



FORUM IDEASI RISET PERTAMINA – UNIVERSITAS SRIWIJAYA

PROPOSAL RISET

Konversi Karbondioksida menjadi Metanol untuk Bahan Bakar Fuel Cell dengan Metode Reduksi Elektrokimia

Anggota Team Peneliti:

Dr. Dedi Rohendi, M.T (ketua/Peneliti Utama)
Dr. Nirwan Syarif, M.Si (Anggota/Peneliti Madya)
Dr. Addy Rachmat, M.Si (Anggota/Peneliti Madya)
Dwi Hawa Yulianti, S.Si., M.Si (Teknisi/Pembantu Peneliti)
Dea Radestia Rahmah, S.Si (Teknisi/Pembantu Peneliti)

Konversi Karbondioksida menjadi Metanol untuk Bahan Bakar Fuel Cell dengan Metode Reduksi Elektrokimia (Tahun Kedua)

Dedi Rohendi, Nirwan Syarif, Addy Rachmat, Muhammad Said

1. Deskripsi Riset

Riset yang akan dilakukan merupakan aplikasi prinsip elektrokimia untuk mengubah karbondioksida menjadi bahan bakar yang bermanfaat. Seperti diketahui, karbondioksida merupakan salah satu polutan sumber gas rumah kaca dan dihasilkan dari proses produksi dan pengolahan minyak dan gas bumi. Ada beberapa mekanisme reaksi pemanfaatan CO₂ menghasilkan bahan bakar, antara lain; menghasilkan syn gas, metana, metanol dan hidrogen. Produk yang akan dihasilkan tergantung pada kondisi reaksi dan penggunaan katalis yang berbeda. Pada penelitian ini akan dilakukan konversi CO₂ secara elektrokimia untuk menghasilkan metanol dan juga hidrogen sebagai bahan bakar untuk fuel cell melalui dua jalur. Jalur pertama adalah konversi CO₂ secara elektrokimia langsung menjadi metanol dan jalur kedua adalah melalui elektrolisis bersama CO₂ dan air melalui tahapan pembentukan syn gas (CO dan H₂) untuk menghasilkan metanol. Karbondioksida (CO₂) akan direduksi pada sisi katoda menghasilkan produk bahan bakar dan pada sisi anoda akan dioksidasi air (H₂O) menghasilkan elektron dan H⁺. Ion H⁺ akan menyebrang ke katoda melalui membrane elektrolit penghantar proton berupa nafion. Sistem elektrokimia yang digunakan sama seperti pada fuel cell. Teknologi fuel cell dan hidrogen merupakan bidang yang selama ini diteliti dan dikembangkan di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya (UNSRI).

Riset ini menggabungkan tiga topik riset yang ditawarkan, yaitu *Pengembangan teknologi capture CO₂*, *Pengembangan CO₂ sebagai bahan bakar* (khususnya methanol dan Hidrogen) dan *penggunaan bahan bakar hasil konversi CO₂ untuk bahan bakar fuel cell*, baik secara langsung maupun tidak langsung. Sumber energi untuk elektrolisis berasal dari solar cell yang telah terpasang di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya. Keuntungan dari metode elektrolisis adalah reaksi cukup sederhana dan dalam kondisi ambien. Selain itu, pemanfaatan solar cell untuk proses elektrolisis akan mengurangi pemakaian energi listrik dari PLN.

Penelitian tahun pertama melalui Kegiatan Forum Ideasi Riset Bersama Pertamina-Universitas tahun 2018 sudah memasuki persiapan penandatanganan kontrak. Riset pada tahun pertama difokuskan pada konversi CO₂ dengan menggunakan metode reduksi elektrokimia langsung menjadi methanol. Sementara proposal riset tahun kedua ini difokuskan pada konversi CO₂ menjadi methanol secara tidak langsung

2. Latar Belakang

Karbondioksida merupakan gas yang banyak dihasilkan dalam produksi dan pengolahan minyak serta gas bumi. Keberadaan CO₂ merupakan permasalahan tersendiri karena kehadirannya dalam jumlah besar menyebabkan efek rumah kaca (Albo *et al.*, 2015). Pemanfaatan CO₂ menjadi sangat penting karena dapat mengatasi dua hal sekaligus, yaitu mereduksi kehadiran gas rumah kaca dan menjadikan CO₂ sebagai bahan baku untuk menghasilkan bahan bakar yang sangat dibutuhkan.

Diantara metode untuk mengkonversi CO₂ menjadi bahan bakar adalah metode elektrolisis yang mempunyai keunggulan ramah lingkungan, dapat mengkonversi CO₂ menjadi berbagai jenis bahan bakar dan bekerja pada suhu ambien (Venka, 2016). Rencana penggunaan metode elektrolisis pada penelitian ini didasarkan pada ketersediaan fasilitas solar cell yang dimiliki Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya, sehingga

sumber energi yang digunakan adalah sumber energi terbarukan serta metode yang digunakan relatif sederhana. Produk yang dihasilkan dari penguraian CO₂ secara elektrokimia sangat tergantung pada beberapa parameter, antara lain; jenis elektroda, jenis elektrolit dan kondisi operasi (suhu dan arus) (Venka, 2016).

Dalam kaitan produksi methanol, ada beberapa mekanisme yang dapat dilakukan, antara lain produksi methanol melalui elektrolisis CO₂ dengan bantuan katalis Cu₂O-ZnO dengan elektrolit KHCO₃ (Albo *et al.*, 2015), atau gabungan antara elektrolisis CO₂ langsung dan gabungan elektrolisis air dan elektrolisis CO₂ melalui pembentukan produk antara CO dan H₂ (Delacourt *et al.*, 2008). Metanol yang mempunyai densitas energi cukup tinggi dan mempunyai kestabilan dalam penyimpanan, merupakan salah satu produk reduksi elektrokimia CO₂ yang paling memberikan harapan. Selain sebagai bahan bakar untuk fuel cell, methanol juga menjadi bahan baku untuk dimetil eter (DME) (Goeppert *et al.*, 2014)

Proses elektrokimia pengubahan karbondioksida menjadi produk metanol dan hidrogen dilakukan melalui media *Membrane Electrode Assembly* (MEA) seperti yang digunakan pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) dan DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*). Dua produk yang akan dihasilkan, yaitu metanol dan hidrogen, keduanya diarahkan sebagai bahan bakar untuk fuel cell, baik PEMFC maupun DMFC. Dengan rekam jejak penelitian dan fasilitas yang tersedia di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen UNSRI, penelitian ini diharapkan dapat dilaksanakan dengan baik.

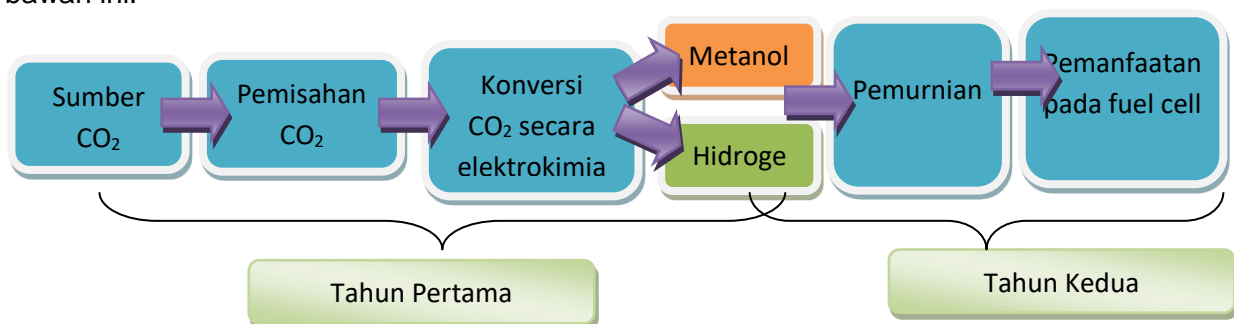
3. Tujuan Penelitian:

Tujuan utama dari penelitian ini adalah:

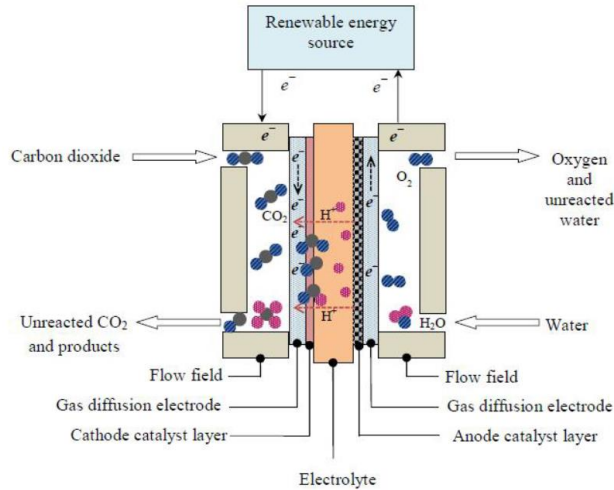
- a) Menangkap dan mengubah CO₂ menjadi metanol dan hidrogen melalui metode elektrolisis langsung dengan katalis yang bervariasi dan metode elektrolisis tidak langsung melalui pembentukan syn gas (Tahun pertama);
- b) Menentukan rendemen metanol dan hidrogen yang dihasilkan dari kedua metode (tahun pertama);
- c) Memurnikan dan mengujicoba pemanfaatan metanol dan hidrogen yang dihasilkan sebagai bahan bakar fuel cell, baik langsung maupun tidak langsung (tahun kedua).

4. Gambaran Umum

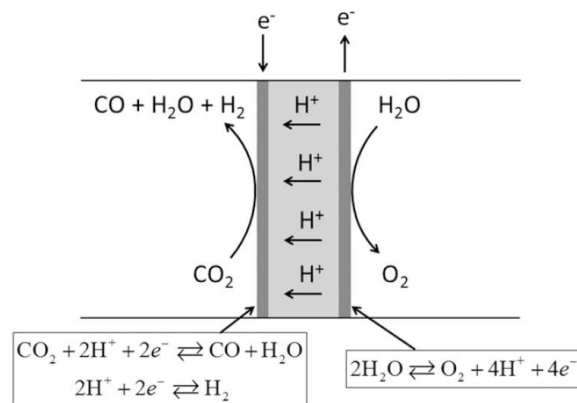
Gambaran umum dari riset yang akan dilakukan dapat digambarkan pada skema di bawah ini.



Gambar 1. Tahapan Rencana Riset

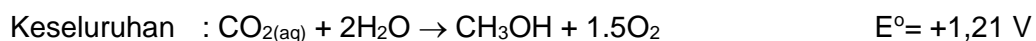
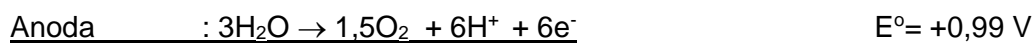
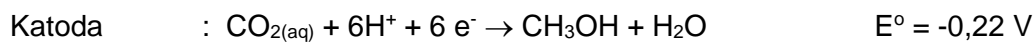


Gambar 2. Skema umum konversi CO₂ menjadi produk bahan bakar secara elektrokimia (Venka, 2016)



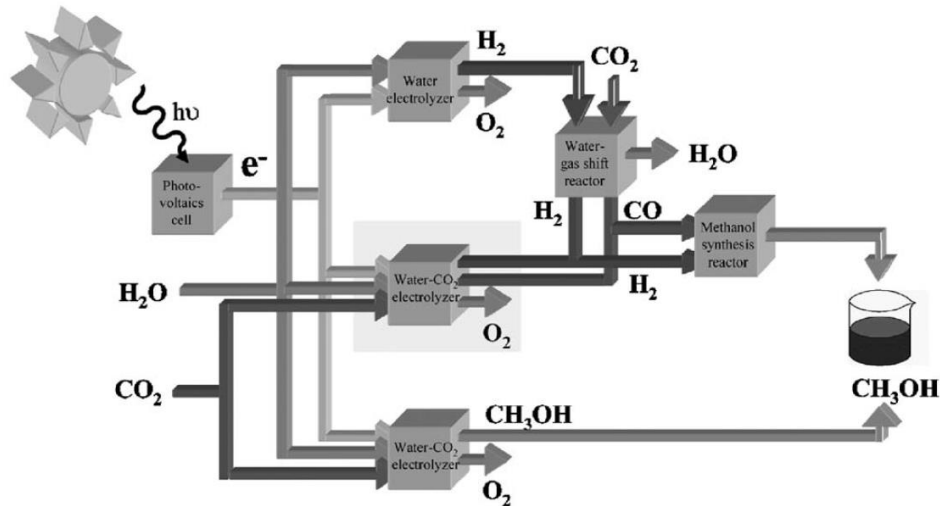
Gambar 3. Skema umum konversi CO₂ menjadi Syn Gas (Delacourt *et al.*, 2008)

Secara elektrokimia, reaksi konversi CO₂ menjadi metanol seperti tergambar pada reaksi berikut:



(Simakov, 2017)

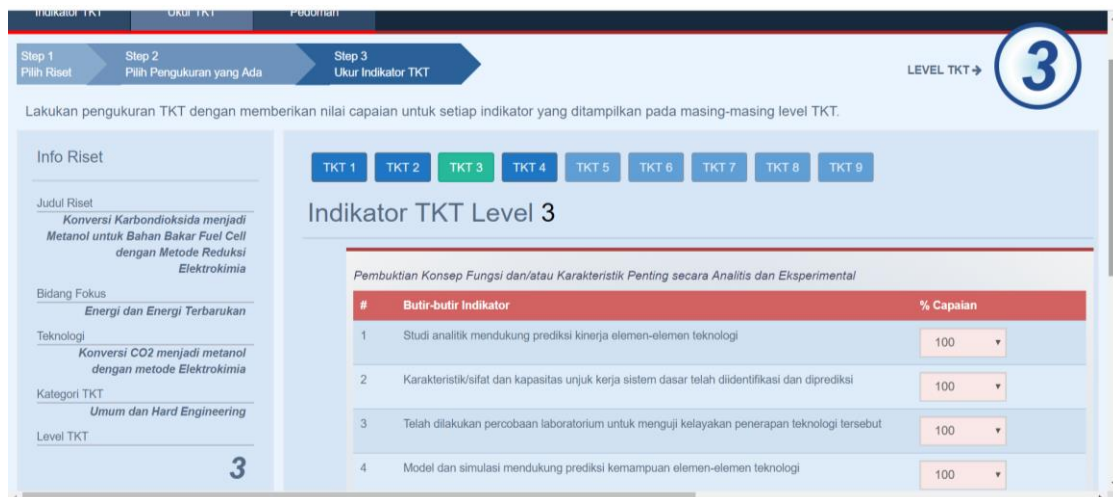
Gabungan Proses pembentukan methanol dari dua jalur elektrolisis ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 4. Proses gabungan pembentukan methanol dari konversi CO₂ secara langsung dan melalui mekanisme pembentuk Syn gas (Delacourt *et al.*, 2008)

5. Tingkat Kesiapan Riset

Tingkat kesiapan riset diukur berdasarkan Tingkat Kesiapan Teknologi berada pada level 3, seperti hasil dari perhitungan pada gambar berikut.



Gambar 5. Tingkat kesiapan Teknologi Konversi CO₂ menjadi metanol secara elektrokimia

6. Timeline

Penelitian ini direncanakan akan dilaksanakan dalam dua tahapan selama dua tahun. Tahun pertama penelitian mengenai pemisahan dan konversi CO₂ menjadi methanol dan hydrogen dan tahun kedua penelitian untuk meningkatkan kemurnian dan pemanfaatan metanol dan hidrogen untuk bahan bakar fuel cell.

No	KEGIATAN	TAHUN PERTAMA BULAN KE-												TAHUN KEDUA BULAN KE-											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Persiapan Bahan dan Peralatan	█	█	█									█	█	█										
2	Persiapan CO2				█																				
3	Pembuatan MEA					█	█																		
4	Konversi CO2 menjadi CH3OH dan H2						█	█	█																
5	Penentuan Rendemen metanol dan H2								█	█															
6	Pemurnian Metanol															█	█	█							
7	Pemanfaatan Metanol dan H2 untuk Fuel Cell																		█	█	█	█			
8	Penyiapan Laporan																						█	█	

7. Sumber Daya

Rincian Sumber Daya yang dibutuhkan

No	Komponen	Kuantitas	Satuan	Biaya (Rp)	
				Tahun 1	Tahun 2
1	Biaya Bahan Habis Pakai	1	Paket	250,000,000	200,000,000
2	Biaya Peralatan	1	Paket	500,000,000	450,000,000
3	Biaya Analisa Laboratorium	1	Paket	100,000,000	100,000,000
4	ATK dan Akomodasi	1	Paket	50,000,000	50,000,000
Total biaya per tahun (Rp)				900,000,000	800,000,000
Total biaya dua tahun (Rp)				1,700,000,000	

8. Tenaga Peneliti

- Dr. Dedi Rohendi, M.T (Kimia, Koordinator PUR Fuel Cell dan Hidrogen UNSRI (**Ketua Penelitian**))
- Dr. Nirwan Syarif, M.Si (Kimia, Peneliti Fuel Cell dan Hidrogen UNSRI) (**Wakil Ketua**)
- Dr. Addy Rachmat, M.Si (Kimia, Peneliti Fuel Cell dan Hidrogen UNSRI) (**Anggota**)
- Afriyanti Sumboja, Ph.D (Fak. Teknik Mesin dan Dirgantara, ITB) (**Anggota**)
- Deni Shidqi Khaerudini, Ph.D (Pusat Penelitian Fisika, LIPI) (**Anggota**)

Konsultan:

Sutiana Junaedi (Senior Technology Advisor PT. Kreasi Handal Selaras/Konsultan Bidang Migas)

Jakarta, 29 November 2018
No. 060/L30110/2018-S0

Kepada : Bapak/Ibu Peneliti
Tembusan : Para Pejabat Wakil Rektor Terkait
Dari : Ketua Panitia Forum Ideasi Riset Pertamina – Universitas 2018

Lampiran : 1 (satu) berkas
Perihal : **Undangan Presentasi Proposal**

Berdasarkan hasil seleksi dari tim internal Pertamina terkait dengan usulan proposal riset yang disampaikan Bapak/Ibu, kami menyatakan bahwa **proposal Bapak/Ibu (dengan judul pada lampiran)** terpilih untuk pada tahap selanjutnya yaitu tahapan presentasi proposal. Sehubungan hal tersebut, kami mengundang **1 (satu) perwakilan** dari tim peneliti untuk dapat mempresentasikan materi tersebut dalam tahapan seleksi lebih lanjut pada:

Waktu : Rabu - Kamis, 12 - 13 Desember 2018
Pukul : 07.30 – Selesai
Tempat : Ruang Seminar Fakultas Teknologi Mineral, Gedung Arie Frederik Lasut,
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta
Jalan SWK 104 Condongcatur Depok Sleman Daerah Istimewa Yogyakarta
Agenda : Forum Ideasi Riset Pertamina – Universitas 2018


Panitia menyediakan akomodasi **untuk 1 (satu) orang berupa** tiket PP dari universitas asal Bapak/Ibu ke Yogyakarta dan hotel yang telah disediakan oleh panitia (keterangan lebih lanjut mengenai akomodasi terdapat pada lampiran di bawah).

Dimohon Bapak/Ibu peneliti untuk mempersiapkan slide presentasi (PPT) sesuai dengan *guideline* yang ada dalam lampiran. Peneliti yang tidak mempresentasikan proposalnya dianggap mengundurkan diri dari proses seleksi. Untuk informasi lebih lanjut mengenai kegiatan ini maka Bapak/Ibu dapat menghubungi panitia berikut ini:

1. Hartoto Nursukatmo (hartoto.nursukatmo@pertamina.com) / 081225024229
2. Talitha Ulima Sofiana (bps.talitha.sofiana@pertamina.com) / 085643131391
3. Bagas Prasetyo Wicaksono (bps.bagas.wicaksono@pertamina.com) / 081349556260.

Demikian disampaikan, atas perhatian dan kerjasamanya diucapkan terima kasih.

Manager Strategy & Business Development
Ketua Forum Ideasi Riset Pertamina – Universitas 2018

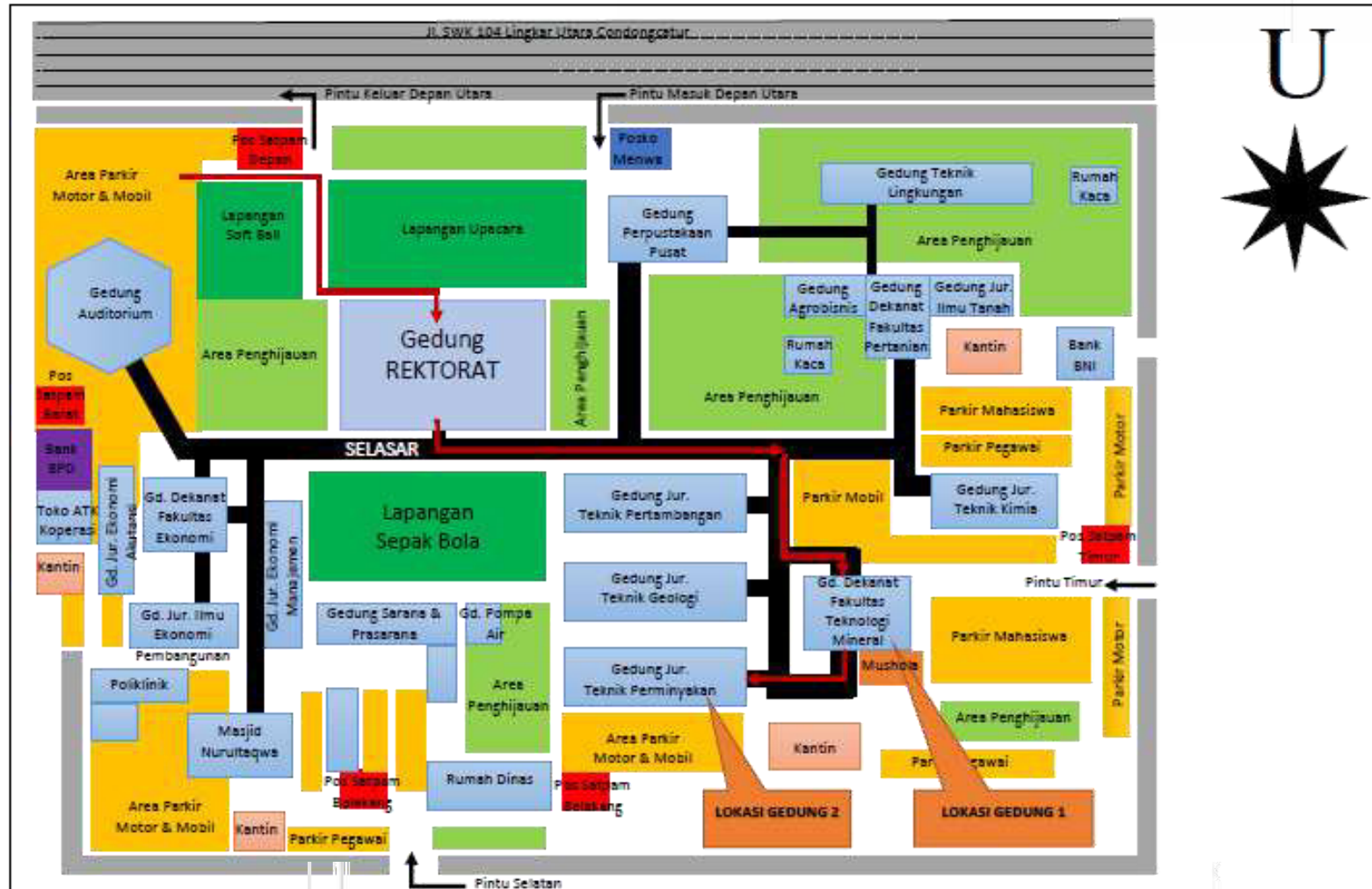


Purnadi
ms

LAMPIRAN

1. Proposal Bapak/Ibu yang terpilih dalam mengikuti tahap presentasi proposal dengan judul Konversi Karbondioksida menjadi Metanol untuk Bahan Bakar Fuel Cell dengan Metode Reduksi Elektrokimia dengan ketua peneliti Bapak Dr. Dedi Rohendi, M.T.
2. Bagi Bapak/Ibu peneliti perwakilan tim yang akan hadir dalam Forum Ideasi Riset Pertamina – Universitas 2018 di Yogyakarta, **dimohon untuk melakukan RSVP pada link berikut <https://intip.in/Ideasi2018> maksimal pada tanggal 6 Desember 2018 pukul 10.00 WIB.** Apabila Bapak/Ibu ingin menanyakan hal yang berkaitan dengan akomodasi dapat menghubungi Panitia atas nama **Alfin Putra** (mk.alfin.putra@mitrakerja.pertamina.com) / 081318140881.
3. Panitia menyediakan akomodasi hotel Grand Mercure Yogyakarta untuk **1 perwakilan tim peneliti** yang disediakan mulai tanggal 11 Desember 2018 – 13 Desember 2018 (3 hari 2 malam).
4. Panitia menyediakan tiket akomodasi PP dari universitas asal Bapak/Ibu ke Yogyakarta (untuk pesawat maksimal kelas ekonomi atau kereta api maksimal kelas eksekutif dengan melampirkan *boarding pass* dan bukti pembayaran) dengan metode *reimbursement* untuk **1 orang perwakilan tim peneliti**. Apabila mengirim lebih dari satu perwakilan, maka selebihnya diluar tanggung jawab panitia.
5. Waktu yang disediakan untuk presentasi dan diskusi untuk setiap proposal adalah 35 menit
6. Poin-poin yang perlu ada dalam presentasi (PPT) antara lain:
 - a. Judul penelitian
 - b. *Executive summary* & TKT-TRL (Tingkat Kesiapan Teknologi/ *Technology Readiness Level*)
 - c. Tujuan penelitian
 - d. Latar Belakang
 - e. Hipotesis
 - f. Metodologi meliputi *experimental method* (kualitatif atau kuantitatif), area studi, populasi studi dan sampling frame, jumlah sampel, material yang dibutuhkan
 - g. *Track record* dan progres riset sampai saat ini.
 - h. Target hasil: Berhasil di laboratorium, berhasil *pilot test* di lapangan, berhasil *full scale implementation*, dapat dipatenkan, dapat dikomersialkan
 - i. *Workplan* dan *timeline*
 - Detail pekerjaan & *scope of work*
 - *Timeline* setiap detail pekerjaan
 - Jam/hari kerja
 - Kurva *timeline* (e.g. S-Curve, Gantt Chart, dll)
 - j. Budget detail
 - *Manhour per unit price*
 - Biaya peralatan
 - Biaya total dan *breakdown per timeline*
 - Sumber dana atas biaya riset yang sudah dikeluarkan
 - Perbandingan harga produk dengan harga pasar
 - k. Ketersediaan bahan baku di dalam negeri/*security supply*.
 - l. Kekuatan sumber daya: SDM/*manpower* (pengalaman riset, penghargaan), laboratorium, sarana prasarana, peralatan.
 - m. Publikasi yang telah dilakukan terhadap riset ini sebelumnya (jika ada).

DENAH GEDUNG KAMPUS TERPADU UPN "VETERAN" YOGYAKARTA

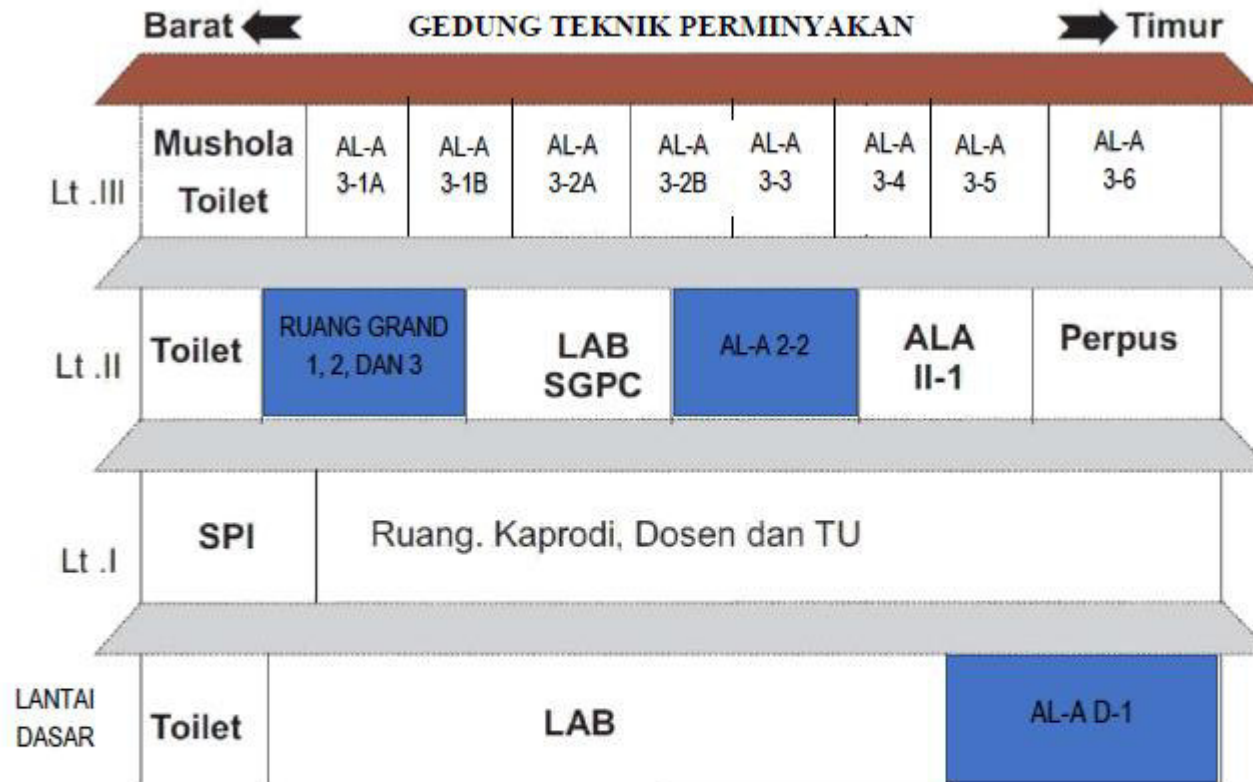


Kantor Pusat
 Jalan Medan Merdeka Timur 1A
 Jakarta 10110 Indonesia
 T +62 21 381 5111, +62 21 381 6111
 F +62 21 384 6885, +62 21 384 3882
 www.pertamina.com


NOTE:

= RUANGAN FORUM IDEASI UNIVERSITAS 2018

1. Ruang Seminar FTM : Ruang Opening Forum Ideasi Universitas 2018
2. Ruang Presentasi Proposal :
 - a. Ruang Rapat FTM
 - b. Ruang Rapat Kecil FTM
 - c. Ruang Alumni
 - d. Ruang Workstation/ Anjungan CBIS



NOTE:

= RUANGAN FORUM IDEASI UNIVERSITAS 2018

1. Ruang AL-A D-1 : Ruang Panitia Forum Ideasi Universitas 2018
2. Ruang Presentasi Proposal :
 - a. Ruang Grand 1
 - b. Ruang Grand 2
 - c. Ruang Grand 3
 - d. Ruang AL-A 2-2

Kantor Pusat
 Jalan Medan Merdeka Timur 1A
 Jakarta 10110 Indonesia
 T +62 21 381 5111, +62 21 381 6111
 F +62 21 384 6865, +62 21 384 3882
www.pertamina.com

POKOK-POKOK PERJANJIAN
PENGEMBANGAN PROSES KONVERSI KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL DENGAN
METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA
(MODEL OCLC 02)

No. 003./P00000/2019-S0

Perjanjian ini ("KONTRAK") dibuat dan ditandatangani pada tanggal 22. bulan November tahun 2019 ("TANGGAL KONTRAK"), oleh:

- I. **PT Pertamina (Persero)**, suatu perusahaan yang didirikan berdasarkan hukum Indonesia, berkedudukan dan berkantor pusat di Jakarta Pusat, dalam hal ini diwakili oleh **Dadi Sugiana** selaku **SVP Research & Technology Center**, selanjutnya dalam **KONTRAK** ini disebut "**PERUSAHAAN**", dan
- II. **Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya**, suatu lembaga yang didirikan berdasarkan hukum Indonesia, berkedudukan dan berkantor pusat di Gedung KPA Lt. 1 Kampus UNSRI Bukit Besar, Jl. Srijaya Negara Kec. Ilir Barat I, Palembang-Sumatera Selatan 30139, dalam hal ini diwakili oleh **Prof. Dr. Zulkifli Dahlan, M.Si, DEA** selaku **Kepala Badan Pengelola Usaha**, selanjutnya dalam **KONTRAK** ini disebut "**KONSULTAN**".

