

Analisis Variasi Natrium Klorida (NaCl) Dan Tegangan Pada Membran Berongga Berbahan Semen Menggunakan *Microbial Electrolysis Cell* (MEC)

1st Fiolyta Hafidah
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

fiolytahafidah@student.telkomuniversit
y.ac.id

2nd Muhamad Ramdhan
Kirom

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom

Bandung, Indonesia
mramdankirom@telkomuniversity.c
o.id

3rd Amaliyah Rohsari
Indah Utami

Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom

Bandung, Indonesia
amaliyahriu@telkomunivers
ity.ac.id

Abstrak—Gas hidrogen merupakan energi ramah lingkungan untuk kendaraan. Teknologi yang relatif baru, bernama *Microbial Electrolysis Cell* (MEC) meningkatkan produksi gas hidrogen (H_2) yang berkelanjutan dan bersih dari biomassa dan air limbah. Desain reaktor MEC merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi produksi hidrogen. Pada penelitian ini dibuat MEC dengan membran berongga yang berbahan semen dan melakukan optimalisasi Natrium Klorida (NaCl) untuk menghasilkan gas hidrogen yang maksimal. Variasi konsentrasi NaCl pada campuran semen adalah 0 mol/L, 4,88 mol/L, 9,76 mol/L, 14,65 mol/L, 19,53 mol/L dan 24,42 mol/L. Penambahan NaCl pada membran berfungsi untuk meningkatkan produksi hidrogen. Reaktor MEC menggunakan dual chamber, yaitu chamber anoda dan chamber katoda. Pada chamber anoda diisi substrat kulit nanas. Anoda dan katoda dihubungkan dengan power supply DC yang menjadi sumber. Penelitian dilakukan selama 20 jam dengan pengukuran setiap 2 jam sekali pada variasi tegangan 1,2 volt, 1,5 volt, 1,8 volt, 2,1 volt, 2,4 volt, 2,7 volt dan 3 volt. Hasil produksi hidrogen pada sistem MEC diukur oleh alat ukur gas hidrogen yang diletakkan pada katoda. Hasil dari pengujian sistem MEC mendapat hasil maksimal 10.000 PPM dengan konsentrasi NaCl 14,65 mol/L pada jam ke-2 dan jam ke-4 di tegangan 2,7 volt.

Kata kunci— gas hidrogen, membran berongga, *microbial electrolysis cell* (MEC), NaCl.

I. PENDAHULUAN

Energi merupakan hal yang sangat berpengaruh terhadap peradaban manusia. Populasi dunia pada tahun 2050 diperkirakan mencapai 9,7 miliar sementara konsumsi energi di dunia pada tahun 2040 akan melebihi 736 kuadriliun *British Thermal Units* (BTUs) [1]. Sejauh ini penggunaan energi masih mendominasi pada energi fosil sedangkan pemanfaatan energi non fosil masih rendah. Pemakaian bahan bakar fosil mengakibatkan emisi gas rumah kaca yang semakin meningkat dan terjadinya perubahan iklim yang drastis [2]. Karena memiliki dampak yang serius pada lingkungan maka diperlukan alternatif pengganti untuk bahan bakar fosil ini.

Salah satu teknologi mutakhir untuk memperoleh energi dari limbah yaitu *Microbial Electrolysis Cells* (MEC) dimana mikroorganisme digunakan untuk mengkatalisis

oksidasi-reduksi elektrokimia yang menghasilkan hidrogen (H_2) [3]. Teknik MEC masih dalam perkembangan, walaupun demikian MEC memiliki potensi yang luar biasa dalam memproduksi hidrogen. Gas hidrogen merupakan bahan bakar bersih karena saat digunakan hanya menghasilkan air.

Teknologi MEC sebagai platform untuk menyediakan energi terbarukan untuk menghasilkan bahan bakar. Teknologi ini memanfaatkan energi dalam air limbah organik sebagai fitur utamanya. Selain itu, pemanfaatan bakteri dan menghasilkan energi bersih merupakan poin lain dalam topik ini. Dalam MEC, bahan organik diubah menjadi elektron, CO_2 dan hidrogen pada anoda. Elektron akan bergerak dari anoda ke katoda dan kemudian diubah menjadi gas hidrogen.

