}^2}$	$Gr_{a,1}$
9.	$Gr_{a,2} = \frac{g\Delta C_{s,2}L^3}{C_{s,2}v_{s,2}^2}$	$Gr_{a,2}$
10.	$Sc_{a,1} = \frac{v_{s,1}}{D_{s,1}}$	$Sc_{a,1}$
11.	$Sc_{a,2} = \frac{v_{s,2}}{D_{s,2}}$	$Sc_{a,2}$
12.	$\frac{h_{mass,1}^s L}{D_{s,1}} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_{a,1}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Sc_{a,1}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]$	$h_{mass,1}^s$

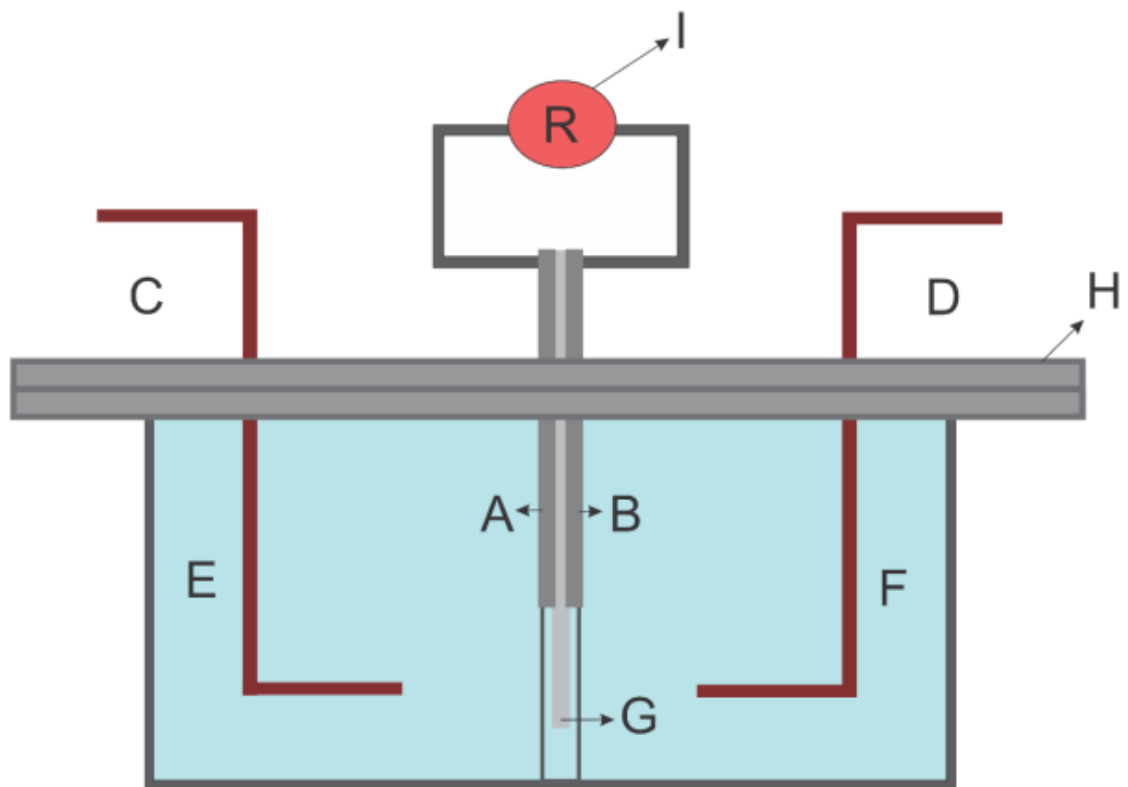
13.	$\frac{h_{mass,2}^s L}{D_{s,2}} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_{a,2}^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Sc_{a,2}} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]$	$h_{mass,2}^s$
14.	$\frac{V_a}{A_m} \frac{dC_{s,1}}{dt} = h_{mass,1}^s (C_{s,1}^0 - C_{s,1}) - r_{a,1}$	$C_{s,1}$
15.	$\frac{V_a}{A_m} \frac{dC_{s,2}}{dt} = h_{mass,2}^s (C_{s,2}^0 - C_{s,2}) - r_{a,2}$	$C_{s,2}$
16.	$\frac{V_a}{A_m} \frac{dC_x}{dt} = r_{a,1} Y_{x/s} + r_{a,2} Y_{x/s} - \frac{V_a K_{dec} C_x}{A_m}$	C_x
17.	$C_{s,1}^b = C_{s,1} - \frac{b_{det} L_t (1 + \rho) L_I}{Y_{x/s} D_{s,1}}$	$C_{s,1}^b$
18.	$C_{s,2}^b = C_{s,2} - \frac{b_{det} L_t (1 + \rho) L_I}{Y_{x/s} D_{s,2}}$	$C_{s,2}^b$
19.	$r_{a,1} = \mu_{maks} \frac{C_{s,1}}{C_{s,1} + K_s} C_x \exp\left(\frac{\alpha_{a,1} F}{RT} \eta_{a,1}\right) + \mu_{maks} \frac{C_{s,1}^b}{C_{s,1}^b + K_s} C_x \exp\left(\frac{\alpha_{a,1} F}{RT} \eta_{a,1}\right)$	$\eta_{a,1}$
20.	$r_{a,2} = \mu_{maks} \frac{C_{s,2}}{C_{s,2} + K_s} C_x \exp\left(\frac{\alpha_{a,2} F}{RT} \eta_{a,2}\right) + \mu_{maks} \frac{C_{s,2}^b}{C_{s,2}^b + K_s} C_x \exp\left(\frac{\alpha_{a,2} F}{RT} \eta_{a,2}\right)$	$\eta_{a,2}$
21.	$r_k = \frac{I}{n_k F}$	r_k
22.	$Ra_k = Gr_k \times Sc_k$	Ra_k
23.	$Gr_k = \frac{g \Delta C_r L^3}{C_r \nu_r^2}$	Gr_k
24.	$Sc_k = \frac{\nu_r}{D_r}$	Sc_k
25.	$\frac{h_{mass}^r L}{D_r} = \left[0.825 + \frac{0.387 Ra_k^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Sc_k} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]$	h_{mass}^r
26.	$\frac{V_k}{A_m} \frac{dC_r}{dt} = h_{mass}^r (C_r^0 - C_r) - r_k$	C_r
27.	$r_k = I_{ref} \left(\frac{C_r}{C_{r,ref}} \right) \exp\left(\frac{\alpha_k F}{RT} \eta_k\right)$	η_k
28.	$R_{sel} = \frac{\delta_m}{k}$	R_{sel}
29.	$\eta_o = I \times R_{sel}$	η_o
30.	$V = E_{sel} - \eta_{a,1} - \eta_{a,2} - \eta_k - \eta_o$	V
31.	$P_{sel} = I \times V$	P_{sel}

3.4. Validasi Pemodelan

Untuk memvalidasi permodelan yang telah dibuat, percobaan basah dengan variasi pH dilakukan pada MFC dua ruang menggunakan substrat POME. Grafik OCV dan IVP yang didapat dari percobaan basah kemudian akan digunakan untuk memvalidasi model. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai peralatan utama percobaan basah, alat dan bahan percobaan, serta prosedur kerja.