Selanjutnya **PERUSAHAAN** dan **KONSULTAN** secara sendiri-sendiri disebut "**PIHAK**" dan secara bersama-sama disebut "**PARA PIHAK**".

BAHWASANYA;

PERUSAHAAN mempunyai kegiatan usaha di bidang energi yaitu minyak dan gas bumi, energi baru dan terbarukan, dan dalam kaitannya dengan hal tersebut **PERUSAHAAN** memerlukan dilakukannya pekerjaan sebagaimana diatur dalam **KONTRAK** ini; dan

KONSULTAN adalah perusahaan yang mempunyai kemampuan dan pengalaman serta sanggup untuk melaksanakan pekerjaan yang diperlukan oleh **PERUSAHAAN**.

BERDASARKAN PERTIMBANGAN DI ATAS, PARA PIHAK MENYEPAKATI HAL-HAL BERIKUT:

1. Dokumen-dokumen yang disebut dibawah merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari **KONTRAK** ini:
 - A. Lampiran A: Syarat-syarat dan Ketentuan-ketentuan Umum.
 - B. Lampiran B: Lingkup Pekerjaan.
 - C. Lampiran C: Harga Kontrak dan Ketentuan Pembayaran.
 - D. Lampiran D: Jangka Waktu dan Jadwal Pelaksanaan Pekerjaan.

PARAF KONSULTAN
<i>fa</i>

1

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>D</i>	/

E. Lampiran E: Health, Safety, Environment (HSE).

F. Lampiran F: Lain-lain.

2. Pekerjaan yang harus dilaksanakan oleh **KONSULTAN** adalah **Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia**, dengan ruang lingkup sebagaimana diuraikan dalam Lampiran B dan harus diselesaikan sesuai dengan jadwal yang diuraikan dalam Lampiran D ("**PEKERJAAN**").
3. Nilai **PEKERJAAN** adalah sebesar **Rp1.193.700.000,- (satu milyar seratus Sembilan puluh tiga juta tujuh ratus ribu Rupiah)**, belum termasuk Pajak Pertambahan Nilai 10% (sepuluh persen) dengan tata cara pembayaran sebagaimana diuraikan dalam Lampiran C ("**HARGA KONTRAK**").
4. **KONTRAK** ini mulai berlaku sejak kontrak No. 003/PO0000/2019-50 tanggal 22 November 2019 ditandatangani dan akan tetap berlaku sampai dengan terpenuhinya hak dan kewajiban **PARA PIHAK** secara keseluruhan berdasarkan **KONTRAK** ini ("**JANGKA WAKTU KONTRAK**") kecuali diakhiri lebih awal sesuai dengan ketentuan **KONTRAK** ini.

KONTRAK ini dibuat dalam rangkap 2 (dua), masing-masing mempunyai kekuatan hukum yang sama, dan ditandatangani di atas meterai cukup oleh **PARA PIHAK**.

PERUSAHAAN



Nama : **Dadi Sugiana**
Jabatan : SVP Research & Technology Center

Nama : **Prof. Dr. Zulkifli Dahlan, M.Si, DEA**
Jabatan : Kepala Badan Pengelola Usaha

PARAF KONSULTAN
<i>JK</i>

2

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>DK</i>	

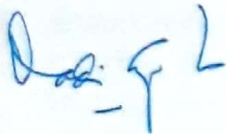
E. Lampiran E: Health, Safety, Environment (HSE).

F. Lampiran F: Lain-lain.

2. Pekerjaan yang harus dilaksanakan oleh KONSULTAN adalah **Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia**, dengan ruang lingkup sebagaimana diuraikan dalam Lampiran B dan harus diselesaikan sesuai dengan jadwal yang diuraikan dalam Lampiran D ("PEKERJAAN").
3. Nilai PEKERJAAN adalah sebesar Rp1.193.700.000,- (satu milyar seratus Sembilan puluh tiga juta tujuh ratus ribu Rupiah), belum termasuk Pajak Pertambahan Nilai 10% (sepuluh persen) dengan tata cara pembayaran sebagaimana diuraikan dalam Lampiran C ("HARGA KONTRAK").
4. KONTRAK ini mulai berlaku sejak kontrak No. 003/P00000/2019-50 tanggal 22 November 2019 ditandatangani dan akan tetap berlaku sampai dengan terpenuhinya hak dan kewajiban PARA PIHAK secara keseluruhan berdasarkan KONTRAK ini ("JANGKA WAKTU KONTRAK") kecuali diakhiri lebih awal sesuai dengan ketentuan KONTRAK ini.

KONTRAK ini dibuat dalam rangkap 2 (dua), masing-masing mempunyai kekuatan hukum yang sama, dan ditandatangani di atas meterai cukup oleh PARA PIHAK.

PERUSAHAAN



ho
Dr
Nama : Dadi Sugiana
Jabatan : SVP Research & Technology Center

KONSULTAN



Nama : Prof. Dr. Zulkifli Dahlan, M.Si, DEA
Jabatan : Kepala Badan Pengelola Usaha

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	

SYARAT-SYARAT DAN KETENTUAN-KETENTUAN UMUM

PASAL 1 DEFINISI

Kata-kata dan/atau istilah-istilah dibawah yang digunakan dalam **KONTRAK** ini mempunyai arti sebagaimana diberikan disini:

- a. **AFILIASI** adalah suatu perusahaan yang: a) mengendalikan, atau b) dikendalikan oleh, atau c) berada dibawah kendali yang sama dengan salah satu **PIHAK**. Yang dimaksud dengan "kendali" adalah kepemilikan secara langsung atau tidak langsung lebih dari 50% (lima puluh persen) saham atau 50% (lima puluh persen) hak suara.
- b. **DOKUMEN KONTRAK** adalah **POKOK-POKOK PERJANJIAN** dan semua dokumen yang disebut dalam PASAL 1 **POKOK-POKOK PERJANJIAN**.
- c. **HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL** yaitu segala hak eksklusif yang diberikan oleh peraturan perundang-undangan kepada seseorang atau sekelompok orang atas karya ciptanya, termasuk namun tidak terbatas pada hak cipta, paten, merek, rahasia dagang dan desain industri.
- d. **HARI KALENDER** adalah kurun waktu 24 (dua puluh empat) jam secara terus-menerus, yang dimulai pada pukul 00.00 WIB sampai dengan pukul 00.00 WIB pada hari berikutnya.
- e. **HARI KERJA** adalah semua **HARI KALENDER** kecuali hari Sabtu, hari Minggu dan hari libur nasional Republik Indonesia.
- f. **JANGKA WAKTU KONTRAK** adalah jangka waktu yang dimulai sejak **TANGGAL KONTRAK** atau tanggal lain yang disepakati **PARA PIHAK** sampai dengan tanggal yang disebut dalam Lampiran D.
- g. **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** adalah tindakan yang dimaksudkan untuk melanggar atau tidak dipenuhinya suatu kewajiban berdasarkan **KONTRAK**, peraturan perundangan, *best oilfield practices* atau kepatutan.
- h. **LOKASI PEKERJAAN** adalah kantor, lapangan atau tempat-tempat lain dimana **PERUSAHAAN** melakukan kegiatannya, di tempat mana **PEKERJAAN** harus dilakukan sebagaimana disebut dalam Lampiran B.
- i. **MASA PENYELESAIAN PEKERJAAN** yaitu jangka waktu bilamana **PEKERJAAN** harus diselesaikan oleh **KONSULTAN** seperti diatur dalam Lampiran D.
- j. **PERSONIL KONSULTAN** adalah mereka yang dipekerjakan atau dilibatkan oleh **KONSULTAN** untuk melaksanakan **KONTRAK**, baik langsung maupun tidak langsung, termasuk namun tidak terbatas pada **SUBKONTRAKTOR** dan *vendor*. Termasuk dalam pengertian **PERSONIL KONSULTAN** adalah mereka yang oleh **KONSULTAN** diundang atau dibiarkan untuk berada di **LOKASI PEKERJAAN**.
- k. **PERSONIL PERUSAHAAN** adalah mereka yang dipekerjakan atau dilibatkan oleh **PERUSAHAAN**, baik langsung maupun tidak langsung dan **PIHAK KETIGA** yang oleh **PERUSAHAAN** diundang untuk berada di **LOKASI PEKERJAAN**.
- l. **POKOK-POKOK PERJANJIAN** adalah dokumen yang berjudul "POKOK-POKOK PERJANJIAN" yang ditandatangani oleh **PARA PIHAK**.

- m. **PIHAK KETIGA** adalah mereka yang bukan **PERUSAHAAN, PERSONIL PERUSAHAAN, KONSULTAN** atau **PERSONIL KONSULTAN**.
- n. **SUBKONTRAK** adalah kontrak antara **KONSULTAN** dan **SUBKONTRAKTOR** untuk melaksanakan sebagian dari **PEKERJAAN**.
- o. **SUBKONTRAKTOR** adalah suatu pihak yang disetujui secara tertulis oleh **PERUSAHAAN** untuk melakukan sebagian dari **PEKERJAAN** dalam kapasitas sebagai subkontraktor dari **KONSULTAN**.
- p. **TANGGAL DIMULAINYA PEKERJAAN** adalah tanggal harus dimulainya pelaksanaan **PEKERJAAN** oleh **KONSULTAN** sebagaimana disebut dalam Lampiran D.
- q. **TEMPAT PENYERAHAN PEKERJAAN** adalah tempat diserahkan hasil **PEKERJAAN** dari **KONSULTAN** kepada **PERUSAHAAN** sebagaimana disebutkan dalam Lampiran B.
- r. **TANGGAL SELESAINYA PEKERJAAN** adalah tanggal sebagaimana dimaksud dalam Lampiran D.

PASAL 2 ISI DAN PENAFSIRAN ISI KONTRAK

- 2.1 Semua instruksi, pemberitahuan, otorisasi, persetujuan harus dibuat dalam bentuk tertulis dan ditandatangani sekurang-kurangnya oleh Pengawas/Direksi Pekerjaan **PERUSAHAAN** yang disebut dalam Lampiran F. Meskipun demikian, **PERUSAHAAN** berhak untuk memberikan instruksi kepada **KONSULTAN** secara lisan dan **KONSULTAN** harus tunduk kepada instruksi tersebut dengan ketentuan bahwa instruksi itu harus kemudian dikonfirmasi secara tertulis oleh **KONSULTAN** dalam waktu maksimal 3 (tiga) **HARI KERJA** setelah instruksi lisan diberikan. Apabila konfirmasi tertulis dari **KONSULTAN** tersebut tidak dibantah secara tertulis oleh **PERUSAHAAN** dalam waktu maksimal 3 (tiga) **HARI KERJA** setelah diterimanya konfirmasi tertulis dari **KONSULTAN**, maka instruksi lisan dari **PERUSAHAAN** tersebut akan dianggap sebagai suatu instruksi tertulis.
- 2.2 Semua judul dan sub-judul yang dipakai dalam **DOKUMEN KONTRAK** adalah sekedar untuk kemudahan acuan dan tidak dapat digunakan untuk menentukan pemahaman atau penafsiran **KONTRAK** ini.
- 2.3 **PARA PIHAK** sepakat untuk mengesampingkan segala bentuk kesepakatan dan persetujuan baik yang dilakukan secara lisan maupun tertulis yang pernah ada sebelum ditandatanganinya **KONTRAK** ini.
- 2.4 Tidak ada hak apapun dari satu **PIHAK** berdasarkan **KONTRAK** ini yang dapat dianggap dikesampingkan atau dilepaskan, kecuali dinyatakan secara tertulis oleh **PIHAK** tersebut. Setiap perubahan atas **KONTRAK** ini harus disetujui secara tertulis oleh **PARA PIHAK** dan dimuat dalam suatu addendum yang menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari **KONTRAK** ini.
- 2.5 Jika satu atau lebih ketentuan dalam **KONTRAK** ini dinyatakan ilegal, tidak sah, tidak berlaku atau tidak dapat dilaksanakan dengan alasan apapun (termasuk karena adanya ketentuan peraturan perundang-undangan atau putusan pengadilan atau badan lain yang memiliki yurisdiksi atas **PARA PIHAK** atau **KONTRAK** ini), maka ketentuan atau beberapa ketentuan itu akan dianggap dihapus dari **KONTRAK** ini, tanpa mengurangi keberlakuan ketentuan-ketentuan lainnya. Apabila ketidak-berlakuan ketentuan atau beberapa ketentuan itu secara substansial akan mempengaruhi **HARGA KONTRAK**, maka **PARA**

PIHAK dengan itikad baik akan melakukan negosiasi untuk mengganti ketentuan yang dinyatakan ilegal, tidak sah, tidak berlaku atau tidak dapat dilaksanakan itu dengan ketentuan lain yang tetap sesuai dengan maksud dari ketentuan semula.

- 2.6 Apabila terdapat perbedaan atau pertentangan isi dari ketentuan-ketentuan dalam **DOKUMEN KONTRAK**, maka **PARA PIHAK** akan berunding dengan itikad baik untuk menentukan ketentuan mana yang berlaku.
- 2.7 Apabila **KONTRAK** ini dibuat dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris, jika terjadi perbedaan arti atau penafsiran antara teks bahasa Indonesia dan teks bahasa Inggris maka yang berlaku adalah teks atau penafsiran bahasa Indonesia.

PASAL 3 KORESPONDENSI

- 3.1 Korespondensi terkait **KONTRAK** ini (termasuk pemberitahuan, perintah atau komunikasi lainnya) harus dilakukan secara tertulis dan disampaikan langsung, melalui kurir, surat tercatat atau faksimili ke alamat yang disebut pada Lampiran F.
- 3.2 Korespondensi dianggap telah dikirimkan: a) dengan adanya tanda terima tertulis yang ditandatangani oleh penerima jika korespondensi tersebut diserahkan langsung; b) dengan lewatnya 7 (tujuh) **HARI KALENDER** sejak tanggal pengeposan surat; atau c) dengan lewatnya 1 x 24 jam sejak waktu yang tertera dalam lembar bukti dilakukannya transmisi elektronik yang layaknya ada jika korespondensi dilakukan dengan faksimili.
- 3.3 Jika terjadi perubahan alamat, **PIHAK** yang berubah alamatnya harus mengirimkan pemberitahuan kepada **PIHAK** lainnya selambat-lambatnya 5 (lima) **HARI KALENDER** sebelum alamat baru itu berlaku. Tanpa adanya pemberitahuan itu, korespondensi yang dilakukan ke alamat yang lama akan dianggap telah dilakukan sesuai dengan **KONTRAK** ini.

PASAL 4 PERNYATAAN DAN JAMINAN KONSULTAN

KONSULTAN dengan ini menyatakan dan menjamin kepada **PERUSAHAAN** bahwa **KONSULTAN**: a) adalah suatu perusahaan yang didirikan secara sah menurut hukum yang berlaku dan **KONTRAK** ini ditandatangani oleh pejabat **KONSULTAN** yang berwenang; b) cakap secara hukum untuk mengikat diri dalam dan melaksanakan **KONTRAK** ini; c) memiliki kualifikasi, izin-izin dan memenuhi seluruh persyaratan yang diperlukan untuk melaksanakan **PEKERJAAN** selama **JANGKA WAKTU KONTRAK** sesuai ketentuan dan standar yang berlaku; dan d) telah mengetahui dan memahami ruang lingkup **PEKERJAAN** serta keadaan dan informasi yang akan mempengaruhi pelaksanaan **KONTRAK**.

fk

Dr

PASAL 5
KEWAJIBAN KONSULTAN BERKAITAN DENGAN PELAKSANAAN PEKERJAAN

- 5.1 **KONSULTAN** wajib menyediakan semua peralatan, perlengkapan, sarana dan fasilitas yang diperlukan untuk melaksanakan **PEKERJAAN** sebagaimana disyaratkan dalam Lampiran B.
- 5.2 Dalam masa tertentu seperti disebut dalam Lampiran B setelah **TANGGAL SELESAINYA PEKERJAAN**, **KONSULTAN** wajib memperbaiki dan/atau mengganti hasil **PEKERJAAN** yang tidak sesuai dengan ketentuan dalam Lampiran B, yang telah diterima oleh **PERUSAHAAN**. Perbaikan dan/atau penggantian tersebut harus dilakukan oleh **KONSULTAN** tanpa membebankan biayanya kepada **PERUSAHAAN** dan dilaksanakan dalam waktu yang ditentukan oleh **PERUSAHAAN**.
- 5.3 **KONSULTAN** wajib menyediakan **PERSONIL KONSULTAN** sesuai yang diatur dalam Lampiran B, atau jika tidak diatur secara spesifik dalam Lampiran B, dalam jumlah dan dengan kualifikasi yang memadai untuk melaksanakan **PEKERJAAN**.
- 5.4 **PERUSAHAAN** berhak menginstruksikan dan **KONSULTAN** wajib untuk segera mengganti **PERSONIL KONSULTAN** yang oleh **PERUSAHAAN** dinilai tidak cakap atau tidak disiplin dalam melakukan tugasnya. **KONSULTAN** wajib menyediakan pengganti paling lambat 1 x 24 jam setelah instruksi diberikan oleh **PERUSAHAAN**.
- 5.5 **KONSULTAN** wajib bekerja sama dengan kontraktor-kontraktor **PERUSAHAAN** untuk pekerjaan-pekerjaan lain yang berkaitan dengan **PEKERJAAN**.
- 5.6 **KONSULTAN** wajib mengirimkan laporan kemajuan **PEKERJAAN** seperti yang diatur dalam Lampiran B dan memberikan informasi yang setiap saat dapat diminta oleh **PERUSAHAAN** berkaitan dengan pelaksanaan **PEKERJAAN**.
- 5.7 **KONSULTAN** harus sepenuhnya tunduk kepada dan mematuhi instruksi **PERUSAHAAN**, kecuali secara hukum tidak memungkinkan atau pelaksanaannya akan menimbulkan bahaya terhadap orang atau barang. Jika instruksi tersebut akan berakibat pada dan **PARA PIHAK** setuju untuk melakukan perubahan atas ruang lingkup **PEKERJAAN**, **HARGA KONTRAK** atau **MASA PENYELESAIAN PEKERJAAN**, maka instruksi tersebut akan dituangkan dalam suatu addendum.
- 5.8 Dalam hal **KONSULTAN** melakukan **PEKERJAAN** di **LOKASI PEKERJAAN** maka **KONSULTAN** harus sepenuhnya berusaha agar tidak terjadi gangguan pada kegiatan operasi **PERUSAHAAN** dan/atau kegiatan kontraktor-kontraktor **PERUSAHAAN** lainnya di **LOKASI PEKERJAAN**.
- 5.9 Penyerahan hasil **PEKERJAAN** akan dilakukan pada **TANGGAL SELESAINYA PEKERJAAN** dengan cara seperti diuraikan dalam Lampiran B.
- 5.10 Selambat-lambatnya 15 (lima belas) **HARI KALENDER** sejak **TANGGAL SELESAINYA PEKERJAAN** atau tanggal putusnya **KONTRAK** seperti diatur dalam PASAL 21, **KONSULTAN** wajib mengosongkan **LOKASI PEKERJAAN** dari **PERSONIL KONSULTAN** dan peralatan yang digunakan dengan biayanya sendiri.
- 5.11 Kecuali disepakati lain dalam Lampiran B, selama **JANGKA WAKTU KONTRAK**, **PERSONIL KONSULTAN** yang ditugaskan untuk melaksanakan **PEKERJAAN** ini diperbolehkan untuk

melaksanakan pekerjaan yang serupa dengan **PEKERJAAN** dalam **KONTRAK** ini kepada pihak lain yang bergerak dalam bidang usaha yang sama dengan **PERUSAHAAN** sepanjang hal tersebut tidak menimbulkan potensi benturan kepentingan.

- 5.12 **KONSULTAN** wajib melakukan **PEKERJAAN** dengan *best practice/applicable professional standards* yang dilandasi prinsip-prinsip keahlian sesuai dengan kaidah keilmuan, kepatutan, dan kejujuran intelektual dalam menjalankan profesinya dengan tetap mengutamakan ketertiban umum.

PASAL 6

KONSULTAN ADALAH "KONTRAKTOR MANDIRI" (INDEPENDENT CONTRACTOR)

- 6.1 Walaupun **KONSULTAN** wajib untuk mengakomodasikan dan melaksanakan saran-saran dan instruksi **PERUSAHAAN**, **KONSULTAN** adalah kontraktor yang mandiri. **KONSULTAN** dan **PERSONIL KONSULTAN** atau **SUBKONTRAKTOR** adalah bukanlah pembantu, agen atau personil **PERUSAHAAN**. **KONSULTAN** bertanggung jawab penuh atas pelaksanaan **PEKERJAAN**. Pengawasan yang dilakukan dan instruksi atau perintah yang diberikan oleh **PERUSAHAAN** sama sekali tidak mengurangi tanggung jawab tersebut.
- 6.2 Setiap persetujuan yang diberikan oleh **PERUSAHAAN** atas usulan **KONSULTAN** tidak boleh, dengan cara apapun, dianggap sebagai pembatasan atau pembebasan **KONSULTAN** dari kewajiban dan tanggungjawabnya berdasarkan **KONTRAK** ini, termasuk tanggung jawab atas konsekuensi yang timbul karena perbuatan-perbuatan yang telah diinstruksikan atau disetujui oleh **PERUSAHAAN**.

PASAL 7

KEPEMILIKAN HASIL PEKERJAAN

- 7.1 Hasil **PEKERJAAN** sebagaimana disebut dalam Lampiran B yang diserahkan oleh **KONSULTAN** kepada **PERUSAHAAN** berdasarkan **KONTRAK** ini seluruhnya menjadi milik **PERUSAHAAN**.
- 7.2 Selain **PERUSAHAAN**, hasil **PEKERJAAN** dapat digunakan dan/atau dimanfaatkan oleh **AFILIASI PERUSAHAAN** dan/atau kontraktor dan/atau subkontraktor dalam rangka melaksanakan suatu pekerjaan yang menjadi latar belakang dilakukannya **PEKERJAAN** tanpa persetujuan dari **KONSULTAN**.

PASAL 8

INVENTION DAN HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL

- 8.1 Semua penemuan (*invention*) dalam bentuk apapun yang terjadi dalam pelaksanaan **PEKERJAAN** adalah menjadi milik **PARA PIHAK** yang dapat digunakan untuk kepentingan selain yang diatur dalam **KONTRAK** ini tanpa memerlukan persetujuan dari dan pembayaran apapun kepada masing-masing **PIHAK**.

- 8.2 Semua **HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL KONSULTAN** dan **PIHAK KETIGA** yang digunakan untuk menghasilkan hasil **PEKERJAAN** merupakan bagian dari **PEKERJAAN** berdasarkan **KONTRAK** ini.
- 8.3 **PERUSAHAAN** dan/atau **AFILIAS**nya tidak perlu lagi melakukan pembayaran-pembayaran lain dan/atau mendapatkan persetujuan dari **KONSULTAN** atas penggunaan hasil **PEKERJAAN** yang mengandung **HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL KONSULTAN** dan **PIHAK KETIGA** sebagaimana dimaksud dalam PASAL 8.2 di atas.

PASAL 9 PENUNDAAN PEKERJAAN

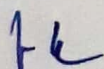
- 9.1 Dengan pemberitahuan tertulis, **PERUSAHAAN** dapat setiap waktu memerintahkan **KONSULTAN** untuk menunda pelaksanaan **PEKERJAAN** baik sebagian atau seluruhnya. Pemberitahuan tersebut harus mencantumkan tanggal mulainya penundaan dan perkiraan lamanya penundaan. Setelah menerima pemberitahuan itu **KONSULTAN** harus segera menghentikan pelaksanaan **PEKERJAAN** dan menjaga serta melindungi bagian **PEKERJAAN** yang telah diselesaikan. Jika diminta oleh **PERUSAHAAN**, **KONSULTAN** harus segera menyerahkan semua hasil **PEKERJAAN** yang telah dilaksanakan kepada **PERUSAHAAN**.
- 9.2 Jika **KONSULTAN** menerima pemberitahuan penundaan seperti disebut dalam PASAL 9.1 di atas yang lamanya lebih dari jangka waktu yang disebut dalam Lampiran D, **KONSULTAN** dapat mengusulkan kepada **PERUSAHAAN** untuk melakukan perubahan **MASA PENYELESAIAN PEKERJAAN**. Jika **PERUSAHAAN** setuju dengan usulan tersebut, **PARA PIHAK** akan menyepakati suatu **MASA PENYELESAIAN PEKERJAAN** yang baru dalam suatu adendum.
- 9.3 **KONSULTAN** tidak berhak untuk menerima kompensasi apapun juga berkaitan dengan penundaan pelaksanaan **PEKERJAAN** kecuali disepakati tertulis oleh **PARA PIHAK** dalam suatu adendum.

PASAL 10 KESELAMATAN DAN KESEHATAN KERJA SERTA PERLINDUNGAN LINGKUNGAN

KONSULTAN wajib mematuhi ketentuan mengenai keselamatan dan kesehatan kerja serta lindungan lingkungan sebagaimana diatur dalam Lampiran E.

PASAL 11 ETIKA BISNIS

KONSULTAN menjamin bahwa **KONSULTAN** dan/atau **PERSONIL KONSULTAN** dan/atau **SUBKONTRAKTOR** tidak akan memberikan sesuatu kepada siapapun juga, pemberian mana dapat dianggap sebagai suatu tindak pidana berdasarkan UU Nomor 31 tahun 1999 jo UU Nomor 20 tahun 2001 tentang Pemberantasan Tindak Pidana Korupsi beserta perubahannya.





**PASAL 12
KERAHASIAAN**

- 12.1 Sepanjang tidak dinyatakan sebaliknya oleh **PERUSAHAAN** atau **KONSULTAN**, semua data dan informasi dalam bentuk apapun yang menyangkut **PEKERJAAN** dan/atau merupakan hasil dari **PEKERJAAN** merupakan informasi yang bersifat rahasia ("**Informasi Rahasia**").
- 12.2 Masing-masing **PIHAK**, termasuk **PERSONIL PERUSAHAAN** atau **PERSONIL KONSULTAN**, wajib menjaga kerahasiaan dan dilarang untuk mengungkapkan **Informasi Rahasia** tersebut kepada pihak lain dengan cara apapun tanpa persetujuan tertulis lebih dulu dari **PIHAK** pemberi **Informasi Rahasia**.
- 12.3 Pengungkapan **Informasi Rahasia** kepada **PERSONIL PERUSAHAAN** atau **PERSONIL KONSULTAN**, para pengurus perusahaan, kreditur, auditor atau penasehat profesional dari **PERUSAHAAN** atau **KONSULTAN** yang perlu mengetahui **KONTRAK** ini dalam rangka melaksanakan tugas-tugas mereka dapat dilakukan sepanjang mereka juga tunduk pada kewajiban untuk menjaga kerahasiaan yang sama dengan kewajiban **PARA PIHAK**.
- 12.4 Masing-masing **PIHAK** wajib untuk mengambil semua langkah yang diperlukan untuk menyimpan secara baik dan melindungi semua **Informasi Rahasia** milik **PIHAK** lainnya, termasuk mewajibkan **PERSONIL PERUSAHAAN** atau **PERSONIL KONSULTAN** untuk mentaati suatu ketentuan untuk menjaga kerahasiaan.
- 12.5 Ketentuan dalam PASAL 12.2 tidak berlaku untuk informasi yang: a) sudah menjadi milik umum (*public domain*) tanpa lebih dulu terjadi pelanggaran ketentuan kerahasiaan dalam **KONTRAK** ini; atau b) merupakan milik atau secara sah dikuasai masing-masing **PIHAK** yang sudah ada sebelum **KONTRAK** ini dan informasi tersebut tidak termasuk yang harus dijaga kerahasiaannya menurut **KONTRAK** ini; atau c) harus diungkapkan karena disyaratkan oleh undang-undang atau peraturan atau perintah tertulis resmi dari badan publik yang memiliki yurisdiksi atas **PEKERJAAN** atau masing-masing **PIHAK**; atau d) harus diungkapkan karena perintah lembaga peradilan.
- 12.6 Jika masing-masing **PIHAK** terikat dalam suatu perjanjian dengan pemilik data/informasi (*confidentiality agreement*) berkaitan dengan data/informasi yang diberikan oleh salah satu **PIHAK** kepada **PIHAK** lainnya, maka **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** wajib menandatangani suatu perjanjian kerahasiaan tersendiri, baik dengan **PIHAK** pemberi **Informasi Rahasia** yang terikat dengan *confidentiality agreement* atau pemilik data/informasi itu, yang isinya sesuai dengan *confidentiality agreement* tersebut.
- 12.7 Terkecuali hasil **PEKERJAAN**, maka masing-masing **PIHAK** wajib untuk mengembalikan seluruh **Informasi Rahasia** kepada **PIHAK** pemberi **Informasi Rahasia**, dan memusnahkan dan/atau menghapus semua *copy* yang masih dipegang oleh **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** pada saat **KONTRAK** berakhir.
- 12.8 Kewajiban **PARA PIHAK** tentang kerahasiaan yang diatur dalam **KONTRAK** ini akan tetap berlaku setelah berakhirnya **KONTRAK**.
- 12.9 Jika berdasarkan **KONTRAK** ini **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** diizinkan untuk mengungkapkan **Informasi Rahasia** kepada pihak lain selain **PIHAK** pemberi **Informasi Rahasia**, maka **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** wajib berusaha agar pengungkapan tersebut tidak perlu dilakukan, atau,

jika pengungkapan tersebut harus juga dilakukan, pengungkapan tersebut dibatasi seminimal mungkin. **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** wajib memberitahu **PIHAK** pemberi **Informasi Rahasia** secara tertulis mengenai pengungkapan paling lambat 3 (tiga) **HARI KALENDER** sejak **Informasi Rahasia** tersebut diungkapkan atau sejak diterimanya permintaan untuk mengungkapkan **Informasi Rahasia** itu, mana yang lebih dulu. Dalam pemberitahuan tersebut, **PIHAK** penerima **Informasi Rahasia** harus menjelaskan alasan dan kepada siapa pengungkapan akan dilakukan, serta langkah-langkah yang telah atau akan diambil untuk menghindari dan/atau membatasi pengungkapan tersebut.

PASAL 13 ASURANSI

Selama **JANGKA WAKTU KONTRAK**, atas biaya sendiri, **KONSULTAN** wajib mempunyai asuransi berkaitan dengan **PERSONIL KONSULTAN** dan dalam Lampiran B **PERUSAHAAN** dapat mensyaratkan bahwa **KONSULTAN** menutup asuransi berkaitan dengan risiko tanggung jawab profesi. **PERUSAHAAN** dapat meminta **KONSULTAN** untuk menunjukkan bukti asuransi tersebut.

PASAL 14 INFORMASI DAN SARANA YANG DISEDIAKAN OLEH PERUSAHAAN

- 14.1 **PERUSAHAAN** akan menyediakan informasi, sarana, akses sebagaimana diatur dalam Lampiran B, jika ada, dengan ketentuan bahwa **PERUSAHAAN** tidak menjamin akuratnya dan/atau memadainya informasi, sarana dan akses tersebut dan risiko penggunaan informasi, sarana dan akses itu adalah tanggung jawab penuh **KONSULTAN** sendiri.
- 14.2 Jika disyaratkan oleh peraturan yang berlaku, **PERUSAHAAN** akan memberikan bantuan atau rekomendasi yang sewajarnya diperlukan dalam rangka pengurusan izin atau formalitas lain yang berkaitan dengan pelaksanaan **PEKERJAAN**.
- 14.3 Dengan tetap tunduk pada peraturan internal **PERUSAHAAN**, **PERUSAHAAN** akan memberikan akses bagi **PERSONIL KONSULTAN** untuk masuk ke **LOKASI PEKERJAAN**.

