

**PENERAPAN *LOOPING SYSTEM* DALAM MEMANFAATKAN CO₂ SISA
DARI KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL DAN PEMURNIAN
METANOL MELALUI DISTILASI SECARA KONTINU**

SKRIPSI

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



Oleh:

YOLLANDA NURCHOLIFAH

08031281924113

**JURUSAN KIMIA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2023**

HALAMAN PENGESAHAN

**PENERAPAN *LOOPING SYSTEM* DALAM MEMANFAATKAN CO₂ SISA
DARI KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL DAN PEMURNIAN
METANOL MELALUI DISTILASI SECARA KONTINU**

SKRIPSI

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Sains Bidang Kimia

Oleh :

YOLLANDA NURCHOLIFAH

08031281924113

Indralaya, 13 Februari 2023

Mengetahui,

Pembimbing I



Dr. Dedi Rohendi, MT

NIP. 196704191993031001

Pembimbing II



Dra. Julinar, M. Si.

NIP. 196507251993032002

Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197111191997021001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa skripsi Yollanda Nurcholifah (08031281924113) dengan judul “Penerapan *Looping System* dalam Memanfaatkan CO₂ sisa dari Konversi CO₂ Menjadi Metanol dan Pemurnian Metanol Melalui Distilasi secara Kontinu” telah diseminarkan dihadapan Tim Penguji Sidang Sarjana Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 2 Februari 2023 dan telah diperbaiki, diperiksa, serta disetujui sesuai masukan yang telah diberikan.

Indralaya, 13 Februari 2023

Ketua :

1. **Dr. Ferlinahayati, M.Si.**

NIP. 197402052000032001

()

Sekretaris :

1. **Dr. Addy Rachmat, M.Si.**

NIP. 197409282000121001

()

Pembimbing:

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

NIP. 196704191993031001

()

2. **Dra. Julinar, M.Si.**

NIP. 1965072519930320

()

Penguji :

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

NIP. 1974072120011210001

()

2. **Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si.**

NIP. 197711272005011003

()

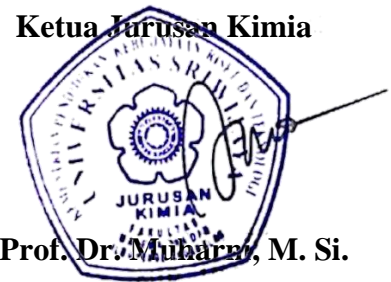
Mengetahui,



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

NIP. 197111191997021001

Ketua Jurusan Kimia



Prof. Dr. Mubarno, M. Si.

NIP. 196903041994122001

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Yollanda Nurcholifah
NIM : 08031281924113
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia

Menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri dan karya ilmiah ini belum pernah diajukan sebagai pemenuhan persyaratan untuk memperoleh gelar sarjana strata (S1) dari Universitas Sriwijaya maupun perguruan tinggi lain. Semua informasi yang dimuat dalam skripsi ini 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.

Demikianlah surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar – benarnya.

Indralaya, 13 Februari 2023
Penulis



Yollanda Nurcholifah
NIM. 08031281924113

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

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

Nama : Yollanda Nurcholifah
NIM : 08031281924113
Fakultas/Jurusan : MIPA/Kimia
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, saya menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Sriwijaya “hak bebas royalti non-eksklusif (*non-exclusively royalty-free right*) atas karya ilmiah yang berjudul: “Penerapan *Looping System* dalam Memanfaatkan CO₂ sisa dari Konversi CO₂ Menjadi Metanol dan Pemurnian Metanol Melalui Distilasi secara Kontinu”. Dengan hak bebas royalti non eksklusif ini Universitas Sriwijaya berhak menyimpan, mengalih, edit/memformatkan, 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 surat pernyataan ini saya buat dengan sungguh – sungguhnya.

Indralaya, 13 Februari 2023

Penulis



Yollanda Nurcholifah

NIM. 08031281924113

HALAMAN PERSEMBAHAN

“Barang siapa yang menempuh jalan untuk mencari ilmu, maka Allah akan mudahkan baginya jalan menuju surga.”

(HR. Bukhari dan Muslim)

“ Dan barang siapa yang bertakwa kepada Allah niscaya Allah menjadikan baginya kemudahan dalam urusan.”

(Qs. Ath-Thalaq/65:4)

Skripsi ini sebagai tanda syukurku kepada Allah Subhanahu Wa Ta'aala

Skripsi ini saya persembahkan kepada :

- Kedua orang tuaku yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tiada henti
- Seluruh keluargaku
- Pembimbing dan sahabat-sahabatku yang senantiasa memberikan dukungan dalam bentuk apapun
- Almamaterku (Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala Nikmat, Rahmat, dan Karunia yang telah dilimpahkan kepada penulis sehingga penulis akhirnya dapat menyelesaikan penulisan skripsi yang berjudul “Penerapan *Looping System* dalam Memanfaatkan CO₂ sisa dari Konversi CO₂ Menjadi Metanol dan Pemurnian Metanol Melalui Distilasi secara Kontinu”. Shalawat serta Salam semoga selalu tercurah kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, serta para saudara umat Islam di manapun berada. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Kimia Universitas Sriwijaya.