3.4.1. Peralatan Utama Percobaan Basah

Konfigurasi MFC yang digunakan adalah MFC dua ruang yang dibuat dari material *plexiglass* dengan volume ruang katoda dan anoda masing-masing adalah 8 x 6 x 5 cm (P x L x T) dan luas elektroda yang akan digunakan adalah 3 x 2 cm. Di antara ruang anoda dan katoda diletakkan sebuah PEM (*proton exchange membrane*). Antara ruang anoda dengan tutup serta ruang katoda disatukan dengan menggunakan baut. Elektroda dilekatkan pada ruang anoda maupun katoda menggunakan *double tape* dan membran diletakkan/dihimpitkan di antara dua elektroda. Pada ruang anoda, setelah dimasukkan substrat, dilakukan *sparging* N₂ agar oksigen didalam dapat keluar, sedangkan pada ruang katoda dibiarkan dalam kondisi aerobik. Skema alat dapat dilihat pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Gambar skema alat MFC.

Keterangan Gambar 3.4 adalah sebagai berikut.

- A. Anoda (*graphite sheet*)
- B. Katoda (*graphite sheet*)
- C. *Inlet* N₂
- D. *Inlet* udara (O₂)
- E. Ruang Anoda
- F. Ruang Katoda
- G. Membran Nafion
- H. Penutup
- I. Sirkuit luar atau alat ukur

3.4.2. Alat dan Bahan Percobaan Basah

Alat dan bahan yang digunakan dalam percobaan ini ditampilkan pada Tabel 3.3.

Tabel 3.3. Alat dan bahan yang digunakan dalam percobaan.

Alat	Bahan
Ruang anoda	Plastisin
Ruang katoda	Lem bakar
Sekrup	<i>Double tape</i>
Kunci pas (<i>open end spanner</i>)	Air limbah POME
Batang pengaduk	Elektroda karbon
Botol semprot	Membran Nafion 212
Gelas kimia 100 ml	KMnO ₄
Gelas kimia 250 mL	Aqua DM
Gelas kimia 500 mL	H ₂ O ₂
Gelas kimia 1000 mL	H ₂ SO ₄
Gelas ukur 100 mL	Nitrogen (g)
Labu erlenmeyer 500 mL	Etanol
Labu erlenmeyer 250 mL	aquades
Labu ukur 250 mL	HNO ₃
Mikropipet	K ₂ Cr ₂ O ₇
Kabel	HgSO ₄
Lemari pendingin	Asam asetat
Neraca analitik	Ag ₂ SO ₄
Pipet tetes	Formaldehid
Probe pH	Mentilen biru
Pinset	NaOH
<i>Sparger</i>	Kristal violet
<i>Magnetic stirrer</i>	BES

3.4.3. Prosedur Kerja Percobaan Basah

Prosedur kerja yang akan dilakukan meliputi tahap persiapan limbah POME dan analisis awal air limbah, persiapan pretreatment POME, persiapan alat MFC, percobaan utama, dan karakterisasi.

Pada tahap persiapan limbah POME dan analisis awal air limbah, limbah POME diambil dari keluaran limbah perebusan dari pabrik pengolahan minyak kelapa sawit PTPN VIII di Cikasungka Bogor. Setelah itu, pengujian dilakukan terhadap parameter fisiko-kimia POME yang meliputi pH, COD, dan konduktivitas. Selanjutnya, uji biofilm *microtiter dish* dilakukan untuk mengukur pertumbuhan biofilm. Sebanyak 100 mL POME diinkubasi pada suhu 37°C. Elektroda *graphite sheet* berukuran 0,25 cm² dimasukkan ke dalam kultur campuran POME. Proses pertumbuhan biofilm pada elektroda dilakukan selama 6, 12, 18, dan 24 jam setelah proses inokulasi. Elektroda kemudian dibilas dengan aquades dan direndam dalam 300 µL kristal violet 0,1% selama 30 menit. Setelah itu, dicuci bersih lagi dengan aquades dan dimasukkan pada 200 µL asam asetat 30%. Sebanyak 100 µL dari larutan tersebut dipindahkan ke piringan *microtiter dish* dan diukur absorbansi pada 550 nm. Grafik nilai absorbansi vs waktu dibuat. Setelah uji biofilm, kemudian dilakukan uji DREAM untuk mengukur aktivitas transfer elektron mikroba. Sebanyak 2 mL kultur kultur campuran POME ditambahkan dengan 0,2 µL *Methylene Blue*. Kemudian nilai absorbansi dicatat pada 660 nm pada interval 10 detik selama 3 menit menggunakan spektrofotometer UV-VIS. Nilai koefisien uji DREAM kemudian dihitung.

Pada tahap *pretreatment* POME, variasi *pretreatment* POME dilakukan pada kondisi alkalin dan penambahan BES untuk mengoptimalkan inhibisi aktivitas metanogenik. Kondisi pH optimum untuk aktivitas metanogenik berada pada kisaran pH 6,8-7,5. Pretreatment POME pada kondisi alkalin dilakukan di kisaran pH basa 7,0-9,0. Pretreatment alkalin dilakukan dalam ketel bertekanan tinggi dengan volume POME yang dimasukkan sebanyak 40 mL. pH POME diatur pada (7,0) dengan penambahan 6 M NaOH, diikuti dengan pemanasan POME pada 150°C selama 30 menit, lalu didinginkan hingga suhu kamar. Untuk pretreatment dengan penambahan BES, sebanyak 40 mL POME dimasukkan ke dalam ketel bertekanan tinggi. 10-250 µmol/L BES ditambahkan

ke dalam POME, diikuti dengan pemanasan POME pada 150°C selama 30 menit, lalu didinginkan hingga suhu kamar.