PASAL 15 PENGALIHAN KONTRAK DAN SUBKONTRAK

- 15.1 Satu **PIHAK** dilarang untuk mengalihkan sebagian atau seluruh hak dan/atau kewajibannya dalam **KONTRAK** ini kepada pihak lain tanpa persetujuan tertulis lebih dulu dari **PIHAK** yang lain, kecuali sebagaimana diatur dalam PASAL 15.2.
- 15.2 **PERUSAHAAN** berhak mengalihkan sebagian atau seluruh hak, kepentingan, manfaat, dan/atau kewajiban dalam **KONTRAK** ini kepada **AFILIASI** dari **PERUSAHAAN** tanpa memerlukan persetujuan terlebih dahulu dari **KONSULTAN**.
- 15.3 **KONSULTAN** dapat menunjuk **SUBKONTRAKTOR** untuk pelaksanaan sebagian **PEKERJAAN**. Apabila **KONSULTAN** menunjuk **SUBKONTRAKTOR**, **KONSULTAN** tetap bertanggungjawab atas

seluruh maupun bagian-bagian dari kewajiban berdasarkan **KONTRAK** ini, termasuk semua akibat hukum yang timbul dari hubungan hukum antara **KONSULTAN** dengan **SUBKONTRAKTOR**.

- 15.4 **KONSULTAN** wajib segera menyerahkan fotokopi **SUBKONTRAK** yang sudah ditandatangani kepada **PERUSAHAAN**.

PASAL 16
HARGA KONTRAK DAN KETENTUAN PEMBAYARAN

- 16.1 **HARGA KONTRAK** dan ketentuan penagihan serta pembayaran adalah seperti disebut dan diatur dalam Lampiran C.
- 16.2 **PERUSAHAAN** berhak untuk menolak membayar suatu tagihan jika menurut pendapat **PERUSAHAAN** sendiri, tagihan tersebut tidak sesuai dengan **KONTRAK** ini. **PERUSAHAAN** akan memberitahukan secara tertulis kepada **KONSULTAN** tentang penolakan tersebut.
- 16.3 Jika **PERUSAHAAN** tidak mengirimkan pemberitahuan tertulis tentang penolakan sebagaimana diatur dalam PASAL 16.2 di atas, tagihan **KONSULTAN** akan dibayar selambatnya-lambatnya pada waktu yang disebut dalam Lampiran C.
- 16.4 Semua tagihan **KONSULTAN** harus dilengkapi dengan dokumen pendukung sebagaimana diatur dalam Lampiran C.
- 16.5 Pembayaran tagihan oleh **PERUSAHAAN** tidak menghilangkan hak **PERUSAHAAN** untuk kemudian mempersengketakan pembayaran yang telah dilakukan itu. Pembayaran tersebut juga bukan merupakan bukti bahwa **PERUSAHAAN** telah menerima hasil atau bagian dari **PEKERJAAN** atau bukti bahwa **KONSULTAN** telah melaksanakan seluruh kewajibannya berdasarkan **KONTRAK** ini.
- 16.6 Jumlah sebagian pembayaran yang ditahan oleh **PERUSAHAAN** sebagai jaminan pelaksanaan **KONTRAK**, sebagaimana diatur dalam Lampiran C, tidak menghilangkan hak **PERUSAHAAN** untuk melakukan upaya hukum lain jika **KONSULTAN** tidak melaksanakan kewajibannya berdasarkan **KONTRAK** ini.
- 16.7 **KONSULTAN** tidak berhak atas pembayaran lain apapun juga kecuali yang secara tegas disebut dan diatur dalam **KONTRAK** ini.
- 16.8 Semua tagihan menurut **KONTRAK** ini harus dilakukan dalam mata uang yang disebut dalam Lampiran C. **PERUSAHAAN** berhak untuk membayar suatu tagihan dengan mata uang yang berbeda dengan mata uang yang digunakan dalam tagihan. Jika **PERUSAHAAN** menggunakan hak tersebut, maka nilai tukar yang akan digunakan adalah nilai tukar yang berlaku pada hari pertama dari bulan dimana tagihan bersangkutan dibayar, kecuali ditentukan lain dalam Lampiran C.
- 16.9 **PERUSAHAAN** atas pertimbangannya sendiri dapat melakukan pembayaran langsung ke **SUBKONTRAKTOR** berdasarkan tagihan dan pelimpahan kewenangan dari **KONSULTAN** dan pembayaran tersebut akan diperhitungkan sebagai pemenuhan kewajiban **PERUSAHAAN** kepada **KONSULTAN** sepanjang mengenai jumlah yang dibayarkan.

fh

Dr

- 16.10 Semua tagihan berdasarkan **KONTRAK** ini harus sudah dikirimkan oleh **KONSULTAN** ke **PERUSAHAAN** selambat-lambatnya 90 (sembilan puluh) **HARI KALENDER** setelah berakhirnya **JANGKA WAKTU KONTRAK**.

PASAL 17
PAJAK DAN PUNGUTAN-PUNGUTAN LAINNYA

Masing-masing **PIHAK** akan menanggung dan membayar pajak dan pungutan-pungutan lainnya sesuai ketentuan yang diatur di dalam Lampiran C.

PASAL 18
SANKSI DAN DENDA

- 18.1 **PERUSAHAAN** berhak mengenakan sanksi atau denda, seperti diatur dalam Lampiran C, terhadap **KONSULTAN** apabila **KONSULTAN** tidak melaksanakan salah satu atau lebih ketentuan **KONTRAK** ini.
- 18.2 **PERUSAHAAN** berhak memotong sanksi atau denda yang berbentuk uang dari pembayaran **HARGA KONTRAK**.
- 18.3 Pengenaan satu sanksi atau denda tidak mengecualikan pengenaan sanksi atau denda lainnya dan lebih dari satu sanksi atau denda dapat dijatuhkan sekaligus. Pengenaan denda dan/atau sanksi administratif tidak meniadakan hak **PERUSAHAAN** untuk juga melakukan keputusan **KONTRAK**.

PASAL 19
TANGGUNG JAWAB DAN GANTI RUGI

- 19.1 **KONSULTAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **PERUSAHAAN** dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau kematian **PERSONIL KONSULTAN**, atau b) rusak atau hilangnya harta benda **PERSONIL KONSULTAN**, kecuali hal-hal tersebut disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN PERUSAHAAN**. Sehubungan dengan tanggung jawab yang disebut di atas, **KONSULTAN** akan mengganti rugi (termasuk biaya hukum yang dikeluarkan) **PERUSAHAAN** berkaitan dengan klaim, tuntutan serta putusan tersebut.
- 19.2 Masing-masing **PIHAK** bertanggung jawab atas serta saling membebaskan dan melindungi dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau kematian **PIHAK KETIGA**, atau b) rusak atau hilangnya harta benda **PIHAK KETIGA**, kecuali hal-hal tersebut disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** salah satu **PIHAK**. Sehubungan dengan tanggung jawab yang disebut di atas, **PIHAK** yang terbukti merugikan **PIHAK KETIGA** akan mengganti rugi (termasuk biaya hukum yang dikeluarkan) **PIHAK** yang dituntut oleh **PIHAK KETIGA** berkaitan dengan klaim, tuntutan serta putusan tersebut.
- 19.3 **PERUSAHAAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **KONSULTAN** dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau

- 16.10 Semua tagihan berdasarkan **KONTRAK** ini harus sudah dikirimkan oleh **KONSULTAN** ke **PERUSAHAAN** selambat-lambatnya 90 (sembilan puluh) **HARI KALENDER** setelah berakhirnya **JANGKA WAKTU KONTRAK**.

PASAL 17
PAJAK DAN PUNGUTAN-PUNGUTAN LAINNYA

Masing-masing **PIHAK** akan menanggung dan membayar pajak dan pungutan-pungutan lainnya sesuai ketentuan yang diatur di dalam Lampiran C.

PASAL 18
SANKSI DAN DENDA

- 18.1 **PERUSAHAAN** berhak mengenakan sanksi atau denda, seperti diatur dalam Lampiran C, terhadap **KONSULTAN** apabila **KONSULTAN** tidak melaksanakan salah satu atau lebih ketentuan **KONTRAK** ini.
- 18.2 **PERUSAHAAN** berhak memotong sanksi atau denda yang berbentuk uang dari pembayaran **HARGA KONTRAK**.
- 18.3 Pengenaan satu sanksi atau denda tidak mengecualikan pengenaan sanksi atau denda lainnya dan lebih dari satu sanksi atau denda dapat dijatuhkan sekaligus. Pengenaan denda dan/atau sanksi administratif tidak meniadakan hak **PERUSAHAAN** untuk juga melakukan pemutusan **KONTRAK**.

PASAL 19
TANGGUNG JAWAB DAN GANTI RUGI

- 19.1 **KONSULTAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **PERUSAHAAN** dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau kematian **PERSONIL KONSULTAN**, atau b) rusak atau hilangnya harta benda **PERSONIL KONSULTAN**, kecuali hal-hal tersebut disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN PERUSAHAAN**. Sehubungan dengan tanggung jawab yang disebut di atas, **KONSULTAN** akan mengganti rugi (termasuk biaya hukum yang dikeluarkan) **PERUSAHAAN** berkaitan dengan klaim, tuntutan serta putusan tersebut.
- 19.2 Masing-masing **PIHAK** bertanggung jawab atas serta saling membebaskan dan melindungi dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau kematian **PIHAK KETIGA**, atau b) rusak atau hilangnya harta benda **PIHAK KETIGA**, kecuali hal-hal tersebut disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** salah satu **PIHAK**. Sehubungan dengan tanggung jawab yang disebut di atas, **PIHAK** yang terbukti merugikan **PIHAK KETIGA** akan mengganti rugi (termasuk biaya hukum yang dikeluarkan) **PIHAK** yang dituntut oleh **PIHAK KETIGA** berkaitan dengan klaim, tuntutan serta putusan tersebut.
- 19.3 **PERUSAHAAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **KONSULTAN** dari semua macam klaim, tuntutan serta putusan yang timbul dari atau berkaitan dengan a) cedera atau

kematian **PERSONIL PERUSAHAAN**, atau b) rusak atau hilangnya harta benda **PERSONIL PERUSAHAAN**, kecuali hal-hal tersebut disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN KONSULTAN**. Sehubungan dengan tanggung jawab yang disebut di atas, **PERUSAHAAN** akan mengganti rugi (termasuk biaya hukum yang dikeluarkan) **KONSULTAN** berkaitan dengan klaim, tuntutan serta putusan tersebut.

- 19.4 **PERUSAHAAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **KONSULTAN** dari kerugian yang timbul berkaitan dengan rusak atau hilangnya harta benda **PERUSAHAAN**, kecuali kerusakan atau kehilangan itu disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN KONSULTAN**.
- 19.5 **KONSULTAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **PERUSAHAAN** dari kerugian yang timbul dari atau berkaitan dengan rusak atau hilangnya harta benda **KONSULTAN**, harta benda **SUBKONTRAKTOR** serta hasil **PEKERJAAN** yang belum diserahkan, kecuali kerusakan atau kehilangan itu disebabkan oleh **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN PERUSAHAAN**.
- 19.6 **KONSULTAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **PERUSAHAAN** dari tuntutan dan kerugian yang timbul dari atau berkaitan tuntutan hak-hak pekerja atau hak perburuhan **PERSONIL KONSULTAN** atau tuntutan **SUBKONTRAKTOR**. **PERUSAHAAN** berhak untuk meminta **KONSULTAN** untuk menunjukkan bukti tertulis pemenuhan kewajiban **KONSULTAN** terhadap **PERSONIL KONSULTAN** atau **SUBKONTRAKTOR** dan **PERUSAHAAN** berhak untuk menahan pembayaran tagihan **KONSULTAN** jika kewajiban-kewajiban **KONSULTAN** tersebut belum dipenuhi.
- 19.7 **KONSULTAN** bertanggung jawab atas serta membebaskan dan melindungi **PERUSAHAAN** dari tuntutan dan kerugian yang timbul dari atau berkaitan dengan tidak dipenuhinya ketentuan perundangan yang berlaku termasuk dilanggarnya peraturan tentang kelestarian lingkungan hidup dan **HAK KEKAYAAN INTELEKTUAL** oleh **KONSULTAN**.
- 19.8 Dalam keadaan apapun, tidak ada **PIHAK** yang harus bertanggung jawab atas kerugian yang tidak langsung (*indirect and consequential damages*), seperti misalnya: kehilangan kesempatan bisnis atau kehilangan keuntungan yang diderita oleh **PIHAK** yang lainnya.

PASAL 20 KEADAAN KAHAR

- 20.1 Suatu **PIHAK** dibebaskan dari kewajibannya berdasarkan **KONTRAK** ini, jika kewajiban tersebut tidak dapat dilaksanakan karena keadaan yang berada di luar kontrol yang wajar dari **PIHAK** tersebut, tidak dapat dihindari meskipun dengan perencanaan yang baik dan tidak dapat diatasi dengan upaya yang wajar ("**KEADAAN KAHAR**").
- 20.2 Kejadian-kejadian berikut adalah keadaan **KEADAAN KAHAR**: a) kerusuhan masal, perang saudara, pemberontakan, perebutan kekuasaan, perang dengan negara lain atau terorisme; atau b) gempa bumi, banjir, kebakaran, ledakan gunung berapi dan/atau bencana alam lainnya; atau c) sengketa industrial atau pemogokan masal yang terjadi di tingkat nasional maupun daerah; atau d) perubahan peraturan perundang-undangan nasional maupun daerah secara material.

- 20.3 Suatu **PIHAK** hanya akan dibebaskan dari kewajibannya berdasarkan **KONTRAK** ini dengan alasan **KEADAAN KAHAR** jika: a) keadaan dimaksud berdampak langsung pada pelaksanaan kewajiban **PIHAK** tersebut, dan b) tidak ada unsur **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** yang dilakukan oleh **PIHAK** tersebut.
- 20.4 **PIHAK** yang mengalami **KEADAAN KAHAR** wajib memberitahukan **PIHAK** lainnya secara lisan selambat-lambatnya dalam waktu 1 x 24 jam sejak terjadinya **KEADAAN KAHAR** yang diikuti dengan pemberitahuan tertulis dalam waktu 7 (tujuh) **HARI KALENDER** setelah terjadinya **KEADAAN KAHAR** tersebut. Pemberitahuan itu sekurang-kurangnya harus menjelaskan jenis **KEADAAN KAHAR** yang terjadi, perkiraan lamanya **KEADAAN KAHAR** akan berlangsung dan upaya-upaya penanggulangan yang telah dan akan dilakukan oleh **PIHAK** yang mengirimkan pemberitahuan.
- 20.5 **PIHAK** yang mengalami **KEADAAN KAHAR** wajib mengambil langkah-langkah yang diperlukan agar **PIHAK** tersebut dapat melanjutkan pelaksanaan kewajibannya sesuai **KONTRAK**.
- 20.6 Apabila dalam waktu 7 (tujuh) **HARI KALENDER** sejak terjadinya **KEADAAN KAHAR**, **PIHAK** yang mengalami keadaan itu tidak mengirimkan pemberitahuan sesuai dengan PASAL 20.4 di atas, maka **KEADAAN KAHAR** dianggap tidak pernah terjadi.
- 20.7 **PIHAK** yang menerima pemberitahuan **KEADAAN KAHAR** dapat menolak mengakui adanya **KEADAAN KAHAR** selambat-lambatnya 7 (tujuh) **HARI KALENDER** setelah diterimanya pemberitahuan sebagaimana dimaksud PASAL 20.4. Apabila dalam jangka waktu 7 (tujuh) **HARI KALENDER** tersebut tidak ada penolakan dari **PIHAK** yang diberitahu, maka **PIHAK** itu dianggap mengakui adanya suatu **KEADAAN KAHAR**.
- 20.8 Apabila adanya **KEADAAN KAHAR** ditolak untuk diakui oleh **PIHAK** yang diberitahu, maka **PIHAK** yang menyatakan **KEADAAN KAHAR** tersebut harus tetap melaksanakan kewajibannya sesuai **KONTRAK** ini.
- 20.9 Jika **PIHAK** yang mengalami **KEADAAAAN KAHAR** berkeberatan atas penolakan oleh **PIHAK** yang diberitahu, maka **PIHAK** yang berkeberatan atas penolakan itu dapat meminta agar keberatannya diselesaikan melalui mekanisme penyelesaian perselisihan sebagaimana diatur dalam **KONTRAK** ini.
- 20.10 Apabila terjadinya **KEADAAN KAHAR** tersebut diakui oleh **PIHAK** yang diberitahu, maka **PARA PIHAK** akan merundingkan perubahan-perubahan yang diperlukan agar **KONTRAK** dapat tetap dilaksanakan.

PASAL 21
PEMUTUSAN KONTRAK LEBIH AWAL

- 21.1 **PARA PIHAK** sepakat untuk mengesampingkan berlakunya ketentuan Pasal 1266 dan 1267 Kitab Undang-Undang Hukum Perdata terhadap **KONTRAK** ini sepanjang disyaratkan adanya suatu putusan pengadilan untuk pembatalan atau pengakhiran lebih awal suatu perjanjian. **PARA PIHAK** juga sepakat bahwa Pasal 1267 Kitab Undang-Undang Hukum Perdata tidak akan ditafsirkan sehingga pengadilanlah yang mempunyai hak untuk menjatuhkan putusan tentang pelaksanaan perjanjian dan/atau pemberian ganti rugi.

fk

DX

- 21.2 **PERUSAHAAN** berhak memutuskan **KONTRAK** secara sepihak dan seketika tanpa kewajiban untuk memberikan ganti rugi kepada **KONSULTAN**, dengan pemberitahuan tertulis, jika: a) **KONSULTAN** melakukan **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** dengan catatan bahwa **PERUSAHAAN** dapat (namun tidak wajib) secara tertulis memberikan kesempatan kepada **KONSULTAN** untuk memperbaiki akibat yang ditimbulkan atau memulihkan keadaan yang timbul dari **KESENGAJAAN DAN/ATAU KELALAIAN** tersebut dan **KONTRAK** ini putus jika, menurut pandangan **PERUSAHAAN** sendiri, perbaikan atau pemulihan itu tidak berhasil dilakukan oleh **KONSULTAN** dalam waktu yang diberikan **PERUSAHAAN**; atau b) telah dimulainya proses kepailitan atau telah diajukannya permohonan Penundaan Kewajiban Pembayaran Utang ("PKPU") terhadap **KONSULTAN** sebagaimana dimaksud dalam Undang-Undang Nomor 37 Tahun 2004 tentang Kepailitan dan PKPU; atau c) dijatuhkannya sanksi administratif dari **PERUSAHAAN** terhadap **KONSULTAN** yang dapat mempengaruhi pelaksanaan **KONTRAK** ini; d) diputusnya kontrak lain antara **KONSULTAN** dengan **PERUSAHAAN** atau **AFILIASI PERUSAHAAN** karena kesalahan **KONSULTAN** atau e) **KONSULTAN** atau **AFILIASI**nya telah atau sedang memperkarakan **PERUSAHAAN** atau **AFILIASI**nya secara hukum mengenai suatu hal, meskipun tidak berkaitan dengan **KONTRAK** ini.
- 21.3 Pemutusan **KONTRAK** sebagaimana dimaksud dalam PASAL 21.2 di atas berlaku sejak tanggal surat pemberitahuan tertulis **PERUSAHAAN** atau suatu tanggal lain yang disebut dalam surat pemberitahuan tertulis itu.
- 21.4 Jika terjadi pemutusan sebagaimana diatur dalam PASAL 21.2 di atas, maka: a) **KONSULTAN** wajib untuk menyerahkan semua data, dokumen (termasuk dokumen ijin, sertifikat), manual, gambar serta perhitungan-perhitungan dan/atau informasi lainnya yang berhubungan dan/atau dihasilkan sehubungan dengan pelaksanaan **PEKERJAAN** kepada Pengawas/Direksi Pekerjaan yang disebut dalam Lampiran F dalam waktu selambat-lambatnya 7 (tujuh) **HARI KALENDER** setelah tanggal pemutusan **KONTRAK**; b) **KONSULTAN** akan menerima pembayaran atas **HARGA KONTRAK** berkaitan **PEKERJAAN** yang telah dikerjakan namun belum dibayarkan secara proposional, dan **KONSULTAN** melepaskan hak atas pembayaran **HARGA KONTRAK** berkaitan dengan **PEKERJAAN** yang belum dilaksanakan.
- 21.5 Salah satu **PIHAK** dapat memutuskan **KONTRAK** apabila terjadi **KEADAAN KAHAR** yang berlangsung lebih dari 7 (tujuh) **HARI KALENDER**. Jika **KONTRAK** diputus karena **KEADAAN KAHAR** seperti disebut dalam Pasal ini, maka **KONSULTAN** dapat menagih dan **PERUSAHAAN** akan membayar hasil **PEKERJAAN** yang telah dilaksanakan sampai dengan tanggal putusnya **KONTRAK** ini.
- 21.6 Masing-masing **PIHAK** berdasarkan alasan dan/atau pertimbangannya sendiri berhak untuk setiap waktu secara sepihak memutuskan **KONTRAK** ini dengan pemberitahuan tertulis kepada **PIHAK** lainnya, paling lambat 7 (tujuh) **HARI KALENDER** sebelum tanggal putusnya **KONTRAK**.
- 21.7 Jika **KONTRAK** diputus secara sepihak seperti diatur dalam Pasal 21.6 di atas, (i) terhadap pemutusan yang dilakukan oleh **PERUSAHAAN**, maka **KONSULTAN** dapat menagih dan **PERUSAHAAN** akan membayar hasil **PEKERJAAN** yang telah diterima oleh **PERUSAHAAN** sebagaimana diatur dalam Lampiran C dan sejumlah kompensasi yang akan disepakati oleh **PARA PIHAK** dengan itikad baik atau, (ii) terhadap pemutusan yang dilakukan oleh **KONSULTAN**, maka **PERUSAHAAN** berhak meminta sejumlah kompensasi yang akan disepakati oleh **PARA PIHAK** dengan itikad baik.

FL

Dr

- 21.8 Jika terjadi pemberitahuan pemutusan **KONTRAK, KONSULTAN** tetap wajib melaksanakan seluruh ketentuan **KONTRAK** sampai tanggal putusanya **KONTRAK** sebagaimana diatur dalam pasal ini.

PASAL 22 AUDIT

- 22.1 **KONSULTAN** wajib memelihara catatan-catatan dari semua transaksi terkait dengan **KONTRAK** ini dengan benar dan sesuai praktek akuntansi yang lazim. Catatan tersebut wajib disimpan sampai paling sedikit 10 (sepuluh) tahun setelah **KONTRAK** ini berakhir.
- 22.2 Selama masa yang disebut dalam PASAL 22.1 di atas, **PERUSAHAAN** atau pihak yang ditunjuk oleh **PERUSAHAAN** berhak melakukan audit atas catatan-catatan itu dan **KONSULTAN**, dengan biayanya sendiri, wajib untuk menyediakan informasi, bantuan dan akses yang diperlukan.
- 22.3 Apabila berdasarkan audit yang disebut dalam PASAL 22.1 di atas ditemukan adanya kelebihan pembayaran oleh **PERUSAHAAN** terkait dengan pelaksanaan **KONTRAK**, maka **PERUSAHAAN** berhak menagih dan **KONSULTAN** wajib untuk mengembalikan kelebihan pembayaran tersebut.

PASAL 23 PENYELESAIAN PERSELISIHAN

- 23.1 **PARA PIHAK** sepakat untuk menyelesaikan setiap perselisihan yang timbul dalam pelaksanaan **KONTRAK** ini melalui musyawarah.
- 23.2 Jika perselisihan yang timbul tidak dapat diselesaikan secara musyawarah dalam waktu 60 (enam puluh) **HARI KALENDER** sejak soal yang diperselisihkan itu pertama kali dikemukakan oleh salah satu **PIHAK**, salah satu **PIHAK** dapat membawa permasalahan tersebut untuk diputuskan oleh Badan Arbitrase Nasional Indonesia ("**BANI**") di Jakarta dengan menggunakan aturan dan prosedur arbitrase **BANI** dengan dewan arbitrase yang terdiri dari 3 (tiga) orang arbiter.
- 23.3 Bahasa yang akan digunakan dalam arbitrase adalah Bahasa Indonesia.
- 23.4 **PARA PIHAK** tetap harus melaksanakan seluruh kewajibannya berdasarkan **KONTRAK** sampai adanya putusan arbitrase dan putusan arbitrase tersebut bersifat final dan mengikat **PARA PIHAK**.

PASAL 24 HUKUM YANG BERLAKU ATAS KONTRAK INI

KONTRAK ini harus diinterpretasikan berdasarkan dan tunduk kepada hukum yang berlaku di Republik Indonesia.

Fh

Office of Legal Counsel: Rev. 16.10.2014

Dx

LINGKUP PEKERJAAN

Gambaran umum mengenai maksud dan tujuan PEKERJAAN dilakukan

1. URAIAN DAN SYARAT-SYARAT PELAKSANAAN PEKERJAAN

- 1.1. PEKERJAAN yang harus dilaksanakan dalam KONTRAK ini adalah Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia.
- 1.2. KONSULTAN bertanggung jawab dalam pengurusan ijin-ijin sehubungan dengan KONTRAK ini, seperti namun tidak terbatas pada : ijin memasuki LOKASI PEKERJAAN dan ijin-ijin yang lain terkait dengan pelaksanaan PEKERJAAN.
- 1.3. KONSULTAN menyatakan dan menjamin bahwa PERSONIL KONSULTAN telah dilengkapi dengan sertifikat yang dipersyaratkan dalam KONTRAK ini.

2. LINGKUP PEKERJAAN

2.1. Tahap Persiapan Pekerjaan:

- a. Mengurus administrasi dan perizinan
- b. Melakukan persiapan pengadaan bahan.
- c. Melakukan desain dan setting peralatan percobaan
- d. Menyusun rancangan percobaan

2.2. Tahap Uji Skala Laboratorium dan Pengembangan Proses:

- a. Pembuatan Membran Electrode Assembly (MEA)
 - i. Pembuatan elektroda dengan berbagai variasi katalis;
 - ii. Pengaturan elektroda pada membran
 - iii. Set-up MEA pada electrolyser
- b. Penyiapan rangkaian gas CO₂
 - i. Penyiapan tabung,
 - ii. Penyiapan regulator
 - iii. Penyiapan pompa sirkulasi
- c. Pengkondisian rangkaian peralatan secara keseluruhan agar bekerja optimal
- d. Konversi CO₂ menjadi methanol secara elektrokimia pada berbagai kondisi:
 - i. Konversi CO₂ menjadi metanol secara elektrokimia dengan katalis Pt-Ru/C, Cu₂O/ZnO dan PdSnO₂
 - ii. Konversi dilakukan pada berbagai laju alir CO₂ dan arus/tegangan bervariasi.
- e. Analisa produk dan penentuan rendemen metanol

2.3. Tahap Pembuatan Laporan:

- a. Pengolahan data dan pengumpulan dokumentasi.
- b. Pembuatan dan presentasi laporan kemajuan penelitian.
- c. Pembuatan dan presentasi laporan akhir.

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	/

d. Memberikan rekomendasi hasil penelitian secara keseluruhan.

3. HASIL PENELITIAN

Hasil penelitian yang diharapkan dari penelitian adalah:

3.1. Hasil Tahap Persiapan Pekerjaan:

- Desain dan rancangan peralatan percobaan
- Rancangan percobaan

3.2. Hasil Tahap Uji Skala Laboratorium dan Pengembangan Proses:

- Pembuatan dan Karakterisasi Membrane Electrode Assembly (MEA).
- Prototype alat elektrolisis konversi CO₂ menjadi methanol berbasis Membrane Electrode Assembly (MEA).
- Data hasil konversi CO₂ menjadi methanol pada berbagai jenis katalis, laju alir dan tegangan bervariasi.

3.3. Hasil Pembuatan Laporan Akhir:

- Optimasi proses konversi CO₂ menjadi methanol pada berbagai jenis katalis, laju alir dan tegangan bervariasi, produk dan evaluasi penelitian.
- Produk methanol hasil konversi CO₂ berbasis Membrane Electrode Assembly (MEA).
- Evaluasi hasil penelitian dan rekomendasi dari sisi teknis dan ekonomis proses konversi CO₂ menjadi methanol berbasis Membrane Electrode Assembly (MEA).
- Draft Paten tentang konversi CO₂ menjadi methanol berbasis Membrane Electrode Assembly (MEA).

4. SKEMA DAN TATA WAKTU PENELITIAN

Pekerjaan jasa konsultansi ini akan dikerjakan dalam waktu 12 (dua belas) dengan jadwal tentatif seperti yang ditunjukkan pada tabel 1

Tata waktu penelitian adalah sebagai berikut :

No	Deskripsi Kegiatan	Bulan											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Pekerjaan Persiapan												
	1.1 Mengurus administrasi dan perizinan	■											
	1.2 Persiapan pengadaan baha	■	■										
	1.3 Desain dan setting peralatan	■	■										
	1.4 Menyusun rancangan percobaan	■	■										
2	Uji Skala Laboratorium dan Pengembangan Proses												
	2.1 Pembuatan MEA												
	2.1.1 Pembuatan elektroda dengan berbagai variasi katalis			■									
	2.1.2 Pengaturan elektroda pada membran				■								
	2.1.3 Set-up MEA pada eletrolyser				■								
	2.2 Persiapan CO ₂					■							
	2.3 Pengkondisian rangkaian peralatan secara				■	■							

PARAF
KONSULTAN

fk

PARAF PERUSAHAAN

Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	

keseluruhan																	
2.4 Konversi CO ₂ menjadi CH ₃ OH pada berbagai kondisi																	
2.4.1 Konversi CO ₂ menjadi methanol secara elektrokimia dengan katalis Pt-Ru/C, Cu ₂ O/ZnO dan PdSnO ₂																	
2.4.2 Konversi dilakukan pada berbagai laju alir dan arus/tegangan bervariasi																	
2.5 Analisa produk dan penentuan rendemen methanol																	
3 Pembuatan Laporan Akhir																	
3.1 Pengolahan data dan pengumpulan dokumentasi																	
3.2 Pembuatan dan presentasi laporan kemajuan penelitian																	
3.3 Pembuatan dan presentasi laporan akhir																	
3.4 Memberikan rekomendasi hasil penelitian secara keseluruhan																	

Seluruh proses dan kemajuan pekerjaan harus dilaporkan berdasarkan sesuai dengan tahapan pelaksanaan pekerjaan pada waktu yang disepakati oleh kedua belah pihak. Laporan studi harus disiapkan dengan urutan sistematis yang memenuhi semua lingkup pekerjaan di atas dan mudah dimengerti.

5. PERUBAHAN LINGKUP DAN JANGKA WAKTU KONTRAK

Apabila terjadi Perubahan lingkup PEKERJAAN dan/atau JANGKA WAKTU KONTRAK dalam pelaksanaan KONTRAK ini, maka perubahan tersebut akan dituangkan dalam suatu Amandemen yang merupakan satu kesatuan yang tidak terpisahkan dari KONTRAK ini.

6. KUALIFIKASI PERSONIL

KONSULTAN akan menyediakan tenaga ahli dan tenaga penunjang untuk melaksanakan penelitian ini dengan kualifikasi sebagai berikut :

- a) 1 (satu) orang S3 Kimia dengan pengalaman minimal 17 tahun dan memiliki kompetensi di bidang proses berbasis elektrokimia dan aplikasi fuel cell
- b) 1 (satu) orang S3 Kimia dengan pengalaman minimal 6 tahun dan memiliki kompetensi di bidang perancangan dan formulasi proses berbasis elektrokimia
- c) 1 (satu) orang S3 Kimia dengan pengalaman minimal 1 tahun dan memiliki kompetensi di bidang katalis pada proses berbasis elektrokimia
- d) 1 (satu) orang S2 Kimia dengan pengalaman minimal 1 tahun dan memiliki kompetensi dalam instrumentasi dan uji proses berbasis elektrokimia
- e) 1 (satu) orang S1 Kimia dengan pengalaman minimal 2 tahun dan memiliki kompetensi dalam instrumentasi dan uji proses berbasis elektrokimia

PARAF
KONSULTAN

fk

3

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>[Signature]</i>	/

HARGA KONTRAK dan KETENTUAN PEMBAYARAN

1. HARGA KONTRAK

HARGA KONTRAK adalah maksimal sebesar Rp1.193.700.000,- (satu milyar seratus sembilan puluh tiga juta tujuh ratus ribu Rupiah), belum termasuk Pajak Pertambahan Nilai 10% (sepuluh persen).