Proses penyusunan skripsi dan penelitian tidak terlepas dari berbagai hambatan dan rintangan yang penulis hadapi. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa semua ini dapat terwujud karena bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

Penulis juga menyampaikan terima kasih kepada :

1. Ibuku tersayang **Dina Perawaty** dan Ayahku tersayang **Subagio** , terima kasih atas semua doa dan dukungan yang telah diberikan kepadaku. Kata-kata semangat yang selalu Ibu dan Ayah lontarkan kepadaku menjadi penyemangatku setiap harinya dalam menyelesaikan karya ini. Peluh serta perjuangan Ibu dan Ayah yang tanpa lelah untukku hanya bisa aku balas sekarang dengan mempersembahkan karya ini.
2. Kedua adikku **Bagass** dan **Jabbar**, terima kasih atas doa dan dukungannya kepadaku.
3. Almarhum kakek dan Almarhumah nenek yang sangat besar perannya dalam perjalanan hidupku terutama pendidikanku. Semoga kalian bahagia dengan pencapaian penulis saat ini.
4. Bapak **Dr. Dedi Rohendi, M.T.** selaku pembimbing I dan Ibu **Dra. Julinar, M.Si.** selaku pembimbing II sekaligus dosen pembimbing akademik atas segala bimbingan, kesabaran dan waktu yang diluangkan kepada penulis selama menjalankan penelitian dan penyusunan skripsi hingga selesai.

5. Bapak **Dr. Muhammad Said, M.T.** dan **Dr. rer. nat. Risfidian Mohadi, M.Si.** selaku dosen pembahas sidang sarjana, terima kasih atas masukan dan saran terkait penelitian dan dalam penyelesaian skripsi.
6. Seluruh **Dosen Jurusan Kimia** FMIPA, Universitas Sriwijaya yang telah membimbing dan memberikan ilmu kepada penulis selama masa perkuliahan, terima kasih atas setiap pelajaran kehidupan yang diberikan.
7. Staff administrasi Jurusan Kimia, **Kak Chosiin** dan **Mbak Novi**, yang telah membantu penulis dalam mempersiapkan seminar dan sidang.
8. **Diri sendiri**, yang sudah mengorbankan waktu dan tenaga dalam menjalankan penelitian sampai menyelesaikan skripsi ini. Perasaan suka dan duka yang dirasakan saat perjalanan kemarin telah terbalaskan dengan selesainya karya ini. Semangat untuk perjalanan selanjutnya. Mari banggakan keluarga, terutama Ibu dan Ayah yang meletakkan harapan besar kepadamu.
9. **Muhammad Daffa Aulia Rahman.** Terima kasih karena selalu memberikan ruang dan waktu kepada penulis dalam menyampaikan semua kesedihan atau kebahagiaan yang dirasakan oleh penulis selama masa penelitian sampai dengan menyelesaikan skripsi. Terima kasih atas doa, semangat, dan rasa pengertian yang diberikan kepada penulis. Mari sukses bersama demi masa depan yang cerah!
10. Mentor PUR (**Kak Reka, Kak Dwi dan Kak Icha**), terima kasih banyak kak atas semua dukungan dan ilmu yang diberikan. Terima kasih telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian hingga skripsi. Semoga Allah membalas kebaikan-kebaikan kakak-kakak sekalian.
11. Rekan seperjuangan dari Sekolah Menengah Pertama, **Annash Nabilla Untari.** Terima kasih telah menjadi teman baik penulis hingga saat ini dan semoga selalu menjadi teman baik hingga saat di Surga nantinya. Terima kasih atas kerja samanya saat menjalani penelitian dan penyelesaian skripsi ini. Suka dan duka yang kita lewati bersama telah terbalaskan dengan penambahan 3 huruf di belakang nama kita.
12. Anti Ghibah Club, **Tasak, Icut, Lolik, Ull, Pujak, Salma,** dan **Uci.** Terima kasih karena telah menjadi salah satu peran dalam semua kenangan indah penulis dari SMA. Terima kasih atas semua dukungan kalian yang tak

terhingga baik dari dulu hingga sekarang. Semoga kita selalu menjadi teman baik hingga di Surga-Nya. Let's succeed together!

13. Mantan rekan perjuangan kedinasan penulis, **Tasak**. Terima kasih karena sudah menjadi rekan yang saling menguatkan ketika gagal dalam mendapatkan sesuatu. Setiap perjalanan yang dilewati tidak terlepas dengan hambatan dan rintangan. Mari kita selalu bangkit dalam setiap menghadapi rintangan tersebut. Istirahat boleh, tetapi jangan menyerah ya! Semangat!
14. Team Analisis KOF, **Yollan, Lolik, Sakinah, Jono, Joy, dan Liak**. Terima kasih karena sudah menjadi rekan belajar penulis semasa kuliah. Terima kasih atas waktu, kebaikan, canda tawa, dan ilmunya kepada penulis. Semangat dalam mengejar mimpi kita masing-masing!
15. **July Tasya Siahaan**. Rekan belajar sekaligus rekan voli yang sangat pengertian dan menyebalkan. Terima kasih atas kebaikannya kepada penulis yang tanpa pamrih. Terima kasih selalu meluangkan waktunya untuk membantu dan mengajari penulis semasa perkuliahan.
16. Team Ciwi-Ciwi Hebat Bangka, **Annash, Anggun, Lolik, dan Yollan**. Terima kasih telah saling memberikan dukungan semasa perkuliahan di perantauan. Terima kasih telah kebersamai dari awal perkuliahan. Penulis bersyukur mempunyai rekan seperti kalian.
17. Trio PUR, **Annash, Yati, dan Yollan**. Terima kasih telah menjadi rekan di PUR yang saling membantu dan menguatkan sejak penelitian hingga menyelesaikan skripsi. Semua badai dan topan yang telah kita hadapi selama perjalanan ini membuat kita menjadi pribadi yang lebih tangguh.
18. Rekan KP hingga penelitian, **Siti Nur Hidayati**. Terima kasih untuk semua pengalaman dan pembelajaran yang luar biasa. Perjalanan kita yang dimulai dari KP tidak terlepas dari suka dan duka, yang mana akhirnya telah melewati bersama.
19. **Indah dan Fitria**. Terima kasih atas semua dukungan yang telah diberikan kepada penulis. Terima kasih atas ilmu, canda dan tawa selama perkuliahan. Setiap pertemuan pasti akan selalu ada perpisahan. Semoga kita akan bertemu kembali dan sukses untuk kita semua.

