

**PENGARUH LAJU ALIR DAN WAKTU OPERASI PADA KONVERSI  
KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI  
ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ELEKTROLISER MULTI-STACK**

**SKRIPSI**

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Sains Bidang Studi Kimia**



**Oleh:**

**BALQIS HAYATI**

**08031281823087**

**JURUSAN KIMIA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SRIWIJAYA  
INDRALAYA  
2022**

**HALAMAN PENGESAHAN**

**PENGARUH LAJU ALIR DAN WAKTU OPERASI PADA KONVERSI  
KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI  
ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ELEKTROLISER MULTI-STACK**

**SKRIPSI**

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Sains  
Bidang Studi Kimia

**Disusun oleh :**

**Balqis Hayati**

**08031281823087**

Indralaya, Mei 2021

**Pembimbing I**



**Dr. Dedi Rohendi, M.T.**

**NIP. 196704191993031001**

**Pembimbing II**



**Nova Yuliasari, M.Si.**

**NIP. 197307261999032001**

**Mengetahui,**

**Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**Prof. Hermansyah, S. Si., M. Si., Ph. D**

**NIP. 197111191997021001**

## HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi ini dengan judul “Pengaruh Laju Alir dan Waktu Operasi Pada Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol Dengan Metode Reduksi Elektrokimia Menggunakan Elektroliser Multi-Stack” telah dipertahankan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada Tanggal 18 Mei 2022 dan telah diperbaiki, diperiksa serta disetujui sesuai masukan yang diberikan.

Indralaya, Mei 2022

Ketua:

1. **Dr. Dedi Rohendi, M. T**

NIP. 196704191993031001

Anggota:

2. **Nova Yuliasari, M. Si**

NIP. 197307261999032001

3. **Dr. Muhammad Said, M. T**

NIP. 197407212001121001

4. **Widia Purwaningrum, M. Si**

NIP. 197304031999032001

Mengetahui

Dekan FMIPA  
  
Prof. Hermansyah, S. Si., M. Si., Ph. D  
NIP. 1971111191997021001

Ketua Jurusan Kimia  
  
Prof. Dr. Muharni, M. Si  
NIP. 196903041994122001

## PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Balqis Hayati

NIM : 08031281823087

Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/ Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar kesarjanaan strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini yang berasal dari penulis lain baik yang dipublikasikan atau tidak telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar. Semua isi dari skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya sebagai penulis.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Indralaya, Mei 2022

Penulis



Balqis Hayati

NIM. 08031281823087

**HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH UNTUK  
KEPENTINGAN AKADEMIS**

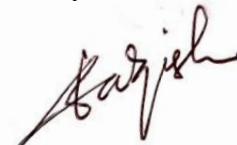
Sebagai civitas akademik Universitas Sriwijaya, yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Balqis Hayati  
NIM : 08031281823087  
Fakultas/Jurusan : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam/ Kimia  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “Pengaruh Laju Alir dan Waktu Operasi Pada Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol Dengan Metode Reduksi Elektrokimia Menggunakan Elektroliser Multi-Stack”. Dengan hak bebas royalti non-eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/menformatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat dan mempublikasikan tugas akhir atau skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya.

Indralaya, Mei 2022



Balqis Hayati  
NIM. 08031281823087

## SUMMARY

### THE EFFECT FLOW RATE AND TIME OPERATION ON THE CONVERSIONS OF CARBON DIOXIDE TO METHANOL WITH ELECTROCHEMICAL REDUCTION METHOD USING MULTI-STACK AS ELECTROLYZER

Balqis Hayati: Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T and Nova Yuliasari, M.Si.

Departement of Chemistry, Faculty of Math and Science, Sriwijaya University xii + 60 pages, 5 Tables, 12 Pictures, 10 Appediences

The large concentration of carbon dioxide gas causes global warming which has a negative impact on humans and the environments to overcome this problem a further conversion process is needed by utilizing carbon dioxide gas into hydrocarbon compounds. In this study, the conversion of carbon dioxide gas into methanol was carried out using an electrochemical reduction method with a membrane electrode assembly (MEA). MEA has two sides, namely the cathode and anode which are then placed on a stack. The percentage of methanol product is measured using a methanol analyzer through variations in flow rate and operating time with calculation analysis in the form of Faraday Efficiency. Operating time is measured using two types of stacks namely doublestack and multistack. The Percentage of methanol with various flow rates of 120, 160, 200 and 240 mL/minute using a doublestack were obtained at 33.47%, 39.30%, 38.41% and 32.51% (%w/v). The percentage of methanol with operating time variations of 2, 4, 6 and 8 hours using doublestack were obtained at 39.30%, 39.92%, 41.22% and 42.62% (%w/v) while the multistack were obtained at 42.406%, 44.055%, 45.12% and 45.369% (%w/v). The calculation of the percentage of Faraday Efficiency with variations in the doublestack flow rate obtained values of 42.06%, 41.15%, 80.44% and 81.70%. The percentage of Faraday Efficiency with variations in operating time using doublestack obtained a values of 61.73%, 35.83%, 34.53% and 33.47%, while multistack obtained a value of 29.60%, 21.29%, 17.18% and 15.84%. The results showed that the optimum flow rate of doublestack of 160 mL/minute, while the optimum operating time of doublestack and multistack of 8 hours.

**Keywords** : Doublestack, Multistack, Efficiency of Faraday, Electrolyzer, Current, CO<sub>2</sub> Conversion

**Citation** : 70 (2009-2021)

## RINGKASAN

### PENGARUH LAJU ALIR DAN WAKTU OPERASI PADA KONVERSI KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ELEKTROLISER MULTI-STACK

Balqis Hayati: Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T dan Nova Yuliasari, M.Si.

Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya xii + 60 Halaman, 5 Tabel, 12 Gambar, 10 Lampiran