Pada penelitian Nadia agrippina Sirait sebelumnya, menggunakan variasi substrat kulit nanas yaitu difermentasi dan tidak difermentasi. Hasil dari penelitian tersebut kulit, nanas yang difermentasi memproduksi gas hidrogen yang lebih banyak [4]. Tegangan yang menghasilkan produksi hidrogen terbesar pada tegangan 1,2 V [4]. Pada sebagian besar penelitian tentang MEC menggunakan senyawa murni terutama asetat sebagai substrat [5]. Produksi tanaman nanas menurut data Badan Pusat Statistik Indonesia pada tahun 2020 sebesar 2,44 juta ton [6]. Hasil produksi nanas melimpah dan rata diseluruh daerah Indonesia, nanas dikonsumsi sebagai buah segar ataupun bahan baku minuman dan makanan [7]. Dimana hasil limbah nanas yaitu kulitnya masih belum optimal pemanfaatannya. Biasanya limbah nanas digunakan sebagai pakan ternak, kulit nanas tidak cocok diberikan pada ternak karena mengandung serat yang tinggi. Buah nanas mengandung asam organik dan gula yang dapat dimanfaatkan menjadi substrat dalam produksi etanol dan hidrogen.

Pada penelitian ini teknik MEC menggunakan *dual chamber reactor* yang akan dibuat, ruang anoda dan katoda dipisah dengan membran. Sebagian besar MEC telah menggunakan membran, membran berfungsi untuk menjaga hidrogen yang dihasilkan oleh katoda terpisah dari anoda untuk mencegah hilangnya hidrogen karena metanogen [5]. Membran yang biasa digunakan dalam MEC yaitu *Proton*

Exchange Membrane (PEM). Material PEM yang banyak tersedia adalah nafion. Kelebihan nafion adalah konduktivitas proton yang tinggi. Namun, kekurangan nafion adalah biayanya yang relatif mahal. Anil N. Ghadge dan teman-temannya menemukan bahan alternatif yang menjanjikan dalam *Microbial Fuel Cell* (MFC) adalah membran keramik [8]. Membran keramik memiliki struktur yang lebih baik dan biaya produksi yang lebih rendah dari PEM. Kekurangan pada membran keramik adalah memerlukan temperatur yang tinggi dalam proses pembuatan.

Pada penelitian Abi Taslim tentang rancang bangun *Microbial Fuel Cell* dengan jembatan garam berbahan semen, yang mana semen yang digunakannya adalah Natrium Klorida (NaCl) [9]. NaCl yang digunakan pada jembatan garamnya dapat mempengaruhi daya *output* reaktor tubular MFC. Dan pada jembatan garam yang menggunakan semen juga berhasil dapat digunakan pada sistem *Microbial Fuel Cell* karena dapat melakukan pertukaran proton dengan kandungan NaCl. Dari tinjauan penelitian sebelumnya, penulis melakukan penelitian menggunakan membran berongga yang berbahan semen dan mencampurkan NaCl dengan semen pada sistem *Microbial Electrolysis Cell* (MEC). Studi literatur yang penulis lakukan belum mendapati penelitian tentang membran berongga yang terbuat dari semen untuk memproduksi gas hidrogen (H_2). Tujuan dari penelitian ini untuk mengetahui pengaruh konsentrasi Natrium Klorida (NaCl) pada membran. Pada penelitian dilakukan variasi konsentrasi NaCl yang dicampurkan dalam semen pada membran berongga, untuk mendapatkan hasil hidrogen yang maksimal.

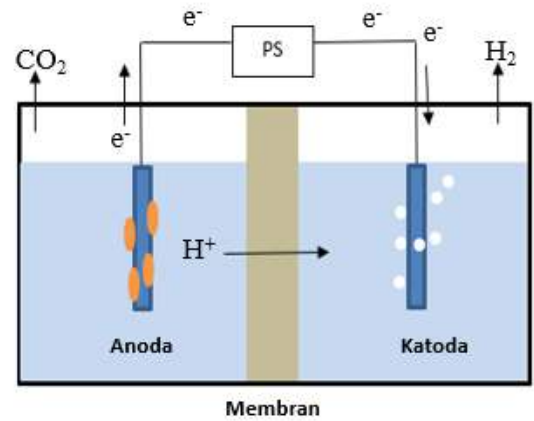
II. KAJIAN TEORI

A. MEC

Microbial Electrolysis Cells (MEC) adalah proses biologis yang merupakan teknologi canggih dimana mikroorganisme berfungsi untuk mengkatalis elektrokimia reaksi oksidasi-reduksi yang digunakan untuk energi pemulihan limbah organik dan residu biomassa [10]. *Microbial Electrolysis Cell* (MEC) merupakan proses yang menghasilkan hidrogen dengan menggunakan bahan organik. MEC ditemukan pada tahun 2005 oleh dua kelompok penelitian, pertama di Penn State University dan yang kedua di Wageningen University [11].