Tahap persiapan alat MFC meliputi pembuatan dan persiapan komponen-komponen MFC, yaitu persiapan membran, persiapan elektroda, dan perangkaian alat MFC. Proses persiapan membran diawali dengan perlakuan awal terhadap membran. Membran yang akan digunakan adalah Membran Nafion 212. Tahap perlakuan membran terdiri dari lima tahap yaitu pemanasan pada $80 \pm 1^\circ\text{C}$ dengan aqua DM selama satu jam, pemanasan dengan H_2O_2 3% pada $80 \pm 1^\circ\text{C}$ selama satu jam, pemanasan pada $80 \pm 1^\circ\text{C}$ dengan aqua DM kembali selama satu jam, pemanasan pada $80 \pm 1^\circ\text{C}$ dengan H_2SO_4 0,5M selama satu jam dan terakhir pemanasan kembali pada $80 \pm 1^\circ\text{C}$ dengan aqua DM selama satu jam. Setelah proses perlakuan awal selesai, membran di rendam di dalam aqua DM sampai saatnya nanti digunakan pada proses operasi MFC.

Selanjutnya, persiapan elektroda dilakukan Elektroda yang akan digunakan adalah *graphite sheet* berukuran 2x3 cm. Aktivasi elektroda dilakukan dengan merendam *graphite sheet* dalam larutan aqua regia, yaitu larutan H_2SO_4 dan HNO_3 dengan perbandingan volume 3:1 dan disonikasi selama 6 jam. Setelah itu, elektroda dibilas dengan aqua dm hingga larutan hasil pembilasan mencapai pH 7. Setelah itu, komponen-komponen MFC dirangkai. Pada ruang anoda, setelah dimasukkan substrat, *sparging* N_2 dilakukan agar oksigen di dalam dapat keluar, sedangkan pada ruang katoda dibiarkan dalam kondisi aerobik.

Setelah semua persiapan selesai, kemudian percobaan utama dilakukan. Percobaan dimulai dengan mengisi ruang pada MFC yaitu anolit pada ruang anoda dan katolit pada ruang katoda. Anolit yang digunakan adalah limbah POME yang telah di *pretreatment*. Katolit yang dipakai adalah larutan KMnO_4 100 mM. Sistem ini dijalankan selama 10 hari dan dilakukan pengukuran potensial serta arus listrik yang dihasilkan, yaitu dengan menyambungkan masing-masing elektroda dengan kabel dan langsung dihubungkan dengan multimeter. Hambatan eksternal selama proses pengoperasian adalah 1000 Ω . Pengukuran dilakukan setiap 24 jam.

Parameter yang divariasikan pada penelitian ini adalah perlakuan *pretreatment* terhadap limbah POME yang digunakan sebagai anolit. Adapun variabel dan parameter yang divariasikan ditampilkan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Variasi percobaan yang dilakukan.

Parameter	Variasi	Simbol
Pengaruh kondisi pH basa pada <i>pretreatment</i> POME	7,0	A-1
	7,5	A-2
	8,0	A-3
	8,5	A-4
	9,0	A-5
Pengaruh penambahan BES pada <i>pretreatment</i> POME	0 μmol	B-1
	10 μmol	B-2
	50 μmol	B-3
	250 μmol	B-4
	500 μmol	B-5

Variasi kondisi pH basa pada POME dilakukan dengan langkah-langkah berikut. POME yang telah melalui tahapan persiapan *pretreatment* pada kondisi basa dimasukkan kedalam botol penyimpanan. pH didalam botol penyimpanan dikontrol oleh sistem kontrol pH. Probe pH dimasukkan ke dalam botol penyimpanan untuk mendeteksi nilai pH. pH di dalam botol penyimpanan divariasikan mulai dari 7,0, 7,5, 8,0, 8,5, hingga 9,0. Anolit dari botol penyimpanan dialirkan ke ruang anoda. *Magnetic stirrer* digunakan di ruang anoda dan botol penyimpanan. Masing-masing kondisi pH dipertahankan selama 10 hari baik pada ruang anoda maupun pada botol penyimpanan. Proses ini dilakukan untuk pelapisan biofilm pada anoda.

Sementara itu, variasi penambahan BES dilakukan dengan langkah-langkah berikut. Pome yang telah melalui tahapan persiapan *pretreatment* dengan penambahan BES dimasukkan ke dalam botol penyimpanan. Penambahan BES divariasikan pada 0, 10, 50, 250, dan 500 $\mu\text{mol/L}$. Masing-masing konsentrasi BES yang telah ditambahkan kedalam

POME dioperasikan selama 10 hari pada ruang anoda. Proses ini dilakukan untuk pelapisan biofilm pada anoda.

Tahap terakhir dari percobaan basah adalah karakterisasi. Karakterisasi yang dilakukan meliputi pengukuran *Open Circuit Voltage* (OCV), analisis potensiodinamik, analisis *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS), SEM, XRD, FTIR, analisis COD, dan analisis NGS ampikon sekuensing. Karakterisasi yang digunakan dalam validasi model adalah pengukuran OCV dan analisis potensiodinamik.

Pengukuran OCV dilakukan untuk mengetahui tegangan maksimum yang dihasilkan ketika rangkaian tidak dikenai beban. Pada pengukuran ini, multimeter langsung dihubungkan pada anoda dan katoda di alat MFC tanpa adanya hambatan luar. Tegangan diamati setiap tiga jam selama 48 jam. Selain itu, hambatan awal dari rangkaian sebelum alat dioperasikan diukur untuk melihat sejauh mana hambatan luar yang terjadi di rangkaian dapat mempengaruhi pengukuran tegangan.

Analisis potensiodinamik dilakukan untuk mengetahui arus dan tegangan dari rangkaian MFC. Kedua elektroda dihubungkan dengan potensiostat Gamry V300 yang terhubung dengan komputer. Hasil dari pengukuran disajikan dalam bentuk kurva IV dan nilai *power density* dapat dihitung.

3.5. Jadwal Kerja

Penelitian dilakukan selama 15 minggu yang mencakup keseluruhan tahapan penelitian, pembuatan laporan, dan seminar.

Tahapan pengambilan POME, persiapan *pretreatment* kondisi MFC, serta persiapan alat MFC merupakan tahap sebelum percobaan utama. Pengambilan POME dilakukan pada dua minggu pertama. Kemudian dilanjutkan dengan persiapan alat MFC sekaligus pemberian *pretreatment* berupa variasi pH dan penambahan BES. Variasi dilangsungkan

sebanyak 5 kali setiap 2 minggu sejak minggu ke-2 hingga minggu ke-10.