20. **Semua rekan Bujang Gadis Kampus Sumatera Selatan 2022.** Terima kasih telah menjadi teman yang selalu mendukung penulis dalam menyelesaikan skripsi. Terima kasih atas semua kata-kata semangat kalian kepada penulis. Semangat untuk kita semua dalam menjalankan amanah hingga PBGK 2023.
21. **Teman-teman seperjuangan kimia 2019,** terima kasih atas bantuan dan kebersamaannya dari maba hingga akhir. Terima kasih untuk semua pengalaman dan pembelajaran yang luar biasa bersama kalian. Semoga sukses untuk kita semua.
22. **Seluruh kakak dan adik tingkat Kimia FMIPA Universitas Sriwijaya** serta semua pihak yang telah membantu memberikan saran dan masukan baik secara langsung maupun tidak langsung dalam pembuatan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu namanya.

Dalam penulisan skripsi ini, penulis menyadari masih banyak terdapat kekurangan, untuk itu penulis mengharapkan saran dan masukan yang membangun dari pembaca. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi kita semua, Aamiin ya Rabbal Aalamin.

Indralaya, 13 Februari 2023

Penulis

SUMMARY

LOOPING SYSTEM APPLICATION IN UTILIZING RESIDUAL CO₂ FROM CONVERSION CO₂ TO METHANOL AND METHANOL PURIFICATION THROUGH CONTINUOUS DISTILLATION

Yollanda Nurcholifah: Supervised by Dr. Dedi Rohendi, M.T and Dra. Julinar, M.Si
Department of Chemistry, Faculty of Mathematics and Natural Science, Sriwijaya
University

x + 54 pages, 3 tables, 11 images, 13 appendices

CO₂ conversion can produce compounds that can be used as raw materials and fuels, such as methanol. Not all of the supplied CO₂ gas can be converted to methanol, but there is residual CO₂ that is not converted. The Looping system method is used to utilize unconverted residual CO₂ so that it can be reused in the system to produce methanol. CO₂ gas is supplied by freeing gas flow to MFC (Mass Flow Controller) 1, then flowed to MFC 2 with a flow rate of 480 mL/minute at a voltage of 1.8 V. The residual CO₂ flows back to MFC 3 with the help of a peristaltic pump. The residual CO₂ returned to the system will help reduce the CO₂ supply. It is known from MFC 1 which shows a decrease in flow rate. The methanol product produced on the cathode side was purified by continuous distillation method and concentration of methanol was measured using the Methanol Analyser Analox AM5. The operation of CO₂ conversion with a looping system on a multi-stack electrolyzer is carried out in parallel circuits using varying operating times, namely for 2, 4, 6, and 8 hours. The percentage value of the converted CO₂ efficiency and the CO₂ flow rate from the inlet tube did not change significantly at various operating times with the highest converted CO₂ efficiency percentage values being at 2 and 6 hours of operation, amounting to 83.333% and the lowest MFC1 input CO₂ flow rate at 4 hours of operation hour by 434 mL/minute. Currents that tend to be stable are at 2 hours of operating time, starting with an electric current of 0.32 A and ending at a current of 0.33 A. The highest percentage of methanol from the conversion before distillation and after distillation is at 2 hours of operation, that is, respectively percentages of 7.83 and 63.850 % (w/v).

Keywords : Methanol Analyser, Looping System, Mass Flow Controller,
Elektroliser Multi-Stack, CO₂ Conversion

Citation : 62 (2011-2022)

RINGKASAN

PENERAPAN *LOOPING SYSTEM* DALAM MEMANFAATKAN CO₂ SISA DARI KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL DAN PEMURNIAN METANOL MELALUI DISTILASI SECARA KONTINU

Yollanda Nurcholifah: Dibimbing oleh Dr. Dedi Rohendi, M.T dan Dra. Julinar, M.Si
Jurusan Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas
Sriwijaya

x + 54 halaman, 3 tabel, 11 gambar, 13 lampiran

Konversi CO₂ dapat memproduksi senyawa yang dapat digunakan sebagai bahan baku dan bahan bakar, seperti metanol. Gas CO₂ yang disuplai tidak seluruhnya dapat diubah menjadi metanol, melainkan terdapat CO₂ sisa yang tidak terkonversi. Metode *looping system* digunakan untuk memanfaatkan CO₂ sisa yang tidak terkonversi agar dapat digunakan kembali ke dalam sistem untuk menghasilkan metanol. Gas CO₂ disuplai dengan membebaskan aliran gas pada MFC (*Mass Flow Controller*) 1, kemudian dialirkan ke MFC 2 dengan laju alir 480 mL/menit pada tegangan sebesar 1,8 V. Gas CO₂ yang tersisa dialirkan kembali ke MFC 3 dengan bantuan pompa peristaltik. CO₂ sisa yang dikembalikan pada sistem akan membantu mengurangi suplai CO₂. Hal ini diketahui dari MFC 1 yang menunjukkan adanya penurunan laju alir. Produk metanol yang dihasilkan pada sisi katoda dimurnikan dengan metode distilasi secara kontinu dan diukur kadarnya menggunakan alat *Methanol Analyser Analox AM5*. Pengoperasian konversi CO₂ dengan *looping system* pada elektroliser *multi-stack* dilakukan dengan rangkaian listrik paralel menggunakan waktu operasi yang bervariasi, yaitu selama 2, 4, 6, dan 8 jam. Nilai persentase efisiensi CO₂ terkonversi dan laju alir CO₂ dari tabung *inlet* tidak berubah signifikan pada waktu operasi bervariasi dengan nilai persentase efisiensi CO₂ terkonversi tertinggi berada pada waktu operasi 2 dan 6 jam, sebesar 83,333% dan laju alir CO₂ input MFC1 terendah pada waktu operasi 4 jam sebesar 434 mL/menit. Arus yang cenderung stabil berada pada waktu operasi 2 jam, diawali arus listrik sebesar 0,32 A dan diakhiri pada arus 0,33 A. Persentase metanol tertinggi dari hasil konversi sebelum distilasi dan sesudah distilasi berada pada waktu operasi 2 jam, yaitu masing-masing persentase sebesar 7,83 dan 63,850 % (b/v).