B. Prinsip Kerja MEC

Template Pada MEC mengubah bahan organik yang terdapat mikroorganisme elektrogen menjadi proton, elektron dan CO_2 secara elektrokimia, kemudian elektron akan berpindah dari anoda ke katoda. Desain MEC menggunakan arus untuk mengurangkan proton. Membran yang digunakan pada elektrolisis air berguna untuk mencegah penggabungan dan reaksi terhadap oksigen dan gas hidrogen. Prinsip kerja MEC dapat dilihat pada Gambar 1.

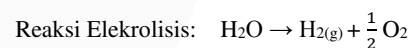


GAMBAR 1 Prinsip Kerja MEC

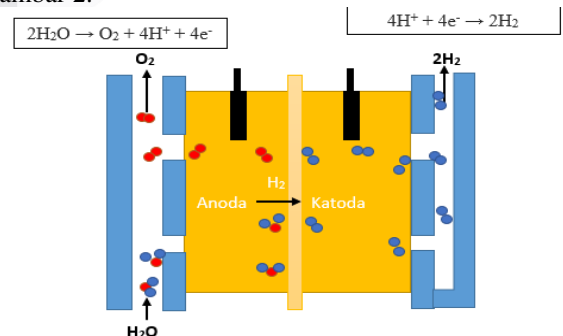
C. Produksi Hidrogen

Hidrogen dapat diproduksi melalui berbagai sumber daya yang beragam termasuk bahan bakar fosil seperti gas alam dan batu bara dan menggunakan energi nuklir dan energi terbarukan seperti angin, matahari, panas bumi dan tenaga air. Dan dari biomassa melalui proses biologis [12]. Hidrogen dapat diproduksi menggunakan menggunakan beberapa proses yang berbeda adalah proses termokimia, proses elektrolisis, proses pemisahan air tenaga surya langsung dan proses biologis.

Proses elektrolisis, teknologi ini sedang dikembangkan dan merupakan pilihan yang menjanjikan untuk produksi hidrogen. Elektrolisis adalah proses yang menggunakan listrik untuk memisahkan air menjadi gas hidrogen dan oksigen [13]. Elektrolisis air terdiri dari arus searah melalui air untuk memisahkan molekul menjadi hidrogen dan gas. Arus akan mengalir antara dua elektroda yang direndam dan dipisahkan dalam elektrolit untuk menaikkan konduktivitas ionik [14]. Proses elektrolisis membutuhkan penerapan pemisah untuk menghindari rekombinasi hidrogen dan oksigen yang dihasilkan pada elektroda. Secara umum, reaksi elektrolisis yang terjadi adalah



Dalam proses elektrolisis, elektron dilepas atau diambil oleh ion-ion permukaan elektroda, menghasilkan multifase padat-cair-gas. Proses elektrolisis dapat dilihat pada Gambar 2.