Pengoperasian MFC berlangsung 10 minggu sejak minggu ke-2 hingga minggu ke-11. Analisis yang dilakukan terdiri dari karakterisasi *Open Circuit Voltage* (OCV), *I-V-P curve*, *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Durasi analisis berlangsung dari minggu ke-2 sampai dengan minggu ke-12. Analisis OCV dilakukan paralel dengan setiap *run* variasi MFC. Analisis IVP dapat dilakukan pada hari ke-10 setelah setiap *run* variasi berakhir. Analisis biofilm berupa SEM dan FTIR dilakukan pada minggu ke-10 hingga minggu ke-12.

Data hasil pengoperasian MFC pada berbagai variasi MFC kemudian diolah dan digunakan untuk validasi pemodelan yang telah dilakukan sebelumnya. Validasi model dimulai sejak minggu ke-11 hingga minggu ke-13. Pada tahap ini juga dilakukan analisis terkait pengaruh pH substrat dan jenis mikroba terhadap performa MFC.

Tahap terakhir dari proses penelitian adalah penyusunan laporan dan seminar hasil penelitian, yang berlangsung pada minggu ke-12 sampai dengan minggu ke-15. Jadwal kerja penelitian ditunjukkan oleh Tabel 3.5.

Tabel 3.5. Rencana Kerja Penelitian

Tahapan	Minggu														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Pengambilan POME															
Persiapan alat MFC															
Persiapan <i>pretreatment</i> (pH dan BES)															
Operasi MFC															
Analisis OCV															
Analisis I-V-P															
Analisis SEM															
Analisis FTIR															
Validasi model															
Laporan															
Seminar															

DAFTAR PUSTAKA

- Antonopoulou, G., Stamatelatou, K., Bebelis, S., Lyberatos, G. "Electricity Generation from Synthetic Substrates and Cheese Whey Using a Two-Chamber Microbial Fuel Cell". *Biochem. Eng. J.* **50**, (2010) 10–15.
- Baranitharan, E.; Khan, M.R.; Prasad, D.M.R.; Teo, W.F.A.; Tan, G.Y.A.; Jose, R., "Effect of biofilm formation on the performance of microbial fuel cell for the treatment of palm oil mill effluent". *Bioprocess Biosyst Eng* (2014).
- Basu, D.; Basu, S., "Mathematical modeling of overpotentials of direct glucose alkaline fuel cell and experimental validation", *J Solid State Electrochem* **17** (2013), 2927-2938.
- Bermek, H.; Catal, T.; Akan, S.S.; Ulutas, M.S.; Kumru, M.; Ozguven, M.; Liu, H.; Ozcelik, B.; Akarsubasi, A.T., "Olive mill wastewater treatment in single-chamber air-cathode microbial fuel cells", *World J Microbiol Biotechnol* **30** (2014), 1177-1185.
- Borole, A.P.; Reguera, G.; Ringeisin, B.; Wang, Z.; Feng, Y.; Kim, B.H., "Electroactive biofilms: Current status and future research needs", *Energy Environ. Sci.* **4** (2011), 4813
- Budihardjo, M.A., Syarifudin, Effendi, A.J., Hidayat, S., Purnawan, C., Lantasi, A.I.D., Muhammad, F.I. Ramadan, B.S., "Waste Valorization Using Solid-Phase Microbial Fuel Cells (SMFCs): Recent Trends and Status", *Journal of Environmental Management* **277** (2011), 1-10.
- Chae, K.; Choi, M.; Lee, J.; Kim, K.; Kim, I.S., "Effect of different substrates on the performance, bacterial diversity, and bacterial viability in microbial fuel cells", *Bioresource Technology* **100** (2009), 3518–3525.
- Chiu, H., Pai, T.Y., Liu, M.H., Chang, C.A., Lo, F.C., Chang, T.C., Lo, H.M., Chiang, C.F., Chao, K.P., Lo, W.Y., Lo, S.W., Chu, Y.L. "Electricity production from municipal solid waste using microbial fuel cells". *Waste Manag. Res.* **34** (2016), 619–629.
- Chou, T.Y.; Whiteley, C.G.; Lee, D.; Liao, Q., "Control of dual-chambered microbial fuel cell by anodic potential: Implications with sulfate reducing bacteria", *International Journal of Hydrogen Energy* **30** (2013), 1-10.
- Choudhury, P.; Uday, U.S.; Mahata, N.; Tiwari, O.N.; Ray, N.R.; Bandyopadhyay, T.K.; Bhunia, B. "Performance Improvement of Microbial Fuel Cells for Waste Water Treatment along with Value Addition: A Review on Past Achievement and Recent Prospectives". *Renew. And sus. Ener. Rev* **79** (2017), 372-389.
- Cohen, B., "The Bacterial Culture as an Electrical Half-Cell", *Journal of Bacteriology* **21** (1931), 18–19.
- Daud, W.R.W.; Mokhtarian, N.; Ghasemi, M.; Ismail, M.; Najafpour, G.; Alam, J., "Improvement of Microbial Fuel Cell Performance by Using Nafion Polyaniline Composite Membranes as a Separator", *Journal of Fuel Cell Science and Technology* **10** (2013), 041008-2.