Besarnya konsentrasi gas karbon dioksida menyebabkan pemanasan global yang berdampak negatif bagi manusia dan lingkungan. Untuk mengatasi masalah ini diperlukan proses konversi lebih lanjut dengan memanfaatkan gas karbon dioksida menjadi senyawa hidrokarbon. Pada penelitian ini dilakukan konversi gas karbon dioksida menjadi metanol dengan metode reduksi elektrokimia menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA). MEA memiliki dua sisi yakni katoda dan anoda yang mengapit membran elektrolit Nafion kemudian ditempatkan pada suatu *stack*. Persentase produk metanol diukur dari proses elektrolisis karbon dioksida pada laju alir dan waktu operasi bervariasi menggunakan *methanol analyzer* disertai analisis perhitungan berupa efisiensi faraday. Penentuan waktu operasi dilakukan menggunakan dua jenis *stack* yakni *stack* ganda dan *multi-stack* untuk membandingkan persentase produk metanol yang dihasilkan. Persentase metanol dengan variasi laju alir 120, 160, 200 dan 240 mL/menit menggunakan *stack* ganda didapatkan sebesar 33,47%, 39,30%, 38,41% dan 32,51% (%b/v). Persentase metanol dengan variasi waktu operasi 2, 4, 6, 8 jam menggunakan *stack* ganda didapatkan sebesar 39,30%, 39,92%, 41,22% dan 42,62% (%b/v), sedangkan *multi-stack* didapatkan sebesar 42,406%, 44,055%, 45,12% dan 45,369% (%b/v). Perhitungan persentase efisiensi faraday dengan variasi laju alir *stack* ganda didapatkan nilai sebesar 42,06%, 41,15%, 80,44% dan 81,70%. Persentase efisiensi faraday dengan variasi waktu operasi menggunakan *stack* ganda didapatkan nilai sebesar 61,73%, 35,83%, 34,53% dan 33,47%, sedangkan *multi-stack* didapatkan nilai sebesar 29,60%, 21,29%, 17,18% dan 15,84%. Hasil penelitian didapatkan bahwa laju alir optimum *stack* ganda sebesar 160 mL/menit, sedangkan waktu operasi optimum *stack* ganda dan *multi-stack* sebesar 8 jam.

**Kata Kunci** : *Stack* ganda, *Multi-stack*, Efisiensi Faraday, Elektroliser, Arus, Konversi CO<sub>2</sub>  
Sitasi : 70 (2009-2021)

## HALAMAN PERSEMBAHAN

*Bismillahirrohmanirrohim.*

Yakinlah ada sesuatu yang menantimu selepas banyak kesabaran yang kau jalani,  
yang membuatmu terpana hingga kau lupa rasanya rasa sakit.

(Ali bin abi thalib)

Setiap kita punya proses dan waktunya masing-masing. Ibarat matahari dan bulan,  
mereka bersinar pada saat yang berbeda. Keduanya tetap indah. Untuk itu, tak perlu  
khawatir akan waktumu. Entah nanti, sekarang atau di masa depan, tugas kita adalah  
tetap mengusahakan.

(@Kangihsan\_)

Skripsi ini sebagai salah satu rasa syukur kepada Allah SWT atas segala nikmat,  
rahmat dan kasih sayangNya dalam hidup sehingga penulis bisa menyelesaikan  
dengan baik dan penuh keyakinan hati.

Dan kupersembahkan juga kepada:

1. Papaku Abdul Gafur, S.Ag dan mamaku Maidasari, S.E yang selalu mendoakan, memberi support dikala senang maupun sedih dan sudah menguatkan balqis untuk selalu teguh dalam pendiriannya
2. Muhammad Hamzah Haikal dan Bashasha Hayati selaku adik-adikku yang terkadang rewel dan nyusahi tapi aku sayang
3. Alm. Kakek Sariman dan Nyai Hariah yang juga sudah menyemangati, mendoakan dan percaya dengan kemampuan yang balqis miliki
4. Pembimbing dan Teman-temanku
5. Almamaterku (Universitas Sriwijaya)



## KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan *Bismillahirrahmanirrahim* dan rasa puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniannya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Laju Alir dan Waktu Operasi Pada Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol Dengan Metode Reduksi Elektrokimia Menggunakan Elektroliser Multi-Stack”. Penulis menyadari bahwa karya manusia tak luput dari ketidaksempurnaan, keterbatasan, kekurangan serta rintangan dalam penyelesaian proses penyusunan. Namun, atas kesabaran dan rasa tanggung jawab sebagai mahasiswi yang sedang mengemban tugas akhir serta adanya bantuan dan dorongan semangat oleh orang-orang baik, Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga sangat mengucapkan banyak terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T** dan Ibu **Nova Yuliasari, M.Si** yang telah banyak memberikan bimbingan, bantuan, motivasi, semangat, saran dan petunjuk kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Hermansyah, Ph.D selaku Dekan FMIPA Universitas Sriwijaya
2. Ibu Prof. Dr. Muharni, M.Si selaku Ketua Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya
3. Bapak Dr. Addy Rachmat, M.Si selaku Sekretaris Jurusan Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya
4. Bapak Dr. Dedi Rohendi, M,T selaku dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan dalam penulisan skripsi ini
5. Ibu Nova Yuliasari, M.Si selaku dosen Pembimbing Akademik sekaligus Pembimbing kedua yang telah memberikan pengarahan dan bimbingan selama masa studi
6. Bapak Dr. Muhammad Said, M.T dan Ibu Widia Purwaningrum, M. Si selaku pembahas dan penguji sidang sarjana
7. Selaku Dosen FMIPA Kimia Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmu, mendidik dan membimbing selama masa kuliah
8. Mama dan Papa tersayang Maidasari, S.E dan Abdul Gafur, S. Ag yang telah mendoakan, memberikan dukungan dan semangat, mencintai dan menyayangi balqis sampai akhirnya balqis bisa menyelesaikan skripsi ini,

serta kepada adik-adikku Muhammad Hamzah Haikal dan Bashasha Hayati yang secara tidak langsung sudah menjadi penghibur dan pemberi semangat dikala lelah walaupun terkadang usil dan eneg-in.

9. Alm. Kakek Sariman yang sangat aku hormati, segani, saluti dan aku banggakan serta nyai Hariah yang aku sayang, terima kasih banyak atas kepercayaannya disertai dukungan dan semangatnya
10. Mbak Novi dan Kak Cosiin selaku Admin Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya yang telah membantu dalam proses kelengkapan administrasi atau syarat yang diperlukan
11. Kak Dwi, Kak Rekha, Kak Icha dan Kak Yuni, terima kasih atas segala bantuan dan masukan selama proses penelitian dan penyelesaian skripsi. Lancar luncur terus kak untuk kedepannya
12. Semua anak-anak lab PUR, semangat selalu.
13. Sicho si yang paling rusuh sendiri, terima kasih sudah menjadi orang yang sudah sangat baik. Ngga nyangka sih ternyata sicho orang yang baik padahal *first imprreson* adalah canggung, songong dan sangat tidak ramah sama sekali. Semangat terus setelah ini, sedikit lagi menuju ambang kebebasan sejati. Jangan lupain aku yaa dan tetep lah suka melembur!
14. Tiara Nabilla si tinggi yang bikin bengek, terima kasih atas canda tawanya hahaha plz bgt segala bentuk kocak dan konyol kau semuanya bikin mood. Si yang tahu segala bentuk dan perumpamaan duniawi. Bismillah disegerakan, cepet nyusul ya! Sedih bakal pisah sama team yang suka melembur di anor. Oh ya tolong mukanya agak sedikit di naturalin rasanya pengen aku gampol karena rada ngeselin tapi so ngakak juga.
15. Kak sisi yang baru saja official S. Si, terimakasih sudah mau membantu balqis selama didunia kampus, suatu penghargaan bisa kenal sama kak sisi yang multitalent. Terimakasih sudah mau menopang nginep dikosan kakak dan bercerita Kpop vs Jpop sama aku wkwk. Inget ga kak? *Kakak vampir aku serigala*, berbeda tapi sejalan eaa. Lancar terus kak sampai kedepan, kakak terhebat dan terkeren si sejauh ini! Dan untuk Ahmaduddin si ambis yang mau mulai penelitian dan mastah KO ini, terimakasih cuy sudah berbagi cerita sama aku dan kak sisi. Semangat terus! Lanjutkelah sidang langsung.