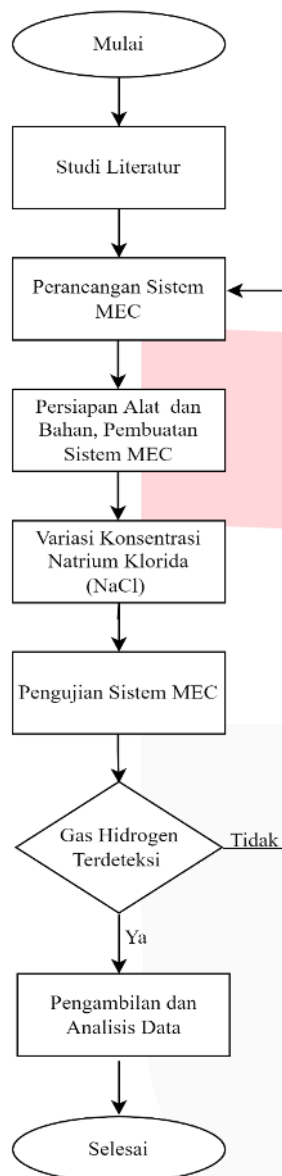


GAMBAR 2 Proses Elektrolisis

III. METODE

A. Tahapan Penelitian

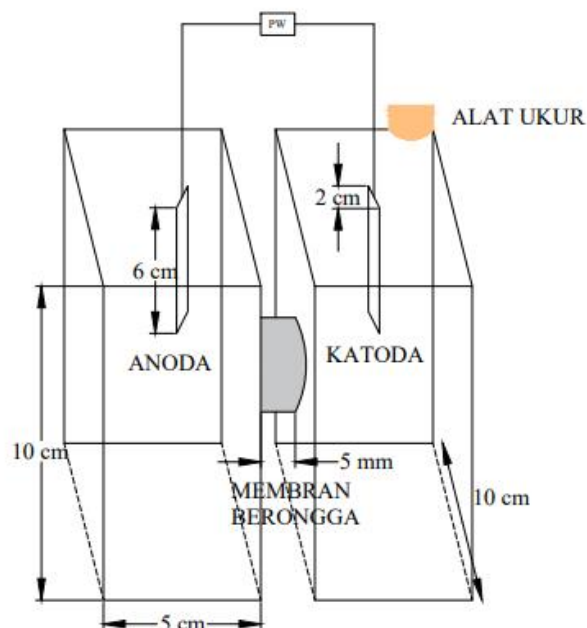
Dibawah ini merupakan diagram alur dari penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 3.



GAMBAR 3 Diagram Alur Penelitian

B. Persiapan Penelitian: Perancangan dan Pembuatan Sistem

Sistem reaktor MEC akan didesain dengan *dual chamber*. Pada sistem reaktor MEC akan dibuat menjadi dua bagian yaitu anoda dan katoda. Akrilik merupakan bahan yang akan digunakan sebagai bahan membuat reaktor MEC dengan ukuran lebar 5 cm, panjang 10 cm dan tinggi 10 cm. *Dual chamber* dihubungkan dengan membran berongga. Pada tutup reaktor katoda akan diberi lubang kecil yang bertujuan untuk tempat keluarnya produksi gas hidrogen (H_2) dan dipasang alat ukur gas hidrogen yang diproduksi. Pada reaktor anoda diisi substrat dan reaktor katoda diisi aquades. Seng akan digunakan sebagai anoda dan tembaga digunakan sebagai katoda, lalu anoda dan katoda dihubungkan dengan *power supply*. Desain reaktor MEC dapat dilihat pada Gambar 4.



GAMBAR 4 Desain Reaktor MEC

Pada pembuatan substrat akan digunakan kulit nenas dan air. Dengan komposisi substrat kulit nenas 50 gram dengan air 100 ml dan kulit nenas 58 gram dengan air 125 ml. Kemudian substrat akan dicampurkan dengan lumpur yang berfungsi untuk mikrobalekroden dengan komposisi lumpur 100 gram dan air 50 ml hasil dari pengukuran hidrogen belum mencapai perhitungan teoritis. Kulit nenas akan difermentasi sebelumnya kulit nenas dihancurkan menggunakan blender sampai tekstur kulit nenas seperti bubur. Setelah itu dilakukan proses fermentasi, substrat akan dicampurkan dengan air dan lumpur.

Membran berongga akan menghubungkan anoda dan katoda. Membran berongga dibuat dari semen dan Natrium Klorida (NaCl). Dengan komposisi semen, air dan variasi Natrium Klorida (NaCl) pada campuran semen yang dapat dilihat pada Tabel 1 Membran berongga akan dibentuk seperti koin.

TABEL 1 Komposisi Semen, Air dan Natrium Klorida (NaCl)

No	Semen	Air	Massa Natrium Klorida (NaCl)	Konsentrasi Natrium Klorida (NaCl)
1	7 gram	3,5 ml	0 gram	0 mol/L
2	7 gram	3,5 ml	1 gram	4,88 mol/L
3	7 gram	3,5 ml	2 gram	9,76 mol/L
4	7 gram	3,5 ml	3 gram	14,65 mol/L
5	7 gram	3,5 ml	4 gram	19,53 mol/L
6	7 gram	3,5 ml	5 gram	24,42 mol/L

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Proses dan Pengujian Sistem MEC

Sistem *Microbial Electrolysis Cells* (MEC) pada penelitian ini merupakan teknologi yang menghasilkan hidrogen dari limbah organik. Sistem ini didesain menggunakan *dual chamber* yang terdiri dari anoda dan katoda yang

dihubungkan dengan membran berongga. Membran berongga dibuat dari semen, air dan NaCl, pada penelitian ini menggunakan enam variasi jumlah NaCl yaitu 0 gram, 1 gram, 2 gram, 3 gram, 4 gram dan 5 gram atau dengan konsentrasi NaCl 0 mol/L, 4,88 mol/L, 9,76 mol/L, 14,65 mol/L, 19,53 mol/L dan 24,42 mol/L. Pada anoda diisi limbah kulit nanas yang dicampur dengan lumpur dan air. Pada katoda diisi oleh aquades yang menjadi tempat memproduksi gas hidrogen. Elektroda yang digunakan pada sistem MEC adalah seng pada anoda dan tembaga pada katoda yang dihubungkan pada catudaya.