Keywords : *Methanol Analyser, Looping System, Mass Flow Controller, Elektroliser Multi-Stack, Konversi CO₂*

Sitasi : 62 (2011-2022)

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN KARYA ILMIAH.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
SUMMARY	xi
RINGKASAN	xii
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL.....	xvii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Karbon Dioksida (CO ₂)	4
2.2 Konversi CO ₂	4
2.3 MEA (<i>Membrane Electrode Assembly</i>)	5
2.3.1 Membran Nafion.....	6
2.3.2 Elektroda.....	6
2.3.2.1 GDL (<i>Gas Diffusion Layer</i>).....	7
2.3.2.2 Katalis Tembaga (Cu).....	7
2.3.2.3 Katalis Platina (Pt).....	8
2.4 Metanol.....	8
2.5 <i>Looping System</i>	9

2.6 Distilasi.....	10
2.7 <i>Methanol Analyser</i>	10
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	11
3.1 Waktu dan Tempat	11
3.2 Alat dan Bahan	11
3.2.1 Alat	11
3.2.2 Bahan.....	11
3.3 Prosedur Penelitian.....	11
3.3.1 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	11
3.3.2 Preparasi Elektroda	12
3.3.2.1 Elektroda Cu ₂ O-ZnO/C.....	12
3.3.2.2 Elektroda Pt/C.....	12
3.3.3 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	12
3.3.4 Konversi CO ₂ Menjadi CH ₃ OH dengan <i>Looping System</i>	13
3.3.5 Distilasi Metanol Hasil Konversi CO ₂ secara Kontinu	14
3.3.6 Pengukuran Kadar Metanol dengan <i>Methanol Analyser</i>	14
3.4 Analisis Data	15
3.4.1 Efisiensi Penggunaan CO ₂ dan Efektivitas CO ₂ sisa dengan <i>Looping System</i>	15
3.4.2 Persentase Konversi CO ₂ dan Metanol dengan <i>Looping</i> <i>System</i> sebelum distilasi dan setelah distilasi.....	15
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	18
4.1 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	18
4.2 Pengaruh <i>Looping System</i> terhadap Arus Listrik dan Laju Alir CO ₂	20
4.2.1 Persentase Efisiensi Penggunaan CO ₂ dan Efektivitas CO ₂ sisa	23
4.2.2 Persentase Konversi CO ₂ dan Metanol dengan <i>Looping</i> <i>System</i> sebelum distilasi dan setelah distilasi	25
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	29
5.1 Kesimpulan.....	29
5.2 Saran.....	29

DAFTAR PUSTAKA	30
LAMPIRAN.....	37

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Struktur Kimia Nafion	6
Gambar 2. Lapisan <i>Gas Diffusion Layer</i>	7
Gambar 3. Konversi CO ₂ Menjadi CH ₃ HOH dengan <i>Looping System</i>	14
Gambar 4. Distilasi Metanol Hasil Konversi CO ₂ secara Kontinu	14
Gambar 5. <i>Membrane Electrode Assembly</i>	20
Gambar 6. Reaksi reduksi CO ₂ menjadi metanol.....	20
Gambar 7. Grafik pengaruh waktu operasi terhadap jumlah laju alir CO ₂ yang terkonversi dan CO ₂ sisa	21
Gambar 8. Grafik pengaruh waktu terhadap arus yang dihasilkan	22
Gambar 9. Grafik efisiensi penggunaan CO ₂ dari tabung.....	23
Gambar 10. Grafik efektivitas CO ₂ sisa	25

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Reaksi konversi CO ₂ menjadi metanol secara reduksi elektrokimia..	5
Tabel 2. Pengaruh waktu operasi terhadap produksi metanol sebelum distilasi dan sesudah distilasi.....	16
Tabel 3. Pengaruh waktu operasi terhadap produksi metanol sebelum distilasi dan sesudah distilasi.....	28