16. Untuk irma, terima kasih sudah baik dan menjadi teman selama masa kuliah sampai selesai masa studi. Semangat selalu dan semoga disegerakan.
17. Jeni dan Rahma si duo sejoli, terimakasih sudah menjadi orang baik sekaligus teman main ku layo-palembang. Saling cerita kebiasaan dan kegundahan selama perkuliahan adalah jalan kita ya bun. Bakalan kangen dengan segala kekocakkan dan kemenye-menyean kalian wkwk, *jujurly* main sama kalian itu asiq pake banget. Bermotoran BOTI (bonceng tiga) terus bawa kue dari arah persada? *No problem* ya ga. Taehyung dan Jisoo vs Yamada ya ga si? Bangga bisa bertemu dan tau dengan kalian. Kita senasib dan seperjuangan, semoga sampai setelah ini kita bisa bermain dan bertemu dengan label orang ‘berhasil’, tapi di destinasi wisata yang lain ya. Semangat terus!
18. Untuk Dayah si anak centil, terima kasih dan semangat untuk menyelesaikan tugas nya sebagai mahasiswi di jurusan ini. *I know u did it*. Ga usah risauin yang nda disukai sama kita, fokus aja ke depan dan buktikan. Semua perlu pembuktian. Lancar luncur terus kedepannya!
19. Restri si geminian sama kaya aku wkwk, semangat ya res semoga disegerakan juga. Insyallah step by step bakalan selesai dan menjadi buah kemenangan. Terimakasih atas kenangan pas aku sidang malahan BOTI sama tiara ke hukum. Ga bakal bisa lupa sih itu.
20. Untuk Irma Apriliyanti yang sedang mau sidang juga, selamat dan semangat! Terimakasih sudah baik banget sama aku. Selalu ada kapanpun dan dimanapun saat aku membutuhkan. Yang sangat siru pas aku mau sidang kemarin dan ngga berhenti henti kasih semangat. Jangan lupain aku ya!
21. Untuk Zeni Meilini, si anak baik dan ~~buaya betina~~ wkwk peace! Terimakasih sudah menjadi teman aku sedari SMA dulu. Si anak yang katanya setia tapi doinya seisi dunia, pusing sampe yang mana yang disukai dan disetiain wkwk. Ga nyangka sih bisa berteman awet ampe sekarang. Orang baik, lemah lembut yang tak terduga. Semangat terus jalani skripsinya.
22. Maulidyah Pratiwi yang next soon S.I.Kom, si adek kelas yang seumuran dan jadi temen ghibah+main dari SMP-Sekarang. Si anak yang paling tau semua tentang aku. Atlet tangguh pencak silat wkwk, mantap si. Terimakasih sudah menjadi temen ‘segilaan’ dari dulu. Satu bulan, satu bintang, satu kepribadian

‘gila’nya wkwk. Jangan keenakan organisasi ya bun, inget kuliah. But, semangat terus wik kedepannya!

23. Untuk Dytha pratiwi yang baru saja mengenal perDuniaan kampus offline, terima kasih sudah hadir dan berbagi cerita sama mba wkkwk *my support for fighting*. Satu sekolah terus dari sd, smp dan sma tapi alhamdulillah beda kampus kuliah. Selamat menjalani perDunia kampus yang tidak ketebak alur ceritanya dan semangat terus setelah ini! *You did it*.
24. Alumni KASEP (KT Sepuluh) si gerombolan temen-temen aku SMA yang kocak, tengil dan siru. Alia Reina Maulidya, A.Md, Suci Widya, A. Md, Zonia Febiani, S. Ak dan Next soon untuk Afizah, Elma Almiro, Lili Novia, Nurhalimah, Islamia Tanjung, Rully Nurul. Kangen selalu untuk kalian! Asrama rame kalau ada kalian, kamar adalah tempat lalu lalang para pembina asrama, nyuci + berghibah di bak besak adalah jalan kita kalau krisis air di kamar mandi, minggat bimbel, bolos bimbel, pura-pura sakit, konser ditengah malam, nonton hororr, dengeri turnamen basket dan pingpong tiap malam adalah keseharian yang dilalui bersama wkwk mengcape banget ga si. Rebutan mandi dan alarm terbaik setiap pagi adalah halimah. Semangat terus buat kalian baik yang sudah kerja maupun sedang menyusun skripsinya!
25. Personil Anak Umang, Agus si wabup dan gubma, Desta si pecinta BEM dan Tias si jaim dan tenangan apalagi kalau bersanding sama agus wkwk. Terimakasih atas momen dan ceritanya yang sudah kalian bagi selama studi di perkuliahan ini. Ga bakalan lupa kalau kita adalah kelompok praktikum yang berkedok ‘praktikan mandiri’ tapi the first for acc bundel, keren banget ga sih. Semangat terus untuk kalian!
26. Temen-temen aku asrama muara enim yang nda bisa aku sebutin satu satu. Suatu momen yang tak terduga bisa berkenalan sama kalian. Konser dan ngaji sebarengan, bercerita dengan mendengarkan kisah bahwa kita mengetahui ‘penghuni’ yang terkadang bercanda tak lucu adalah bukti kengerian yang tidak hakiki. Semangat terus buat kalian!
27. Para Tobikko diluar sana, ga nyangka bisa masuk grup *Viva 9's Soul*. Terimakasih sudah memberi asupan foto-foto member *Jhonmys's* khususnya Hey!Say!JUMP. Semangat terus semua.