- Esfandyari, M.; Fanaezy, M.A.; Gheshlaghi, R.; Mahdavi, M.A., “Mathematical modeling of two-chamber batch microbial fuel cell with pure culture of *Shewanella*”, *Chemical Engineering Research and Design* **117** (2017), 34–42.
- Fitzgerald, L.A.; Petersen, E.R.; Leary, D.H.; Nadeau, L.J.; Soto, C.M.; Ray, R.I.; Little, B.J.; Ringeisen, B.R.; Johnson, G.R.; Vora, G.J.; Biffinger, J.C., “*Shewanella frigidimarina* microbial fuel cells and the influence of divalent cations on current output”, *Biosensors and Bioelectronics* **40** (2013), 102–109.
- Flimban, S.G.A.; Ismail, I.M.I.; Kim, T.; Oh, S., “Overview of Recent Advancements in the Microbial Fuel Cell from Fundamentals to Applications: Design, Major Elements, and Scalability”, *Energies* **12** (2019), 3390.
- Florio, C.; Nastro, R.A.; Flagiello, F.; Minutillo, M.; Pirozzi, D.; Pasquale, V.; Ausiello, A.; Toscano, G.; Jannelli, E.; Dumontet, S. “Biohydrogen production from solid phase-microbial fuel cell spent substrate: a preliminary study”. *J. Clean. Prod.* **227**, (2019) 506–511.
- Guo, K.; Hassett, D.J.; Gu, T., “Microbial Fuel Cells: Electricity Generation from Organic Wastes by Microbes”, Chapter 9 dalam *Microbial Biotechnology: Energy and Environment*, CAB International, Oxon, 2012.
- Heidrich, E.S.; Edwards, S.R.; Dolfing, J.; Cotterill, S.E.; Curtis, T.P., “Performance of a pilot scale microbial electrolysis cell fed on domestic wastewater at ambient temperatures for a 12 month period”, *Bioresource Technology* **173** (2014), 87–95.
- Inoue, K.; Leang, C.; Franks, A.E.; Woodard, T.L.; Nevin, K.P.; Lovley, D.R. ‘Specific Localization of the C-Type Cytochrome OmcZ at the Anode Surface in Current Producing Biofilms of *Geobacter*. (2010).
- Jadhav, D.A.; Carmona-Martinez, A.A.; Chendake, A.D.; Pandit, S.; Pant, D., “Modeling and optimization strategies towards performance enhancement of microbial fuel cells”, *Bioresource Technology* **320** (2021), 124256.
- Jalilluddin, A.M.; Chia-Chay, T.; Talib, S.A.; “Performance of Two Chambered Microbial Fuel Cells (MFC) at Different pH Anode Microenvironment Using Palm Oil Mill Effluent (POME) as Substrate”. *Applied Mechanics and Materials* **773-774** (2015),
- Ji, E.; Moon, H.; Piao, J.; An, J.; Kim, D.; Woo, J.; Lee, Y.; Moon, S.; Rittman, B.E.; Chang, I.S., “Interface resistances of anion exchange membranes in microbial fuel cells with low ionic strength”, *Biosensors and Bioelectronics* **26** (2011), 3266–3271.
- Jia, J., Tang, Y., Liu, B., Wu, D., Ren, N., Xing, D. “Electricity generation from food wastes and microbial community structure in microbial fuel cells. *Bioresour. Technol.*” **144** (2013), 94–99.
- Jiang, X.; Hu, J.; Lieber; Jackan, C.S.; Biffinger, J.C.; Fitzgerald, L.A.; Ringeisen, B.R.; Lieber, C.M. “Nanoparticle Facilitated Extracellular Electron Transfer in Microbial Fuel Cells”. *Nano lett.* **14** (2014), 6737-6742.
- Karluvali, A., Koroğlu, E.O., Manav, N., Çetinkaya, A.Y., Ozkaya, B. “Electricity generation from organic fraction of municipal solid wastes in tubular microbial fuel cell”. *Separ. Purif. Technol.* **156** (2015), 502–511.
- Katuri, K.P.; Scott, K., “On the dynamic response of the anode in microbial fuel cells”, *Enzyme and Microbial Technology* **48** (2011), 351–358.
- Kautsar, R.B.; Sualing, J., “Pemodelan Proses Bioelektrokimia pada Microbial Fuel Cell (MFC) Dua Ruang Sistem Partaian”. *Skripsi Program Magister, Institut Teknologi*

- Bandung (2021).
- Kang C.S.; Eaktasang N.; Kwon D.Y.; Kim H.S. “Enhanced current production by *Desulfovibrio desulfuricans* biofilm in a mediator-less microbial fuel cell”. *Bioresour Technol* **165** (2014), 27–30.
- Kazemi, M.; Biria, D.; Rismani-Yazdi, H., “Modelling bio-electrosynthesis in a reverse microbial fuel cell to produce acetate from CO₂ and H₂O”. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **17** (2015), 12561–12574.
- Khudzari, J.M., Tartakovsky, B., Raghavan, G.S.V. “Effect of C/N ratio and salinity on power generation in compost microbial fuel cells”. *Waste Manag.* **48**, (2016) 135–142.
- Kumar, R.; Singh, L.; Wahid, Z.A.; “Role of Microorganism in Microbial Fuel Cells Bioelectricity Production”, *Microbial Factories*, (2015) 135-154.
- Leong, J.X.; Daud, W.R.W; Ghasemi, M.; Liew, K.B.; Ismail, M., “Ion exchange membranes as separators in microbial fuel cells for bioenergy conversion: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **28** (2013), 575–587.
- Liu, C.X.; Zhang, D.R.; He, Y.; Zhao, X.S.; Bai, R., “Modification of membrane surface for anti-biofouling performance: Effect of anti-adhesion and anti-bacteria approaches”, *Journal of Membrane Science* **346** (2010), 121–130.
- Lifang D.; Frang L.; Shungui Z.; Yin H.D.; Jinren N.I. “A study of electron-shuttle mechanism in *Klebsiella pneumoniae* based microbial fuel cells”. *Environ Sci Technol* **55** (2010), 99–104.
- Logan, B.E., “Extracting Hydrogen and Electricity from Renewable Sources”. *Environ. Sci. Technol.* **38** (2004), 160-167.
- Logan, B.E., “Microbial Fuel Cells”, John Wiley and Sons, New Jersey, 2008.
- Logan, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schroder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstaete, W.; Rabaey, K., “Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology”, *Environmental Science and Technology* **40** 17 (2006), 5181-5192.
- Mao, L.; Zhang, D.; Sotomura, T.; Nakatsu, K.; Koshiba, N.; Ohsaka, T., “Mechanistic study of the reduction of oxygen in air electrode with manganese oxides as electrocatalysts”, *Electrochimica Acta* **48** (2003), 1015-1021.
- Marcus, A.K.; Torres, C.I.; Rittman, B.E., “Conduction-Based Modeling of the Biofilm Anode of a Microbial Fuel Cell”, *Biotechnology and Bioengineering* **98** 6 (2007), 1171-1182.
- Min B; Cheng S; Logan B.E. “Electricity generation using membrane and salt bridge microbial fuel cells”. *Water Res* **39** (2005):1675–1686.
- Merkey, B.V.; Chopp, D.L., “The Performance of a Microbial Fuel Cell Depends Strongly on Anode Geometry: A Multidimensional Modeling Study”, *Bull Math Biol* **74** (2012), 834–857.
- Moqsud, M.A., Omine, K., Yasufuku, N., Bushra, Q.S., Hyodo, M., Nakata, Y. “Bioelectricity from kitchen and bamboo waste in a microbial fuel cell”. *Waste Manag. Res.* **32** (2014), 124–130.
- Moqsud, M.A., Omine, K., Yasufuku, N., Hyodo, M., Nakata, Y. “Microbial fuel cell (MFC) for bioelectricity generation from organic wastes”. *Waste Manag.* **33** (2013), 2465–2469.
- Moqsud, M.A., Yoshitake, J., Bushra, Q.S., Hyodo, M., Omine, K., Strik, D. “Compost in plant microbial fuel cell for bioelectricity generation”. *Waste Manag.* **36** (2015),

63–69.