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Skema Penelitian Konversi CO ₂ Menjadi Metanol pada Elektroliser <i>Multi-stack</i> dengan <i>Looping System</i> dan Distilasi Kontinu	38
Lampiran 2. Skema Preparasi GDL (<i>Gas Diffusion Layer</i>).....	40
Lampiran 3. Skema Preparasi Elektroda Cu ₂ O-ZnO/C (1 mg/cm ²)	41
Lampiran 4. Skema Preparasi Elektroda Pt/C (1 mg/cm ²).....	42
Lampiran 5. Skema Aktivasi Membran Nafion 117 dan Preparasi MEA.....	43
Lampiran 6. Perhitungan Pembuatan GDL (<i>Gas Diffusion Layer</i>).....	44
Lampiran 7. Perhitungan Pembuatan Elektroda Pt/C dan Cu ₂ O-ZnO/C	45
Lampiran 8. Perhitungan Aktivasi Membran.....	46
Lampiran 9. Data dan Perhitungan Laju Alir CO ₂ di MFC 1, MFC 2, dan MFC 3 pada waktu operasi bervariasi.....	46
Lampiran 10. Perhitungan Efisiensi Penggunaan CO ₂	47
Lampiran 11. Perhitungan Efektivitas CO ₂ Sisa	50
Lampiran 12. Tabel dan Perhitungan <i>Yield</i> Metanol Sebelum Distilasi dan Sesudah Distilasi.....	52
Lampiran 13. Grafik hubungan konsentrasi metanol terhadap titik didih metanol.....	55
Lampiran 14. Perhitungan Efisiensi Konversi CO ₂	55
Lampiran 15. Alat dan Bahan yang digunakan.....	58

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan emisi CO₂ di bumi dapat menyebabkan terjadinya pemanasan global. Jika pemanasan global terus berlanjut, akan menyebabkan perubahan iklim yang signifikan, kenaikan permukaan laut, peningkatan keasaman laut, peristiwa cuaca ekstrem, dan lain – lain, sehingga banyak upaya yang telah dilakukan untuk menurunkan kandungan CO₂ dari atmosfer (Paul *et al.*, 2021; Zarandi *et al.*, 2019). Salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk mengurangi dampak buruk emisi CO₂ yaitu melalui proses konversi. Konversi CO₂ dapat memproduksi senyawa yang dapat digunakan sebagai bahan baku dan bahan bakar, seperti metanol. Adapun beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengonversi CO₂ menjadi metanol, diantaranya radiolisis, fotokatalisis, elektrokatalisis, termokatalisis serta reduksi elektrokimia (Kumaravel *et al.*, 2020). Metode yang sering digunakan untuk mengonversi CO₂ menjadi senyawa alkohol seperti metanol adalah metode reduksi elektrokimia. Proses konversi CO₂ dengan metode reduksi elektrokimia telah mendapatkan lebih banyak perhatian karena tingkat konversi yang lebih tinggi dan pengerjaannya lebih sederhana (Zhang *et al.*, 2018).

Konversi CO₂ melalui metode reduksi elektrokimia menjadi metanol dilakukan dengan menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA). Penelitian Win Pe (2021) menunjukkan bahwa tidak semua CO₂ yang disuplai terkonversi menjadi metanol dalam proses konversi CO₂, melainkan terdapat CO₂ sisa yang tidak bereaksi. Hal ini menandakan pemakaian CO₂ dalam proses pembentukan metanol secara reduksi elektrokimia belum maksimal. CO₂ sisa tersebut dapat digunakan kembali ke sistem dengan penerapan *looping system*. *Looping system* merupakan teknologi alternatif yang efisien untuk proses konversi CO₂ menjadi metanol sebagai bahan bakar dengan memanfaatkan CO₂ sisa dari proses konversi CO₂ yang terbuang untuk digunakan kembali ke dalam sistem untuk menghasilkan metanol. Penelitian Hu (2018) menunjukkan proses konversi CO₂ menjadi metanol dapat dioptimalkan dengan menerapkan *looping system*, dengan reaksi yang didekomposisi menjadi beberapa sub-reaksi, berdasarkan reaksi dan regenerasi

mediator padat, yang disebut material *looping* (umumnya oksida logam) yang dilakukan di reaktor terpisah atau sebagai langkah selanjutnya dalam reaktor tunggal. Kelemahan konsep *looping system* ini adalah rumit dan tidak ekonomis (Spallina *et al.*, 2019; Hu *et al.*, 2018).

Proses konversi CO₂ dengan *looping system* pada penelitian ini hanya mengembalikan CO₂ sisa yang merupakan hasil reaksi proses konversi CO₂ sebelumnya dengan laju alir CO₂ sisa yang masuk pada *looping system* akan dimonitor pada *mass flow controller* dan hasil produk metanol ditampung ke dalam penampung yang berisi air sehingga diperlukan tahapan pemurnian, yaitu distilasi secara kontinu. Distilasi kontinu dimaksudkan untuk melakukan proses distilasi metanol hingga tidak ada lagi distilat yang menetes dan mengembalikan sisa air distilasi sebagai air inlet untuk reaktor penampung produk metanol untuk selanjutnya didistilasi kembali, kemudian dianalisis menggunakan *methanol analyser*.

Penelitian Hayati (2022) melakukan proses konversi CO₂ dengan laju alir optimum sebesar 160 mL/menit pada elektroliser *stack* ganda serta menentukan waktu operasi optimum pada elektroliser *multi-stack*. Laju alir dan waktu operasi termasuk faktor yang mempengaruhi hasil konversi CO₂ menjadi metanol. Penggunaan laju alir CO₂ yang tetap dalam proses konversi CO₂ tidak mempengaruhi hasil reduksi CO₂ secara elektrokimia (Albo *et al.*, 2015; Endrődi *et al.*, 2017). Penelitian ini memanfaatkan sisa CO₂ yang tidak terkonversi menjadi metanol dalam proses reduksi elektrokimia dengan laju alir CO₂ tetap yaitu sebesar 480 mL/menit karena memiliki 3 lubang sebagai media masuknya gas CO₂ ke katoda dengan penerapan metode *looping system* menggunakan MEA elektroliser *multi-stack*, serta mengamati pengaruh *looping system* terhadap persentase CO₂ terkonversi, arus listrik, dan laju alir CO₂ dari tabung inlet pada waktu operasi bervariasi.