28. Kepada rekan-rekan seperjuangan ku lainnya baik teman seangkatan maupun adik tingkat di kampus yang tidak bisa aku/kakak sebutkan satu persatu di jurusan Kimia Universitas Sriwijaya ini. Terima kasih telah memberikan dorongan, semangat, motivasi diri dan bantuan selama proses studi.
29. Kepada diriku sendiri, Balqis Hayati terima kasih sudah bisa bertahan untuk melewati dan melalui rintangan selama ini. Pengalaman sudah memberikan pengajaran terbaik akan kehidupan. Semangat terus untuk selanjutnya, perjuangan belum berakhir sampai hari ini! Masih ada dan banyak lagi penantian sebuah tragedi yang belum ditemui sebagai 'kantung bekal' dimasa depan nanti. Tak perlu banyak mencari sensasi dan provokasi. Ingat semua orang punya kelebihan dan kelemahan tersendiri. Yakin akan sebuah proses bahwa kau bisa berhasil

Semoga jasa-jasa dan kebaikan bapak, ibu, saudara dan sahabat-sahabatku tersebut di atas bisa menjadi perhitungan untuk menambah amal dan pahala yang di terima Allah SWT. Akhirnya dengan kerendahan hati, penulis meminta maaf apabila dalam penulisan ini terdapat kekhilafan dan kata yang menyinggung hati. Penulis menyadari skripsi ini masih banyak kekurangan, sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran dari pembaca. Mudah-mudahan skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan semoga Tuhan melindungi dan memberkati kita semua.

Indralaya, Mei 2022

Penulis

## DAFTAR ISI

	<b>Halaman</b>
<b>JUDUL HALAMAN</b> .....	<b>i</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>ii</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	<b>iii</b>
<b>PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH</b> .....	<b>iv</b>
<b>HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH</b> .....	<b>v</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>vi</b>
<b>RINGKASAN</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>xiv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xvi</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	<b>xviii</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Balakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	3
1.3 Tujuan Penelitian .....	3
1.4 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>4</b>
2.1 Karbon Dioksida .....	4
2.2 Konversi Karbon Dioksida .....	4
2.3 Metanol .....	5
2.4 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	6
2.5 Nafion Sebagai Elektrolit .....	6
2.6 Elektroda .....	7
2.6.1 Elektroda Tembaga .....	8
2.2.1 Elektroda Platina.....	8
2.7 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Proses Konversi CO <sub>2</sub> .....	9
2.8 Efisiensi Faraday (EF) .....	9

<b>BAB III METODELOGI PENELITIAN .....</b>	<b>10</b>
3.1 Waktu dan Tempat .....	10
3.2 Alat dan Bahan .....	10
3.2.1 Alat .....	10
3.2.2 Bahan .....	10
3.3 Prosedur Penelitian .....	10
3.3.1 Preparasi katalis Cu <sub>2</sub> O-ZnO/C .....	10
3.3.2 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) .....	10
3.3.3 Preparasi Elektroda .....	11
3.3.4 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	11
3.3.5 Konversi CO <sub>2</sub> Menjadi CH <sub>3</sub> OH Secara Elektrokimia .....	12
3.3.6 Pengukuran Kadar Metanol dengan Analisis <i>Methanol Analyzer</i> .....	13
3.4 Analisis Data .....	14
3.4.1 Persentase Konversi CO <sub>2</sub> .....	14
3.4.2 Efisiensi Faraday (EF) .....	14
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>16</b>
4.1 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	16
4.1.1 Pembuatan Elektroda .....	16
4.1.2 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA) .....	18
4.2 Hasil Konversi Karbon Dioksida (CO <sub>2</sub> ) Menjadi Metanol .....	18
4.2.1 Penentuan Laju Alir Optimum .....	20
4.2.2 Penentuan Waktu Operasi Optimum .....	21
4.2.3 Penentuan Efisiensi Faraday .....	24
4.2.3.1 Penentuan Efisiensi Faraday <i>Stack</i> Ganda Variasi Laju Alir .....	24
4.2.3.2 Penentuan Efisiensi Faraday <i>Stack</i> Ganda dan <i>Multi-stack</i> Variasi Waktu Operasi .....	25
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>27</b>
5.1 Kesimpulan .....	27
5.2 Saran .....	27
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>28</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>34</b>

## DAFTAR GAMBAR

	<b>Halaman</b>
Gambar 1. Struktur kimia nafion (Asam poliperflorosulfonat ionomer).....	7
Gambar 2. Proses pembuatan MEA dengan <i>spraying</i> .....	12
Gambar 3. Bagan reaktor elektroliser .....	13
Gambar 4. <i>Methanol Analyzer</i> .....	14
Gambar 5. <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL) .....	17
Gambar 6. Reaksi Reduksi Elektrokimia CO <sub>2</sub> menjadi metanol pada permukaan katalis .....	19
Gambar 7. Grafik pengaruh laju alir terhadap produksi metanol pada <i>stack</i> ganda .....	20
Gambar 8. Grafik yang menunjukkan pengaruh laju alir terhadap arus pada <i>stack</i> ganda .....	21
Gambar 9. (a) Grafik pengaruh waktu operasi pada <i>stack</i> Ganda (b) Grafik pengaruh waktu operasi pada <i>Multi-stack</i> .....	22
Gambar 10. (a) Grafik pengaruh waktu operasi pada <i>stack</i> Ganda terhadap arus (b) Grafik pengaruh waktu operasi pada <i>Multi-stack</i> terhadap arus.....	23
Gambar 11. Grafik pengaruh laju alir pada <i>stack</i> ganda terhadap efisiensi faraday .....	24
Gambar 12. (a) Grafik pengaruh waktu operasi pada <i>stack</i> ganda terhadap Efisiensi faraday (b) Grafik waktu operasi pada <i>multi-stack</i> terhadap efisiensi faraday .....	25



## DAFTAR TABEL

	<b>Halaman</b>
Tabel 1. Pengaruh laju alir CO <sub>2</sub> terhadap produksi metanol .....	14
Tabel 2. Pengaruh waktu operasi terhadap produksi metanol .....	14
Tabel 3. Pengaruh laju alir CO <sub>2</sub> <i>stack</i> ganda terhadap efisiensi faraday .....	15
Tabel 4. Pengaruh waktu operasi <i>stack</i> ganda terhadap efisiensi faraday .....	15
Tabel 5. Pengaruh waktu operasi <i>stack</i> ganda terhadap efisiensi faraday .....	15