2. TATA CARA PEMBAYARAN

2.1. Pembayaran kepada **KONSULTAN** berdasarkan **KONTRAK** ini akan dilaksanakan dengan cara sebagai berikut :

- a. **Tahap Pertama:** 30% (tiga puluh persen) dari **HARGA KONTRAK** atau sebesar Rp358.110.000,- (tiga ratus lima puluh delapan juta seratus sepuluh ribu Rupiah), setelah **KONSULTAN** menyelesaikan Tahap Persiapan Pekerjaan, dibuktikan dengan di tandatanganinya Berita Acara selesai pekerjaan oleh kedua pihak.
- b. **Tahap Kedua:** 40% (empat puluh persen) dari **HARGA KONTRAK** atau sebesar Rp477.480.000,- (empat ratus tujuh puluh tujuh juta empat ratus delapan puluh ribu Rupiah), setelah **KONSULTAN** menyelesaikan Tahap Uji Skala Laboratorium dan Pengembangan Proses, dibuktikan dengan di tandatanganinya Berita Acara selesai pekerjaan oleh kedua pihak
- c. **Tahap Ketiga:** 30% (tiga puluh persen) dari **HARGA KONTRAK** atau sebesar Rp358.110.000,- (tiga ratus lima puluh delapan juta seratus sepuluh ribu Rupiah), setelah **KONSULTAN** menyelesaikan Tahap Pembuatan Laporan, dibuktikan dengan di tandatanganinya Berita Acara selesai pekerjaan oleh kedua pihak

2.2. **KONSULTAN** wajib menagih kepada **PERUSAHAAN** untuk **PEKERJAAN** yang telah dilaksanakan dan telah diterima dengan baik oleh **PERUSAHAAN** selambat-lambatnya 90 (sembilan puluh) hari kalender setelah **TANGGAL SELESAINYA PEKERJAAN**. Apabila **KONSULTAN** menagih di luar jangka waktu tersebut, maka **PERUSAHAAN** tidak wajib menjamin likuiditas pembayaran kepada **KONSULTAN**.

2.3. Apabila **KONSULTAN** terlambat menagih kepada **PERUSAHAAN** yang mengakibatkan adanya denda pajak maka denda pajak dimaksud menjadi tanggungjawab **KONSULTAN** yang akan langsung dipotongkan pada tagihan **KONSULTAN**.

2.4. Dokumen tagihan tersebut wajib diajukan secara lengkap dan benar, terdiri dari :

- a. Foto copy **KONTRAK**
- b. Invoice Asli bermaterai
- c. Kuitansi asli bermaterai
- d. Dokumen lainnya sesuai peraturan Perpajakan yang berlaku
- e. Berita Acara Serah Terima/Penyelesaian Pekerjaan

dan tagihan asli diserahkan kepada **PERUSAHAAN**, cq. Account Payable Manager/Divisi Kontroller-Direktorat Keuangan PT Pertamina (Persero)

2.5. Khusus faktur pajak, **KONSULTAN** wajib mencantumkan tanggal faktur pajak dan tanggal invoice sesuai dengan penyerahan **PEKERJAAN** dan menyampaikannya pada bulan yang sama. Faktur pajak dan invoice harus diisi secara lengkap dan benar, apabila tanggal faktur pajak tidak memenuhi ketentuan tersebut, **PERUSAHAAN** berhak menolak/mengembalikan berkas invoice.

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	/

Apabila setelah invoice diterima namun ternyata masih diperlukan perbaikan/penambahan kelengkapan dokumen dan penyampaian dokumen tersebut berbeda bulan dengan bulan pada faktur pajak dan invoice, **KONSULTAN** wajib kembali merevisi dan menyampaikan kepada **PERUSAHAAN** faktur pajak pengganti dan invoice dengan bulan yang sama dengan bulan penyampaian dokumen perbaikan tersebut.

- 2.6. Apabila **PERUSAHAAN** mempersoalkan suatu barang/jasa atau jumlah yang ditagih, **PERUSAHAAN** akan memberitahu secara tertulis kepada **KONSULTAN** tentang barang/jasa atau jumlah yang diperselisihkan tersebut dengan merinci alasannya. Tagihan semula yang diajukan **KONSULTAN** dianggap batal dan **KONSULTAN** wajib membuat tagihan yang baru untuk jumlah yang tidak diperselisihkan, sedangkan jumlah yang diperselisihkan akan diselesaikan kemudian.
- 2.7. **PERUSAHAAN** wajib membayar tagihan **KONSULTAN** dalam waktu maksimal 30 (tiga puluh) **HARI KALENDER** setelah dokumen diterima secara lengkap dan benar.
- 2.8. Pembayaran akan dilakukan oleh **PERUSAHAAN** dengan transfer Bank kepada rekening Bank **KONSULTAN** dengan alamat :

Bank : Bank BNI Cabang KCP UNSRI Indralaya
 Rekening No. : 0070570115
 Atas Nama : RPL 014 Unsri Penerimaan BLU

- 2.9. **KONSULTAN** dapat mengusulkan perubahan rekening Bank dengan cara mengajukan permohonan tertulis kepada **PERUSAHAAN**. Permohonan perubahan rekening Bank tersebut harus ditandatangani oleh penandatangan kontrak awal/pejabat yang berwenang yang mempunyai otorisasi sesuai dengan Anggaran Dasar **KONSULTAN** dan Akta perubahannya yang terakhir.

Pembayaran melalui rekening Bank yang baru, dilaksanakan setelah mendapat persetujuan tertulis dari penandatangan **KONTRAK** yang mewakili **PERUSAHAAN** atau pejabat yang berwenang. Selanjutnya perubahan rekening Bank akan dituangkan dalam bentuk Amandemen.

- 2.10. Pembayaran dilakukan dalam mata uang sesuai dengan ketentuan nilai **KONTRAK** sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1 Lampiran C. Apabila **PERUSAHAAN** membayar dengan mata uang yang berbeda, maka nilai tukar yang akan digunakan adalah nilai tukar yang berlaku pada hari pertama dari bulan dimana tagihan bersangkutan di bayar dengan kurs tengah Bank Indonesia.
- 2.11. **PERUSAHAAN** berhak memotong tagihan **KONSULTAN** atas seluruh hutang dan kewajiban lain **KONSULTAN** kepada **PERUSAHAAN** yang timbul dari **KONTRAK** ini maupun kontrak lain.

3. PAJAK DAN PUNGUTAN

- 3.1. Semua pajak, bea meterai, iuran redistribusi dan atau pungutan lain berdasarkan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku dalam pelaksanaan **KONTRAK** ini menjadi beban dan tanggung jawab **KONSULTAN**, kecuali Pajak Pertambahan Nilai (PPN) menjadi beban dan tanggung jawab **PERUSAHAAN**.
- 3.2. **PERUSAHAAN** akan memungut Pajak Penghasilan (PPH) dan Pajak Pertambahan Nilai (PPN) dari setiap pembayaran kepada **KONSULTAN** sesuai dengan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.
- 3.3. Ketentuan ini juga berlaku terhadap pungutan pajak lain, bila terjadi perubahan peraturan perundang-undangan di bidang perpajakan, sepanjang hak atau kewenangan tersebut diatur dan diwajibkan oleh peraturan perundang-undangan dibidang perpajakan tersebut.
- 3.4. Pungutan Pajak Pertambahan Nilai (PPN) yang dikenakan/terhutang sebagaimana yang dimaksud dalam Pasal ini akan disetorkan langsung oleh **PIHAK** yang berwenang dan dalam jangka waktu

2

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	

yang telah ditetapkan oleh peraturan perundang-undangan Perpajakan yang berlaku kepada Kas Negara.

- 3.5. Bilamana diperlukan oleh salah satu pihak atau instansi yang berwenang untuk kepentingan administrasi atau audit, maka baik **PERUSAHAAN** maupun **KONSULTAN** akan memberikan bukti-bukti pembayaran yang berkaitan dengan pajak, iuran, redistribusi dan/atau pungutan lain.

4. SANKSI DAN DENDA

- 4.1. Apabila **KONSULTAN** tidak dapat menyelesaikan **PEKERJAAN** dalam Jangka Waktu Pekerjaan sebagaimana diatur dalam Lampiran D, maka untuk setiap hari keterlambatan **KONSULTAN** akan dikenakan denda keterlambatan sebesar 1 ‰ (satu permil) dari **HARGA KONTRAK** dengan jumlah maksimum denda/sanksi adalah sebesar 5 % (lima persen) dari **HARGA KONTRAK**.
- 4.2. Pembayaran denda sebagaimana dimaksud pada ayat 4.1 Pasal ini, akan diperhitungkan dengan tagihan **KONSULTAN** pada saat pelaksanaan pembayaran **HARGA KONTRAK**
- 4.3. Dalam hal **KONSULTAN** tidak dapat memenuhi sebagian atau seluruh **PEKERJAAN** yang berpotensi mengganggu operasi **PERUSAHAAN**, **PERUSAHAAN** akan menerbitkan Surat teguran/peringatan. Apabila **KONSULTAN** tidak mampu atau tidak beritikad untuk memperbaiki/mengindahkan Surat peringatan **PERUSAHAAN** tersebut, **PERUSAHAAN** dapat menunda pembayaran, menghentikan sementara **PEKERJAAN** hingga pemutusan **KONTRAK**, dan memberikan sanksi administratif.

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

3

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>W</i>	

JANGKA WAKTU DAN JADWAL PELAKSANAAN PEKERJAAN

1. **JANGKA WAKTU KONTRAK** adalah sejak ditandatangani Kontrak dan akan tetap berlaku sampai dengan terpenuhinya hak dan kewajiban **PARA PIHAK** secara keseluruhan berdasarkan **KONTRAK** ini.
2. **TANGGAL DIMULAINYA PEKERJAAN** adalah sejak tanggal ditandatanganinya kontrak oleh Kedua Pihak.
3. **MASA PENYELESAIAN PEKERJAAN** adalah selama 12 (dua belas) Bulan sejak kontrak ditandatanganinya kontrak oleh Kedua Pihak.
4. **PERUSAHAAN** dapat setiap waktu memerintahkan **KONSULTAN** untuk menunda pelaksanaan **PEKERJAAN** yang lamanya akan dituangkan secara tertulis di dalam berita acara penundaan **PEKERJAAN** / Pemberitahuan.

PARAF KONSULTAN
<i>fh</i>

1

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	

HEALTH, SAFETY, ENVIRONMENT (HSE)

PERUSAHAAN memiliki komitmen yang kuat untuk melindungi setiap orang, asset perusahaan, lingkungan dan komunitas sekitar dari potensi bahaya yang terkait dengan kegiatan **PERUSAHAAN**. Komitmen tersebut salah satunya ditunjukkan dengan mensyaratkan pengelolaan aspek HSE dalam pelaksanaan pekerjaan "**Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia**", yang mewajibkan **KONSULTAN** untuk memenuhi dan melaksanakan ketentuan Perundang-undangan yang berlaku mengenai aspek HSE sehingga seluruh aktivitas pekerjaan dapat dilaksanakan dan dikelola secara aman.

PARAF KONSULTAN
<i>Hk</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	

LAIN-LAIN

1. PENGAWAS/ DIREKSI PEKERJAAN

- 1.1. Pjs. VP New & Renewable Energy selain bertindak mewakili **PERUSAHAAN** juga bertindak selaku Direksi Pekerjaan dan berwenang untuk memberikan instruksi, pemberitahuan serta bertanggungjawab atas pengawasan Pekerjaan yang ditugaskan kepada konsultan yang disediakan oleh **KONSULTAN** kepada **PERUSAHAAN**.
- 1.2. **KONSULTAN** menunjuk seorang pimpinan pelaksana Pekerjaan untuk mewakili **KONSULTAN** dan mempunyai wewenang penuh untuk mengambil tindakan atau keputusan dan melaksanakan setiap instruksi/pemintaan **PERUSAHAAN** dalam pelaksanaan Pekerjaan.

2. KORESPONDENSI

- 2.1. Setiap surat-menyurat, komunikasi atau korespondensi dalam pelaksanaan **KONTRAK** akan diberitahukan atau disampaikan oleh salah satu **PIHAK** kepada **PIHAK** lainnya pada alamat sebagaimana tercantum di bawah ini:

a. **PERUSAHAAN :**

PT Pertamina (Persero)

U .p. Pjs. VP New & Renewable Energy R&T

Lantai 51 Sopo Del Office Tower Jl. Mega Kuningan Barat III Lot.10 1-6 Kawasan Mega

Kuningan Jakarta Selatan

Telepon No. : (+62 21) 3815111 ext 7740

b. **KONSULTAN :**

Badan Pengelola Usaha (BPU)

Universitas Sriwijaya

U.p. Kepala BPU

Gedung KPA Lt. 1 Kampus UNSRI Bukit Besar

Jl. Sriwijaya Negara Kec. Ilir Barat I

Palembang-Sumatera Selatan 30139

Telepon No. : (+62 711) 580169 / HP: 08163280681

- 2.2. **PARA PIHAK** akan segera mengajukan pemberitahuan secara tertulis kepada **PIHAK** lainnya apabila terjadi perubahan alamat atau tempat pemberitahuan sebagaimana tersebut di atas tanpa dibuat Addendum terhadap **KONTRAK** ini dan menjadi lampiran **KONTRAK** yang mengikat **PARA PIHAK**.

3. DOKUMEN TERKAIT

- 3.1. Rencana Kerja dan Syarat-syarat Kerjasama
- 3.2. Surat Penawaran Harga No. 058/G20160/2019-S0 tanggal 16 Oktober 2019
- 3.3. Berita Acara Penjelasan Pekerjaan No. 016/G20160/2019-S7 tanggal 23 Oktober 2019
- 3.4. Berita Acara Pembukaan Penawaran No. 017/G20160/2019-S7 tanggal 23 Oktober 2019
- 3.5. Berita Acara Evaluasi Administrasi, Teknis & Harga No. 018/G20160/2019-S7 tanggal 23 Oktober 2019

PARAF KONSULTAN
<i>fh</i>

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>BK</i>	/

- 3.6. Berita Acara Klarifikasi dan Negosiasi Harga No. 019/G20160/2019-S7, tanggal 23 Oktober 2019
- 3.7. Surat Penegasan Negosiasi Harga No. 0112/UN9.SB2.BPU/2019, tanggal 28 Oktober 2019

PARAF KONSULTAN
<i>fk</i>

2

PARAF PERUSAHAAN	
Fungsi User	Fungsi Legal
<i>Dr</i>	



KEPUTUSAN DIREKTUR UTAMA BADAN PENGELOLA USAHA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
NOMOR : 0021/UN9/SK.BUK.BPU/2019

TENTANG

TIM PEKERJAAN JASA KONSULTASI PENGEMBANGAN
PROSES KONVERSI KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL
DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA

DIREKTUR UTAMA BADAN PENGELOLA USAHA UNIVERSITAS SRIWIJAYA,

- Menimbang
- a. bahwa berdasarkan surat perintah kerja Nomor : 003/P00000/2019-S0 tanggal 22 November 2019;
 - b. bahwa sehubungan dengan huruf a di atas, maka dipandang perlu pengangkatan Tim Pekerjaan Jasa Konsultasi Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia;
 - c. bahwa sehubungan dengan huruf a, dan b, maka perlu diterbitkan Surat Keputusan Rektor sebagai Pedoman dan Landasan Hukumnya.
- Mengingat
1. Undang-undang Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi;
 2. Peraturan Pemerintah No. 5 Tahun 2014 tentang Aparatur Sipil Negara;
 3. Peraturan Pemerintah No. 42 Tahun 1960 Pendirian Universitas Sriwijaya;
 4. Peraturan Pemerintah Nomor 17 Tahun 2010 tentang Sistem Pendidikan Nasional;
 5. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi;
 6. Peraturan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2015 tentang Organisasi dan Tata Kerja Universitas Sriwijaya;
 7. Peraturan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 17 tahun 2018 tentang Statuta Universitas Sriwijaya;
 8. Keputusan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Nomor 98 Tahun 2016 tentang Pemberian Kuasa dan Delegasi wewenang Pelaksanaan Kegiatan administrasi Kepegawaian Kepada Pejabat Tertentu di Lingkungan Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi;

9. Keputusan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 334/M/KP/XI/2015 tentang Pemberhentian dan Pengangkatan Rektor Universitas Sriwijaya;
10. Keputusan Menteri Keuangan Nomor 190/KMK.05/2009 tentang penetapan Universitas Sriwijaya pada Departemen Pendidikan Nasional sebagai Instansi Pemerintah yang menerapkan Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum;
11. Keputusan Menteri Keuangan Nomor 515/KMK.05/2014 tentang Penetapan Remunurasi Universitas Sriwijaya;

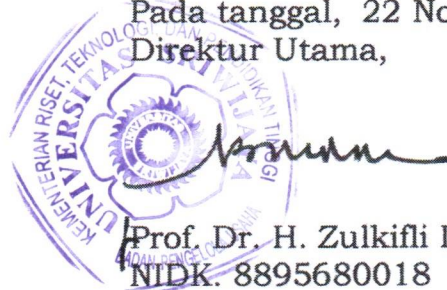
Menetapkan : PEMBENTUKAN TIM PEKERJAAN JASA KONSULTASI PENGEMBANGAN PROSES KONVERSI KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA

KESATU : Menunjuk dan mengangkat Tim Pekerjaan Jasa Konsultasi Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia sesuai dengan lampiran.

KEDUA : Segala biaya yang timbul sebagai akibat diterbitkannya surat keputusan di bebaskan kepada anggaran Universitas Sriwijaya dan/atau dana khusus yang disediakan untuk itu.

KETIGA : Keputusan Rektor Universitas Sriwijaya ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan, dan akan diperbaiki jika terdapat kekeliruan di kemudian hari.

Ditetapkan di Palembang
Pada tanggal, 22 November 2019
Direktur Utama,



The image shows a circular official stamp of Universitas Sriwijaya. The outer ring contains the text 'KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI' at the top and 'UNIVERSITAS SRIWIJAYA' at the bottom. Inside the ring, there is a gear-like emblem with the text 'UNIVERSITAS SRIWIJAYA' and '1912' around it. Overlaid on the stamp is a handwritten signature in black ink.

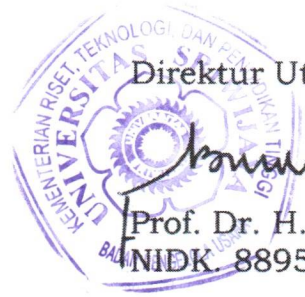
Prof. Dr. H. Zulkifli Dahlan, M.Si., DEA.
NIDK. 8895680018

Tembusan :
1. Rektor;
2. Wakil Rektor Bidang I, II, dan IV;
3. Kepala Biro Umum dan Keuangan;
Universitas Sriwijaya.

Lampiran Surat Keputusan Direktur Utama
Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya
Nomor 0021/UN9/SK.BUK.BPU/2019
Tanggal 22 November 2019

TIM PEKERJAAN JASA KONSULTASI PENGEMBANGAN
PROSES KONVERSI KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL
DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA

No	Nama	Jabatan
1	Prof. Dr. Ir. H. Anis Saggaff, M.SCE	Pengarah
2	Prof. Ir. Zainuddin Nawawi, Ph.D	Nara Sumber
3	Mukhtaruddin, SE, Ak., M.Si	Nara Sumber
4	Dr. A. Muslim, M.Agr	Nara Sumber
5	Prof. Dr. Ir. Muhammad Said, M. Sc	Nara Sumber
6	Drs. Didi Jaya Santri, M. Si	Nara Sumber
7.	Prof. Dr. H. Zulkifli Dahlan, M.Si., DEA	Direktur Utama BPU
8.	Dr. Made Sukaryawan, M. Si	Wakil Direktur Utama BPU
9.	Dr. Dedi Rohedi, MT	Penanggung Jawab
10.	Dr. Nirwan Syarif, M. Si	Tenaga Ahli
11.	Dr. Addy Rachmat, M. Si	Tenaga Ahli
12.	Drs. Almunadi T.P Panagan, M. Si	Tenaga Ahli
13.	Dwi Hawa Yulianti, S. Si., M. Si	Asisten Tenaga Ahli
14.	Dea Radestia Rahmah, S. Si	Asisten Tenaga Ahli
15.	Icha Amelia, S. Si	Asisten Tenaga Ahli
16.	Nyimas Febrika, S. Si., M. Si	Asisten Tenaga Ahli
17.	M. Hafizh	Asisten Tenaga Ahli
18.	Zaki Yamani, S. Si	Tenaga Pendukung Pengadaan Peralatan dan Mesin
19.	Inaya Mandayuni, ST	Tenaga Pendukung Pengadaan Peralatan dan Mesin
20.	Frisiska Oktarina, SE	Administrasi Keuangan
21.	Annisa Indah Sari, SP	Administrasi Keuangan



Direktur Utama,

Prof. Dr. H. Zulkifli Dahlan, M.Si., DEA.
NIDK. 8895680018

LAPORAN TAHAP I
FORUM IDEASI RISET PERTAMINA – UNSRI 2019

**PENGEMBANGAN PROSES KONVERSI
KARBON DIOKSIDA MENJADI METANOL
DENGAN METODE REDUKSI
ELEKTROKIMIA**



Tim Peneliti:

Dr. Dedi Rohendi, M.T (Ketua)
Dr. Nirwan Syarif, M.Si (Anggota)
Dr. Addy Rachmat, M.Si (Anggota)
Dwi Hawa Yulianti, S.Si, M.Si (Asisten Peneliti)
Dea Radestia Rahmah, S.Si (Asisten Peneliti)



**PUSAT UNGGULAN RISET (PUR) FUEL CELL DAN HIDROGEN
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

<http://www.fuel-cell.rnd.unsri.ac.id>; e-mail: pur-fuelcell@unsri.ac.id
Kampus UNSRI Bukit Besar Jl. Srijaya Negara, Palembang

DAFTAR ISI

HALAMAN DEPAN	i
DAFTAR ISI	ii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Riset	2
1.3 Gambaran Umum	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Karbon Dioksida	4
2.2 Metanol	5
2.3 Elektroda	8
2.3.1 Tembaga sebagai Elektroda	8
2.3.2 Platina sebagai Elektroda	9
2.4 Metode Konversi CO ₂ menjadi Metanol	10
2.4.1 Reduksi Elektrokimia CO ₂	10
2.5 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	12
BAB III METODOLOGI	14
3.1 Tempat Riset	14
3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan	14
3.3 Prosedur Riset.....	15
3.3.1 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	15
3.3.2 Preparasi Elektroda	15
3.3.3 Karakterisasi Elektroda.....	16
3.3.3.1 Karakterisasi Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD).....	16
3.3.3.2 Pengujian Sifat Elektrokimia menggunakan <i>Cyclic Voltammetry</i> (CV)	16
3.3.3.3 Pengukuran Konduktivitas Elektrik	16
3.3.4 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	17
3.3.5 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO ₂	17
3.3.5.1 Pengaruh Laju Alir	18
3.3.5.2 Pengaruh Arus Listrik	19

3.3.6 Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk	19
3.3.5.1 Pengaruh Laju Alir	19
BAB IV PERENCANAAN DAN REALISASI AKTIVITAS TAHAP I.....	20
4.1 Pengurus Administrasi dan Perizinan	20
4.2 Persiapan Pengadaan Bahan	21
4.3 Desain dan Setting Peralatan	21
4.4 Rancangan Percobaan.....	22
BAB V PENUTUP.....	25
Referensi	26
Lampiran	30



BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Riset yang akan dilakukan merupakan aplikasi prinsip elektrokimia untuk mengubah karbondioksida menjadi bahan bakar yang bermanfaat. Seperti diketahui, karbondioksida merupakan salah satu polutan sumber gas rumah kaca dan dihasilkan dari proses produksi dan pengolahan minyak dan gas bumi. Ada beberapa mekanisme reaksi pemanfaatan CO_2 menghasilkan bahan bakar, antara lain; menghasilkan syn gas, metana, metanol dan hidrogen. Produk yang akan dihasilkan tergantung pada kondisi reaksi dan penggunaan katalis yang berbeda. Pada penelitian ini akan dilakukan konversi CO_2 secara elektrokimia untuk menghasilkan metanol dan juga hidrogen sebagai bahan bakar untuk fuel cell melalui dua jalur. Jalur pertama adalah konversi CO_2 secara elektrokimia langsung menjadi metanol dan jalur kedua adalah melalui elektrolisis bersama CO_2 dan air melalui tahapan pembentukan syn gas (CO dan H_2) untuk menghasilkan metanol. Karbondioksida (CO_2) akan direduksi pada sisi katoda menghasilkan produk bahan bakar dan pada sisi anoda akan dioksidasi air (H_2O) menghasilkan elektron dan H^+ . Ion H^+ akan menyebrang ke katoda melalui membran elektrolit penghantar proton berupa membrane nafion-117. Sistem elektrokimia yang digunakan sama seperti pada fuel cell. Teknologi fuel cell dan hidrogen merupakan bidang yang selama ini diteliti dan dikembangkan di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya (UNSRI).

Riset ini menggabungkan tiga topik riset yang ditawarkan, yaitu *Pengembangan teknologi capture CO_2* , *Pengembangan CO_2 sebagai bahan bakar* (khususnya methanol dan Hidrogen) dan *penggunaan bahan bakar hasil konversi CO_2 untuk bahan bakar fuel cell*, baik secara langsung maupun tidak langsung. Sumber energi untuk elektrolisis berasal dari solar cell yang telah terpasang di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya. Keuntungan dari metode elektrolisis adalah reaksi cukup sederhana dan dalam



kondisi ambien. Selain itu, pemanfaatan solar cell untuk proses elektrolisis akan mengurangi pemakaian energi listrik dari PLN.

Penelitian tahun pertama melalui Kegiatan Forum Ideasi Riset Bersama Pertamina-Universitas tahun 2018 difokuskan pada konversi CO₂ dengan menggunakan metode reduksi elektrokimia langsung menjadi methanol. Sementara proposal riset tahun kedua (yang sudah diusulkan juga) nantinya difokuskan pada konversi CO₂ menjadi methanol secara tidak langsung.

Proses elektrokimia pengubahan karbondioksida menjadi produk metanol dan hidrogen dilakukan melalui media *Membrane Electrode Assembly* (MEA) seperti yang digunakan pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) dan DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*). Pusat Unggulan Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya telah berhasil membuat dan menguji kinerja MEA yang digunakan pada kedua jenis fuel cell di atas. Produk metanol yang akan dihasilkan, diharapkan dapat digunakan sebagai bahan bakar untuk fuel cell, baik DMFC (bahan bakar langsung) maupun PEMFC (bahan bakar tidak langsung). Dengan rekam jejak penelitian dan fasilitas yang tersedia di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen UNSRI, penelitian ini diharapkan dapat dilaksanakan dengan baik.

1.2. Tujuan Riset

Tujuan utama dari riset tahun pertama adalah:

- a) Mengubah CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung dengan katalis, arus dan laju alir CO₂ yang bervariasi;
- b) Menentukan rendemen metanol dan hidrogen yang dihasilkan dari kedua metode;
- c) Memurnikan dan mengujicoba pemanfaatan metanol yang dihasilkan sebagai bahan bakar fuel cell.

Sementara itu, tujuan khusus untuk riset tahap pertama berdasarkan KAK yang disetujui adalah:

- a) Mengurus administrasi dan perizinan



- b) Persiapan pengadaan bahan.
- c) Desain dan setting peralatan.
- d) Menyusun rancangan percobaan

1.3. Gambaran Umum

Dokumen ini berisi laporan awal dari program kerjasama antara Pertamina dan Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya dalam sebuah proyek yang berjudul **Pengembangan Proses Konversi Karbon Dioksida Menjadi Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia**. Langkah awal yang akan dilakukan pada proyek ini sebelum proses penelitian adalah melakukan persiapan dalam bentuk pembuatan desain peralatan dan rancangan percobaan serta persiapan pengadaan bahan.

Desain dan rancangan alat dibuat untuk mempermudah dan mempercepat dalam proses pekerjaan, produksi yang dihasilkan juga lebih tepat sehingga lebih efektif dan efisien. Sementara itu, rancangan percobaan disusun agar riset ini dapat berjalan sesuai kaidah dan literatur penunjang yang ada serta dengan memperhatikan prosedur yang efektif dan efisien untuk menjawab tujuan penelitian.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karbon Dioksida

Karbon dioksida dengan rumus molekul CO_2 memiliki massa molar 44 g/mol, pada suhu normal membentuk fase gas dan bersifat inert (sangat tidak reaktif). CO_2 merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau (pada konsentrasi atmosfer 0,039% (v/v)) tidak mudah terbakar dan memiliki rasa yang sedikit asam, serta dikenal sebagai gas rumah kaca (Services, 2011; Qiao, Liu and Zhang, 2016). Molekulnya relatif stabil dan tidak mudah terpecah menjadi senyawa yang lebih kecil. Hanya dengan pemanasan, sinar ultraviolet, atau arus listrik, CO_2 dapat terpecah seperti pada persamaan (1):



Suhu tinggi atau penggunaan katalis dapat mengarahkan ke reaksi yang lain pada karbon dioksida. Pada reaksi RWGS (*Reverse Water-Gas Shift*), dimana karbon dioksida bereaksi dengan hidrogen menghasilkan karbon monoksida, ditunjukkan pada persamaan (2):



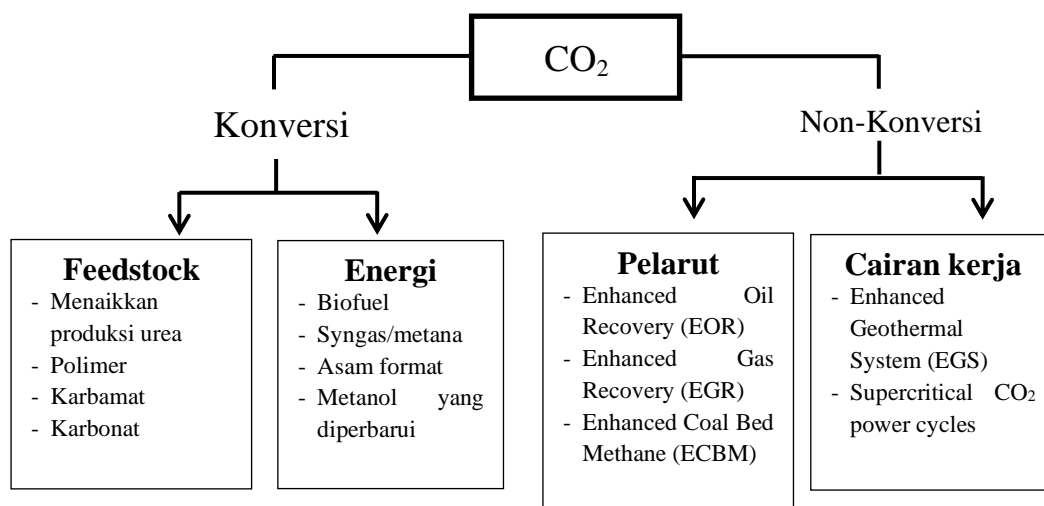
atau pada suhu yang lebih tinggi, karbon monoksida terbentuk dari reaksi karbon dioksida dengan karbon, seperti pada persamaan (3) (Vanhove, 2015):



Kelarutan yang rendah dari CO_2 adalah salah satu keterbatasan yang utama dari beberapa riset tentang reduksi CO_2 . Pada temperatur dan tekanan standar, kelarutan CO_2 dalam air sebesar ~ 34 mM atau 0,033 M, yang berarti densitas arus maksimum yang tersedia sebesar ~ 30 mA/cm² sedangkan kelarutan CO_2 pada metanol sebesar 0,06 M (Lu and Jiao, 2016; Qiao, Liu and Zhang, 2016). Pada prakteknya, untuk reduksi CO_2 cair densitas arus rata-rata yang diperoleh sedikit rendah yaitu pada 10-20 mA/cm². Meskipun densitas arus ini cukup tinggi untuk studi selektivitas/mekanistik, perangkat untuk menyimpan listrik pada bahan bakar yang menghasilkan H_2 seperti *electrolyzers* beroperasi



pada densitas arus 100-300 mA/cm² pada kondisi basa dan mencapai nilai yang lebih tinggi (800-1600 mA/cm²) pada *electrolyzers* dalam kondisi asam (Turner *et al.*, 2008). Penelitian terkait menunjukkan bahwa reduksi CO₂ dapat menekan biaya yang cukup signifikan jika tercapai densitas arus yang lebih tinggi pada overpotensial yang rendah (150 mA/cm² @ 1 V η_{cell}) (Verma *et al.*, 2017) dan hal ini tidak mungkin terjadi pada elektrolit cair, bahkan jika dalam kondisi ekstrim untuk meningkatkan kelarutan CO₂ secara signifikan, misalnya suhu di bawah nol dan tekanan >10 bar. Skema perubahan CO₂ menjadi bahan-bahan yang berguna disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Ringkasan Aplikasi Carbon Capture Utilities (CCU) (Vanhove, 2015)

Aplikasi dari CO₂ ditunjukkan pada Gambar 1, yang dibagi menjadi 2 kelompok utama, yaitu dikonversi menjadi produk yang lebih bernilai misalnya methanol atau sifat spesifik molekul yang digunakan, misalnya sebagai pelarut atau cairan kerja .