Tegangan yang digunakan 1,2 volt, 1,5 volt, 1,8 volt, 2,1 volt, 2,4 volt, 2,7 volt dan 3 volt. Sistem *Microbial Electrolysis Cell* pada penelitian ini terdapat pada Gambar .



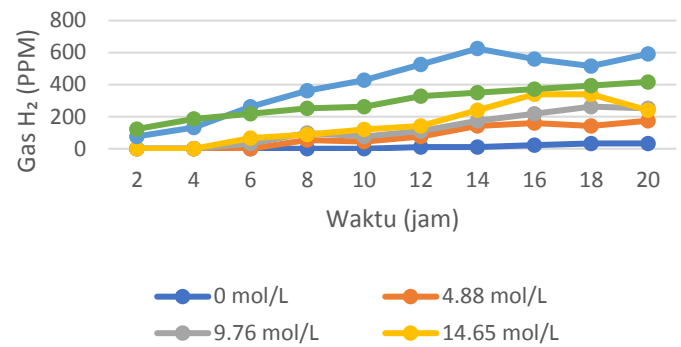
GAMBAR 5 Sistem Microbial Electrolysis Cells (MEC)

Susbrat kulit nanas difermentasikan selama dua hari. Pada proses pengujian, di *chamber* anoda bahan organik akan diuraikan oleh mikroorganisme elektrogen menjadi CO_2 , elektron dan proton. Elektron pada anoda akan ditransfer melalui catudaya. Lalu proton pada anoda didifusikan melalui membran berongga. Elektron yang ditransfer ke katoda akan mengikat proton yang ada di *chamber* katoda. Proses tersebut menghasilkan gas hidrogen, sehingga pada katoda terdapat gelembung-gelembung hidrogen. Gelembung-gelembung hidrogen tersebut bergerak ke arah atas lalu diukur dengan alat ukur hidrogen. Alat ukur menggunakan *detector* gas hidrogen yang akan diletakkan diatas *chamber* katoda. Pengukuran hasil produksi gas hidrogen dilakukan selama 20 jam dengan pengukuran setiap 2 jam sekali.

B. Hasil Pengukuran Gas Hidrogen dengan Massa Kulit Nanas

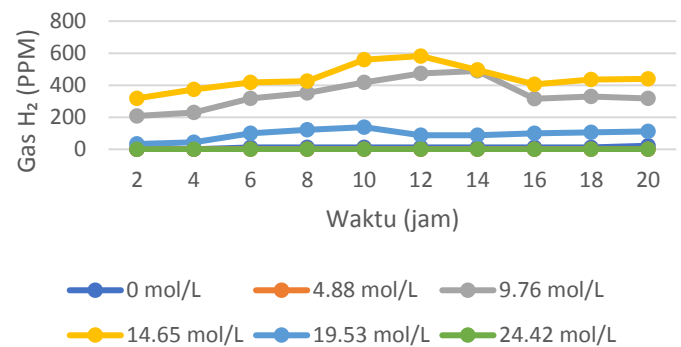
Pada massa kulit nanas 58 gram dilakukan pengujian dengan tegangan 1,2 volt, 1,5 volt, 1,8 volt, 2,1 volt, 2,4 volt, 2,7 volt dan 3 volt. Hasil pengukuran gas hidrogen dengan variasi tegangan, pada massa kulit nanas 58 gram dapat dilihat pada Gambar 6.

Grafik H₂ Terhadap Waktu pada Tegangan 1.2 Volt



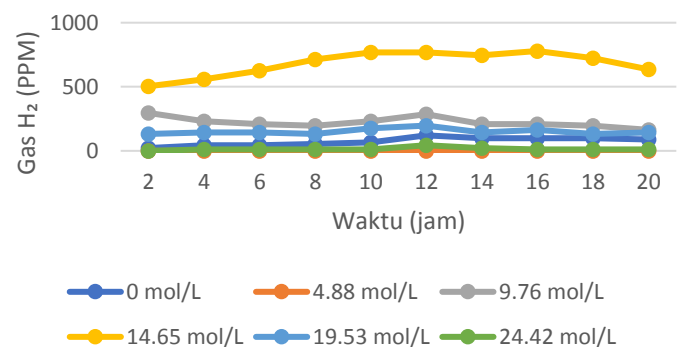
(a)