## DAFTAR LAMPIRAN

	<b>Halaman</b>
Lampiran 1. Bagan Prosedur Penelitian .....	36
Lampiran 2. Skema Pengujian Reduksi Elektrokimia CO <sub>2</sub> .....	38
Lampiran 3. Perhitungan untuk Aktivasi Membran .....	40
Lampiran 4. Tabel dan Perhitungan Pengaruh Laju Alir pada <i>Stack</i> ganda Terhadap Faktor Konversi CO <sub>2</sub> .....	41
Lampiran 5. Tabel dan Perhitungan Pengaruh Waktu Operasi terhadap Faktor Konversi CO <sub>2</sub> pada <i>Stack</i> ganda .....	46
Lampiran 6. Tabel dan Perhitungan Pengaruh Waktu Operasi terhadap Faktor Konversi CO <sub>2</sub> pada <i>Multi-stack</i> .....	51
Lampiran 7. Tabel dan Perhitungan Efisiensi Faraday untuk <i>Stack</i> Ganda Variasi Laju Alir .....	56
Lampiran 8. Tabel dan Perhitungan Efisiensi Faraday untuk <i>Stack</i> Ganda Variasi Waktu Operasi .....	59
Lampiran 9. Tabel dan Perhitungan Efisiensi Faraday untuk <i>Multi-stack</i> Variasi Waktu Operasi .....	61
Lampiran 10. Gambar Alat dan Bahan yang Digunakan .....	63

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) yang berasal dari emisi dan pembakaran dalam konsentrasi yang cukup tinggi menyebabkan pemanasan global sehingga membutuhkan penanganan serius (Halomoan dan Nugroho, 2017; Santoso *dkk*, 2010). Solusi untuk mengurangi konsentrasi dari atmosfer yakni memanfaatkan CO<sub>2</sub> dan mengubahnya menjadi bahan bakar hidrokarbon. Memproduksi senyawa yang memiliki lebih banyak manfaat sehubungan untuk mengurangi kadar CO<sub>2</sub> merupakan sebuah solusi ganda. Dari berbagai penelitian sebelumnya, diketahui bahwa CO<sub>2</sub> sangat berpotensi untuk sintesis energi terbarukan (Aljuboori *et al.*, 2020; Ramadan dan Riyanto, 2017). Produk yang dapat dihasilkan dari CO<sub>2</sub> terdiri dari karbon monoksida, asam format, metanol dan etana (Liu *et al.*, 2017). Minat untuk memproduksi metanol dengan memanfaatkan CO<sub>2</sub> merupakan topik yang ramai dibicarakan. Metanol merupakan bahan bakar yang berbentuk cairan, mudah disimpan dan dianggap sebagai energi universal pembawa yang dapat menggantikan sumber hidrokarbon. CO<sub>2</sub> dapat disintesis menjadi alkohol salah satunya dengan elektrokimia (Joghee *et al.*, 2015; Ramadan dan Riyanto, 2017).

Reduksi elektrokimia merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan karena sederhana, ramah lingkungan, nyaman digunakan untuk aplikasi dalam skala besar serta mudah dilakukan (Ilyasa *et al.*, 2020; Uemoto *et al.*, 2019). Metode lain yang memanfaatkan CO<sub>2</sub> yakni hidrogenasi gas namun membutuhkan katalis, kondisi khusus dan gas reduktan hidrogen yang relatif tinggi. Reduksi CO<sub>2</sub> secara elektrokimia sangat bergantung pada elektroda, waktu reaksi, laju alir CO<sub>2</sub>, konsentrasi serta pH larutan elektrolit KHCO<sub>3</sub> (Fitriani, 2012). Penelitian Ramadan dan Riyanto, 2017 menunjukkan bahwa laju alir CO<sub>2</sub> dapat berpengaruh pada persentase hasil produksi sehingga perlu diperhatikan. Selain itu, berdasarkan penelitian oleh Tamboli *et al.*, 2016, waktu reaksi juga berpengaruh terhadap hasil produk sintesis dimana semakin lama waktu reaksi maka produksi hasil konversi semakin meningkat. Potensial reduksi elektrokimia dengan air saling berdekatan sehingga reduksi CO<sub>2</sub> dan air akan bersaing pada pelarut air. Metode ini memerlukan sebesar 932 KJ. mol<sup>-1</sup> energi yang terjadi secara tidak spontan. Selama proses

berlangsung, banyaknya CO<sub>2</sub> yang larut akan mempengaruhi nilai dari efisiensi faraday yang dihasilkan (Fitriani, 2012).

Metode reduksi elektrokimia pada penerapannya menggunakan MEA (*Membrane Electrode Assembly*) untuk menghasilkan metanol (Pe, 2020). MEA tersusun atas sebuah membran sebagai tempat pertukaran ion dan dua elektroda yang berlapis katalis yakni elektrokatalis (Vietanti *dkk*, 2019). MEA berfungsi untuk memindahkan proton dari sisi anoda ke katoda dan mendorong elektron untuk berpindah di sekitar jalur aliran ke katoda (Yodwong *et al.*, 2020). Elektrokatalis secara signifikan dapat meningkatkan selektivitas terhadap pembentukan CH<sub>3</sub>OH (Liu *et al.*, 2017). Penelitian sebelumnya banyak mengusulkan Pt/C sebagai elektrokatalis karena dapat menghasilkan efisiensi yang tinggi (Vietanti *dkk*, 2019).

Penelitian yang dilakukan oleh Hakim *dkk*, 2015 juga mengusulkan logam Cu sebagai elektroda dalam elektrolisis. Hal itu dikarenakan Cu mempunyai sisi aktif yang baik sehingga dapat meningkatkan efisiensi pembentukan senyawa pada reduksi CO<sub>2</sub>. Logam-logam ini dipadukan dengan ZnO untuk memperoleh keaktifan yang tinggi. Katalis berbasis Cu/ZnO juga aktif dalam reaksi pergeseran air pada suhu rendah dan dalam uap metanol (Schumann *et al.*, 2014). Elektrokatalis Cu<sub>2</sub>O pada elektroda dalam pembentukan CH<sub>3</sub>OH mempengaruhi selektivitas dan aktivitas terhadap CH<sub>3</sub>OH. Selain itu, Cu<sub>2</sub>O memiliki stabilitas dan selektivitas lebih tinggi dibandingkan dengan Cu untuk produksi CH<sub>3</sub>OH (Liu *et al.*, 2020).

Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan *stack* tunggal pada tegangan optimum dengan variasi laju alir dan waktu operasi. Penelitian ini mengukur ulang pengaruh laju alir optimum dengan *stack* ganda yang akan digunakan pada multi-*stack* dengan variasi waktu operasi. *Stack* adalah gabungan MEA yang memiliki bagian katoda dan anoda yang diletakkan pada suatu sel (Dewi, 2021). Multi-*stack* digunakan karena memiliki efisiensi pada rentang daya yang lebih besar dari pada *stack* tunggal ataupun *stack* ganda (Cardozo *et al.*, 2015). Perhitungan efisiensi faraday juga dilakukan untuk mengetahui selektivitas kandungan metanol. Penelitian Albo *et al.*, 2015 menghitung nilai efisiensi faraday dengan variasi ketebalan membran, sedangkan penelitian ini akan menghitung nilai efisiensi berdasarkan laju alir dan waktu operasi yang digunakan dalam *stack*. Hasil konversi CO<sub>2</sub> berupa metanol di analisis menggunakan *Methanol analyzer*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Studi penelitian secara reduksi elektrokimia CO<sub>2</sub> perlu dilakukan karena mengingat gas CO<sub>2</sub> dalam kadar yang banyak berdampak negatif bagi lingkungan dan manusia. Penelitian ini memiliki permasalahan utama yakni belum diketahuinya pengaruh parameter hasil suatu senyawa yang dapat dihasilkan melalui konversi CO<sub>2</sub> dengan variasi laju alir CO<sub>2</sub> dan waktu operasi pada *stack* ganda dan multi-*stack* sebagai elektroliser terhadap banyaknya persentase produk dan nilai efisiensi faraday yang dihasilkan.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menentukan laju alir optimum CO<sub>2</sub> pada *stack* ganda dan waktu operasi optimum pada multi-*stack* pada proses konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol dengan metode reduksi elektrokimia menggunakan MEA.
2. Menentukan nilai persentase metanol yang dihasilkan dan efisiensi faraday dari laju alir optimum CO<sub>2</sub> *stack* ganda dan waktu operasi optimum pada multi-*stack* dengan cara reduksi elektrokimia.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini memiliki manfaat untuk mengetahui hasil pengaruh variasi laju alir CO<sub>2</sub> pada *stack* ganda dan variasi waktu operasi pada multi-*stack* dalam konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol serta memberikan informasi mengenai pemanfaatan konversi CO<sub>2</sub> menjadi metanol yang bersifat ramah lingkungan untuk mengurangi emisi dan pembakaran yang menyebabkan pemanasan global.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abeydeera, L. Mesthringe, J., & Samarasinghalage, T. (2017). Global Research on Carbon Emmissions: a Stoichiometric Review. *Suistainaility*, 11(14), 1-25.
- Afiati, T. A. (2016). Elektrosintesis Etanol dari Gas Karbon Dioksida (CO<sub>2</sub>) dengan Menggunakan Katoda Tembaga (Cu) dan Anoda Karbon (C). *Skripsi*.
- Aghighi, M., Hoeh, M. A., Lehnert, W., Merle, G., & Gostick, J. (2016). Simulation of a Fuel Cell Membrane Electrode Assembly Using Pore Network Modeling. *Journal of The Electrochemical Society*, 163(5), 384-392.
- Al-Juboori, O., Sher, F., Khalid, U., Niazi, M. B., & Chen, G. Z. (2020). Electrochemical Production of Sustainable Hydrocarbon Fuels from CO<sub>2</sub> Co-electrolysis in Eutectic Molten Melts. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 1-50.
- Allam, D. Cheknoun, S., & Hocine, S. (2019). Operating Conditions and Composition Effect on the ydrogenation of Carbon Dioxide Performed over CuO/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts. *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, 14(3), 604-613.
- Albo, J., Guerra, M. A., Castario, P., & Irabien, A. (2012). Towards the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide into Methanol. *Green Chemisty*, 1-27.
- Albo, J., Saez, A., Gullon, J. S. Montoel, V., & Irabien, A. (2013). Production of Methanol from CO<sub>2</sub> and Cu<sub>2</sub>O/ZnO based Electrodes in Aqueous Solution. *Applied Catalysis B: Enviromental*, 176, 709-717.
- Al-tamreh, S. A., Ibrahim, M. H., El-Naas, M. H., Vaes, J., Pant, D., Benamor, A., & Amhamed, A. (2021). Electroreduction of Carbon Dioxide into Formate: a Comprehensive Review. *ChemElectroChem*, 8, 3207-3220.
- Ammiruddin, A., & Lubis, F. A. (2018). Analisa Pengujian Lelah Material Tembaga dengan Menggunakan *Rotary Bending Fantigue Machine*. *Jurnal Ilmiah MEKANIK Teknik Mesin*, 4(2), 93-99.
- Athanasaki, G., Wang, Q., Shi, X, Chauhan, N., Vimala, V., Cindrella, L., Ahmad, R., & Kannan, A. M. (2021). Design and Development of Gas Diffusion Layers with Pore Forming Agent for Proton Exchange Membrane Fuel Cells at Various Relative Humidity Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 6835-6844.
- Bogolowski, N., & Crillet, J. (2015). Appropriate Balance Between Methanol Yield and Power Density in Portable Direct Methanol Fuel Cell. *Chemical Engineering Journal*, 270, 91-100.

- Boonamnuy, T., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., & Kim-Lohsoontorn, P. (2021). Effect 3A and 5A Molecular Sieve on Alcohol-Assited Methanol Synthesis from CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub> Over Cu/ZnO Catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 49(60), 30948-20958.
- Cardozo, J., Marx, N., Boulon, L., & Hissel, D. (2015). Comparison of Multistack Fuel Cell System Architectures for Residential Power Generation Applications Including Electrical Vehicle Charging. *IEEE*, 1(1), 95-112.
- Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., & Stolen, D. (2019). A Comprehensive Review on PEM Water Electrolysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 8(1), 46-52.
- Dalena, F., Senatore, A., Basile, M., Knani, S. Basile, A., & Iulianelli, A. (2018). Advances in Methanoll Production and Utilization with Particula Emphasis toward Hydrogen Generation via Membrane Reactor Technology. *Membranes*, 8(98), 1-27.
- Dewantoro, Y. H., & Roihatin, A. (2019). Teknologi Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan Menggunakan Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Skala Kecil. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, 15(1), 27-34.
- Dewi, S. K. (2021). Produksi Hidrogen dari Air N Menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) dengan Variasi Luas Permukaan dan Jenis Stack. *Skripsi*.
- Economou, A., Karapetis, S. K., Nikoleli, G., Nikolelis, D. P., Bratakou, S., & Varzakas, T. H. (2017). Enzyme-based Sensors. *Advances in Food Diagnostics*, 231-250.
- Endrodi, B., Kecsenovity, E., Samu, A., Darvas, F., Jones, R. V., Torok, V., Danyi, A., & Janaky, C. 2019. Multilayer Electrolyzer Stack Converts Carbon Dioxide to Gas Products at High Pressure with High Efficiency. *ACS Energy Letters*, 4, 1770-1771.
- Esfandiari, A., Kazemeini, M., & Bastani, D. (2016). Synthesis, Characterization and Performance Determination of an AgPt/C Electrocatalyst for the ORR in a PEM Fuel Cell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 1, 1-11.
- Fitriani, L. (2012). Studi Reaksi Reduksi CO<sub>2</sub> dengan Metode Elektrokimia Menggunakan Elektroda Cu. *Skripsi*.
- Fitrianingsih, E., Yusmaniar., & Afrizal. (2013). Pengaruh Penambahan Silika Terhadap Membran Sulfonasi Polieter Eter Keton-Akrilonitributadiena Stirena. *JRSKT*, 3(1), 251-256.
- Fofana, D., Natarajan, S. K. Benard, P., & Hamelin, J. (2013). High Performance PEM Fuel Cell with Low Platinum Loading at the Cathode Using Magnetition

Sputter Deposition. *ISRN Electrochemistry*, 1(1), 1-6.