2.2. Metanol

Metanol (CH₃OH) banyak digunakan sebagai pelarut dalam industri kimia karena kemampuannya yang dapat melarutkan berbagai senyawa organik maupun anorganik. Metanol juga digunakan sebagai reaktan dalam pembentukan formaldehida atau metil ester yang diaplikasikan sebagai bahan



anti beku (anti-freeze) pada industri otomotif maupun pesawat terbang (Salimy and Alimah, 2016).

Metil alkohol atau yang dikenal dengan metanol merupakan produksi industri petrokimia yang mempunyai rumus molekul CH_3OH . Metanol mempunyai berat molekul 32,04 g/mol dan suhu ruangan. Titik didih metanol sebesar $64,5\text{ }^\circ\text{C}$ dan titik leburnya sebesar $-98\text{ }^\circ\text{C}$, serta konduktivitas $< 1\ \mu\text{S/cm}$. Metanol mempunyai sifat mudah menguap, tidak berwarna, mudah terbakar, dan beracun dengan bau yang menyengat (Merck, 2018).

Metanol juga diproyeksikan sebagai bahan bakar alternatif masa depan karena memiliki bilangan oktan yang tinggi dengan pembakaran yang lebih sempurna sehingga gas karbon monoksida sebagai hasil samping reaksi utama yang dihasilkan semakin sedikit (Park *et al.*, 2014). Metanol merupakan bahan bakar ramah lingkungan dengan densitas energi hampir setengah dari bensin (metanol: $15,6\ \text{MJ.L}^{-1}$; bensin: $34,2\ \text{MJ.L}^{-1}$), namun juga perantara yang penting untuk beberapa zat kimia curah yang digunakan dalam produk sehari-hari seperti silikon, cat, dan plastik. Dibandingkan hidrogen, metanol memiliki densitas energi yang tinggi, yang dapat disimpan dalam tekanan atmosfer, dan dapat digunakan secara langsung dalam sistem konversi energi seperti mesin pembakar internal, karena nilai oktannya yang tinggi, atau digunakan langsung seperti pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) atau secara tidak langsung (setelah dikonversi menjadi hidrogen). Saat ini, kebanyakan dari metanol komersial diproduksi dari metana melalui syngas (campuran CO dan H_2) dengan reforming uap dalam kapasitas jutaan ton per tahun pada industri skala besar (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013).

Transformasi CO_2 menjadi metanol membutuhkan 6 elektron agar terjadi reaksi reduksi (dianggap lebih lambat secara kinetik), oleh karena itu material katalis yang dibutuhkan harus sangat aktif dan selektif. (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013). Pada sintesis metanol, pemilihan jenis katalis berperan penting dalam mempengaruhi kondisi operasi sintesis metanol. Setiap katalis memiliki kinerja optimum pada kondisi operasi tertentu, misal katalis $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ bekerja baik pada kondisi operasi suhu $200\text{ }^\circ\text{C}$ – $450\text{ }^\circ\text{C}$ dan

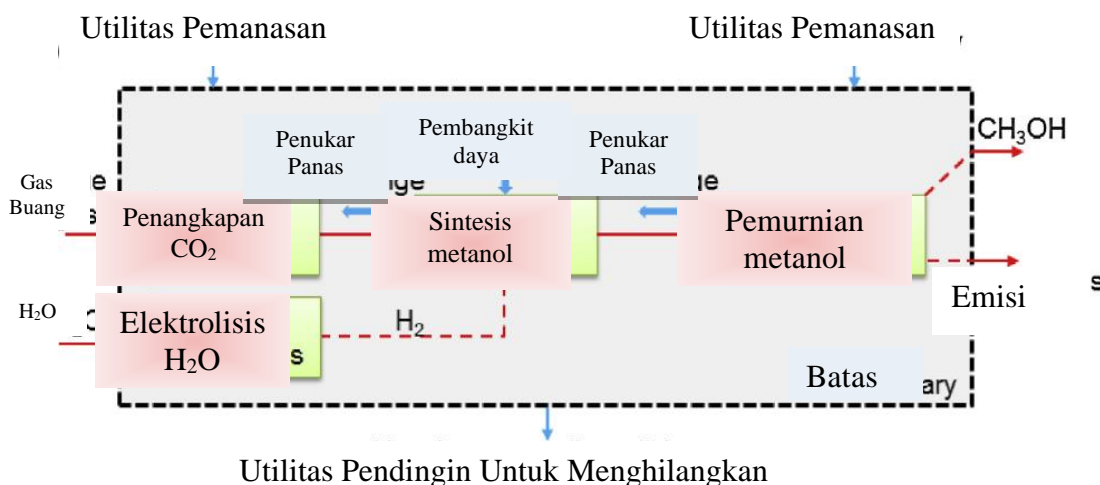


tekanan 40 bar - 100 bar. Proses hidrogenasi karbondioksida menggunakan katalis $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ dapat menghasilkan produk utama berupa metanol, CO dan air (Saito, 2000).

Berikut salah satu proses dalam pembuatan metanol: Proses Elektrokimia; Reaksi pembuatan metanol dari CO_2 dan H_2 dimulai dengan pembuatan gas H_2 dari elektrolisis air. Elektrolisis air adalah peristiwa penguraian senyawa air menjadi gas O_2 dan gas H_2 dengan menggunakan arus listrik. Pada katoda, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H_2 dan ion hidroksida (OH^-). Sementara itu pada anoda, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O_2), melepaskan 4 ion H^+ serta mengalirkan elektron ke katoda. Ion H^+ dan OH^- selanjutnya mengalami netralisasi sehingga membentuk kembali beberapa molekul air. Reaksi keseluruhan yang setara dari elektrolisis air dapat dituliskan sebagai berikut.



Gas H_2 yang dihasilkan dari elektrolisis dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan metanol. Sedangkan bahan baku lainnya, gas CO_2 , didapatkan dari *flue gas* atau emisi yang dihasilkan oleh *geothermal power plant*. Secara umum, proses pembuatan metanol dari flue gas dan H_2O tersaji dalam gambar 2.



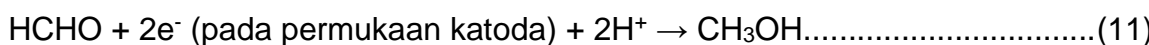
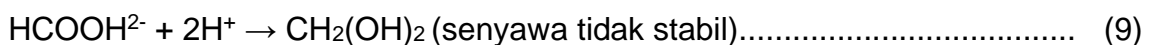
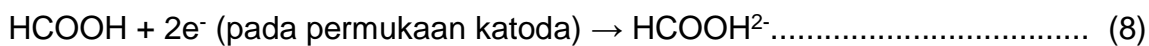
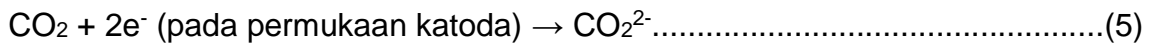
Gambar 2. Produksi Metanol dengan *Electrochemical Process* dan *Flue Gas* (Alkalbani *et al.*, 2016)

Pembuatan metanol dari *electrochemical process* pada gambar 2 menggunakan elektrolisis air untuk produksi H_2 , akan tetapi masih jarang



digunakan karena membutuhkan energi listrik yang tinggi. Walaupun membutuhkan energi listrik yang tinggi, tetapi hasil dari unit elektrolisis tidak menimbulkan emisi dan juga menghasilkan produk samping berupa gas O₂. Hal ini dapat dapat menutupi pengeluaran biaya listrik dari pabrik karena menghasilkan gas oksigen yang umumnya lebih banyak dipakai di unit elektrolisis. Di samping itu, proses ini dapat mengurangi emisi yang ada di lingkungan dengan mengurangi emisi CO₂ yang berasal dari *fluegas* (Al-kalbani *et al.*, 2016).

Mekanisme reaksi yang mungkin terjadi pada reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dapat dituliskan sebagai berikut (Qiao, Liu and Zhang, 2016):



Meskipun mekanisme membutuhkan konfirmasi lebih lanjut, reaksi yang pasti terjadi pada proses enam elektron (Persamaan 12):



Dan senyawa lainnya seperti HCOOH, HCHO, dan CH₄ juga terbentuk.

2.3. Elektroda

Kondisi operasi dalam proses sintesis metanol salah satunya dipengaruhi oleh pemilihan jenis elektroda. Masing-masing elektroda memiliki aktivitas katalitik yang optimum pada kondisi tertentu (Saito, 2000). Penelitian ini menggunakan elektroda berbasis tembaga dan platina.

2.3.1 Tembaga sebagai elektroda

Tembaga telah lama dianggap sebagai bahan elektroda yang sangat menarik untuk reduksi CO₂. Costentin (2013) menyatakan bahwa reduksi CO₂ yang dikatalisis oleh Cu₂O memberikan hasil yang jauh lebih baik dalam laju dan



overpotensi dibandingkan elektroda Cu biasa (Costentin, Robert and Savéant, 2013). Terkait dengan katalis yang digunakan pada reduksi elektrokimia, Albo (2015) melakukan penelitian reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol pada elektroda Cu₂O dan Cu₂O-ZnO menggunakan larutan elektrolit 0,5 M KHCO₃, dari hasil penelitian diperoleh efisiensi konversi CO₂ pada Cu₂O sebesar 54,8% dan 31,4%. Namun, elektroda Cu₂O-ZnO diperkirakan akan tetap stabil selama 20 jam, sedangkan pada permukaan Cu₂O mengalami deaktivasi yang kuat seiring dengan waktu (Albo and Irabien, 2015)

Arena (2008) mengkaji interaksi solid-state, fungsionalitas, dan situs adsorpsi dari katalis Cu-ZnO/ZrO₂ dan kemampuannya untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol. Data karakterisasi menunjukkan bahwa interaksi yang kuat Cu-ZnO secara efektif dapat meningkatkan dispersi dan reaktivitas tembaga ke oksigen (Arena *et al.*, 2008). Sedangkan Le (2011) menguji kimia permukaan dan pembentukan CH₃OH dari beberapa elektrokatalis dengan situs permukaan Cu(I) dan mempertimbangkan kemungkinan cara untuk reduksi elektrokimia langsung dari CO₂ menjadi metanol (Le *et al.*, 2011).

2.3.2 Platina sebagai elektroda

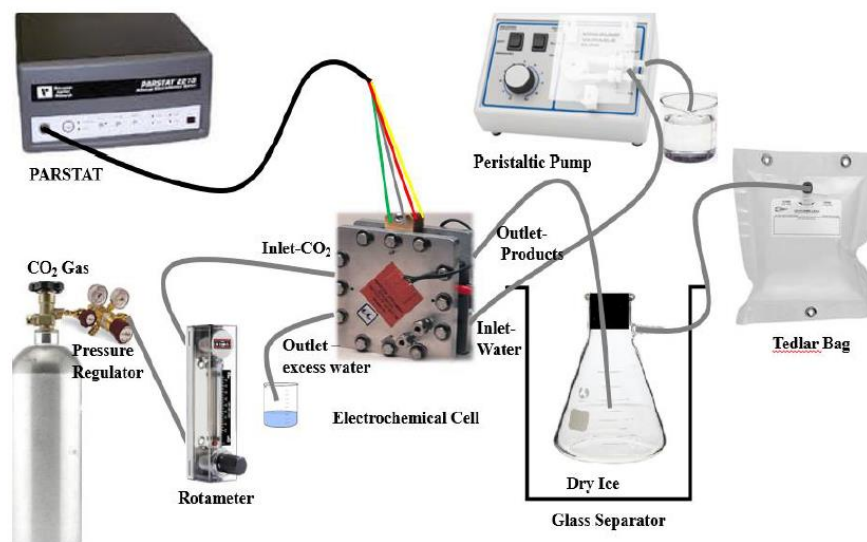
Platina merupakan salah satu unsur transisi golongan VIII dengan kelimpahan terbesar, yaitu 10⁻⁶% dimana unsur golongan VIII lainnya hanya memiliki kelimpahan 10⁻⁷%. Logam platina berwarna putih keabu-abuan dan bersifat inert serta merupakan salah satu unsur kimia pada tabel periodik yang mempunyai simbol Pt dengan nomor atom 78 dan memiliki konfigurasi [Xe] 4f¹⁴ 5d⁹ 6s¹. Titik lelehnya mencapai 1768,3 °C dan massa atom relatifnya adalah 195,09 g/mol (Cotton and Wilkinson, 2007). Shironita (2013) menguji reduksi CO₂ pada elektrokatalis Pt/C dan Pt-Ru/C menggunakan MEA dan memperoleh *yield* metanol 0,03% pada Pt/C dan 7,5% pada Pt-Ru/C, dengan efisiensi Coulomb 35% pada Pt/C dan 75% pada Pt-Ru/C (Shironita, Karasuda, K. Sato, *et al.*, 2013)

2.4. Metode Konversi CO₂ Menjadi Metanol

Al-Saydeh (2018) melaporkan bahwa terdapat 4 metode untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol, antara lain: konversi kimia; reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol; reduksi fotokimia CO₂ menjadi metanol; dan reduksi fotoelektrokimia CO₂ menjadi metanol (Al-Saydeh, 2018). Pada penelitian ini digunakan metode reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dengan pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi.

2.4.1 Reduksi Elektrokimia CO₂

Reduksi elektrokimia CO₂ secara langsung menghasilkan produk yang bervariasi, umumnya bergantung pada material katalis dan medium reaksi. Gambar 3 menunjukkan representasi bergambar dari rangkaian elektrokimia.



Gambar 3. Representasi Bergambar Dari Rangkaian Elektrokimia (Venka, 2016)

Reduksi elektrokimia CO₂ dapat diproses melalui jalur reduksi dua-, empat-, enam-, dan delapan elektron pada fase gas, berair dan non-aqueous pada sel dan konfigurasi elektroda yang berbeda, baik pada temperatur rendah maupun tinggi. Produk reduksi yang utama antara lain karbon monoksida (CO), asam format (HCOOH) atau format (HCOO⁻) pada larutan basa, asam oksalat



($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) atau oksalat ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ pada larutan basa), formaldehida ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), metanol (CH_3OH), metana (CH_4), etilena (CH_2CH_2), etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), dan lain-lain. Di antara berbagai zat yang dihasilkan, merupakan tantangan yang besar untuk mengubah CO_2 menjadi CH_3OH , namun potensial yang diperoleh juga sangat besar (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013; Qiao, Liu and Zhang, 2016).

Karbon dioksida (CO_2) adalah molekul yang sepenuhnya teroksidasi dan stabil secara termodinamik, pemanfaatan CO_2 melalui pendekatan elektrolisis dalam elektrolit berair menimbulkan beberapa tantangan teknis utama. Dalam beberapa dekade terakhir, pengurangan CO_2 telah dipelajari secara intensif menggunakan metode termokimia, elektrokimia, dan fotokimia. Untuk konversi termokimia CO_2 melalui proses reformasi, tidak hanya membutuhkan suhu reaksi dan tekanan tinggi, tetapi juga memerlukan jumlah hidrogen sebagai zat pereduksi yang cukup banyak, yang secara energetik bermasalah dalam penerapan pada aplikasi skala besar. Sebaliknya, reduksi CO_2 secara elektrokimia menjadi lebih menarik karena memiliki beberapa keunggulan karakteristik dibandingkan dengan pendekatan lain, sebagai contoh, reaksi dapat dilakukan pada kondisi ambien dengan laju reaksi yang mudah dikendalikan dengan menyetel bias eksternal (yaitu overpotential) (Lu and Jiao, 2016).

Fitriani (2012) melaporkan bahwa reduksi elektrokimia CO_2 ini merupakan reaksi yang terjadi secara tidak spontan dimana dibutuhkan sumber energi dari luar yang berasal dari *power supply*. Metode elektrokimia yang digunakan adalah elektrolisis dengan menggunakan arus tetap. Metode ini dipilih karena pada elektrolisis arus tetap tidak diperlukan kondisi potensial yang stabil dan juga untuk mempermudah mengamati efisiensi faraday dari hasil reduksi CO_2 (Fitriani, 2012).

Poin penting dari proses elektoreduksi CO_2 menjadi metanol antara lain: (1) material katoda yang digunakan, (2) efek dari medium reaksi, (3) kondisi operasi, (4) konfigurasi sel elektrokimia, dan (5) perbandingan dengan rute elektrokatalitik yang lain. (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013). Selama dekade terakhir, konversi elektrokimia CO_2 telah digunakan secara luas



di skala laboratorium, tapi belum berhasil digunakan dalam proses industri (skala besar). Metode reduksi elektrokimia digunakan untuk konversi CO₂ menjadi zat kimia yang bernilai dan bahan bakar seperti metanol menggunakan listrik sebagai sumber energi utama. Reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol secara langsung adalah proses yang menjanjikan untuk mengurangi sejumlah CO₂ yang di perangkap (Al-Saydeh, 2018). Produksi metanol melalui reduksi elektrokimia CO₂ merupakan pilihan yang lebih baik karena dapat dilakukan dibawah kondisi ringan dan dapat mencapai efisiensi yang lebih baik dengan biaya yang lebih rendah. Tabel 1 menunjukkan reaksi elektrokimia konversi CO₂ menjadi methanol pada kondisi standar.

Tabel 1. Reaksi elektrokimia untuk konversi CO₂ menjadi metanol di bawah kondisi standar

	Reaksi elektrokimia	E (V)
Katoda	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-0,22 vs SCE
Anoda	$3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 1.5\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,99 vs SCE
Reaksi Keseluruhan	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2$	1,21

(Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013)

Fitriani (2012) melakukan penelitian tentang reduksi elektrokimia CO₂ pada suhu sekitar 15 °C dengan menggunakan elektroda Cu sebagai elektroda kerja dan platina sebagai elektroda pembantu. Larutan elektrolit yang digunakan adalah NaHCO₃ dengan berbagai konsentrasi serta buffer fosfat dengan variasi pH asam, netral, dan basa (Fitriani, 2012)

2.5. *Membrane Electrode Assembly (MEA)*

Membrane Electrode Assembly (MEA) dapat dibuat menggunakan metode *Catalyst-Coated Substrate (CCS)* atau *Catalyst-Coated Membrane (CCM)* (Thanasilp and Hunsom, 2010). Pada metode CCS, lapisan katalis diletakkan di substrat *Gas Diffusion Layer (GDL)*. Setelah pasta katalis di spray ke GDL, membran diapit diantara GDL yang telah dilapisi katalis menggunakan *hot-*



pressing. *Hot-pressing* sangat penting untuk preparasi MEA berkinerja tinggi karena dapat meningkatkan adhesi antara lapisan katalis dan membran, yang mengarah pada peningkatan koneksi ion (Vielstich, Yokokawaa and Gasteiger, 2009). Namun, panas dan tekanan yang kuat dapat menyebabkan perubahan struktural pada MEA dan GDL, sehingga berpotensi menurunkan kinerja sel (Frey and Linardi, 2004). Sebaliknya, dalam metode CCM, lapisan katalis langsung dibuat pada membran tanpa di *hot-press*. Metode CCM menghindari kerusakan struktural MEA dan GDL, mengurangi resistensi ohmik, dan menyederhanakan proses pembuatan karena tidak memerlukan proses tambahan (Peng *et al.*, 2016).

Upaya untuk memahami dan menghasilkan MEA yang efektif telah dilakukan oleh Sossenburg (2018). Sistem MEA digunakan untuk menggabungkan reaksi fase cair dan gas serta membatasi crossover produk sambil menyediakan kedua setengah reaksi dengan reagen yang dibutuhkan masing-masing. Secara teori MEA hanya memiliki dua konstituen; membran dan katalis elektroda yang dikemas rapat. Namun, pemanfaatan MEA memiliki tujuan khusus bila dikombinasikan dengan *gas diffusion layer* (GDL). Dengan menggabungkan membran, lapisan katalis dan *gas diffusion layer* (GDL) hidrofobik, sistem ini mampu melakukan reaksi reduksi CO₂ dalam elektrolit cair sambil menggunakan aliran umpan gas CO₂. Konfigurasi yang sedikit berbeda yang mengintegrasikan elektroda dengan lapisan difusi gas juga dikenal sebagai *gas diffusion electrode* (GDE) di mana membran merupakan komponen terpisah pada jarak tertentu (Sassenburg, 2018).



BAB III

METODOLOGI

3.1. Tempat Riset

Riset akan dipusatkan dan dilaksanakan di Pusat Unggulan Riset (PUR) Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya dengan fasilitas yang relatif memadai, sementara karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) akan dilakukan di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya.

3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan

Peralatan yang akan digunakan pada penelitian ini antara lain; Sel *Electrolyzer*, *Mass Flow Controller*, *Spray Gun*, *High Temperature Vacuum Tube Furnace* OTF-1200X-S, *Hydraulic lamination hot press* EQ-HP-88V-LD, *Ultrasonic homogenizer* MSK-USP-3N, neraca analitik, peralatan gelas, Potensiostat AUTOLAB Metrohm PGSTAT128N, *Power Supply* LW-K3010D 30V/10A, pompa air, *X-Ray Diffraction*, Reaktor penampung methanol, Methanol analyzer, sensor dan pompa serta instalasi pipa.

Bahan-bahan yang akan digunakan pada penelitian antara lain, *carbon paper Avcarb P75T*, *carbon vulcan XC-72R*, amonium bikarbonat (NH_4CO_3), *Polytetrafluoroethylene* (PTFE), Membran Nafion 117, Larutan Nafion 20%, 2-propanol, air *ultrapure*, air demineralisasi, bubuk elektrokatalis Pt/C 10%, bubuk elektrokatalis Pt-Ru/C, bubuk elektrokatalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, Larutan H_2O_2 3%, Larutan H_2SO_4 0,5 M.



3.3. Prosedur Riset

3.3.1 Preparasi *Gas Diffusion Layer* (GDL)

GDL dipreparasi dengan mencampurkan *carbon vulcan XC-72R*, ammonium bikarbonat, PTFE, dan 2-propanol, kemudian diaduk menggunakan ultrasonik selama 15 menit hingga membentuk pasta. Pasta yang dihasilkan disemburkan di atas *carbon paper Avcarb P75T* sampai habis, kemudian GDL disintering selama ± 3 jam pada suhu 350°C .

3.3.2 Preparasi Elektroda

Elektroda yang digunakan terdiri atas katoda dan anoda dengan ukuran $7 \times 7 \text{ cm}^2$. Anoda menggunakan katalis Pt/C, sementara di katoda menggunakan katalis yang berbeda. Katoda pertama menggunakan katalis Pt-Ru/C, sementara katoda yang kedua menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$, dengan pemuatan katalis 6 mg.cm^{-2} .

Preparasi elektrokatalis dibuat dengan cara mencampurkan bubuk Pt-Ru/C dengan air destilat secukupnya hingga kalis dan diaduk menggunakan spatula. Selanjutnya, Larutan Nafion 20% dan 2-propanol ditambahkan ke campuran katalis, kemudian campuran diagitasi selama 10 menit dalam *ultrasonic homogenizer*. Campuran ditambahkan PTFE dan pengadukan dilanjutkan selama 5 menit hingga membentuk pasta. Pasta disemburkan ke GDL, kemudian dikeringkan pada suhu ruangan. Pasta $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ dipreparasi dengan cara yang sama seperti yang telah disebutkan diatas dan disemprotkan pada GDL (Carmo et al., 2019). Elektroda yang telah dikeringkan, dikarakterisasi dengan XRD, CV dan EIS.



3.3.3 Karakterisasi Elektroda

Karakterisasi pada elektroda Pt-Ru/C dan Cu₂O/ZnO dilakukan untuk mengetahui kristalinitas dengan XRD, kemudian dilakukan pengujian menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV) dan EIS untuk mengetahui aktivitas katalitik. Selain itu juga dilakukan pengukuran konduktivitas elektrik.

3.3.3.1 Karakterisasi Menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Elektroda diletakkan ke dalam sampel holder. Pengukuran dilakukan pada daerah 2 θ menggunakan metode *continuous scan* dari 3 hingga 90°. Perpindahan langkah setiap sudut hamburan sebesar 0,02° dengan kecepatan scan 10 deg/min, tegangan 30,0 kV, dan kuat arus 10,0 mA.

3.3.3.2 Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV)

Sifat elektrokimia elektroda karbon ditentukan dengan menggunakan teknik *Cyclic Voltammetry* (CV), dimana nilai densitas arus adalah hasil pembagian nilai arus hasil pengukuran dengan berat elektroda karbon dalam satuan gram. Pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) dilakukan pada potensiostat dengan elektroda Ag/AgCl sebagai elektroda acuan, batang platinum sebagai elektroda cacah, dan elektroda Pt-Ru/C sebagai elektroda kerja. Elektrolit yang digunakan adalah NaOH 1 M. Prosedur yang sama juga dilakukan pada Cu₂O/ZnO.

3.3.3.3 Pengukuran Konduktivitas Elektrik

Elektroda Pt-Ru/C dihubungkan dengan multimeter digital dengan fungsi auto serta catu daya DC digital untuk mengukur arus dan tegangan listrik.



Ketebalan elektroda diukur menggunakan jangka sorong digital dan selanjutnya konduktivitas elektroda ditentukan dengan menggunakan hubungan matematika di bawah ini.

$$R = \frac{V}{I} ; \rho = \frac{R \times A}{l} ; K = \frac{1}{\rho}$$

dimana R adalah hambatan listrik (Ω), ρ adalah resistivitas (Ω cm), l adalah tebal pellet (mm), I adalah kuat arus (ampere), A adalah luas permukaan pellet karbon (cm^2), dan K menyatakan konduktivitas (S/cm). Prosedur yang sama juga dilakukan pada $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$.

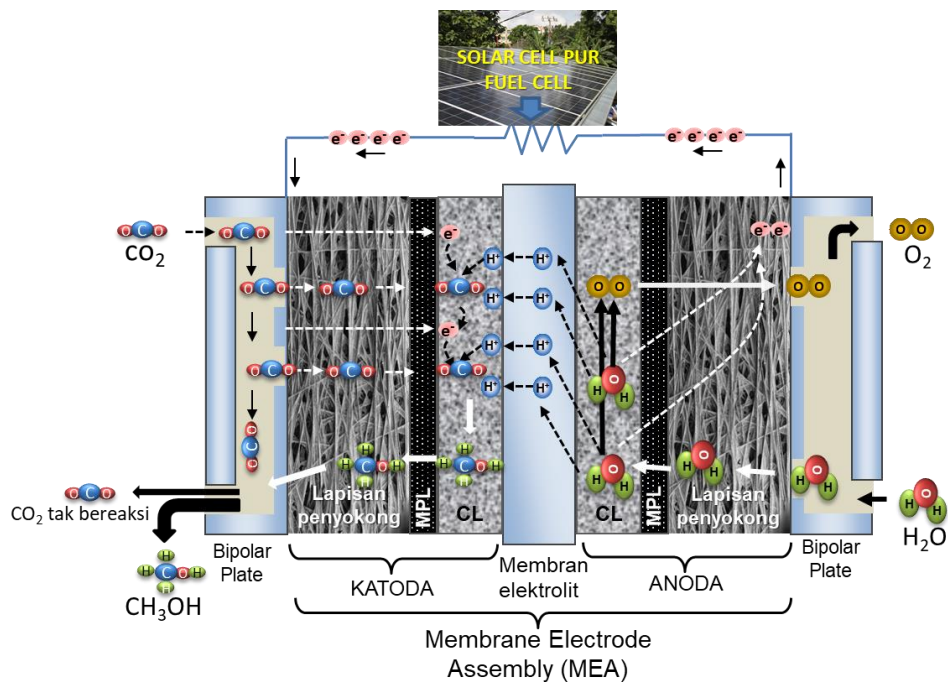
3.3.4 Preparasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA)

Membrane Electrode Assembly (MEA) dipreparasi dengan menggabungkan kedua buah elektroda pada kedua sisi membran nafion-117 menggunakan penekanan panas. Sebelum digunakan, membran diaktivasi menggunakan H_2O_2 3% pada 80°C selama 1 jam, kemudian direndam dalam H_2SO_4 0,5 M pada 80°C selama 1 jam. Terakhir, membran dibilas beberapa kali dalam air deionisasi untuk menghilangkan sisa asam, kemudian disimpan dalam air deionisasi untuk menghindari dehidrasi. Elektroda yang dihasilkan dari prosedur 3.3.2 direkatkan pada kedua sisi membran elektrolit, dilapisi dengan aluminium foil pada kedua sisi elektroda. Penekanan panas pada pembuatan MEA dilakukan pada suhu 135°C dan tekanan 2.000 psi dalam waktu 3 menit (Carmo et al., 2019; Le et al., 2011; Shironita, Karasuda, Sato, & Umeda, 2013).



3.3.5 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO₂

Laju alir CO₂ diatur menggunakan *mass flow controller*. Oksigen diproduksi pada sisi anoda meninggalkan reaktor *electrolyzer* dan dilepas ke atmosfer tanpa dianalisis, CO₂ sisa yang tidak bereaksi diumpungkan kembali ke line tabung CO₂ demikian pula kelebihan air dikembalikan ke dalam penampungan air. Konfigurasi Sel Elektrokimia tercantum pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan Reaksi dan Komponen MEA

3.3.5.1 Pengaruh Laju Alir

Reduksi elektrokimia CO₂ diteliti pada laju alir CO₂ 50; 100; 150; 200 mL/min dan arus listrik 6 A pada tegangan 1,21 V dengan katoda Pt-Ru/C. Setiap variasi kondisi berlangsung tiap 15 menit. Prosedur yang sama juga dilakukan untuk variasi katalis Cu₂O/ZnO.



3.3.5.2 Pengaruh Arus Listrik

Reduksi elektrokimia CO₂ diteliti pada laju alir optimum dan arus listrik 2; 4; 6; 8; 10 A pada tegangan 1,21 V dengan katoda Pt-Ru/C. Setiap variasi kondisi berlangsung tiap 15 menit. Prosedur yang sama juga dilakukan untuk variasi katalis Cu₂O/ZnO.

3.3.6 Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk

Hasil reduksi elektrokimia diidentifikasi dengan menggunakan metanol analyzer. Metanol yang diproduksi dilarutkan ke dalam air bersama karbondioksida sisa. Metanol larut sempurna dalam air dan CO₂ mempunyai kelarutan yang kecil dalam air dan akan ditarik untuk bergabung kembali dengan feed CO₂.



BAB IV

PERENCANAAN DAN REALISASI AKTIVITAS TAHAP I

Aktivitas tahap I sesuai dengan KAK adalah:

- a) Mengurus administrasi dan perizinan;
- b) Persiapan pengadaan bahan;
- c) Desain dan setting peralatan;
- d) Menyusun rancangan percobaan.

Secara umum, skedul pekerjaan dan sumber daya yang dibutuhkan disajikan dalam table 1 di bawah ini.