Grafik H₂ Terhadap Waktu pada Tegangan 1.5 Volt

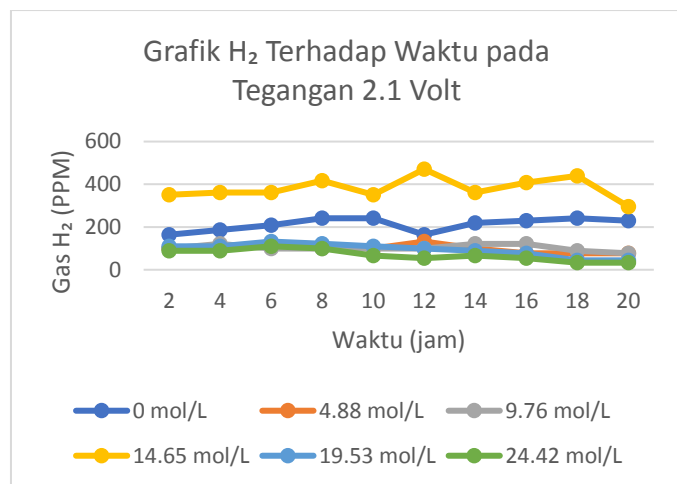


(b)

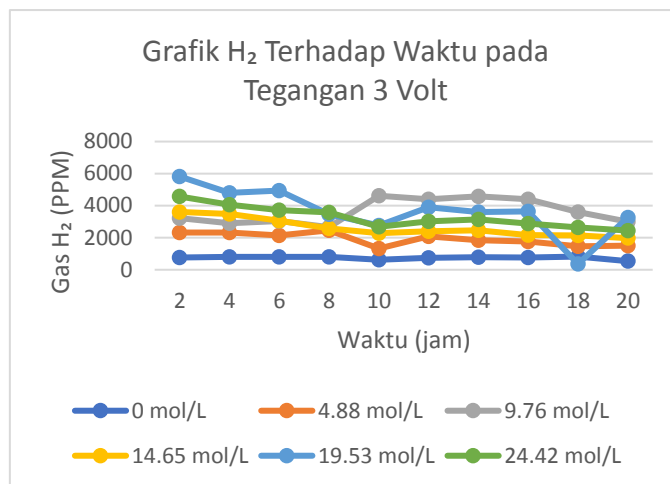
Grafik H₂ Terhadap Waktu pada Tegangan 1.8 Volt



(c)



(d)

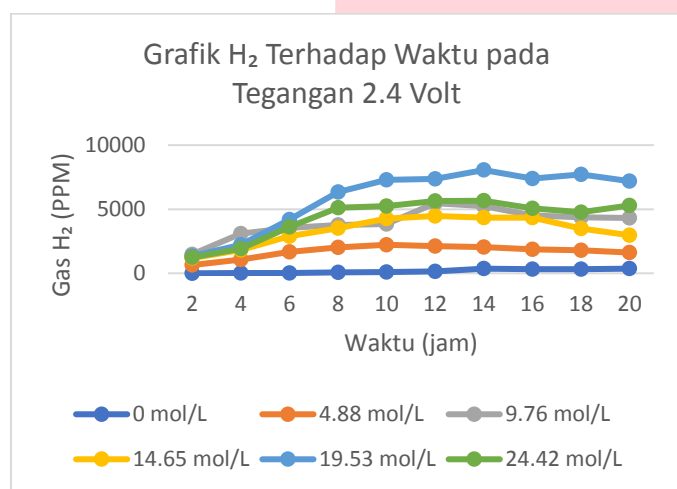


(g)