- Ghouri, Z. K., Barakat, N. A., & Kim, H. Y. (2015). Influence of Copper Content on the Electrocatalytic Activity Toward Methanol Oxidation of  $\text{Co}_x\text{Cu}_y$  Alloy Nanoparticles-decorated CNFS. *Scientific Reports*, 5(16695), 1-12.
- Haisch, T., Kubannek, F., Haisch, C., Bahnemann, D. W., & Krewer, U. (2019). Quantification of Formaldehyde Production During Alkaline Methanol Electrooxidation. *Electrochemistry Communications*, 102, 57-62.
- Hakim, M. H., Pangestu, H., & Riyanto. (2015). Studi Konversi Karbon Dioksida dengan Teknik Reduksi Elektrokimia Menggunakan Elektroda Tembaga. *Prosiding Sinja*, 143-146.
- Halomoan, N., & Nugroho, A. R. (2017). Pengaruh Variasi Laju Alir Massa Karbon Dioksida Terhadap Produksi Mikroalga *Scenedesmus obliquus* pada Fotobioreaktor. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 3(1), 245-253.
- Hasan, A. (2017). Aplikasi Sistem Fuel Cell Sebagai Energi Ramah Lingkungan di Sektor Transportasi dan Pembangkit. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 8(3), 277-286.
- Hazarika, J., & Manna, M. S. (2019). Electrochemical Reduction of  $\text{CO}_2$  to Methanol with Synthesized  $\text{Cu}_2\text{O}$  Nanocatalyst: Study of the Selectivity. *Electrochimica Acta*, 328, 1135053.
- Herland, E. V., Sparta, M., & Halvosen, A. (2019). Skin and Proximity Effects in Electrodes and Furnace Shells. *Metallurgical and Material Transaction*, 50, 2884-2896.
- Ilyasa, S.Z., Jiwanti, P.K., Khalil, M., Einaga, Y., & Ivandini, T.A. (2020). Studi of Carbon Dioxide Electrochemical Reduction in Flow Cell System Using Copper Modified Boron-Doped Diamond. *E3S Web of Conference*, Creative Commons Attribution.
- Ishikawa, H., Teramoto, T., Ueyama, Y., Sugarawa, Y., Sakiyama, Y., Kusakabe, M., Miyatake, K., & Uchida, M. (2016). Use of Sub-gasket and Soft Gas Diffusion Layer to Mitigate Mechanical Degradation of a Hydrocarbon Membrane for Polymer Electrolyte Fuel Cells in Wet-dry Cycling. *Journal of Power Sources*, 325, 35-41.
- Jayakumar, A., Singamneni, S., Ramos, M., Al-jumaily, A. M., & Pethaiah, S. S. (2017). Manufacturing the Gas Diffusion Layer for PEM Fuel Cell Using a Novel 3D Printing Technique and Critical Assessment of the Challenges Encountered. *Materials*, 10(796), 1-9.
- Joghee, P., Malik, J. N., Pylypenko, S., & O'Hayre, R. (2015). A review on Direct Methanol Fuel Cells - in the Perspective of Energy and Sustainability. *MRS Energy & Sustainability*, 2(3), 1-31.



- Li, D., Qu, Y., Liu, J., He, W., Wang, H., & Feng, Y. (2014). Using Ammonium Bikarbonate as Pore Former in Activated Carbon Catalyst Layer to Enhance Performance of Air Cathode Microbial Fuel Cell. *Journal of Power Source*, 272, 909-914.
- Liu, Z., Tang, X., Xu, S., & Wang, X. (2014). Synthesis and Catalytic Performance of Graphene Modified CuO-ZnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> for Hydrogenation to Methanol. *Journal of Nanomaterials*, 1, 1-6.
- Liu, Y., Xu, W., Shan, Y., & Xu, H. (2017). High Reactivity of the ZnO(0001) Polar Surface: The Role of Oxygen Adatoms. *Journal of Physical Chemistry*, 121(29), 15711-15718.
- Liu, Y., Li, F., Zhang, X., & Ji, X. (2020). Recent Progress on Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub> to Methanol. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 23, 10-17.
- Mahendro, S. (2014). Analisis Penggunaan Elektroliser Terhadap Emisi Gas Buang CO dan HC pada Sepeda Motor 4 Langkah Merk Suzuki Shogun 125 CC Tahun Pembuatan 2010. *JTM*, 3(3), 27-37.
- Mahreni. (2010). Aplikasi Membran Nanokomposit sebagai Elektrolit Sel Bahan Bakar Hidrogen Pada Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Indonesian Journal of Materials Science*, 12(1), 52-58.
- Majlan, E. H., Rohendi, D., Daud, W. R. W., Husaini, T., & Haque, M. A. (2018). Electrode for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: a Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89, 117-134.
- Malasari, N. N., Onggo, H., & Rokhmat, M. (2014). Integrasi Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Fuel Cell dan Analisis Pengaruh Jumlah Sel Terhadap Performansi Berdasarkan Data Kurva Karakteristik. *Jurnal Eproc*, 1-6.
- Marlina, E., Wahyudi, S., & Yuliati, L. (2013). Produksi Browns's Gas Hasil Elektrolisis H<sub>2</sub>O dengan Katalis NaHCO<sub>3</sub>. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 4(1), 53-58.
- Martawati, M., & Hardiyana, H. (2017). Pembuatan dan Analisis Pembacaan Sensor Karbon Dioksida pada Gas Analyzer terhadap Variasi Bahan Bakar Berbasis Aplikasi Android. *Jurnal ELTEK*, 15(2), 95-112.
- Martono., & Komala, N. (2018). Kondisi Konsentrasi Karbon Dioksida di Bukittinggi Selama Kejadian El Nino 2015. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, 3(3), 118-125.
- Meyer, Q., Mansor, N., Lacoviello, F., Cullen, P.L., Jervis, R., Finegan, D., Tan, C., Bailey, J., Shearing, P. R., & Brett, D. J. L. (2017). Investigation of Membrane Electrode Assembly Hot Pressing using X-ray Computed Tomography. *Electrochimica Acta*.