- Obileke, K.; Onyeaka, H.; Meyer, E.L.; Nwokolo, N., “Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review”, *Electrochemistry Communications* (2021).
- Oh, S.; Kim, J.; Premier, G.; Lee, T.; Changwon, K.; Sloan, W. “Sustainable Wastewater Treatment: How Might Microbial Fuel Cells Contribute. *Biotech. Adv.* **28** (2010), 871-881.
- Oh, S.E.; Kim, J.R.; Joo, J.H.; Logan, B.E., “Effects of applied voltages and dissolved oxygen on sustained power generation by microbial fuel cells”, *Water Science & Technology* (2009), 1311-1317.
- Oliveira, V.B.; Boas, J.V.; Pinto, A.M.F.R., “Kinetics and Mass Transfer Within Microbial Fuel Cells”, *Progress and Recent Trends in Microbial Fuel Cells* (2018), 313-326.
- Pant, D.; Bogaert, G.V.; Diels, L.; Vanbroekhoven, K., “A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production”, *Bioresource Technology* **101** (2010), 1533–1543.
- Prathap P; Cesar I.T.; Tyson B.; Sudeep C.P.; Bradley G.L.; Bruce E.R. “Kinetic, electrochemical, and microscopic characterization of the thermophilic, anoderespiring bacterium *Thermincola ferriacetica*”. *Environ Sci Technol* **47** (2013), 4934–4940.
- Rabaey K; Boon N; Siciliano S.D.; Verhaege M.; Verstraete, W. “Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer”. *Appl Environ Microbiol* **70** (2004), 5373–5382.
- Rackley, S.A., “Carbon capture and storage”, Elsevier, Massachusettes, 2010.
- Ringeisen B.R.; Henderson E.; Wu P.K.; Pietron J.; Ray R.; Little B.; Jones-Meehan J.M. “High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella oneidensis* DSP10”. *Environ Sci Technol* **40** (2006):2629–2634.
- Sedaqatvand, R.; Esfahany, M.N.; Behzad, T.; Mardanpour, M., “Comparison of conduction based and mediator based models for microbial fuel cells”. *J. Petroleum Sci. Technol.* **1** (2011), 24–29.
- Shanmuganathan, P.; Rajasulochana, P., “Factors Affecting The Performance of Microbial Fuel Cells”, *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)* **9** (2018), 137–148.
- Shuler, M.L.; Kargi, F., “Bioprocess Engineering Basic Concepts”, 2nd Ed., Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2002.
- Stewart, P.S., “Diffusion in biofilms”. *J. Bacteriol.* **185** (2003), 1485–1491.
- Suryaga K.Z., “Pengaruh Jenis Limbah dan Jarak Elektroda pada Kinerja *Microbial Fuel Cell*” Tesis Program Magister, Institut Teknologi Bandung (2017).
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Volume II: Demographic Profiles (ST/ESA/SER.A/400)*.
- Wang, C.; Shin, D.W.; Lee, S.Y.; Kang, N.R.; Robertson, G.P.; Lee, Y.M.; Guiver, M.D., “A clustered sulfonated poly(ether sulfone) based on a new fluorene-based bisphenol monomer”. *Journal of Materials Chemistry*, **22** (48) (2012), 25093.
- Wang, C.-T., Liao, F.-Y., Liu, K.-S. “Electrical analysis of compost solid phasemicrobial fuel cell. *Int. J. Hydrogen Energy*”. **38** (2013a), 11124–11130.

- Wang, Z., Ma, J., Xu, Y., Yu, H., Wu, Z. “Power production from different types of sewage sludge using microbial fuel cells: a comparative study with energetic and microbiological perspectives”. *J. Power Sources* **235** (2013b), 280–288.
- Wang, C.-T., Lee, Y.-C., Liao, F.-Y.J.S. “Effect of composting parameters on the power performance of solid microbial fuel cells. *Sustainability*”, **7** (2015), 12634–12643.
- Wong, Y.; Teng, T.T.; Ong, S.; Morad, N.; Rafatullah M., “Suspended growth kinetic analysis on biogas generation from newly isolated anaerobic bacterial communities for palm oil mill effluent at mesophilic temperature”. *RSC Adv.* **4** (2014), 64659.
- Xin, X., Ma, Y., Liu, Y. “Electric energy production from food waste: microbial fuel cells versus anaerobic digestion”, *Bioresour. Technol.* **255** (2018), 281–287.
- Xing D, Zuo Y, Cheng S, Regan J.M., Logan B.E. “Electricity generation by *Rhodopseudomonas palustris* DX-1”. *Environ Sci Technol* **42** (2008), 4146–4151.
- Yu, H., Jiang, J., Zhao, Q., Wang, K., Zhang, Y., Zheng, Z., Hao, X. “Bioelectrochemically-assisted anaerobic composting process enhancing compost maturity of dewatered sludge with synchronous electricity generation”, *Bioresour. Technol.* **193** (2015), 1–7.
- Zhang, J.; Zhang, L.; Wang, W.; Han, L.; Jia, J.-C.; Tian, Z.-W.; Zhan, D., “Contact electrification induced interfacial reactions and direct electrochemical nanoimprint lithography in n-type gallium arsenate wafer. *Chemical Science*, **8** (3) (2016), 2407–2412.
- Zeng, Y.; Choo, Y.F.; Kim, B.; Wu, P., “Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell”, *Journal of Power Sources* **195** (2010), 79–89.
- <http://lipi.go.id/publikasi/sumber-daya-biomassa-potensi-energi-indonesia-yang-terbaik/16374#:~:text=Potensi%20sumber%20daya%20biomassa%20di,gergajian%20dan%20limbah%20produksi%20kayu>.