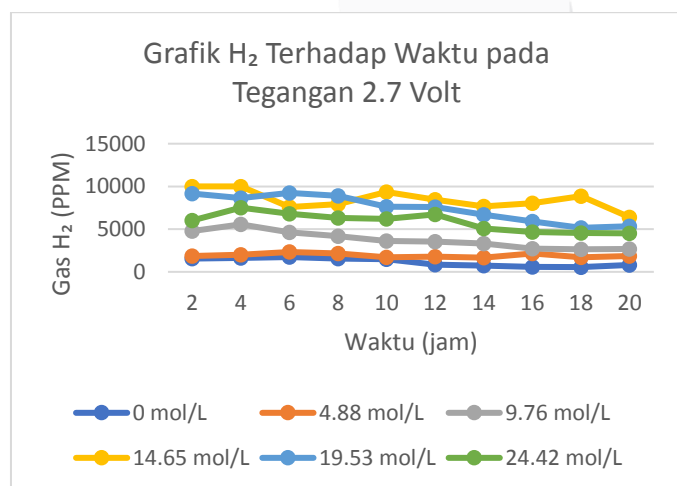
GAMBAR 6 Grafik Produksi Hidrogen

Pada rencana awal percobaan nanas yang digunakan adalah 50 gram tetapi dikarenakan hasil produksi hidrogen belum mencapai hasil dari perhitungan terotitis. Dimana hasil hidrogen maksimal baru mencapai 1645 PPM dengan konsentrasi NaCl 19,53 mol/L pada jam ke-10 di tegangan 2,4 volt. Maka penelitian dilanjutkan dengan menambahkan massa kulit nanas menjadi 58 gram dan 125 ml air pada substrat.

Pada massa kulit nanas 58 gram cenderung mendapatkan hasil yang naik turun pada setiap konsentrasi membran dikarenakan kandungan selulosa pada kulit nanas yang bermodifikasi karena perolehan energi listrik. Karena kandungan selulosa meningkat dalam inokulum pada penelitian ini, ada modifikasi yang jelas dari selulosa sebagai akibat paparan asam, suhu, energi dan tekanan.



(e)



(f)

C. Pengaruh Konsentrasi Natrium Klorida (NaCl) Terhadap Produksi Gas Hidrogen (H₂)

Produksi hidrogen rata-rata tinggi pada konsentrasi NaCl 14,65 mol/L dan 19,53 mol/L dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

TABEL 2 Hasil Pengukuran H₂ pada Konsentrasi NaCl 14,65 mol/L

Jam ke-	Hasil Pengukuran H ₂ (PPM)						
	1,2 V	1,5 V	1,8 V	2,1 V	2,4 V	2,7 V	3 V
2	0	318	504	351	1184	10000	3607
4	0	373	559	362	1831	10000	3487
6	66	417	625	362	2884	7577	3070
8	88	426	713	417	3509	7910	2588
10	121	559	768	351	4256	9331	2286
12	143	582	768	471	4474	8435	2412
14	241	496	746	362	4342	7667	2467
16	340	405	779	408	4331	8044	2160
18	340	436	724	439	3487	8849	2149
20	241	439	635	296	2971	6399	1974

TABEL 3 Hasil Pengukuran H₂ pada Konsentrasi NaCl 19,53 mol/L

Jam ke-	Hasil Pengukuran H ₂ (PPM)						
	1,2 V	1,5 V	1,8 V	2,1 V	2,4 V	2,7 V	3 V
2	77	33	132	110	1349	9156	5822
4	132	44	143	110	2215	8618	4803
6	263	99	143	132	4200	9243	4934
8	362	121	132	121	6336	8895	3454
10	428	138	175	110	7292	7643	2763
12	526	88	197	99	7368	7588	3893
14	625	88	143	88	8056	6678	3596
16	559	99	164	77	7390	5910	3640
18	515	106	132	44	7719	5154	358
20	592	112	143	44	7181	5329	3270

Berdasarkan Tabel 2 produksi hasil hidrogen tertinggi pada konsentrasi NaCl 14,65 mol/L adalah 10.000 PPM. Hasil dari tegangann 1,2 volt hingga 1,8 volt mengalami kenaikan dan hasil produksi turun pada tegangan 2,1 volt. Kemudian hasil produksi naik kembali pada tegangan 2,4 volt dan 2,7 volt lalu kembali turun pada tegangan 3 volt. Dan pada tabel 4.16 produksi hidrogen tertinggi pada konsentrasi NaCl 19,53 mol/L adalah 9243 PPM. Pada tabel ini hasil produksi hidrogen pada tegangan 1,2 volt tinggi dibanding hasil pada tegangan 1,5 volt. Hasil produksi hidrogen pada tegangan 1,8 volt mengalami kenaikan dan mengalami sedikit penurunan pada tegangan 2,1 volt. Kemudian hasil produksi hidrogen naik lagi pada tegangan 2,4 volt dan 2,7 volt. Lalu hasil produksi hidrogen turun pada tegangan 3 volt. Hal ini bisa terjadi karena batang-batang NaCl pada membran menghambat pori untuk mendifusikan proton. Yang mana fungsi NaCl pada membran adalah untuk meningkatkan konduktivitas proton. Tetapi pada saat pembuatan membran pada konsentrasi 9,76 mol/L, 14,65 mol/L, 19,53 mol/L dan 24,42 mol/L daya ikat air terhadap NaCl tidak dapat membuat NaCl larut sepenuhnya. Hal ini dapat mempengaruhi kinerja membran dalam berdifusi adalah stuktur membran (ukuran pori, kerapatan pori pada permukaan membran dan kedalaman pori).

V. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat ditarik berdasarkan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Variasi konsentrasi Natrium Klorida (NaCl) pada membran berongga berpengaruh pada sistem MEC, gas hidrogen yang dihasilkan lebih besar dari membran berongga yang tidak terdapat NaCl.
2. Pada pengujian mendapat hasil gas hidrogen yang maksimal adalah 10.000 PPM dengan konsentrasi NaCl 14,65 mol/L pada jam ke-2 dan jam ke-4 di tegangan 2,7 volt.

REFERENSI

- [1] P. Dange et al., "Recent developments in microbial electrolysis cell-based biohydrogen production utilizing wastewater as a feedstock," *Sustain.*, vol. 13, no. 16, pp. 1–37, 2021, doi: 10.3390/su13168796.
- [2] M. A. Soliman and I. Ashour, "A Reduced Model for Microbial Electrolysis Cells," *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 1724–1730, 2020, doi: 10.35940/ijitee.d1613.029420.
- [3] S. Dutta, "Hydrogen as fuel : prospects and challenges," no. December, 2020.
- [4] N. A. Sirait, M. R. Kirom, and N. Fitriyanti, "PENGARUH VARIASI SUBSTRAT DAN TEGANGAN PADA PRODUKSI GAS HIDROGEN (H₂) DENGAN MICROBIAL ELECTROLYSIS CELL (MEC) DUAL CHAMBER MENGGUNAKAN LIMBAH KULIT NANAS SELAMA 20 JAM INFLUENCE OF SUBSTRATE AND VOLTAGE VARIATIONS IN HYDROGEN GAS (H₂) PRODUCTION."
- [5] L. Lu, N. Ren, D. Xing, and B. E. Logan, "Hydrogen production with effluent from an ethanol-H₂-coproducing fermentation reactor using a single-chamber microbial electrolysis cell," *Biosens. Bioelectron.*, vol. 24, no. 10, pp. 3055–3060, 2009, doi: 10.1016/j.bios.2009.03.024.
- [6] Badan Pusat Statistik (BPS) "Produksi Tanaman Buah-Buahan 2020" (<https://www.bps.go.id/indicator/55/62/1/produksi-tanaman-buah-buahan.html>, Diakses pada 25 Oktober 2021, 18.21 WIB.)
- [7] A. D. Susanti, "Pembuatan Bioetanol Dari Kulit Nanas Melalui Hidrolisis Dengan Asam," *Ekuilibrium*, vol. 12, no. 1, pp. 81–86, 2013, doi: 10.20961/ekuilibrium.v12i1.2170.
- [8] A. N. Ghadge, M. Sreemannarayana, N. Duteanu, and M. M. Ghangrekar, "Influence of ceramic separator's characteristics on microbial fuel cell performance," *J. Electrochem. Sci. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 315–326, 2014, doi: 10.5599/jese.2014.0047.
- [9] A. Taslim, M. R. Kirom, and R. A. Salam, "RANCANG BANGUN TUBULAR MICROBIAL FUEL CELL DENGAN JEMBATAN GARAM BERBAHAN SEMEN (DESIGN OF MICROBIAL FUEL CELL TUBULAR WITH A CEMENT SALT BRIDGE)."
- [10] N. Wrana, R. Sparling, N. Cicek, and D. B. Levin, "Hydrogen gas production in a microbial electrolysis cell by electrohydrogenesis," *J. Clean. Prod.*, vol. 18, no. SUPPL. 1, pp. S105–S111, 2010, doi: 10.1016/j.jclepro.2010.06.018.
- [11] A. Kadier, Y. Simayi, P. Abdesahian, N. F. Azman, K. Chandrasekhar, and M. S. Kalil, "A comprehensive review of microbial electrolysis cells (MEC) reactor designs and configurations for sustainable hydrogen gas production," *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 1, pp. 427–443, 2016, doi: 10.1016/j.aej.2015.10.008.
- [12] Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, "Hydrogen Production" (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production>, Diakses pada 2 November 2021, 11.02 WIB).
- [13] Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, "Hydrogen Production:Electrolysis" (<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>, Diakses pada 2 November 2021, 11.48 WIB).
- [14] A. Ursúa, L. M. Gandía, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, 2012, doi: 10.1109/JPROC.2011.2156750.