Tabel 1. Skedul dan Sumber Daya yang Diperlukan

SKEDUL DAN SUMBER DAYA																
No	KEGIATAN	BULAN KE-												PERALATAN/SUMBER DAYA YANG DIPERLUKAN	FASILITAS PUR	PIC
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	Pekerjaan Persiapan															
	a. Mengurus administrasi dan perizinan															Dedi, Dwi Hawa
	b. Persiapan pengadaan bahan													Dokumen pengadaan		Tim Pengadaan
	c. Desain dan setting peralatan													Desain peralatan, asesoris		Tim Peneliti
	d. Menyusun rancangan percobaan													Rancangan percobaan		Tim Peneliti
2	Uji Skala Laboratorium dan Pengembangan Proses													Sistem Reaktor dan asesoris		Tim Peneliti
A	Pembuatan MEA															
	a. Pembuatan Elektroda dengan berbagai variasi katalis													Baking layer, Carbon, katalis, PTFE, Nafion, Propanol	Pembuat Elektroda (Metode Dr.Blade); spray gun, ultrasonic	Dedi, Dwi dan Dea
	b. Pengaturan Elektroda pada membran													Elektroda, membran Nafion 117	homogenizer, Hot press, Oven, Furnace, HEM)	Dedi, Dwi dan Dea
	c. set-up MEA pada electrolyser													Electrolyser, MEA		Dedi, Dwi dan Dea
B	Persiapan CO2													Tabung CO2 dan regulator	Tabung CO2	Dedi, Nirwan, Addy
C	Pengondisian rangkaian peralatan secara keseluruhan													Rangkaian Peralatan	Ruangan dan peralatan kunci	Dedi, Nirwan, Addy
D	Konversi CO2 menjadi CH3OH pada berbagai kondisi															
	a. Konversi CO2 menjadi methanol secara elektrokimia dengankatalis Pt-Ru/C, Cu2O/ZnO, dan Pd/SnO2													Katalis Pt-Ru/C, Cu2O/ZnO dan Pd/SNO2 denga berbagai konsentrasi	Mass flow Controller, bejana penampung produk.	Dedi, Dea, Nirwan, Addy
	b. Konversi dilakukan pada berbagai laju alir CO2 dan arus bervariasi													CO2, Pengukur laju, power supply	Power supply	Dedi, Dea, Nirwan, Addy
E	Analisis Produk dan penentuan rendemen methanol													Methanol Analyzer, Gas Chromatography		Dea, Dwi, Nirwan
3	Pembuatan Laporan Akhir															
	a. Pengolahan data dan pengumpulan dokumentasi													Data dan pengolah data (laptop dll)	Laptop, Printer	Tim peneliti
	b. Pembuatan dan presentasi laporan kemajuan penelitian													Laporan, bahan presentasi	Laptop, Printer	Tim peneliti
	c. Pembuatan dan presentasi laporan akhir													Laporan akhir, bahan presentasi	Laptop, Printer	Tim peneliti
	d. Memberikan rekomendasi hasil penelitian secara keseluruhan													Rekomendasi hasil penelitian		Tim peneliti

4.1. Pengurusan Administrasi dan Perizinan

Pengurusan administrasi dan perizinan telah dilakukan sebagai syarat pembuatan kontrak dan kick off meeting. Persyaratan administrasi antara lain status dan legalitas Badan Pengelolaan Usaha (BPU) Unsri, Curriculum Vitae Para Peneliti, KAK dan review Kontrak. Dokumen terkait persyaratan administrasi terlampir.

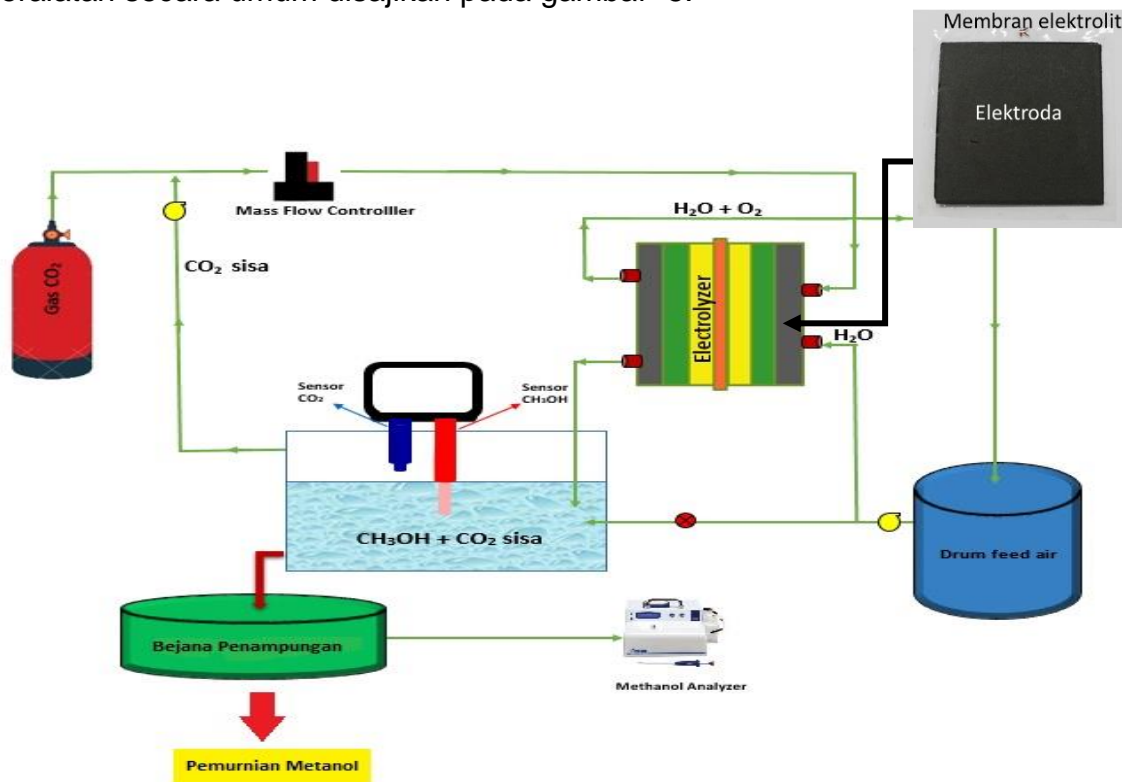


4.2. Persiapan Pengadaan Bahan

Persiapan pengadaan bahan dilakukan dengan melakukan survey barang dan supplier serta meminta penawaran barang dari beberapa supplier. Data penawaran dari supplier terlampir.

4.3. Desain dan Setting Peralatan

Desain peralatan disesuaikan dengan kebutuhan percobaan. Rancangan peralatan secara umum disajikan pada gambar 5.



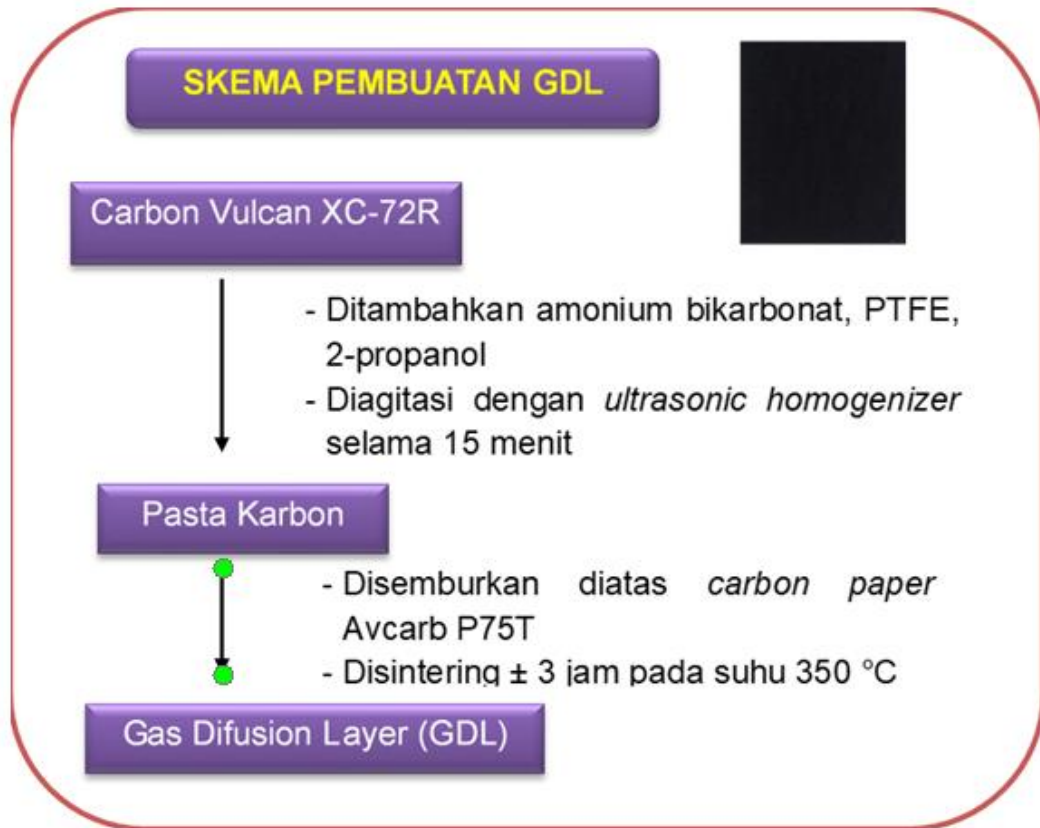
Gambar 5. Diagram produksi Metanol dari CO₂

Gas CO₂ dialirkan ke massa flow controller dan dicatat laju alirnya, masuk melalui sisi katoda dari elektroliser. Pada saat yang sama, air dialirkan melalui sisi anoda. Elektrolisis dijalankan pada tegangan 1,21 V pada arus yang bervariasi. Metanol yang dihasilkan akan dilarutkan dalam air dan CO₂ sisa dikembalikan ke line feed CO₂.

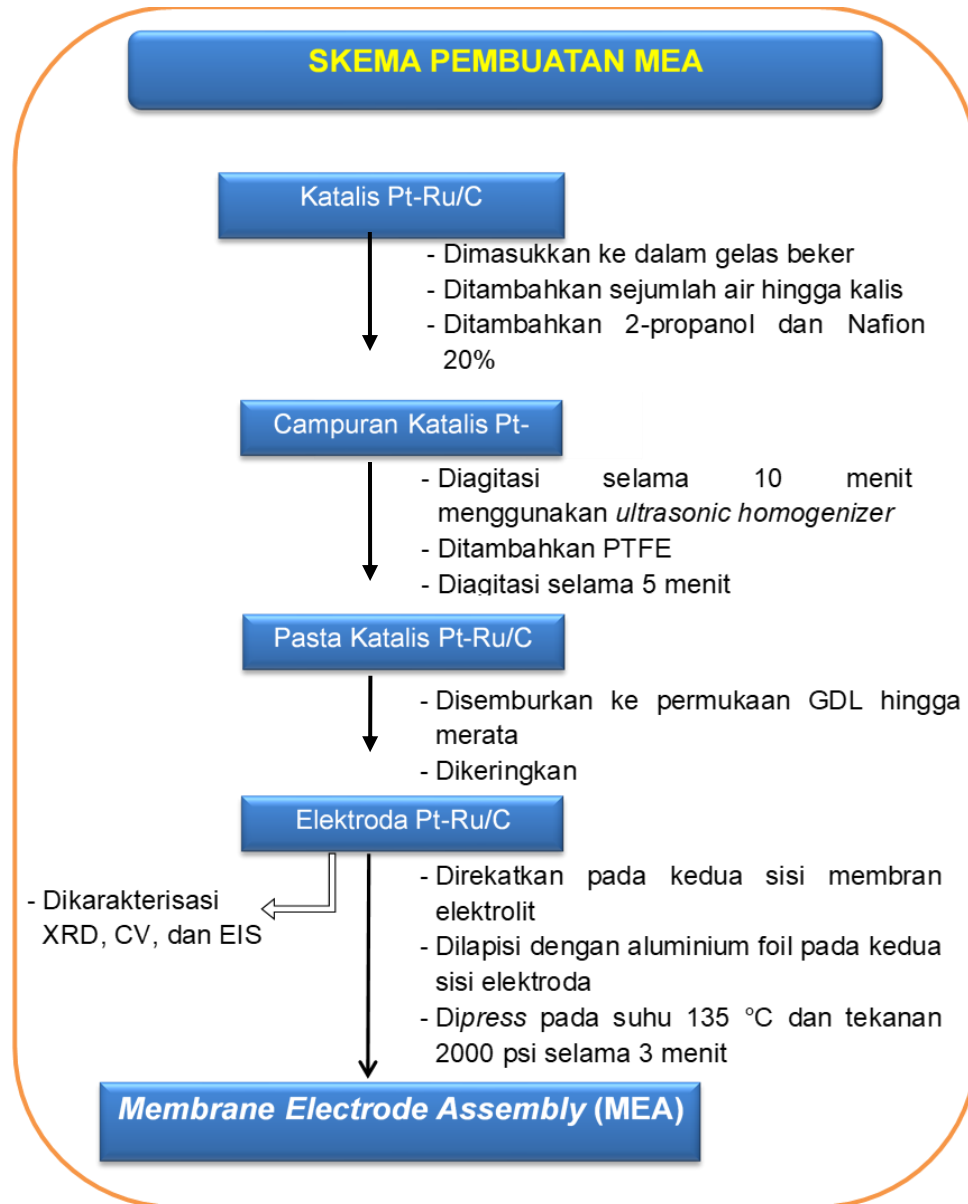


4.4. Rancangan Percobaan

Rancangan percobaan seperti yang tercantum pada BAB III dapat digambarkan secara ringkas dalam diagram pada gambar 6.



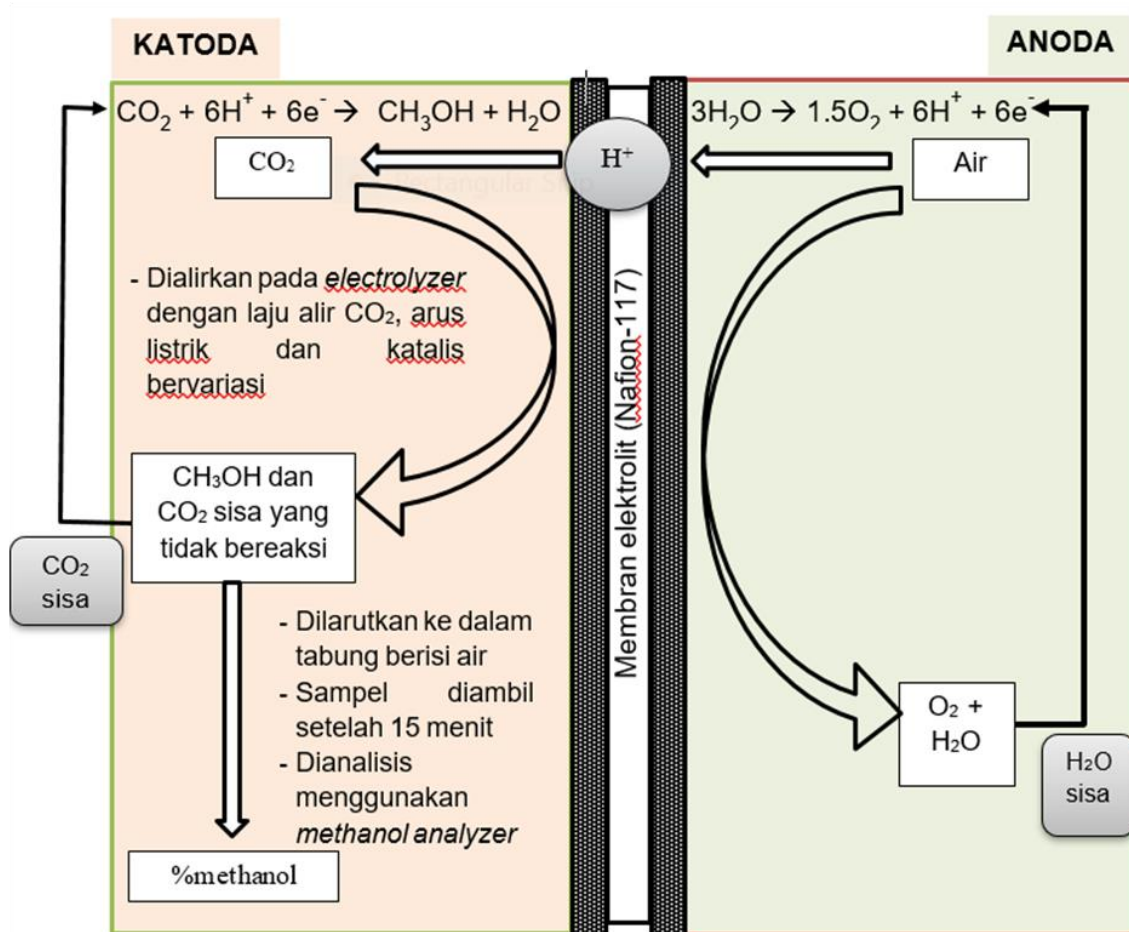
(a)



(b)



SKEMA PENGUJIAN REDUKSI ELEKTROKIMIA CO₂



(c)

Gambar 6. Rancangan percobaan konversi CO₂ menjadi methanol (a) Skema pembuatan GDL (b) Skema Pembuatan MEA (c) Skema Reduksi CO₂ secara elektrokimia

Variasi percobaan adalah sebagai berikut:

1. Laju alir CO₂ 50; 100; 150; 200 mL/menit
2. Arus listrik 2; 4; 6; 8; 10 A
3. Katalis: Pt-Ru/C, Cu₂O/ZnO, dan Pd/SnO₂



BAB V

PENUTUP

Demikian laporan ini dibuat, sebagai salah satu bentuk pertanggung jawaban pelaksanaan kegiatan.

Rencana kerja selanjutnya sesuai KAK adalah:

1. Pembuatan dan Karakterisasi MEA
2. Data hasil konversi konversi CO₂ menjadi methanol pada berbagai jenis katalis, laju alir dan tegangan bervariasi



REFERENSI:

- Albo, J. and Irabien, A. (2015) 'Cu₂O-loaded gas diffusion electrodes for the continuous electrochemical reduction of CO₂ to methanol'. Elsevier Inc. doi: 10.1016/j.jcat.2015.11.014.
- Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, A. (2013) 'Towards the electrochemical conversion of carbon dioxide into methanol', The Royal Society of Chemistry, 0, pp. 1–3. doi: 10.1039/x0xx00000x.
- Al-kalbani, H. et al. (2016) 'Comparative energetic assessment of methanol production from CO₂: Chemical versus electrochemical process', Applied Energy. Elsevier Ltd, 165, pp. 1–13. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.12.027.
- Al-Saydeh, S. (2018) 'Carbon Dioxide Conversion to Methanol: Opportunities and Fundamental Challenges'. doi: 10.5772/intechopen.74779.
- Arena, F. et al. (2008) 'Applied Catalysis A: General Solid-state interactions, adsorption sites and functionality of Cu-ZnO/ZrO₂ catalysts in the CO₂ hydrogenation to CH₃OH', 350, pp. 16–23. doi: 10.1016/j.apcata.2008.07.028.
- Ari, K. and Darmapatni, G. (2016) 'Pengembangan Metode GC-MS Untuk Penetapan Kadar Acetaminophen Pada Spesimen Rambut Manusia', Biosains Pasca Sarjana, 18(3).
- Atsonios, K., Panopoulos, K. D. and Kakaras, E. (2015) 'Thermocatalytic CO₂ hydrogenation for methanol and ethanol production: Process improvements', International Journal of Hydrogen Energy. Elsevier Ltd, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.12.001.
- Bayahia, H. et al. (2017) 'Facile Synthesis of ZnO-Cu₂O Composite Nanoparticles and Effect of Cu₂O Doping in ZnO on Antimicrobial Activity', Modern Chemistry & Applications, 5(4), pp. 2–5. doi: 10.4172/2329-6798.1000237.
- Carmo, M., Keeley, G. P., Holtz, D., Grube, T., Robinius, M., Müller, M., & Stolten, D. (2019). PEM water electrolysis: Innovative approaches towards catalyst separation, recovery and recycling. International Journal of Hydrogen Energy, 44(7), 3450–3455.
- Costentin, C., Robert, M. and Savéant, J. M. (2013) 'Catalysis of the electrochemical reduction of carbon dioxide', Chemical Society Reviews, 42(6), pp. 2423–2436. doi: 10.1039/c2cs35360a.
- Cotton, F., Wilkinson, G. (2007) *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: UI Press.
- Darowicki, K., Janicka, E. and Slepski, P. (2012) 'Study of Direct Methanol Fuel Cell Process Dynamics Using Dynamic Electrochemical Impedance Spectroscopy', 7, pp. 12090–12097.
- Fitriani, L. (2012) 'Studi Reaksi Reduksi CO₂ Dengan Metode Elektrokimia Menggunakan Elektroda Cu'. *Skripsi*. Jurusan Kimia FMIPA Universitas Indonesia.
- Frey, T. and Linardi, M. (2004) 'Effects of membrane electrode assembly preparation on the polymer electrolyte membrane fuel cell performance', Electrochimica Acta, 50(1), pp. 99–105.



- Ganesh, I. (2011) 'Conversion of Carbon Dioxide to Methanol Using Solar Energy - A Brief Review', *Materials Sciences and Applications*, 2(10), pp. 1407–1415. doi: 10.4236/msa.2011.210190.
- Gani, A. A., Mukarlina, & PW, E. R. (2017). Profil GC-MS dan Potensi Bioherbisida Ekstrak Metanol Daun Ketapang (*Terminalia catappa L.*) terhadap Gulma Maman Ungu (*Cleome rutidosperma D.C.*). *Jurnal Protobiont*, 6(2), 22–28.
- Huang, G.-M. and Chang, M.-H. (2014) 'Effect of Gas Diffusion Layer With Double-Side Microporous Layer Coating on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance Under Different Air Inlet Relative Humidity', *Int. J. Electrochem. Sci*, 9, pp. 7819–7831. doi: 10.1115/1.4023841.
- Husin, H. (2012) 'Katalis Bimetal Cu - Cr/Diatomea Untuk Hidrogenasi Minyak Sawit Bimetallic Cu - Cr/Diatomite Supported Catalyst For Palm Oils', *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia*, 4(2), pp. 1–6.
- Jones, C. et al. (2013) 'Twenty-first-century compatible CO₂ emissions and airborne fraction simulated by cmip5 earth system models under four representative concentration pathways', *Journal of Climate*, 26(13), pp. 4398–4413. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00554.1.
- Khopkar, S.M. 2010. *Konsep Dasar Kimia Analitik*. Jakarta: UI- Press.
- Kuhl, K. P. et al. (2014) 'Electrocatalytic Conversion of Carbon Dioxide to Methane and Methanol on Transition Metal Surfaces', *J. Am. Chem. Soc.*, 136(40), pp. 14107–14113. doi: 10.1021/ja505791r.
- Le, M. et al. (2011) 'Electrochemical Reduction of CO₂ to CH₃OH at Copper Oxide Surfaces', 158(5), pp. 45–49. doi: 10.1149/1.3561636.
- Lu, Q. and Jiao, F. (2016) 'Electrochemical CO₂ reduction: Electrocatalyst, reaction mechanism, and process engineering'. doi: 10.1016/j.nanoen.2016.04.009.
- Majlan, E. H. et al. (2018) 'Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 89(June 2017), pp. 117–134. doi: 10.1016/j.rser.2018.03.007.
- Mallick, R. K. et al. (2016) 'Analysis of the clamping effects on the passive direct methanol fuel cell performance using electrochemical impedance spectroscopy', *Electrochimica Acta*. Elsevier Ltd, 215, pp. 150–161. doi: 10.1016/j.electacta.2016.08.080.
- Martín, M. and Grossmann, I. E. (2016) 'Towards zero CO₂ emissions in the production of methanol from switchgrass CO₂ to methanol', pp. 1–18.
- Merck (2018) 'Lembaran Data Keselamatan Bahan Metanol', 1253(1907), pp. 1–21.
- Ohta, K. et al. (2002) 'Electrochemical reduction of carbon dioxide to ethylene with high Faradaic efficiency at a Cu electrode in CsOH/methanol', *Electrochimica Acta*, 44(26), pp. 4701–4706. doi: 10.1016/s0013-4686(99)00262-5.
- Pardede, M. C. E. 2014. Pemanfaatan Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Dalam Pembuatan Elektroda Karbon untuk Kapasitor Lapis Ganda Elektrokimia. *Skripsi*. Jurusan Kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.



- Park, N. et al. (2014) 'Modeling and analysis of a methanol synthesis process using a mixed reforming reactor: Perspective on methanol production and CO₂ utilization', *FUEL*. Elsevier Ltd, 129, pp. 163–172. doi: 10.1016/j.fuel.2014.03.068.
- Peng, X. et al. (2016) 'Fabrication of High Performing PEMFC Catalyst-Coated Membranes with a Low Cost Air-Assisted Cylindrical Liquid Jets Spraying System', *Journal of The Electrochemical Society*, 163(14), pp. E407–E413.
- Qiao, J., Liu, Y. and Zhang, J. (2016) *Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide: Fundamentals and Technologies*. Boca Raton: CRC Press.
- Rohendi, D. et al. (2015) 'Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC', *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd, 40(34), pp. 10960–10968. doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.06.161.
- Saito, M. (2000) 'R & D activities in Japan on methanol synthesis from CO₂ and H₂', 2(1998), pp. 175–184.
- Salimy, D. H. and Alimah, S. (2016) 'HTGR Kogenerasi Produksi Hidrogen Untuk Konversi CO₂ Menjadi Metanol', *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 17(2), p. 109. doi: 10.17146/jpen.2015.17.2.2556.
- Sari, W. P. 2012. Sintesis dan Karakterisasi Komposit Zeolit-Glassy Carbon dan Aplikasinya Sebagai Zeolite Modified Electrode (ZME) untuk Indikator Asam Askorbat. *Skripsi*. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Program Studi Reguler Kimia Universitas Indonesia.
- Sassenburg, M. (2018) 'Conducting CO₂ reduction at a bipolar membrane electrode assembly'. *Thesis*. Delft University of Technology.
- Services, N. V (2011) 'Material Safety Data Sheet Carbon Dioxide'.
- Shironita, S. et al. (2013) 'Methanol generation by CO₂ reduction at a Pt-Ru/C electrocatalyst using a membrane electrode assembly', *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V, 240, pp. 404–410.
- Shironita, S., Karasuda, K., Sato, M., et al. (2013) 'Feasibility investigation of methanol generation by CO₂ reduction using Pt/C-based membrane electrode assembly for a reversible fuel cell', *Journal of Power Sources*. Elsevier B.V, 228, pp. 68–74. doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.11.097.
- Surahmida, Sudarwati, T. P. L. and Junairiah (2018) 'Analisis GCMS Terhadap Senyawa Fitokimia Ekstrak Metanol Ganoderma lucidum', 3(2), pp. 147–155.
- Thanasilp, S. and Hunsom, M. (2010) 'Effect of MEA fabrication techniques on the cell performance of Pt-Pd/C electrocatalyst for oxygen reduction in PEM fuel cell', *Fuel*. Elsevier Ltd, 89(12), pp. 3847–3852.
- Togar, Yan Mulders., 2012. Preparasi Katalis Praseodimium Oksida/ Zeolit Klipnotilolit Aktif untuk Meningkatkan Bilangan Oktan pada Gasolin. *Skripsi*. Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Tripković, A. V., Lović, J. D. and Popović, K. D. J. (2010) 'Comparative study of ethanol oxidation at Pt-based nanoalloys and UPD-modified Pt nanoparticles', *Journal of the Serbian Chemical Society*, 75(11), pp. 1559–1574. doi: 10.2298/JSC100519093T.



- Turner, J. et al. (2008) 'Renewable hydrogen production', (March 2007), pp. 379–407. doi: 10.1002/er.
- Vanhove, A. (2015) 'Improvements on the design of carbon dioxide conversion to methanol process using Aspen Plus ® interface', (June).
- Venka, R. (2016) 'Design and Development of Electrochemical Cell for Converting Carbon Dioxide to Useful Fuel'. *Thesis*. Arizona State University.
- Verma, S. et al. (2017) 'Insights into the Low Overpotential Electroreduction of CO₂ to CO on a Supported Gold Catalyst in an Alkaline Flow Electrolyzer'. doi: 10.1021/acseenergylett.7b01096.
- Vielstich, W., Yokokawaa, H. and Gasteiger, H. . (2009) *Handbook of fuel cells: Fundamentals, technology and applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Yang, H. P. et al. (2016) 'Selective electrochemical reduction of CO₂ to different alcohol products by an organically doped alloy catalyst', *Green Chemistry*. Royal Society of Chemistry, 18(11), pp. 3216–3220.