DAFTAR SIMBOL

Pemodelan Saat Kondisi Dinamik

A_m	: Luas membran [m^2]
b	: Koefisien Tafel [V]
b_{ina}	: Koefisien inaktivasi [s^{-1}]
b_{det}	: Koefisien pelepasan [s^{-1}]
$C_{O_2}^*$: Konsentrasi saturasi oksigen [kgm^{-3}]
C_{S_1}	: Konsentrasi substrat asetat pada anoda [kgm^{-3}]
C_{S_2}	: Konsentrasi substrat propionat pada anoda [kgm^{-3}]
C_{Sb_1}	: Konsentrasi substrat asetat pada <i>bulk liquid</i> [kgm^{-3}]
C_{Sb_2}	: Konsentrasi substrat propionat pada <i>bulk liquid</i> [kgm^{-3}]
d_{cell}	: Jarak elektroda [m]
d_m	: Ketebalan membran [m]
D_{CO_2}	: Diffusivitas karbon dioksida [m^2s^{-1}]
D_H	: Diffusivitas hidrogen [m^2s^{-1}]
D_{S_1}	: Diffusivitas substrat asetat [m^2s^{-1}]
D_{S_2}	: Diffusivitas substrat propionat [m^2s^{-1}]
D_r	: Diffusivitas senyawa di katoda [m^2s^{-1}]
$E_{0,anode}$: Potensial standar anoda [V]
$E_{0,cathode}$: Potensial standar katoda [V]
F	: Konstanta Faraday [$Cmol^{-1}$]
Gr_k	: Nilai konstanta Grashof untuk substrat propionat pada anoda
h_{mass}^r	: Koefisien perpindahan massa untuk senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [m/jam]
i	: Arus [A]
i_l	: Arus terbatas untuk substrat asetat [A]
i_l	: Arus terbatas untuk substrat propionat [A]
$i_{0,ref}$: Arus penukar di keadaan referensi [A]
k_{aq}	: Konduktivitas larutan [Sm^{-1}]

$k_L a$: Koefisien perpindahan massa oksigen volumetrik keseluruhan [s^{-1}]
k_m	: Konduktivitas membran [Sm^{-1}]
K_S	: Konsentrasi laktat pada setengah laju maksimal [kgm^{-3}]
L	: Ketebalan biofilm [m]
L_l	: Ketebalan sublapisan difusi laminar [m]
r_{max}	: Konstanta laju reaksi [s^{-1}]
r_{s_1}	: Laju konsumsi substrat asetat [Ms^{-1}]
r_{s_2}	: Laju konsumsi substrat propionat [Ms^{-1}]
R	: Konstanta gas ideal [$Jmol^{-1}K^{-1}$]
Ra_k	: Nilai bilangan Rayleigh pada katoda
Sc_k	: Nilai bilangan Rayleigh pada katoda
T	: Temperatur [K^{-1}]
ν_r	: Viskositas kinematik untuk senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [m^2/jam]
V_a	: Volume ruang anoda [m^3]
V_c	: Volume ruang katoda [m^3]
Y_{ac}	: Perolehan biomassa [kg sel kering kg^{-1}]
ϕ_a	: Fraksi volumetrik biomassa aktif
ϕ_i	: Fraksi volumetrik biomassa tidak aktif
η_{act_1}	: Overpotensial aktivasi substrat asetat [V]
η_{act_2}	: Overpotensial aktivasi substrat propionat [V]
η_{con_1}	: Overpotensial konsentrasi substrat asetat [V]
η_{con_2}	: Overpotensial konsentrasi substrat propionat [V]
η_{ohm}	: Overpotensial ohmik [V]

Pemodelan Saat Kondisi Tunak

E_{sel}	: Nilai potensial saat kesetimbangan termodinamika sel [V]
E_{katoda}	: Nilai potensial saat kesetimbangan termodinamika katoda [V]
E_{anoda}	: Nilai potensial saat kesetimbangan termodinamika anoda [V]
E_k^0	: Nilai potensial standar reaksi di katoda [V]
E_a^0	: Nilai potensial standar reaksi di anoda [V]
n_k	: Jumlah elektron yang terlibat pada reaksi di katoda
$n_{a,1}$: Jumlah elektron yang terlibat pada reaksi oksidasi substrat asetat di anoda
$n_{a,2}$: Jumlah elektron yang terlibat pada reaksi oksidasi substrat propionat di anoda
R	: Konstanta gas [J/mol.K]
G	: Percepatan gravitasi [m/jam ²]
T	: Nilai temperatur [K]
F	: Konstanta faraday [C/mol]
I	: Nilai densitas arus [A/m ²]
I_{ref}	: Nilai densitas arus referensi untuk reaksi di katoda [A/m ²]
$r_{a,1}$: Nilai laju reaksi oksidasi substrat asetat di anoda per luas area [mol/m ² .jam]
$r_{a,2}$: Nilai laju reaksi oksidasi substrat propionat di anoda per luas area [mol/m ² .jam]
r_c	: Nilai laju reaksi di katoda per luas area [mol/m ² .jam]
$Ra_{a,1}$: Nilai konstanta rayleigh untuk substrat asetat pada anoda
$Ra_{a,2}$: Nilai konstanta rayleigh untuk substrat propionat pada anoda
Ra_k	: Nilai konstanta rayleigh pada katoda
$Gr_{a,1}$: Nilai konstanta grashof untuk substrat asetat pada anoda
$Gr_{a,2}$: Nilai konstanta grashof untuk substrat propionat pada anoda
Gr_k	: Nilai konstanta grashof pada katoda
$Sc_{a,1}$: Nilai konstanta schmidt untuk substrat asetat pada anoda

$Sc_{a,2}$: Nilai konstanta schmidt untuk substrat propionat pada anoda
Sc_k	: Nilai konstanta schmidt pada katoda
L	: Panjang elektroda [m]
$C_{s,1}$: Konsentrasi substrat asetat pada <i>bulk</i> anoda [mol/m ³]
$C_{s,2}$: Konsentrasi substrat propionat pada <i>bulk</i> anoda [mol/m ³]
$C_{s,1}^0$: Konsentrasi awal substrat asetat pada anoda [mol/m ³]
$C_{s,2}^0$: Konsentrasi awal substrat propionat pada anoda [mol/m ³]
$C_{s,1}^b$: Konsentrasi substrat asetat pada biofilm [mol/m ³]
$C_{s,2}^b$: Konsentrasi substrat propionat pada biofilm [mol/m ³]
C_r	: Konsentrasi senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [mol/m ³]
C_r^0	: Konsentrasi awal senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [mol/m ³]
$C_{r,ref}$: Konsentrasi referensi senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [mol/m ³]
C_x	: Konsentrasi biomassa [mol/m ³]
$\nu_{s,1}$: Viskositas kinematik untuk substrat asetat pada anoda [m ² /jam]
$\nu_{s,2}$: Viskositas kinematik untuk substrat propionat pada anoda [m ² /jam]
ν_r	: Viskositas kinematik untuk senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [m ² /jam]
$D_{s,1}$: Koefisien difusivitas untuk substrat asetat pada anoda [m ² /jam]
$D_{s,2}$: Koefisien difusivitas untuk substrat propionat pada anoda [m ² /jam]
D_r	: Koefisien difusivitas untuk senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [m ² /jam]
$h_{mass,1}^s$: Koefisien perpindahan massa untuk substrat asetat pada anoda [m/jam]
$h_{mass,2}^s$: Koefisien perpindahan massa untuk substrat propionat pada anoda [m/jam]
h_{mass}^r	: Koefisien perpindahan massa untuk senyawa yang mengalami reduksi pada katoda [m/jam]
V_a	: Volume ruang anoda [m ³]