1.2 Rumusan Masalah

Konversi CO₂ menjadi metanol akan menghasilkan CO₂ sisa. CO₂ sisa ini memerlukan upaya untuk dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan baku, sehingga dapat dikonversikan kembali. Oleh karena itu, perlu dilakukan penerapan

looping system agar CO₂ sisa dapat dikonversikan secara maksimal. Selain itu, upaya untuk meningkatkan kadar metanol hasil konversi perlu dilakukan melalui distilasi secara kontinu. Dengan demikian, rumusan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menghitung pengaruh *looping system* terhadap persentase efisiensi CO₂ terkonversi, arus listrik, dan laju alir CO₂ dari tabung inlet pada waktu operasi ?
2. Menghitung pengaruh waktu operasi terhadap persentase metanol hasil konversi sebelum dan sesudah proses distilasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah

1. Menentukan pengaruh *looping system* terhadap persentase efisiensi CO₂ terkonversi, arus listrik, dan laju alir CO₂ dari tabung inlet pada waktu operasi.
2. Menentukan pengaruh waktu operasi terhadap persentase metanol hasil konversi sebelum dan sesudah proses distilasi.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan persentase produk metanol dari hasil konversi CO₂ dengan penerapan *looping system* menggunakan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) pada elektroliser *multi-stack* dengan bantuan katalis Cu₂O-ZnO/C dan Pt/C melalui pemurnian distilasi secara kontinu.

DAFTAR PUSTAKA

- Albo, J., & Irabien, A. (2015). Cu₂O-loaded gas diffusion electrodes for the continuous electrochemical reduction of CO₂ to methanol. *Journal of Catalysis*, 343, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.11.014>
- Albo, J., Sáez, A., Solla-Gullón, J., Montiel, V., & Irabien, A. (2015). Production of methanol from CO₂ electroreduction at Cu₂O and Cu₂O/ZnO-based electrodes in aqueous solution. *Applied Catalysis B: Environmental*, 176–177, 709–717. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.055>
- Anastasya, S. (2022). Konversi Karbon Dioksida (CO₂) Menjadi Metanol dengan Metode Elektrokimia Menggunakan GDE (Gas Diffusion Electrode) dengan Elektrolit KHCO₃ di Katoda. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sriwijaya : Palembang.
- Chen, M., Zhao, C., Sun, F., Fan, J., Li, H., & Wang, H. (2020). Research progress of catalyst layer and interlayer interface structures in membrane electrode assembly (MEA) for proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) system. *ETransportation*, 5, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100075>
- Cherevko, S., Kulyk, N., & Mayrhofer, K. J. J. (2016). Durability of platinum-based fuel cell electrocatalysts: Dissolution of bulk and nanoscale platinum. *Nano Energy*, 29, 275–298. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.03.005>
- Cseri, L., Razali, M., Pogany, P., & Szekely, G. (2018). *Green Chemistry* (B. Torok & T. Dransfield (eds.)). Amsterdam : Elsevier.
- Endrődi, B., Bencsik, G., Darvas, F., Jones, R., Rajeshwar, K., & Janáky, C. (2017). Continuous-flow electroreduction of carbon dioxide. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62, 133–154. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2017.05.005>
- Fan, L. S., Zeng, L., Wang, W., & Luo, S. (2012). Chemical looping processes for CO₂ capture and carbonaceous fuel conversion - Prospect and opportunity. *Energy and Environmental Science*, 5(6), 7254–7280. <https://doi.org/10.1039/c2ee03198a>
- Fofana, D., Natarajan, S. K., Bénard, P., & Hamelin, J. (2013). High Performance PEM Fuel Cell with Low Platinum Loading at the Cathode Using Magnetron Sputter Deposition. *ISRN Electrochemistry*, 2013, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2013/174834>
- Gulluce, H. (2019). Production and Use of Carbon Dioxide Gas in Turkey. *International Journal of Innovative Research and Reviews*, 3(2).

- Guzmán, H., Salomone, F., Batuecas, E., Tommasi, T., Russo, N., Bensaid, S., & Hernández, S. (2021). How to make sustainable CO₂ conversion to Methanol: Thermocatalytic versus electrocatalytic technology. *Chemical Engineering Journal*, 417 (2021) . <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127973>
- Hayati, B. (2022). Pengaruh Laju Alir dan Waktu Operasi pada Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia Menggunakan Elektroliser Multi-Stack. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sriwijaya : Palembang.
- Hazarika, J., & Manna, M. S. (2019). Electrochemical reduction of CO₂ to methanol with synthesized Cu₂O nanocatalyst: Study of the selectivity. *Electrochimica Acta*, 328, 135053. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135053>
- Herlambang, Y. D., & Roihatin, A. (2019). Teknologi Pembangkit Listrik Energi Baru Terbarukan Menggunakan Proton Exchange Membrane (PEM) Fuel Cell Skala Kecil. *Eksergi*, 15(1), 27. <https://doi.org/10.32497/eksergi.v15i1.1464>
- Hou, S., Liao, S., Dang, D., Zou, H., Shu, T., & Du, L. (2014). Self-humidifying membrane electrode assembly prepared by adding microcrystalline cellulose in anode catalyst layer as preserve moisture. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(24), 12842–12848. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.06.067>
- Hu, J., Galvita, V. V., Poelman, H., & Marin, G. B. (2018). Advanced chemical looping materials for CO₂ utilization: A review. *Materials*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/ma11071187>
- Institute, M. (2022). Boiling and Flash Points of Methanol-Water Solutions. Washington DC : *Methanol Institute*.
- Iriarte, D., Andrada, H., Maldonado Ochoa, S. A., Silva, O. F., Vaca Chávez, F., & Carreras, A. (2022). Effect of acid treatment on the physico-chemical properties of Nafion 117 membrane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(49), 21253–21260. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.246>
- Jayakumar, A., Sethu, S. P., Ramos, M., Robertson, J., & Al-Jumaily, A. (2015). A technical review on gas diffusion, mechanism and medium of PEM fuel cell. *Ionics*, 21(1), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11581-014-1322-x>
- Jia, J., Liu, X., Liu, F., Yin, H., & Ding, Y. (2022). Designing independent water transport channels to improve water flooding in ultra-thin nanoporous film cathodes for PEMFCs. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(49), 21261–21272. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.04.243>