LAMPIRAN

CURRICULUM VITAE

1	Nama Lengkap	Dr. Dedi Rohendi, M.T	
2	Jenis Kelamin	Laki-laki	
3	Jabatan Fungsional	Lektor	
4	NIP/NIK/Identitas lainnya	196704191993031001	
5	NIDN	0019046705	
6	Tempat dan Tanggal Lahir	Garut, 19 April 1967	
7	E-mail	rohendi19@gmail.com / rohendi19@unsri.ac.id	
9	Nomor Telepon/HP	(0711) 5560896 / 0816383220	
10	Alamat Kantor	Jl. Palembang-Prabumulih Km 32 Inderalaya Ogan Ilir Sumatera Selatan	
11	Nomor Telepon/Faks	(0711) 580269	
12	Lulusan yang Telah Dihasilkan	S-1 = 35 orang; S-2 = 2 orang; S-3 = 1 orang	
13.	Mata Kuliah yang Diampu	1. Pengantar Energi 2. Kimia Fisika 1 dan 2 3. Termodinamika Kimia 4. Kinetika Kimia 5. Kimia Zat Padat 6. Elektrokimia	

A. Riwayat Pendidikan

	S-1	S-2	S-3
Nama Perguruan Tinggi	ITB	UNSRI	UKM Malaysia
Bidang Ilmu	Kimia	T. Kimia	Elektrokimia/Fuel Cell
Tahun Masuk-Lulus	1986-1991	1999-2002	2010-2014
Judul Skripsi/Tesis/Disertasi	Pereaksi Kimia Terhadap Struktur Klorofil A Dan Klorofil B Hasil Pemisahan Secara Spektroskopi Elektronik	Modifikasi pada Sistem Elektroda untuk Meningkatkan Kinerja Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)	Pembangunan Himpunan Elektrod Membran Ketumpatan Arus Tinggi Untuk PEMFC Mudah Alih

Nama Pembimbing/Promotor	Dr. Buchari	Prof.Dr. Ir. Syarifuddin Ismail, Dr. Ir. Tri Kurnia Dewi	Assoc. Prof. Dr. Edy H. Majlan; Prof.Dr. Abubakar Muhamad; Prof.Dr. A.A.H Kadhum; Assoc. Prof.Dr. L.K Shyuan
--------------------------	-------------	--	--

B. Pengalaman Penelitian

No.	Tahun	Judul Penelitian	Sumber Pendanaan
1	2005-2006	Pembuatan Electroda PEFC dengan Metode Casting menggunakan Katalis Pt-Co/C	Hibah Bersaing DIKTI
2	2009-2011	Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodeposisi Menggunakan Katalis Pt-Cr/C Dan Pt/C Serta Uji Kinerja Pada <i>Alkaline Fuel Cell (AFC)</i>	Hibah Bersaing DIKTI
3	2014	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly (MEA) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)</i> Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodeposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi <i>Base Transceiver Station</i>	INSINas Ristek
4	2015	Produksi dan penanganan gas hidrogen dari hidrolisis NaBH_4 untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	Hibah Kompetitif UNSRI
5	2016	Production and Storage of Hydrogen Gas for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) from Aluminium Waste	Hibah Kolaborasi Internasional
6	2017	Pemanfaatan Metode <i>Catalyst-Coated Membranes (Ccm)</i> Dan Metode Semburan dalam Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA) Untuk Direct methanol fuel cell (DMFC) dengan menggunakan katalis Pt-Co/C	Hibah Kompetitif UNSRI

7	2018	Pemanfaatan Metode <i>Catalyst-Coated Membranes (Ccm)</i> Dan Metode Semburan dalam Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA) Untuk Direct methanol fuel cell (DMFC) dengan menggunakan katalis Pt-Co/C (tahun kedua)	Hibah Kompetitif UNSRI
8	2019	Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly (MEA)</i> dan Pengujian Kinerja MEA untuk <i>Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)</i> Multi Stek pada Berbagai Konsentrasi Methanol untuk Kebutuhan Energi Mudah Alih (<i>Portable Power</i>)	Unggulan Inovasi UNSRI

C. Pengalaman Pengabdian Kepada Masyarakat dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Tahun	Judul Pengabdian Kepada Masyarakat	Sumber
1	2015	Penyuluhan dan Pelatihan Cara Membersihkan Rumah dan Kantor dari Racun yang Ada di Udara.	LPM UNSRI
2	2016	Pembuatan Mie JAgung Sebagai Pengolahan alternatif dari Jagung dan Manfaatnya bagi Ibu Hamil	LPM UNSRI

D. Publikasi Artikel Ilmiah Dalam Jurnal dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Judul Artikel Ilmiah	Nama Jurnal	Volume/ Nomor/Tahu
1	Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodeposisi Menggunakan Katalis Pt-Cr/C dan Pt/C dan Karakterisasinya	Jurnal penelitian Sains (JPS)	Vol. 13 no.2, Mei 2010
2	Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions.	International Journal of Hydrogen Energy	38(22) 2013
3	Effect of PTFE content and sintering temperature on the properties of a fuel cell electrode backing layer	J. Fuel Cell Sci. Technol.	11(04) 2014

4	Effects of temperature and backpressure on the performance degradation of MEA in PEMFC	International Journal of Hydrogen Energy	40 (2015)
5	Study Of Hydrogen Consumption By Control System In Proton Exchange Membrane Fuel Cell	<i>Malaysian Journal of Analytical Sciences,</i>	20(4) 2016: 901 – 912.
6	Oxidation of Cyclohexane to Cylohexanol and Cyclohexanone Over H4[α -SiW12O40]/TiO2 Catalyst	Indones. J. Chem	2016, 16 (2), 175 – 180.
7	Electrode for proton exchange membrane fuel cells: A review	Renewable and Sustainable Energy Reviews	vol. 89, June 2018
8	Congo red dye removal from aqueous solution by acid-activated bentonite from sarolangun: kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies	Arab Journal of Basic and Applied Sciences	VOL. 26, NO. 1, 125–136
9	Fabrication and Characterization of Pt-Co/C Catalyst for Fuel Cell Electrode	IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series	1095 (2018) 012007
10	Optimization of biomass-based electrochemical capacitor performance	AIP Conference Proceedings 2049, 020057 (2018).	2049, 020057-1–020057-6
11	Biomethane emissions: Measurement in wastewater pond at Palm Oil Mill by using TGS2611 methane gas sensor	Journal of Ecological Engineering	2019; 20(6):25–35
12	Storage and Release of Hydrogen as a Fuel of the Fuel Cell with Media of NaBO2/NaBH4	IOP Conference Series: Earth and Environmental Science	248 (2019) 012008
13	Fabrication and Characterization of Pt-Co/C Catalyst for Fuel Cell Electrode	IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series	1095 (2018) 012007

14	Functionality Analysis of Carbon Nanosheet, Oxidized Carbon Nanosheet and Reduced Carbon Nanosheet Oxide by Using Fourier Transform Infra Red and Boehm Titration Method	Journal of Physics: Conference Series	1095 (2018) 012028
15	Thermal and Acid Activation (TAA) of Bentonite as Adsorbent for Removal of Methylene Blue: A Kinetics and Thermodynamic Study	Chiang Mai J. Sci.	2018; 45(4) : 1770-1781
16	Kinetics and Thermodynamics Interaction between Bentonite Inserted Organometallic Compounds [Cr3O(OOCH)6(H2O)3](NO3) with Methylene Blue Dye in Aqueous Medium	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	1823, 020028 (2017);
17	Thermal Activated of Indonesian Bentonite as A Low-Cost Adsorbent for Procion Red Removal from Aqueous Solution	<i>J. Pure App. Chem. Res.</i>	2018, 7(2), 79-93
18	Oxidation of Cyclohexane to Cylohexanol and Cyclohexanone Over H4[□-SiW12O40]/TiO2 Catalyst	<i>Indones. J. Chem</i>	2016, 16 (2), 175 - 180
19	Preparation and Characterization of Dabco (1,4-Diazabicyclo [2.2.2]octane) modified bentonite: Application for Congo red removal	IOP Conference Series: Materials Science and Engineering	2018 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 299 012055

E. Pemakalah Seminar Ilmiah (*Oral Presentation*) dalam 5 Tahun Terakhir

No	Nama Pertemuan Ilmiah / Seminar	Judul Artikel Ilmiah	Waktu dan Tempat
1	Seminar BKS-PTN MIPA Riau	Elektrodeposisi Co Pada Backing Layer Pt/C Dengan Pengikat PTFE Sebagai Paduan Katalis Dalam Elektroda Fuel Cell	10-11 Mei 2010, Pekanbaru
2	Sriwijaya International Seminar On Energy Science And Technology 2010 (Sisest-2010)	Catalyst Effect of Pt and Co to Conductivity, Morphological and OCV of Membrane Electrode Assembly (MEA) for Proton Exchange Membrane Fuel Fuel (PEMFC)	3-4 November 2010 Palembang

3	International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology 2011	Effect Of PTFE Content And Sintering Temperature On The Properties Of Backing Layer	22-23 November 2011 Kuala Lumpur
4	International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology 2011	Characterization Of Electrodes And MEA Performance Test With Varies Platinum Content	22-23 November 2011 Kuala Lumpur
5	Seminar Nasional Green Energy	Prinsip, Aplikasi dan Perkembangan Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Bersih”	30 April 2012 Palembang
6	The 4th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT) 2013	Effects of temperature and backpressure on performance degradation of MEA in PEMFC	Oktober 2013. Yogyakarta
7	The 4th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT) 2013	Proton Exchange Membrane Fuel Cell/Supercapacitor Hybrid Power System for a Golf Cart	October 2013 Yogyakarta
8	INDONESIA - FRANCE Joint Seminar on Technical Challenges in the Field of Renewable Energi 2014 “FUEL CELL AND HYDROGEN TECHNOLOGIES	Comparison of the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) electrodes with different carbon powder content and methods of manufacture	October 14-15, jakarta
9	International Conference on Chemistry, Chemical Process, and Engineering (IC3PE 2016)	Production dan Storage Hydrogen for Fuel Cell (Paper Review)	Yogyakarta, November, 15-16, 2016
10	^{6th} International Conference of the Indonesian Chemical Society 2017	Fabrication and characterization of fuel cell electrode from Pt-Co/C catalyst	Palembang, October 16-17

F. Perolehan HKI dalam 5–10 Tahun Terakhir

No.	Judul/Tema HKI	Tahun	Jenis	Nomor P/ID
1	Metode Pembuatan Gas Hidrogen Dengan Metode Aluminium Water	2017	Patent	P00201700392
2	Metode Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA) Untuk Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	2017	Patent	P00201700388
3	Metode Pembuatan Lapisan Katalis Elektroda Fuel Cell Dengan Tiga Menggunakan Metode Penyemprotan (Spraying)	2017	Patent	P00201700379

G. Penghargaan dalam 10 tahun Terakhir (dari pemerintah, asosiasi atau institusi lainnya)

No.	Jenis Penghargaan	Institusi Pemberi Penghargaan	Tahun
1	Penghargaan medali emas dan Best of the Best; UKM - FUEL CELL HYDROGEN VEHICLE (UKM-FCHV).	Pecipta International Conference and Exposition on Invention of Institutions of Higher Learning	2013
2	Ketua Jurusan Berprestasi ke-3	UNSRI	2016
3	Ketua Jurusan Berprestasi ke-1	UNSRI	2017

Semua data yang saya isikan dan tercantum dalam biodata ini adalah benar dan dapat dipertanggungjawabkan secara hukum. Apabila di kemudian hari ternyata dijumpai ketidaksesuaian dengan kenyataan, saya sanggup menerima sanksi.

Demikian biodata ini saya buat dengan sebenarnya untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam pengajuan Hibah **Ideasi Pertamina** tahun 2019.

Inderalaya, 26 September 2019



(Dr. Dedi Rohendi, M.T)

CURRICULUM VITAE

1	Nama Lengkap	Dr. Nirwan Syarif, M.Si
2	Pangkat / Golongan	Penata / IIIc
3	Jabatan Fungsional	Lektor
4	Jabatan Struktural	Pembina Kemahasiswaan
5	NIP	197010011999031003
6	NIDN	0001107001
7	Tempat dan Tanggal lahir	Palembang, 01 Oktober 1970
8	Alamat Rumah	Perumahan Bukit Sejahtera BV 07 Palembang
9	Nomor HP	08980768575
10	Alamat Kantor	Jurusan Kimia, Fakultas MIPA Unsri. Kampus Inderalaya Ogan Ilir, Sumatera Selatan
11	Nomor Telepon/Fax	0711580269 / 0711580069
12	Alamat email	nnsyarif@gmail.com
13	Lulusan yang telah dihasilkan	S1 = 40 orang
14	Mata kuliah yang diampu	1. Kimia Fisika 1
		2. Kimia Fisika 2
		3. Matematika Kimia
		4. Elektrokimia
		5. Kimia Permukaan
		6. Komputasi Kimia

B. Riwayat Pendidikan

Program	S1	S2	S3
Nama Perguruan Tinggi	Universitas Sriwijaya	Institut Teknologi Bandung	Universitas Indonesia
Bidang Ilmu	Kimia	Kimia	Kimia
Tahun Masuk	1991	1997	2007
Tahun Lulus	1996	1999	2013
Judul Skripsi/ Tesis/Disertasi	Studi Sifat Kimia dan Fisika Bahan Keramik dari Campuran Semen - Terak dan Campuran Tanah Liat - Terak	Reaksi Osilasi pada Bioluminesensi Kunang - kunang	Pengembangan Kapasitor Lapis Ganda Elektrokimia dari Elektroda Karbon Aktif Kayu Gelam
Nama Pembimbing/ Promotor	Dr. Ir. Trikurnia Dewi, M.Sc	Prof. Dr. Susanto Imam Rahayu	Dr. Iwandini Tribidasari P. Dr.rer.nat. Widayanti Wibowo

C. Pengalaman Penelitian dalam 5 Tahun Terakhir

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan	
			Sumber	Jml (Juta Rp.)

1	2017	Preparasi Graphene Oksida Tereduksi dari Karbon Kayu Gelam dan Aplikasinya pada Elektroda Termoelektrik	Mandiri	20
2	2016	Preparasi dan karakterisasi elektroda transparan dari karbon tabung nano kerosene yang di-doping dengan SnO ₂ -SbO ₂ .	Mandiri	20
3	2016	Preparasi dan karakterisasi elektroda transparan karbon lembaran-nano/poli-anilin/SnO ₂ -SbO ₂ .	Mandiri	20
4	2016	Sengon Wood Honeycomb Carbon for Energy Storage Device: from Fabrication Film/Layer Electrode to Stacking Module	Hibah International Collaboration Research	120
5	2015	Efek Oksida Logam (BaO dan CaO dan ratio TiO ₂ terhadap konduktivitas ionik dan elektronik material perovskite.	Mandiri	20
6	2015	Studi konduktivitas ionik dan elektronik dari elektrolit gel polimer (NH ₄ Cl – Polyvinylalcohol, NH ₄ SCN – Polyvinylalcohol) dengan variasi konsentrasi dan plastisi Propylene Carbonate.	Mandiri	20
7	2015	The Development Kerosene Soot Carbon Nanoparticle and Its Application as Electrode for Lithium Ion Battery.	Mandiri	20
8	2015	Utilisasi Kapasitor Lapis Ganda Elektrokimia Asimetrik pada Instalasi Modul dan Sistem Cluster Sel Surya	Hibah Unggulan Kompetitif Perguruan Tinggi. Universitas Sriwijaya	40
9		Pembuatan graphene oksida / TiO ₂ sebagai photoelectrocatalyst dengan metoda elektrokimia.	Mandiri	20
10	2014	Aplikasi Elektroda Karbon Nanoribbon dari Kulit Batang Kayu Gelam Sebagai Penyimpan Energi dari Sel Surya	Hibah Unggulan Kompetitif Perguruan Tinggi. Universitas Sriwijaya	40
11	2013	Pengembangan Kapasitor Lapis Ganda Elektrokimia dengan Elektroda Berbasis Karbon Aktif untuk Penyimpan Energi Tenaga Surya	Hibah Riset Unggulan Perguruan Tinggi. Dikti – Depdiknas – RI	90

D. Pengalaman Pengabdian Kepada Masyarakat dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Tahun	Judul Pengabdian Kepada Masyarakat	Pendanaan	
			Sumber	Jml (Juta Rp)

1	2015	Aplikasi Teknologi Pembuatan Tungku Gelombangmikro (Microwave) untuk Meningkatkan Nilai Jual Bagi Masyarakat Pengrajin Keramik Gerabah di Desa Payakabung, Inderalaya Utara, Ogan Ilir	LPM UNSRI	12.000.000
2	2015	Pemanfaatan Daun Mindi dalam Pembuatan Obat Nyamuk Bakar sebagai usaha dalam Mengatasi Masalah Kesehatan Masyarakat.	LPM UNSRI	5.000.000

E. Pengalaman Penulisan Artikel Ilmiah dalam Jurnal dalam 5 Tahun Terakhir

No	Tahun	Judul Artikel Ilmiah	Volume/ Nomor	Nama Jurnal
1	2017	Sengon wood (Paraserianthes Falcataria (L.) Nielsen) carbon as supporting material for electrochemical double layer capacitor	In Press	International Journal of Technology
2	2017	Electrochemical Impedance Spectroscopy of Polyvinylalcohol Based Gel Electrolyte	2/1	Indonesian J. of Fund. And Appl. Chem.
3	2016	Analyses of Non-bonding Length, Partial Atomic Charge and Electrostatic Energy from Molecular Dynamics Simulation of Phospholipase A2 – Substrate	1/3	Indonesian J. of Fund. And Appl. Chem.
4	2016	Multichannel Data Acquisition System for Monitoring Supercapacitor Module And Cells	14/4	TELKOMNIKA
5	2016	Preparation of Carbon Nanosheets From Gelam Wood Bark and Its Electrochemical Behaviour	8/1	Carbon – Science and Technology
6	2014	Performance of Biocarbon based Electrodes for Electrochemical	52	Energy Procedia
7	2014	Hydrothermal Assisted Microwave Pyrolysis of Water Hyacinth for Electrochemical Capacitor	5/2	Int. Trans. J. Of Eng., Manag. and App. Sci. and Tech.
8	2013	Binderless Activated Carbon Electrode From Gelam Wood For Use In Supercapacitors	3/2	J. Electrochem. Sci. Eng.
9	2013	First principles studies on band structures and density of states of graphite surface oxides	4/1	Int. J. of Nano Dimension
10	2012	Fractional Factorial Analysis of Gelam Wood Pyrolysis	2/7	J. of Mat. Sci. and Eng. A
11	2012	Direct Synthesis Carbon/Metal Oxide Composites for Electrochemical Capacitors Electrode	3/1	Int. Trans. J. of Eng., Manag. & App. Scie. & Tech.

F. Pengalaman Penyampaian Makalah Secara Oral pada Pertemuan / Seminar Ilmiah dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Artikel Ilmiah	Nama Pertemuan / Seminar	Waktu dan Tempat
1	The Effects of Grain Size, Oxidizers and Catalysts on Band Gap Energy of Gelam Wood Carbon	International Conference on Science and Technology 2016 (ICST2016)	Yogyakarta 2016
2	Preparation Carbon Nanotube from Sesame Oil and Its Electrochemical Properties	The 2nd International Conference on Science, Technology and Interdisciplinary Research 2016	Bandar Lampung 2016
3	Module Stabilizing of Gelam Wood Carbon Nanosheet Based Electrochemical Capacitor	International Conference on Engineering, Science and Technology	Pangkal Pinang 2016
4	Gugus Fungsi Permukaan, Kristalografi dan Sifat Elektrokimia Elektroda Karbon Aktif Kayu Gelam.	Simposium dan Seminar nasional: Hasil-hasil riset untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat, Palembang, Pemda Sumsel.	Palembang, 2010
5	Vibration-Electronic Analysis Based on DFT Theory to Determine Surface Functionalities of Nitric Acid Treated Carbon	International Conference on Materials Science and Technology	Serpong, Indonesia. 2010

G. Karya Buku dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Buku	Tahun	Jumlah Halaman	Penerbit

H. Perolehan HKI dalam 5–10 Tahun Terakhir

No	Tahun	Judul Paten	No Paten
1	2017	Pembuatan Keramik Perovskite Biaya Reandah dengan Menggunakan Oven Gelombangmikro	P00201700380 19-01-2017
2	2017	Pembuatan Karbon Saranglebah Mesopori dari Biomassa lignoselulosa – hemiselulosa – selulosa untuk aplikasi Kapasitor Lapis Ganda Elektrokimia	P00201700384 19-0102917
3	2016	Aplikasi Karbon Tabungnano dari Kerosene pada Elektroda Transparan.	P00201700383 19-01-2017
4	2016	Pembuatan Karbon Lembaran-nano dari biomassa lignoselulosa – hemiselulosa – selulosa untuk Aplikasi Absorben CO2 pada modul Kontaktor Gas	P00201700394 19-01-2017
5	2014	Pemanfaatan Oven Gelombangmikro (<i>Microwave</i>) Rumah untuk Sistem Pemanasan	P00201406700 03-11-2014

		(<i>Heating System</i>) Temperatur Tinggi	(Pemeriksaan Substantif Oktober 2016)
6	2014	Pembuatan Karbon Berstruktur Tabungnano (<i>Carbon Nanotube</i>) dari Minyak Lemak	P00201403454 13-06-2014 (Pemeriksaan Substantif April 2017)
7	2013	Kapasitor Elektrokimia dari Karbon Aktif Kayu tanpa Pengikat (Binder)	P00201300781 04-10-2013 (Pemeriksaan Substantif April 2017)
8	2013	Pembuatan Karbon Berstruktur Pitanano (Carbon Nanoribbons, Graphene Nanoribbons, Graphite Nanoribbons) dari Kulit Batang Kayu	P00201304767 05-12-2013 (Pemeriksaan Substantif Oktober 2016)

I. Pengalaman Merumuskan Kebijakan Publik/Rekayasa Sosial Lainnya dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Judul/Tema/Jenis Rekayasa Sosial Lainnya yang Telah Diterapkan	Tahun	Tempat Penerapan	Respon Masyarakat
	Tidak ada			


J. Penghargaan dalam 10 tahun Terakhir (dari pemerintah, asosiasi atau institusi lainnya)

No.	Jenis Penghargaan	Institusi Pemberi Penghargaan	Tahun
	Tidak ada		

Semua data yang saya isikan dan tercantum dalam biodata ini adalah benar dan dapat dipertanggungjawabkan secara hukum. Apabila di kemudian hari ternyata dijumpai ketidaksesuaian dengan kenyataan, saya sanggup menerima sanksi.

Demikian biodata ini saya buat dengan sebenarnya untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam pengajuan **Hibah Ideasi Pertamina 2019**.

Anggota Peneliti,



Dr. Nirwan Syarif, M.Si
NIP. 197010011999031003

CURRICULUM VITAE

A. Identitas Diri

1. Nama Lengkap (dengan gelar) : Dr. Addy Rachmat, S.Si., M.Si.
2. Jenis Kelamin : Laki-laki
3. Jabatan Fungsional : Lektor
4. NIP : 19740928 200012 1 001
5. NIDN : 0028097401
6. Tempat dan Tanggal Lahir : Jayapura, 28 September 1974
7. E-mail : addy_rachmat@unsri.ac.id
8. Nomor Telepon/HP : 081373102670
9. Alamat Kantor : Kampus FMIPA Universitas Sriwijaya Jl Palembang-Prabumulih KM-35 Inderalaya Ogan Ilir Sumatera Selatan 30662
10. Nomor Telepon : 081373102670
11. Mata Kuliah yang Diampu :
 1. Kimia Dasar II
 2. Kimia Fisik I
 3. Kimia Fisik II
 4. Kimia Fisik III
 4. Kimia Zat Padat
 5. Kimia Permukaan
 6. Radiokimia
 7. Metodologi Penelitian

B. Riwayat Pendidikan

	S1	S2	S3
Nama Perguruan Tinggi	Universitas Sriwijaya	UGM	UGM
Bidang Ilmu	Kimia	Ilmu Kimia	Ilmu Kimia
Tahun masuk-lulus	1992-1998	1999-2001	2013-2018
Judul Skripsi/Tesis	Analisis N-total, kadar abu dan logam Pb, Al, Fe dalam lumpur aktif kolam limbah PT Pusri	Pengaruh temperatur pirolisis dan pelarut pada ekstraksi terhadap produk cair batubara peringkat rendah	Sintesis, karakterisasi dan aplikasi katalis ZrO ₂ tersulfatasi dengan promotor Al dan Fe untuk hidrolisis selulosa
Nama Pembimbing/Promotor	Dra. Frida Oesman, MS Drs. Bambang Yudono, M.Sc.	Dr. Bambang Setiaji Dra. Wega Trisunaryanti, Ph.D	Prof. Dr. rer. nat Karna Wijaya Prof. Dra. Wega Trisunaryanti, Ph.D. Dr. Sutarno, M.Si.

C. Pengalaman Penelitian dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Judul	Tahun	Pendanaan	
			Sumber	Jumlah (Rp)
1	Pengaruh promotor Al ₂ O ₃ dan Fe ₂ O ₃ terhadap aktivitas katalitik katalis ZrO ₂ mesopori tersulfatasi pada hidrolisis lignoselulosa	2016	Hibah Disertasi	42.200.000,-

2	Aplikasi Fotokatalis ZnO/Bentonite dalam Penguraian Kromium Heksavalen melalui Proses Fotoreduksi	2019	PPNBM Sateks	35.167.500,-
3	Modifikasi Bentonit dengan Campuran Oksida Logam sebagai Adsorben dalam Pengolahan Limbah Fenol	2019	Unggulan Kompetitif	50.000.000,-

D. Pengalaman Pengabdian kepada Masyarakat dalam 5 tahun Terakhir

No.	Tahun	Judul Pengabdian kepada Masyarakat	Pendanaan	
			Sumber	Jumlah (Rp)
1	2014	Pembinaan usaha pembuatan mie (mie basah dan kering) dari tepung singkong di Kelurahan Inderalaya Raya Kecamatan Inderalaya Kabupaten Ogan Ilir	BOPTN Unsri	4.000.000,-
2	2018	Training pembuatan mie dari pati alam untuk skala industry	PNBP Unsri	8.000.000,-
3	2019	Produksi Tablet Kosmetika Herbal Inovatif dari Buah Tembesu untuk Perawatan Kulit dan Wajah	PPM Inovasi	20.500.000,-

E. Publikasi Artikel Ilmiah di Jurnal dalam 5 Tahun Terakhir

No	Judul Artikel	Nama Jurnal	Volume/nomor/tahun
1	Synthesis of Cr/Al ₂ O ₃ -Bentonite Nanocomposite as the Hydrocracking Catalyst of Castor Oil	Nano Hybrids and Composites	19/2018
2	Synthesis and characterization of sulfated zirconia mesopore and its application on lauric acid esterification	Materials for Renewable and Sustainable Energy, Springer	13/6/2017
3	Photodegradation of Permethrin using Photocatalyst Montmorillonite-TiO ₂	Indonesian Journal of Fundamental and Applied Chemistry	1/1/2016
4	Isoterm Adsorpsi-Desorpsi dan Porositas Katalis Ag-TiO ₂ /Zeolit	Jurnal Sainmatika	2015
5	Penggunaan Katalis Paladium dalam Reaksi Arilasi n-Oktil dengan 2-Iodida-5-Metil Tiofen	Molekul	9/1/2014

F. Prosiding Seminar Ilmiah dalam 5 Tahun Terakhir

No.	Nama Pertemuan Ilmiah/seminar	Judul artikel ilmiah	Nama Prosiding
1	The 1 st Sriwijaya International Conference on Environmental issues (SICOEn) 2018	Optimisation of Phenol Removal from Palm Oil Mill Effluent (POME) Using Natural Bentonite	E3S Web of Conferences
2	The 6 th International Conference of Indonesia Chemical Society 2018	Fabrication and Characterization of Pt-Co/C Catalyst for Fuel Cell Electrode	Journal of Physics: Conference Series

Semua data yang saya isikan dan tercantum dalam biodata ini adalah benar dan dapat dipertanggungjawabkan secara hukum. Apabila di kemudian hari ternyata dijumpai ketidaksesuaian dengan kenyataan, saya sanggup menerima sanksi.

Demikian biodata ini saya buat dengan sebenarnya untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam pengajuan **Hibah Ideasi Pertamina 2019**.

Palembang, 26 September 2019
Anggota Peneliti



Dr. Addy Rachmat, M.Si

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Dwi Hawa Yulianti
NIM : 080926817221002
Tempat/ Tanggal Lahir : Sumber Rejo, 18 Juli 1996
Universitas : Universitas Sriwijaya
Fakultas/Jurusan : FMIPA/ Magister (S2) Kimia
Bidang Ilmu Tesis : Kimia Energi dan Lingkungan
Alamat Rumah : Komplek Pasar Gotong Royong Desa Sumber Rejo RT.14 RW.01 Selat Penuguan, Banyuasin

Riwayat Pendidikan :

SDN Kelapa Dua Tahun 2001 s.d 2007

SMPN 1 Pulau Rimau Tahun 2007 s.d 2010

SMA Plus N 2 Banyuasin III Tahun 2010 s.d 2013

Universitas Sriwijaya (S1 Kimia) Tahun 2013 s.d 2017

Pascasarjana S2 Kimia Universitas Sriwijaya Tahun 2017 s.d 2019

Judul Tesis : *Uji Kinerja MEA dengan Katalis Pt-Ru/C pada DAFC Menggunakan Bahan Bakar Campuran MeOH:EtOH dan Pengaruh Suplai Oksigen di Katoda*

Pengalaman Organisasi :

- Anggota U-Read UNSRI Tahun 2014
- Deputi Kajian dan Strategi BEM FMIPA UNSRI Tahun 2015-2016
- Kepala Dinas Kesekretariatan HIMAKI UNSRI Tahun 2015-2016
- Koordinator Akhwat Syiar Media Kosmics UNSRI Tahun 2014-2015
- Anggota Beasiswa 10000 Palembang Tahun 2018

Pelatihan/Seminar/Conference/Lomba :

- Finalis Pekan Kreativitas Mahasiswa (PKM) UNSRI Tahun 2015
- Juara III Teknologi Tepat Guna FMIPA UNSRI Tahun 2016

- Juara II Lomba Karya Tulis Ilmiah (LKTI) Tingkat MIPA Tahun 2006
- Juara I Olimpiade Nasional MIPA Bidang Kimia Tingkat Perguruan Tinggi Universitas Sriwijaya Tahun 2016
- Delegasi Pertukaran Mahasiswa Tanah Air Nusantara (PERMATA) Universitas Hasanuddin Makassar Oleh Kemenristekdikti Tahun 2016
- Participant on the 6th International Conference of the Indonesia Chemical Society 2017
- Participant on the special training in operating and maintaining the following equipment “Autolab PGSTAT 204 + FRA 32M wiht NOVA™” by Metrohm on 2018.
- Participant on the training in operating and maintaining the following equipment “Ultrasonic Processor, Split Tube Furnace, Vacuum Oven, Compact Tape Casting Coater, Hydraulic Lamination Hot Press, Mass Flow Controller” by KGC Saintifik on 2018.
- Participant on the occasion of the Workshop on Scientific Writing and Journal Submission 2019
- Presenter in the 5th Conference on Science and Technology (ICST) 2019.
- Presenter in The 7th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT 2019), 16-19 Oct’2019 with title Performance Test of Membrane Electrode Assembly (MEA) of Direct Alcohol Fuel Cell (DAFC) with Various of MeOH:EtOH Compositions and the Effect of Oxygen Supply in Cathode.

Demikian CV ini dibuat untuk dipergunakan sebagai kelengkapan data teknis Program Ideasi Pertamina– Universitas Sriwijaya 2019.

Palembang, 26 September 2019



Dwi Hawa Yulianti, S.Si., M.Si

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Nama : Dea Radestia Rahmah
Tempat / Tanggal Lahir : Lubuklinggau, 5 Desember 1996
Jenis Kelamin : Perempuan
Status : Belum Menikah
Agama : Islam
Kebangsaan : Indonesia
Alamat : Jln. Kemang I No. 34 RT. 07 Kel. Watervang Kec.
Lubuklinggau Timur I
No. Telp : 082186315905
E-mail : radesdea@gmail.com



Riwayat Pendidikan

- SDN 42 Lubuklinggau Tahun 2001-2007
 - SMPN 2 Lubuklinggau Tahun 2007-2010
 - SMAN 2 Lubuklinggau Tahun 2010-2013
 - Universitas Sriwijaya (S1 Kimia) Tahun 2013-2017
 - Pascasarjana Universitas Sriwijaya (S2 Kimia) Tahun 2017 –
- Judul Tesis : *Konversi karbon dioksida menjadi metanol dengan metode elektrokimia menggunakan membrane electrode assembly (MEA)*

Pengalaman Organisasi:

- Anggota Dinas Kominfo Ikatan Keluarga Mahasiswa Silampari UNSRI (2013-2015)
- Sekretaris Umum II Himpunan Mahasiswa Kimia (2015-2016)
- Anggota Departemen Sains BEM KM FMIPA UNSRI (2014-2015)

Pelatihan/Seminar/Conference

- Pelatihan ISO 2001: 2015
- Pelatihan ISO 45001: 2018
- Pelatihan ISO 14001: 2015
- Pelatihan ISO 22000: 2018
- Pelatihan HACCP

- Pelatihan GMP
- Pelatihan, Pelaksanaan Instalasi dan Uji Fungsi Peralatan Ultrasonic Processor, Split Tube Furnace, Vacuum Oven, Compact Tape Casting Coater, Hydraulic Lamination Hot Press, Mass Flow Controller
- Pelatihan Pengoperasian dan Perawatan Peralatan Autolab PGSTAT 204 + FRA 32M with NOVA™
- Workshop on Scientific Writing and Journal Submission sebagai participant
- The 5th International Conference on Science and Technology 2019 sebagai participant
- The 7th International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology (ICFCHT 2019), 16-19 Oct'2019 with title: Methanol production and its application as fuel for fuel cell: A Review: Presenter

Demikian CV ini dibuat untuk dipergunakan sebagai kelengkapan data teknisi Program Ideasi Pertamina– Universitas Sriwijaya 2019.

Palembang, 26 September 2019



Dea Radestia Rahmah, S.Si



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Palembang – Prabumulih Km. 32 Indralaya (OI) Kode Pos 30662
Telepon (0711) 580645, 580069, 580225, 580169 Faximile(0711)580644
Laman: www.unsri.ac.id

PERATURAN
REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA
NOMOR 05 TAHUN 2016

TENTANG
PENYELENGGARAAN BADAN PENGELOLA USAHA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA,

Menimbang : a. bahwa dalam rangka melaksanakan ketentuan Pasal 136 ayat (3) Peraturan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Nomor 12 Tahun 2015 tentang Organisasi dan Tata Kerja Universitas Sriwijaya, perlu adanya peraturan di Universitas Sriwijaya yang memuat kebijakan dan pedoman tentang Penyelenggaraan Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya;
b. bahwa berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud pada huruf a perlu dibentuk Peraturan Rektor Universitas Sriwijaya tentang Penyelenggaraan Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya;

Mengingat : 1. Undang-Undang Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 158, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5336);
2. Peraturan Pemerintah Nomor 42 tahun 1960 tentang Pendirian Universitas Sriwijaya (Lembaran Negara Tahun 1960 Nomor 135, Tambahan Lembaran Negara Nomor 2072);
3. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 16, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5500);
4. Peraturan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2015 tentang Organisasi dan Tata Kerja Universitas Sriwijaya (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 606);
5. Keputusan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor 064/0/2003 tentang Statuta Universitas Sriwijaya;
6. Keputusan Menteri Keuangan Republik Indonesia Nomor 190/KMK.05/2009 tentang Penetapan Universitas Sriwijaya pada Departemen Pendidikan Nasional sebagai Instansi Pemerintah yang Menerapkan Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum;
7. Keputusan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Nomor 334/M/KP/XI/2015 tentang Pengangkatan Rektor Universitas Sriwijaya;

MEMUTUSKAN

Menetapkan : KEPUTUSAN REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA TENTANG
PENYELENGGARAAN BADAN PENGELOLA USAHA UNIVERSITAS
SRIWIJAYA

BAB I
KEDUDUKAN, TUGAS POKOK, DAN FUNGSI

Pasal 1

- (1) Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya yang selanjutnya dalam Peraturan Rektor ini disebut BPU Universitas Sriwijaya merupakan unit kerja yang diselenggarakan oleh Universitas Sriwijaya.
- (2) BPU Universitas Sriwijaya merupakan unit kerja yang berada di dalam Lingkungan Universitas Sriwijaya.