V_k	: Volume ruang katoda [m^3]
A_m	: Luas area aktif membran [m^2]
K_s	: Koefisien laju paruh substrat untuk pertumbuhan biomassa [mol/m^3]
μ_{maks}	: Koefisien pertumbuhan maksimum biomassa [$1/\text{jam}$]
$Y_{x/s}$: Perolehan biomassa terhadap substrat
K_{dec}	: Koefisien laju peluruhan biomassa [$1/\text{jam}$]
$\alpha_{a,1}$: Koefisien perpindahan elektron pada reaksi oksidasi substrat asetat di anoda
$\alpha_{a,2}$: Koefisien perpindahan elektron pada reaksi oksidasi substrat propionat di anoda
α_k	: Koefisien perpindahan elektron pada reaksi di katoda
$\eta_{a,1}$: Nilai overpotensial anoda untuk substrat asetat [V]
$\eta_{a,2}$: Nilai overpotensial anoda untuk substrat propionat [V]
η_k	: Nilai overpotensial katoda [V]
η_o	: Nilai kerugian ohmik [V]
δ_m	: Ketebalan membran [m]
κ	: Konduktivitas membran [S/m]
b_{det}	: Koefisien penempelan [$1/\text{jam}$]
ρ	: Densitas biomassa [kg/m^3]
L_I	: Ketebalan sublapisan difusi laminar [m]
L_t	: Ketebalan biofilm [m]

LAMPIRAN A

NILAI PARAMETER PEMODELAN SIMULASI DINAMIK

Parameter	Nilai	Referensi
A_m	$6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	Dari percobaan
b	120 mV	Logan, dkk. (2006)
b_{det}	0,05 hari ⁻¹	Sedaqatvand, dkk. (2011)
b_{ina}	0,02 hari ⁻¹	Sedaqatvand, dkk. (2011)
$C_{O_2}^*$	$7,26 \times 10^{-3}$	Konstanta
d_{cell}	$5,8 \times 10^{-5} \text{ m}$	Dari percobaan
d_m	$5,8 \times 10^{-5} \text{ m}$	Dari percobaan
D_H	$3,89 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{hari}$	Stewart (2003)
D_{CO_2}	$1,66 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{hari}$	Stewart (2003)
D_{S_1}	$1,05 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{hari}$	Stewart (2003)
D_{S_2}	$9,16 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{hari}$	Stewart (2003)
$E_{0,anode}$	-130 mV	Logan (2008)
$E_{0,cathode}$	1700 mV	Logan (2008)
E_{KA}	-155 mV	Esfandyari dkk. (2017)
F	96500 C/mol	Konstanta
$i_{0,ref}$	0,001 mA	Logan (2008)
k_{aq}	158,7 mS/m	Dari percobaan
$k_L a$	414/hari	Estimasi
k_m	9100 mS/m	Wang, dkk. (2012)
K_S	25,03 g/L	Wong, dkk. (2014)
L_l	$2 \times 10^{-4} \text{ m}$	Merkey dan Chopp (2012)
r_{max}	0,957 hari ⁻¹	Wong, dkk. (2014)
R	8,314 J/K.mol	Konstanta
T	298 K	Dari percobaan
V_a	$2,4 \times 10^{-4}$	Dari percobaan
V_c	$2,4 \times 10^{-4}$	Dari percobaan

Y_{ac}	0,357	Wong, dkk. (2014)
ρ	50 kg/m ³	Merkey dan Chopp (2012)

NILAI PARAMETER SIMULASI PEMODELAN TUNAK

Parameter	Nilai	Referensi
R	8,314 J/K.mol	Konstanta
G	$1,27 \times 10^8$ J/K.mol	Konstanta
T	298 K	Dari percobaan
F	96500 C/mol	Konstanta
I_{ref}	$1,14 \times 10^{-14}$ A/m ²	Zhang, dkk. (2016)
L	3 cm	Dari percobaan
$C_{s,1}^0$	2005 mg/L	Wong, dkk. (2014)
$C_{s,2}^0$	54,6 mg/L	Wong, dkk. (2014)
C_r^0	20 mol/m ³	Suryaga (2017)
$C_{r,ref}$	40 mol/m ³	Zhang, dkk. (2016)
$v_{s,1}$	$9,95 \times 10^{-3}$ m ² /jam	Kautsar dan Sualing (2021)
$v_{s,2}$	$4,07 \times 10^{-3}$ m ² /jam	engineeringtoolbox.com
v_r	$3,37 \times 10^{-3}$ m ² /jam	Kautsar dan Sualing (2021)
$D_{s,1}$	$1,05 \times 10^{-4}$ m ² /hari	Perhitungan dari Stewart (2003)
$D_{s,2}$	$10,6 \times 10^{-4}$ cm ² /s	Perhitungan dari Stewart (2003)
D_r	$8,69 \times 10^{-6}$ m ² /jam	Kautsar dan Sualing (2021)
V_a	2,4 m ³	Dari percobaan
V_k	2,4 m ³	Dari percobaan
A_m	6×10^{-4} m ²	Dari percobaan
K_s	25,03 g/L	Wong, dkk. (2014)
μ_{maks}	0,01125 jam ⁻¹	Wong, dkk. (2014)
$Y_{x/s}$	0,357	Wong, dkk. (2014)
K_{dec}	$2,92 \times 10^{-3}$ jam ⁻¹	Wong, dkk. (2014)
$\alpha_{a,1}$	0,28	Asumsi pada model
$\alpha_{a,2}$	0,28	Asumsi pada model
α_k	0,44	Asumsi pada model
δ_m	$5,08 \times 10^{-5}$ m	www.fuelcellstore.com

κ	9,1 S/m	Wang, dkk. (2012)
b_{det}	0,05 /hari	Sedaqatvand, dkk. (2011)
ρ	50 kg/m ³	Merkey dan Chopp (2012)
L_I	2 x 10 ⁻⁴ m	Merkey dan Chopp (2012)
L_t	0,2 cm	Dari percobaan