- Kanza, S., Silvianti, R., Ramadhan, D. S., Cahayo, M., & Sukardi. (2021). Comparison of the separation process of crude citronella oil using vacuum fractionation distillation on a pilot plant scale and laboratory scale. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/733/1/012013>
- Kortlever, R., Shen, J., Schouten, K. J. P., Calle-Vallejo, F., & Koper, M. T. M. (2015). Catalysts and Reaction Pathways for the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 6(20), 4073–4082. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.5b01559>
- Kumar, A., & Malavika, B. G. (2021). Methanol Poisoning- A Review. *International Journal Of Scientific Research*, 10(05), 49–51.
- Kumaravel, V., Bartlett, J., & Pillai, S. C. (2020). Photoelectrochemical Conversion of Carbon Dioxide (CO₂) into Fuels and Value-Added Products. *ACS Energy Letters*, 486–519. <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.9b02585>
- Kwon, H., Oh, K. C., Choi, Y., Chung, Y. G., & Kim, J. (2021). Development and application of machine learning-based prediction model for distillation column. *International Journal of Intelligent Systems*, 36(5), 1970–1997. <https://doi.org/10.1002/int.22368>
- Labidi, A. (2022). Continuous Distillation process. *Research Gate and AfricArXiv Journal*, 1(1), <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25643.92960>
- Lebedeva, M. V., Ragutkin, A. V., & Yashtulov, N. A. (2019). The Polymer Materials as Effective Matrix-Supports in Autonomous Energy Sources. *International Journal of Applied Engineering Research*, 14(21), 4014–4018.
- Lee, F. C., Ismail, M. S., Ingham, D. B., Hughes, K. J., Ma, L., Lyth, S. M., & Pourkashanian, M. (2022). Alternative architectures and materials for PEMFC gas diffusion layers: A review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 166, 112640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112640>
- Lee, S., Son, I., Lee, J., Lee, J., Kim, Y., Lee, G., Lee, S., Cho, Y., & Bae, D. (2015). Effect of Aging Treatment on Bonding Interface Properties of Hot-Pressed Cu / Al Clad Material. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(3), 525–530. <https://doi.org/10.1007/s12541-015-0071-8>
- Li, J., Ni, Z., Ji, Y., Zhu, Y., Liu, H., Zhang, Y., Gong, X. Q., Zhong, Z., & Su, F. (2019). ZnO supported on Cu₂O{100} enhances charge transfer in dimethyldichlorosilane synthesis. *Journal of Catalysis*, 374, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.02.029>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.007>
- Mališ, J., Mazúr, P., Paidar, M., Bystron, T., & Bouzek, K. (2016). Nafion 117 stability under conditions of PEM water electrolysis at elevated temperature and pressure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(4), 2177–2188. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.102>
- Marcos, F. C. F., Cavalcanti, F. M., Petrolini, D. D., Lin, L., Betancourt, L. E., Senanayake, S. D., Rodriguez, J. A., Assaf, J. M., Giudici, R., & Assaf, E. M. (2022). Effect of operating parameters on H₂/CO₂ conversion to methanol over Cu-Zn oxide supported on ZrO₂ polymorph catalysts: Characterization and kinetics. *Chemical Engineering Journal*, 427(May 2021). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130947>
- Mutlu, M. (2011). Biosensors In Food Processing, Safety, And Quality Control. In D. W. Sun (Ed.), *Contemporary Food Engineering*. Taylor and Francis Group, LLC.
- Ojemaye, M. O., & Okoh, A. I. (2021). Global research direction on Pt and Pt based electro-catalysts for fuel cells application between 1990 and 2019: A bibliometric analysis. *International Journal of Energy Research*, 45(11), 15783–15796. <https://doi.org/10.1002/er.6907>
- Park, J., Oh, H., Ha, T., Lee, Y. Il, & Min, K. (2015). A review of the gas diffusion layer in proton exchange membrane fuel cells: Durability and degradation. *Applied Energy*, 155, 866–880. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.06.068>
- Paul, S., Kumar, R., Kukmar, A., & Paul, R. (2021). Electrochemical conversion of greenhouse gas CO₂ to renewable energy and there by control air pollution in a robotic controlled fuel cell. *International Journal of Chemical Sciences*, 19(10), 1–6.
- Pujiastuti, S., & Onggo, H. (2016). Effect of various concentration of sulfuric acid for Nafion membrane activation on the performance of fuel cell. *AIP Conference Proceedings*, 1711. <https://doi.org/10.1063/1.4941639>
- Putra, I. G. S. A., Wartini, N. M., & Wrasati, L. P. (2015). Pengaruh Suhu dan Lama Distilasi terhadap Rendemen dan Karakteristik Distilat Alkohol dari Cairan Pulpa Hasil Samping Fermentas. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri*, 3(3), 58–66.