- Miko, T., Kristaly, F., Bohacs, K., Sveda, M., Sycheva, A., & Janovszky, D. (2018). The Effect of Proses Control Agents and Milling Atmosphere on the Structural Changes of  $Ti_{50}Cu_{27.5}Ni_{10}Zr_{10}Co_{2.5}$  Master Alloy During Short Time Milling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 426, 1-8.
- Palanichamy, V., Frites, M., & Khan, U. M. (2016). Conversion of  $CO_2$  to Methanol in Aqueous Medium on Visible Light Active  $BiVO_4$ ,  $Cu_2BiVO_6$  Photocatalysts and in CM-n- $TiO_2$ -Cu PEC by Simultaneous Electron and Proton Transfer Reactions. *WIT Conferences*, 205, 203-204.
- Pauzi, G.A., Arwadhita, R.K., Supriyanto, A., Suciayati, S.W., Surtono, A., Junaidi., & Warsito. (2018). Desain dan Realisasi Akumulatur Elektrolit Air Laut dengan Penambahan Sodium Bicarbonat ( $NaHCO_3$ ) sebagai Sumber Energi Alternatif. *Jurnal Fisika*, 8(2), 78-85.
- Pe, N. W. (2021). Pengaruh Temperature dan Waktu Terhadap Konversi  $CO_2$  Menjadi Methanol Menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA). *Skripsi*.
- Permana, E., Cristine, I., Murti, S. D. S., & Yanti, F. M. (2020). Preparasi dan Karakterisasi Katalis Cu/ZnO dengan Support Karbon Aktif Menggunakan Aktivator  $H_3PO_4$  dan  $ZnCl_2$ . *Jurnal Teknologi*, 13(1), 6-15.
- Pratama, R. (2019). Efek Rumah Kaca terhadap Bumi. *Buletin Utama Teknik*, 14(2), 120-126.
- Pujiastuti, S., Rahimi, E., & Hendrana, S. (2009). Pembuatan Fuel Cell Stack Berbasis Membran Fision. *Indonesian Journal of Materials Sains*, 11(1), 1-5.
- Ramadan, S., & Riyanto. (2015). Conversion of Carbon Dioxide to Ethanol by Electrochemical Synthesis Method Using Brass as A Cathode. *EKSAKTA: Journal of Science and Data Analysis*, 17(2), 86-97.
- Ren, S., Shoemaker, W. R., Wang, X., Shang, Z., Klinghoffer, M., Li, S., Yu, M., He, X., White, T. A., & Liang, X. (2019). Highly Active and Selective Cu-ZnO Based Catalyst for Methanol and Dimethyl Ether Synthesis via  $CO_2$  Synthesis. *Fuel*, 239, 1125-1133.
- Rohendi, D., Majlan, E.H., Mohamad, A.B., Daud, W. R. W., Kadhum, A. A. H., & Shyuan, L. K. (2013). Characterization of Electrode and Performance Tests on MEA's With Varying Platinum Content and Under Various Operational Conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(1), 9431-9437.
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Shyuan, I. K., & Raharjo, J. (2016). Comparison of The Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Electrodes with Different Carbon Powder Content and Methods of Manufacture. *Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry*, 61-66.

- Santoso, A. D., Darmawan, R. A., & Susanto, J. P. (2011). Mikro Alga untuk Penyerapan Emisi CO<sub>2</sub> dann Pengolahan Limbah Cair di Lokasi Industri. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 3(2), 62-70.
- Sari, E. N. (2014). Peningkatan Kinerja Membran Elektrolit Polistirena Tersulfonasi untuk Aplikasi Membrane Electrode Assembly. *Skripsi*.
- Sarker, M., Rahman, M. A., Mojica, F., Mehrazi, S., Kamp, W. J. M. K., & Chuang, P. Y. A. (2021). Experimental and Computational Study of the Microporous Layer and Hydrophobic Treatment in the Gas Diffusion Layer of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell. *Journal Power of Source*, 509, 1-31.
- Schumann, J., Lunkenbein, T., Yarasov, A., Thomas, N., Schlogl, R., & Behrens, M. (2014). Synthesis and Characteritition of a Highly Active Cu/ZnO:Al Catalyst. *ChemCatChem*, 6(10), 2889-2897.
- Tamboli, A.H., Chaugule, A. A., & Kim, H. (2016). Highly Selective and Multifunctional Chitosan/Ionic Liquids Catalyst for Conversion of CO<sub>2</sub> and Methanol to Dimethyl Carbonates at Mild Reaction Conditions. *Fuel*, 166, 495-501.
- Uemoto, N., Farukawa, M., Tateishi, I., Katsumata, H., & Kaneo, S. (2019). Electrochemical Carbon Dioxide Reduction in Methanol at Cu and Cu<sub>2</sub>O-Deposited Carbon Black Electrodes. *Chem Engineering*, 3(15), 1-10.
- Utomo, D. P. (2011). Analisis Matematis dan Ekonomis Penggunaan Metanol dan Etanol pada Kompor "HD". *Jurnal Teknik Industri*, 11(1), 50-55.
- Vietanti, F., Susanti, D., Purwaningsih, H., & Kurniawan, F. (2019). Pengaruh Reduktor Zink pada Sintesis Graphene terhadap Peforma PdAu/Graphene sebagai Material Elektrokatalisis DMFC. *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan VII*. Institut Teknologi Adhi Tama Surabaya
- Wahyono, Y., Sutanto, H., & Hidayanto, E. (2017). Produksi Gas Hydrogen Menggunakan Metode Elektrolisis dari Elektrolit Air dan Air Laut dengan Penambahan Katalis NaOH. *Youngster Physics Journal*, 6(4), 353-359.
- Yazdani, N., Toroghinejad, M. R., Shabani, A., & Cavaliere, P. (2021). Effects of Process Control Agent Amount, Milling Time and Annealing Heat Treatment on the Microstructure of AlCrCuFeNi High-Entropy Alloy Synthesized Through Mechanical Alloying. *Metals*, 11(9), 1-14.
- Yu, T. L., Lin, H., Su, P., & Wang, G. (2012). Struktur Lapisan Katalis Reaktan Elektroda Membran untuk Sel Bahan Bakar Membran Pertukaran Proton. *Jurnal Sains Bahan Bakar & Energi Terbuka*, 5, 28-38.
- Yulianti, E. dan Noviandri, I. (2016). Pengembangan Materi Praktikum Elektrolisis Menggunakan Sumber Arus Tetap Ar.500. *Prosding Snips*.

- Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (2020). Faraday's Efficiency Modeling of a Proton Exchange Membrane Electrolyzer Based on Experimental Data. *Energies*, 13(4792), 1-14.
- Yodwong, B., Guilbert, D., Phattanasak, M., Kaewmanee, W., Hinaje, M., & Vitale, G. (2020). Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control: a Short Review. *Journal of Carbon Research*, 6(29), 1-20.