- Rapiyanta, P. T., Sutopo, B., & Soesanti, I. (2012). Pengaturan Suhu Destilator Pada Proses Destilasi Bio-Etanol Berbasis Kendali Proporsional Menggunakan Plc Omron Cpm2a. *Paradigma*, XIV(1), 1–9.
- Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Wan Daud, W. R., Hassan Kadhum, A. A., & Shyuan, L. K. (2013). Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), 9431–9437. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.03.093>
- Roy, A., Jadhav, H. S., Park, S. J., & Seo, J. G. (2021). Recent advances in the possible electrocatalysts for the electrochemical reduction of carbon dioxide into methanol. *Journal of Alloys and Compounds*, 887, 161449. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161449>
- Seader, J. D., Henley, E. J., & Roper, D. K. (2011). *Separation Process Principles Chemical and Biochemical Operations* (Hoboken). John Wiley & Sons, Inc.
- Spallina, V., Motamedi, G., Gallucci, F., & van Sint Annaland, M. (2019). Techno-economic assessment of an integrated high pressure chemical-looping process with packed-bed reactors in large scale hydrogen and methanol production. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 88(May), 71–84. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.05.026>
- Sun, J., & Tang, Q. (2021). Review of Artificial Neural Network and Its Application Research in Distillation. *Journal of Engineering Research and Reports*, November 2021, 44–54. <https://doi.org/10.9734/jerr/2021/v21i317451>
- Suprianto, F. D., Anggono, W., & Tanoto, M. S. C. (2016). Effect of carbon dioxide on flame characteristics in biogas external premix combustion. *International Journal of Applied Engineering Research*, 11(4), 2240–2243.
- Suyanta. (2019). *Buku Ajar Kimia Unsur*. Yogyakarta : UGM Press.
- Theodosiou, P., Greenman, J., & Ieropoulos, I. (2019). Towards monolithically printed Mfcs: Development of a 3d-printable membrane electrode assembly (mea). *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(9), 4450–4462. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.163>
- Toldra, F., & Nollet, L., M., L. (2017). Advances in Food Diagnostics. In *Wiley-Blackwell*. <https://doi.org/10.1002/9781119105916.ch9>
- Toma, K., Iwasaki, K., Zhang, G., Iitani, K., Arakawa, T., Iwasaki, Y., & Mitsubayashi, K. (2021). Biochemical methanol gas sensor (Meoh bio-sniffer) for non-invasive assessment of intestinal flora from breath methanol. *Sensors*, 21(14). <https://doi.org/10.3390/s21144897>

- Van Dao, D., Adilbish, G., Lee, I. H., & Yu, Y. T. (2019). Enhanced electrocatalytic property of Pt/C electrode with double catalyst layers for PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*(45), 24580–24590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.156>
- Virgita, R. S. (2015). Pengaruh Corporate Social Responsibility Dan Efek Indonesia. *Artikel Ilmiah*, *1–15*(1).
- Wang, D., Joshi, A., & Fan, L. S. (2022). Chemical looping technology – a manifestation of a novel fluidization and fluid-particle system for CO₂ capture and clean energy conversions. *Powder Technology*, *409*(March), 117814. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117814>
- Wang, J., Hao, C., Zhang, Q., Meng, Q., & Liu, H. (2022). Research advances on photo-assisted CO₂ conversion to methanol. *Applied Catalysis A: General*, *643*(June), 118738. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2022.118738>
- Wang, Z., & Nagao, Y. (2014). Effects of Nafion impregnation using inkjet printing for membrane electrode assemblies in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta*, *129*, 343–347. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2014.02.133>
- Win Pe, N. (2021). Pengaruh Temperatur Dan Waktu Terhadap Konversi CO₂ Menjadi Metanol Menggunakan Membrane Electrode Assembly (MEA). *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Sriwijaya : Palembang.
- Xing, L., Shi, W., Su, H., Xu, Q., Das, P. K., Mao, B., & Scott, K. (2019). Membrane electrode assemblies for PEM fuel cells: A review of functional graded design and optimization. *Energy*, *177*, 445–464. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.084>
- Yang, J., He, Y., Zhang, X., Yang, W., Li, Y., Li, X., Chen, Q., Chen, X., Du, K., & Yan, Y. (2021). Improving the electrical conductivity of copper/graphene composites by reducing the interfacial impurities using spark plasma sintering diffusion bonding. *Journal of Materials Research and Technology*, *15*, 3005–3015. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.09.100>
- Yang, K., Kas, R., Smith, W. A., & Burdyny, T. (2021). Role of the Carbon-Based Gas Diffusion Layer on Flooding in a Gas Diffusion Electrode Cell for Electrochemical CO₂ Reduction. *ACS Energy Letters*, *6*(1), 33–40. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.0c02184>
- Zarandi, R. F., Rezaei, B., Ghaziaskar, H. S., & Ensafi, A. A. (2019). Electrochemical conversion of CO₂ to methanol using a glassy carbon electrode, modified by Pt@histamine-reduced graphene oxide. *International*

Journal of Hydrogen Energy, 44(59), 30820–30831.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.09.237>

Zeng, L., & Zhao, T. S. (2015). Integrated inorganic membrane electrode assembly with layered double hydroxides as ionic conductors for anion exchange membrane water electrolysis. *Nano Energy*, 11, 110–118.
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2014.10.019>

Zhang, Q. Y., et.al. (2018). Computational studies of electrochemical CO₂ reduction on chalcogen doped Cu₄ cluster. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(21), 9935–9942. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.033>

Zheng, Z., Fang, Y., Yang, J., Ma, L., Meng, Q., Lin, X., Liu, Y., Zhang, Q., & Wang, T. (2022). A highly active and hydrothermal-resistant Cu/ZnO@NC catalyst for aqueous phase reforming of methanol to hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(2), 950–961.
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.070>