Pasal 2

BPU Universitas Sriwijaya mempunyai tugas melaksanakan pengembangan unit usaha dan mengoptimalkan perolehan sumber-sumber pendanaan Universitas Sriwijaya untuk mendukung pelaksanaan penerapan pengelolaan keuangan Badan Layanan Umum Universitas Sriwijaya

Pasal 3

BPU Universitas Sriwijaya berfungsi untuk:

- a. penyusunan rencana, program dan anggaran;
- b. penyusunan perencanaan, strategi, dan implementasi dalam pengembangan usaha;
- c. pembentukan, pembinaan, dan pengawasan unit usaha;
- d. peningkatan pendapatan Universitas Sriwijaya melalui unit usaha;
- e. pelaksanaan kerjasama dengan pihak lain di luar Universitas Sriwijaya untuk memperoleh pendapatan bagi Universitas Sriwijaya;
- f. pelaksanaan urusan tata usaha.

BAB II
PRINSIP PENGELOLAAN DAN PENDANAAN

Pasal 4

- (1) Pengelolaan BPU menggunakan prinsip swadana.
- (2) BPU mengelola usaha bersifat akademik dan non akademik.
- (3) Pendanaan BPU diperoleh dari pinjaman modal usaha dan/atau hasil usaha penjualan barang/jasa kepada publik.

- (4) Ketentuan selanjutnya mengenai pendanaan BPU diatur dalam pedoman pengelolaan keuangan BPU Universitas Sriwijaya.

BAB III SUSUNAN ORGANISASI

Pasal 5

Susunan organisasi BPU Universitas Sriwijaya terdiri dari:

1. Ketua;
2. Sekretaris;
3. Wakil Ketua Bidang Pengembangan Usaha;
4. Wakil Ketua Bidang Optimalisasi Sumber Pendanaan;
5. Unit Usaha;

Pasal 6

- (1) Ketua BPU bertanggung jawab kepada Rektor.
- (2) Ketua BPU diangkat dan diberhentikan oleh Rektor.
- (3) Ketua BPU bertugas:
 - a. menyusun dan melaksanakan rencana strategis yang hendak dicapai dalam masa jabatannya;
 - b. menyusun dan melaksanakan program kerja dan anggaran tahunan BPU Universitas Sriwijaya;
 - c. menyusun perencanaan dan strategi pengembangan usaha;
 - d. membentuk dan membina unit usaha;
 - e. mengkoordinasikan pengelolaan BPU Universitas Sriwijaya;
 - f. memantau pengelolaan BPU Universitas Sriwijaya;
 - g. melaksanakan urusan ketatausahaan;
 - h. menyusun dan menyampaikan laporan kepada Rektor.

Pasal 7

- (1) Sekretaris bertanggung jawab kepada Ketua BPU.
- (2) Sekretaris bertugas membantu Ketua BPU dalam urusan perencanaan program dan kegiatan, ketatalaksanaan, keuangan, ketatausahaan, dan pengelolaan sarana dan prasarana.

Pasal 8

- (1) Wakil Ketua bertanggung jawab kepada Ketua BPU.
- (2) Wakil Ketua Bidang Pengembangan Usaha membantu Ketua BPU menyusun perencanaan, strategi dan implementasi pengembangan usaha, serta pembentukan dan pembinaan unit usaha.
- (3) Wakil Ketua Bidang Optimalisasi Sumber Pendanaan membantu Ketua BPU meningkatkan pendanaan baik dari dalam Universitas Sriwijaya dalam bentuk barang/jasa yang dapat dijual kepada publik dan dari luar Universitas Sriwijaya dalam bentuk kerjasama yang menguntungkan secara finansial bagi Universitas Sriwijaya.

Pasal 9

- (1) Unit Usaha pada BPU dipimpin oleh seorang Kepala Unit Usaha yang bertanggung jawab langsung kepada Ketua BPU.
- (2) Unit Usaha BPU terdiri dari:
 - A. Usaha Akademik
 1. Unit Usaha Penerbitan dan Percetakan;
 2. Unit Usaha Jasa Asesmen dan Rekrutmen Ketenagakerjaan;
 3. Unit Usaha Pelatihan dan Uji Kompetensi;
 4. Unit Usaha Jasa Laboratorium, Kebun Percobaan, dan Produksi;
 5. Unit Usaha Jasa Konsultasi.
 - B. Usaha Non Akademik
 1. Unit Usaha Klinik Kesehatan dan Apotik;
 2. Unit Usaha Asrama dan Apartemen Mahasiswa;
 3. Unit Usaha Pengelolaan Kantin dan Jasa Boga;
 4. Unit Usaha Pengelolaan Ruangan, Gedung dan Lahan
 5. Unit Usaha Pengelolaan Angkutan Mahasiswa;
 6. Unit Usaha Perparkiran.
- (3) BPU dapat menambah Unit Usaha setelah mendapat persetujuan dan penetapan Rektor.
- (4) Ketentuan lebih lanjut tentang Unit Usaha diatur dalam peraturan Rektor tentang Unit Usaha Universitas Sriwijaya.

BAB IV
TATA KERJA

Pasal 10

- (1) Hubungan kerja antara Ketua BPU dengan Rektor bersifat hirarki, konsultatif, koordinatif, dan fungsional.
- (2) Hubungan kerja antara Ketua BPU dengan Wakil Rektor bersifat konsultatif.
- (3) Hubungan kerja antara Ketua BPU dengan unit kerja dalam lingkungan Universitas Sriwijaya bersifat koordinatif.
- (4) Ketua BPU wajib melakukan konsultasi dan koordinasi dengan Rektor.
- (5) Ketua BPU wajib melakukan koordinasi dengan unit kerja dalam lingkungan Universitas Sriwijaya.
- (6) Ketua BPU wajib membina dan mengarahkan bawahannya dalam melaksanakan tugas.
- (7) Ketua BPU wajib mengawasi bawahannya dan apabila terjadi penyimpangan supaya mengambil langkah-langkah yang diperlukan sesuai peraturan perundang-undangan.

BAB V
KETENTUAN LAIN-LAIN

Pasal 11

Setelah ditetapkan peraturan ini maka seluruh kegiatan usaha dan kerjasama yang menghasilkan pendapatan bagi Universitas

Sriwijaya dan dilaksanakan oleh unit kerja dalam lingkungan Universitas Sriwijaya harus dikoordinasikan dengan BPU Universitas Sriwijaya.

BAB VI
KETENTUAN PENUTUP

Pasal 12

- (1) Ketentuan yang belum diatur dalam peraturan ini akan ditetapkan kemudian.
- (2) Peraturan ini berlaku sejak tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di Indralaya
Pada tanggal 18 Oktober 2016
Rektor,



ANIS SAGGAFF
NIP 196210281989031002



KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI, DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Palembang-Prabumulih, Km.32 Inderalaya Kabupaten Ogan Ilir (30662)
Telepon (0711) 580069, 580225, 580169 Faksimile (0711) 580644
laman: www.unsri.ac.id

PERATURAN REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA NOMOR
11 TAHUN 2018

TENTANG

SUSUNAN ORGANISASI BADAN PENGELOLA USAHA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA
REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA.

- Menimbang : a. Keputusan Menteri Keuangan Republik Indonesia Nomor: 190/KMK.05/2009 tanggal 26 Mei 2009, tentang penetapan Universitas Sriwijaya sebagai Instansi Pemerintah yang Menerapkan Pengelolaan Keuangan Keputusan Menteri Keuangan Republik Indonesia Nomor: 190/KMK.05/2009 tanggal 26 Mei 2009, tentang penetapan Universitas Sriwijaya sebagai Instansi Pemerintah yang Menerapkan Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum ;
- b. Peraturan Rektor Universitas Sriwijaya Nomor: 05 Tahun 2016, tentang Penyelenggaraan Badan Pengelola Usaha Universitas Sriwijaya;
- c. Bahwa berdasarkan pertimbangan sebagaimana dimaksud dalam huruf a dan huruf b perlu menetapkan Peraturan Rektor tentang Susunan Organisasi Badan Pengelola Usaha.
- Mengingat : 1. Undang- Undang nomor 12 tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi(Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2012 Nomor 158, Tambahan Lembaran Negara Indonesia Nomor 5336);
2. Peraturan Pemerintah Nomor 42 tahun 1960 tentang Pendirian Universitas Sriwijaya (Lembaran Negara tahun 1960 Nomor 135, Tambahan Lembaran Negara Nomor 2072);
3. Peraturan Pemerintah Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan dan Pengelolaan Perguruan Tinggi (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2014 Nomor 16, Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 5500);
4. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2015 tentang Organisasi dan Tata Kerja Universitas Sriwijaya (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2015 Nomor 606);

5. Peraturan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia No. 17 Tahun 2018, tentang Statuta Universitas Sriwijaya (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2018 Nomor 634);
6. Keputusan Menteri Keuangan Republik Indonesia Nomor 190/KMK.05/2009 tentang Penetapan Universitas Sriwijaya pada Departemen Pendidikan Nasional sebagai Instansi Pemerintah yang Menerapkan Pengelolaan Keuangan Badan Layanan Umum;
7. Keputusan Menteri Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Nomor 334/M/KP/XI/2015 tentang Pengangkatan Rektor Universitas Sriwijaya.

MEMUTUSKAN :

Menetapkan : PERATURAN REKTOR TENTANG SUSUNAN ORGANISASI BADAN PENGELOLA USAHA.

Pasal 1

Dalam Peraturan Rektor ini, yang dimaksud dengan:

- 1) Universitas Sriwijaya selanjutnya dalam Peraturan Rektor ini disebut UNSRI merupakan perguruan tinggi yang diselenggarakan oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi;
- 2) Rektor adalah Rektor UNSRI;
- 3) Badan Pengelola Usaha UNSRI yang selanjutnya disingkat BPU adalah organ pengelola usaha UNSRI yang merupakan induk dari Unit-unit Usaha milik UNSRI;
- 4) BPU UNSRI sebagaimana dimaksud pada ayat (3) dalam rangka pendayagunaan sumber daya UNSRI;
- 5) Badan Usaha UNSRI adalah unit kerja di bawah pengelolaan BPU UNSRI yang membawahi berbagai jenis Unit Usaha tertentu.
- 6) Unit Usaha adalah satuan Usaha yang menjalankan jenis usaha tertentu untuk memperoleh pendapatan sesuai Peraturan Perundang-undangan.

Pasal 2

Susunan Organisasi BPU UNSRI sebagaimana tercantum dalam lampiran adalah merupakan bagian yang tidak terpisahkan dari Peraturan Rektor ini.

Pasal 3

Susunan organisasi BPU UNSRI terdiri dari :

1. Direktur Utama;
2. Wakil Direktur Utama;
3. Direktur Bidang Usaha Akademik;
4. Direktur Bidang Usaha non Akademik;
5. Manajer Unit Usaha;
6. Kepala Unit Usaha;
7. Kepala Tata Usaha;
8. Bendahara Pengeluaran Pembantu.

Pasal 4

- (1) Direktur Utama BPU bertanggung jawab kepada Rektor;
- (2) Personalia BPU diangkat dan diberhentikan oleh Rektor;
- (3) Direktur Utama BPU bertugas :
 - a. Menyusun dan melaksanakan rencana strategis yang hendak dicapai dalam masa jabatannya;
 - b. Menyusun perencanaan dan strategi pengembangan usaha;
 - c. Menyusun dan melaksanakan program kerja BPU;
 - d. Melakukan Kerja Sama dengan pihak eksternal;
 - e. Membentuk dan membina unit usaha;
 - f. Mengkoordinasikan pengelolaan BPU;
 - g. Memantau pengelolaan BPU;
 - h. Melaksanakan urusan ketatausahaan;
 - i. Menyusun dan menyampaikan laporan kepada Rektor.

Pasal 5

- (1) Wakil Direktur Utama bertanggung jawab kepada Direktur Utama BPU;
- (2) Wakil Direktur Utama bertugas membantu Direktur Utama BPU dalam urusan perencanaan program dan kegiatan ketatalaksanaan, keuangan, ketatausahaan dan pengelolaan sarana dan prasarana.

Pasal 6

- (1) Direktur Bidang bertanggung jawab kepada Direktur Utama BPU;
- (2) Direktur Bidang menyusun perencanaan usaha, serta pembentukan dan pembinaan unit usaha;

- (3) Direktur Bidang memimpin, mengawasi dan berkoordinasi dengan manajer dalam melaksanakan usahanya.

Pasal 7

- (1) Manajer Unit Usaha bertanggung jawab kepada Direktur;
- (2) Manajer Unit Usaha memimpin dan mengendalikan Unit Usahanya;
- (3) Manajer Unit Usaha membina dan mengembangkan unit usahanya;
- (4) Manajer Unit Usaha Mengevaluasi Unit Usahanya.

Pasal 8

- (1) Kepala Unit Usaha bertanggung jawab kepada Manajer;
- (2) Kepala Unit Usaha melaksanakan, dan mengembangkan unit Usahanya;
- (3) Kepala Unit Usaha mengevaluasi Unit Usahanya.

Pasal 9

- (1) Kepala Tata Usaha bertanggungjawab kepada Direktur Utama;
- (2) Kepala Tata Usaha memiliki tugas:
 - (a) Bertanggungjawab terhadap sistim administrasi BPU;
 - (b) Mempersiapkan Seminar/Pertemuan rutin/diskusi yang diselenggarakan BPU;
 - (c) Mendata seluruh kegiatan di BPU;
 - (d) Mengurus seluruh kegiatan di BPU;
 - (e) Membuat laporan kegiatan BPU setiap bulan.
- (3) Bendahara Pengeluaran Pembantu bertanggungjawab kepada Direktur Utama;
- (4) Bendahara Pengeluaran Pembantu memiliki tugas:
 - (a) Mempertanggungjawabkan pengelolaan keuangan BPU;
 - (b) Melaksanakan pencatatan dan pengumpulan data-data dan atau bukti-bukti transaksi dalam kegiatan BPU;
 - (c) Mengklarifikasi semua transaksi yang terjadi dalam BPU;
 - (d) Menyusun dokumen-dokumen kegiatan-kegiatan akuntansi dan keuangan BPU;
 - (e) Membukukan dan mengadministrasikan semua transaksi penerimaan dan pengeluaran kas BPU.

Pasal 10

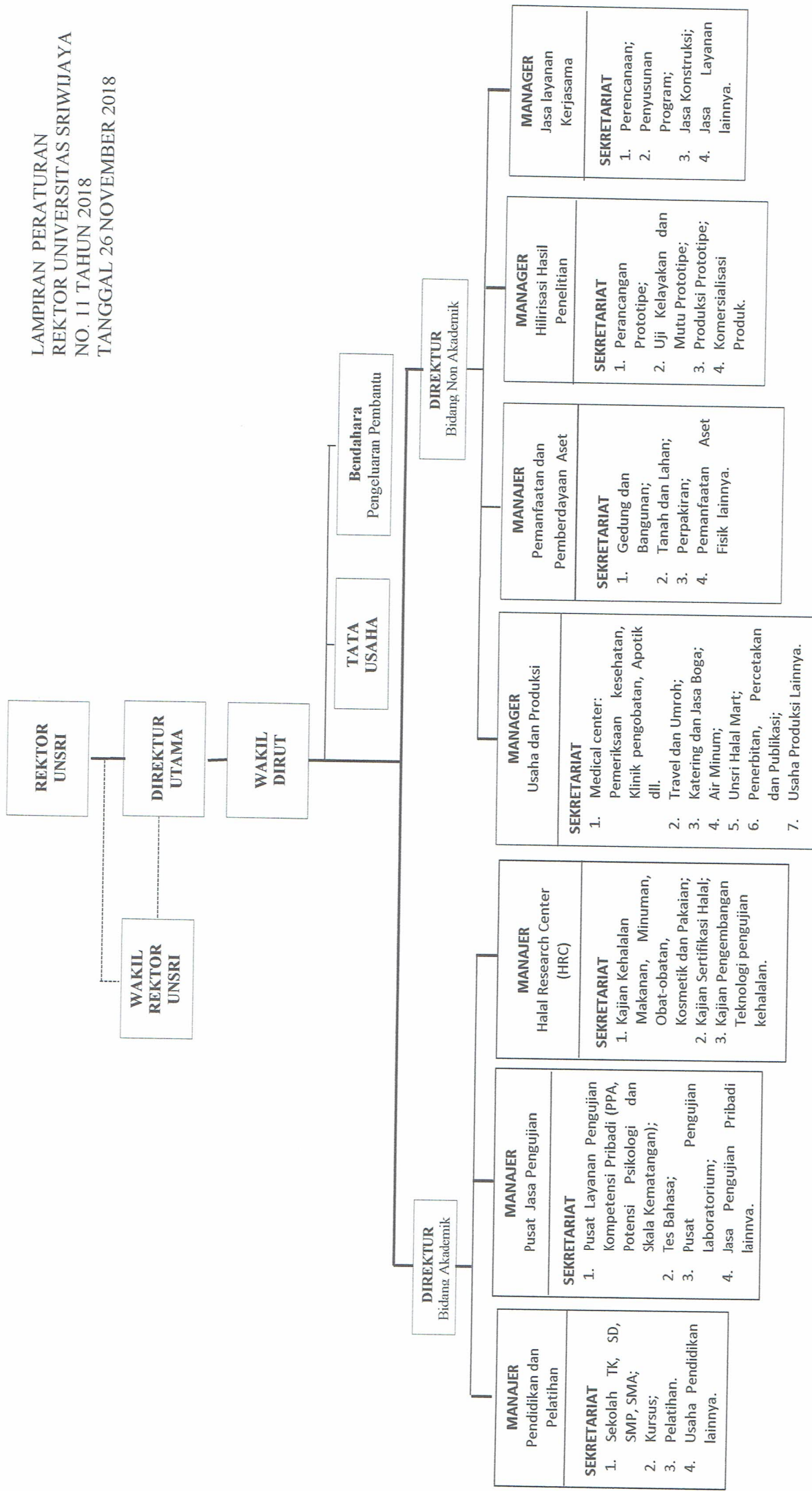
Peraturan Rektor ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di Palembang
pada tanggal 26 Desember 2018



Prof. Dr. Ir. H. Anis Saggaff, MSCE
NIP 196210281989031002

LAMPIRAN PERATURAN
 REKTOR UNIVERSITAS SRIWIJAYA
 NO. 11 TAHUN 2018
 TANGGAL 26 NOVEMBER 2018





PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

Jl. Jend. A. Yani, Mutiara Center, Bekasi Blok B.10 No.2
Margajaya, Bekasi Selatan, Kotamadya Bekasi – Jawa Barat
Telp : 021-88967054 Fax : 021-88967053

Bekasi, 26 September 2019

To. : Dr. Dedi Rohendi
Company : PUR Fuel Cell & Hidrogen
Universitas Sriwijaya

REF No. : PAS-012Q-IX-19
RE : Quotation for Laboratory Equipment

Dear Sir,

In Connection with the above Subject, We are Pleased to submit our Attached Quotation With the Following Sales Terms condition :

Price : Rp. 503.955.500 (Exclude PPN 10%)
Delivery place : FRANCO JAKARTA
Warranty : 1 (one) year for manufacturing defect
Validity : One Month
Include Installation and Training

Thank you for your kind attention, We Look forward to receiving your prompt valuable Order.

Thanks & Regards

Aisah

Sales Administrator
PT. Panjang Anugrah Sejahtera



PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

Jl. Jend. A. Yani, Mutiara Center, Bekasi Blok B.10 No.2
Margajaya, Bekasi Selatan, Kotamadya Bekasi – Jawa Barat
Telp : 021-88967054 Fax : 021-88967053

No	Model #	Description	Qty	Harga Satuan (Rp)	Remark
1	Methanol Analyzer	Type: GL6 Merk: Analox	1	374.833.000	Indent 2-3 bulan
2	Electrolyzer Hardware -Square Active Area Size: 50Cm ² 220 Volt	Type: 72108129 Merk: Fuel Cell Store	1	117.116.500	Indent 2-3 bulan
3	Electrolyzer MEA - 3 Layer Active Area (cm): 7.1 x 7.1	Type: 1141004 Merk: Fuel Cell Store	1	12.006.000	Indent 2-3 bulan
DPP				503.955.500	
PPN 10%				50.395.550	
Total Harga				453.559.950	



CV. TRI RESTU ABADI

SUPLIER OF LABORATORY EQUIPMENT, INSTRUMENT, ANALYTICAL, GLASSWARE, CHEMICAL, SAFETY SHOES AND REPAIR
Jl. Mayor Ruslan No. 804 RT.13 RW.4 Kel.20 Ilir I Kec Ilir Timur I Palembang
Telp/Fax.0711-378974 / 0711-378918 e-mail : trirestuabadi@gmail.com

Kepada Yth : Pak Dedi Rohendi
Dept/Instansi : Universitas Sriwijaya
Perihal : Penawaran Harga

QUOTATION	
Dari	: CV. TRI RESTU ABADI
No.	: 039-QUO/MKT-TRA/IX/2019
Tgl kirim	: 26 September 2019
Pengiriman	: E-mail

Dengan Hormat

Bersama ini kami tawarkan Harga barang yang Bapak/Ibu perlukan dengan keterangan sebagai berikut:

No	Nama Alat	Merck / Model	Qty	Keterangan	Harga Total (IDR)
1	Methanol Analyzer	GL6 / Analox	1	Indent 2-3 bulan	321.286.000
2	Electrolyzer Hardware - Square Active Area Size: 50Cm² 220 Volt	72108129 / Fuel Cell Store	1	Indent 2-3 bulan	117.116.500
3	Electrolyzer MEA - 3 Layer Active Area (cm): 7.1 x 7.1	1141004 / Fuel Cell Store	1	Indent 2-3 bulan	12.006.000
Total Harga					450.408.500
Pajak 10%					45.040.850
Sub Total					405.367.650

Keterangan :

Price : Belum termasuk pajak
Stock : Tidak mengikat
Franko : Palembang
Validity : 14 hari Kalender

Demikian kami sampaikan penawaran ini dan kami menunggu kabar baik selanjutnya dari Bapak/Ibu. Atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

Palembang, 26 September 2019

Ria Harsanti

081327372971



PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

Jl. Jend. A. Yani, Mutiara Center, Bekasi Blok B.10 No.2
Margajaya, Bekasi Selatan, Kotamadya Bekasi – Jawa Barat
Telp : 021-88967054 Fax : 021-88967053

Bekasi, 26 September 2019

To. : Dr. Dedi Rohendi
Company : PUR Fuel Cell & Hidrogen
Universitas Sriwijaya

REF No. : PAS-013Q-IX-19
RE : Quotation for Laboratory Equipment

Dear Sir,

In Connection with the above Subject, We are Pleased to submit our Attached Quotation With the Following Sales Terms condition :

Price : Rp. 2.800.000 (Exclude PPN 10%)
Delivery place : FRANCO JAKARTA
Warranty : 1 (one) year for manufacturing defect
Validity : One Month
Include Installation and Training

Thank you for your kind attention, We Look forward to receiving your prompt valuable Order.

Thanks & Regards

Aisah

Sales Administrator
PT. Panjang Anugrah Sejahtera



PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

Jl. Jend. A. Yani, Mutiara Center, Bekasi Blok B.10 No.2
Margajaya, Bekasi Selatan, Kotamadya Bekasi – Jawa Barat
Telp : 021-88967054 Fax : 021-88967053

No	Model #	Description	Qty	Harga Satuan (Rp)	Remark
1	Tedlar Bag	Type: 5 L Merk: Cell Scientific	1	3.000.000	Indent 2-3 bulan
DPP				3.000.000	
PPN 10%				300.000	
Total Harga				3.300.000	



CV. TRI RESTU ABADI

SUPLIER OF LABORATORY EQUIPMENT, INSTRUMENT, ANALYTICAL, GLASSWARE, CHEMICAL, SAFETY SHOES AND REPAIR
Jl. Mayor Ruslan No. 804 RT.13 RW.4 Kel.20 Ilir I Kec Ilir Timur I Palembang
Telp/Fax.0711-378974 / 0711-378918 e-mail : trirestuabadi@gmail.com

Kepada Yth	: Pak Dedi Rohendi
Dept/Instansi	: Universitas Sriwijaya
Perihal	: Penawaran Harga

QUOTATION	
Dari	: CV. TRI RESTU ABADI
No.	: 040-QUO/MKT-TRA/IX/2019
Tgl kirim	: 26 September 2019
Pengiriman	: E-mail

Dengan Hormat

Bersama ini kami tawarkan Harga barang yang Bapak/Ibu perlukan dengan keterangan sebagai berikut:

No	Nama Alat	Merck / Model	Qty	Keterangan	Harga Total (IDR)
1	Tedlar Bag	5L / Cell Scientific	1	Indent 2-3 bulan	2.800.000
Total Harga					2.800.000
Pajak 10%					280.000
Sub Total					3.080.000

Keterangan :

Price : Belum termasuk pajak
Stock : Tidak mengikat
Franko : Palembang
Validity : 14 hari Kalender

Demikian kami sampaikan penawaran ini dan kami menunggu kabar baik selanjutnya dari Bapak/Ibu. Atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

Palembang, 26 September 2019

Ria Harsanti

081327372971



**PT. TRI DAYA PRIMA
INDONESIA**

PT. TRI DAYA PRIMA

**SUPPLYING, REPAIRING & TRAINING FOR LABORATORY
INSTRUMENTATION AND GLASSWARE, CHEMICAL AND REAGENT**

Jl. Jend Ahmad Yani, Ruko Mutiara Center Bekasi Blok B10 No. 2- Bekasi, Indonesia

Phone : (021) 8896 7054, 8885 5992 | Fax : (021) 8896 7053

Email : tridayaprima@gmail.com, marketingtdp@gmail.com | Website : www.tridayaprima.com

Kepada Yth : Bpk Dedi Rohendi Dari : PT Tridaya Prima-Jakarta
Dept/Instansi : PUR Universitas Sriwijaya No. Ref : 054/QUO/TDP/IV/19
Tel/Fax : - Tgl kirim : 12 April 2019
Perihal : Penawaran Harga Pengiriman : Langsung

Dengan hormat

Bersama ini kami menawarkan, penawaran harga dengan rincian sebagai berikut:

No.	Nama Alat	Brand	No. Katalog	Jumlah	Keterangan	Harga	Total Harga
1	karbon vulcan XC-72R (200 gram)	Fuel Cell store	590106	2 Buah	Indent 2-3 bulan	7.500.000	15.000.000
2	Nafion Membrane 212 (61 x 250 cm)	Fuel Cell store	593263-3	1 Buah	Indent 2-3 bulan	40.700.000	40.700.000
3	Carbon paper Avcarb P75T – wet proof	Fuel Cell store	590642-1	5 Buah	Indent 2-3 bulan	4.300.000	21.500.000
4	Karbon dioksida (40L)			5 Buah	Indent 2-3 bulan		-
5	Isopropanol (2L)	merck	1096342500	2 Buah	Indent 2-3 bulan	670.000	1.340.000
6	Silicon Gasketing (Thickness 0.010 inc)	Fuel Cell store	590363	1 Buah	Indent 2-3 bulan	2.470.000	2.470.000
7	Silicon Gasketing (Thickness 0.015 inc)	Fuel Cell store	591663	1 Buah	Indent 2-3 bulan	2.600.000	2.600.000
8	Ammonium hydrogen carbonate 250 gram	merck	5438350250	1 Buah	Indent 2-3 bulan	2.680.000	2.680.000
9	D1021 Nafion Dispersion - Water based 1100 EW at 10 wt% (125mL)	Fuel Cell Store	592263	1 Buah	Indent 2-3 bulan	7.500.000	7.500.000
10	Methanol p.a (2,5 L)	merck	1060092500	2 Buah	Indent 2-3 bulan	520.000	1.040.000
11	Teflon PTFE DISP 30 Fluoropolymer Dispersion	Fuel Cell Store	72500300	1 Buah	Indent 2-3 bulan	3.200.000	3.200.000
12	40% Paladium on Vulcan (5 gram)	Fuel Cell store	3151614	1 Buah	Indent 2-3 bulan	36.000.000	36.000.000
13	Nafion Membrane 117 (61 x 250 cm)	Fuel Cell Store	591539-3	1 Buah	Indent 2-3 bulan	88.350.000	88.350.000
14	40% Platinum Ruthenium on Vulcan (10 gram)	Fuel Cell Store	592478-2	1 Buah	Indent 2-3 bulan	43.800.000	43.800.000
15	Capton/Poliamide with silikon (30 x30 cm)	Fuel Cell Store	592864	2 Buah	Indent 2-3 bulan	2.200.000	4.400.000
16	Cu2O 25 gram	Sigma Aldrich	566284-25G	1 Buah	Indent 2-3 bulan	6.800.000	6.800.000

17	ZnO 25 gram	Sigma Aldrich	204951-25G	1 Buah	Indent 2-3 bulan	6.100.000	6.100.000
						Total	283.480.000
						Pajak	28.348.000
						Sub Total	311.828.000

Price : Ex PPN 10%
 Franko : Palembang
 Validity : 14 Hari Kalender

Bekasi, 12 April 2019

Gitsu Ginting

Gitsu Ginting
 Marketing



CV. TRI RESTU ABADI

SUPLIER OF LABORATORY EQUIPMENT, INSTRUMENT, ANALYTICAL, GLASSWARE, CHEMICAL, SAFETY SHOES AND REPAIR
Jl. Mayor Ruslan No. 804 RT.13 RW.4 Kel.20 Ilir I Kec Ilir Timur I Palembang
Telp/Fax.0711-378974 / 0711-378918 e-mail : trirestuabadi@gmail.com

Kepada Yth	: Pak Dedi Rohendi
Dept/Instansi	: PUR Universitas Sriwijaya
Perihal	: Penawaran Harga

QUOTATION	
Dari	: CV. TRI RESTU ABADI
No.	: 020-QUO/MKT-TRA/IV/2019
Tgl kirim	: 12 April 2019
Pengiriman	: E-mail

Dengan Hormat

Bersama ini kami tawarkan Harga barang yang Bapak/Ibu perlukan dengan keterangan sebagai berikut:

No	Nama Alat	Merck / Model	Qty	Harga/item	Harga Total (IDR)
1	karbon vulcan XC-72R (200 gram)	590106 / Fuel Cell store	2	Rp 7.600.000	Rp 15.200.000
2	Carbon paper Avcarb P75T – wet proof	590642-1/ Fuel Cell Store	5	Rp 4.400.000	Rp 22.000.000
3	Isopropanol (2L)	1.09634.2500/ Merck	2	Rp 700.000	Rp 1.400.000
4	Ammonium hydrogen carbonate 250 gram	5.43835.0250/ Merck	1	Rp 2.700.000	Rp 2.700.000
5	Methanol p.a (2,5 L)	1060092500 / Merck	2	Rp 550.000	Rp 1.100.000
6	40% Paladium on Vulcan (5 gram)	3151614 / Fuel Cell Store	1	Rp 36.100.000	Rp 36.100.000
7	40% Platinum Ruthenium on Vulcan (10 gram)	592478-2 / Fuel Cell Store	1	Rp 43.900.000	Rp 43.900.000
8	Cu ₂ O 25 gram	566284-25G / Sigma Aldrich	1	Rp 6.900.000	Rp 6.900.000
9	ZnO 25 gram	204951-25G / Sigma Aldrich	1	Rp 6.200.000	Rp 6.200.000
10	Capton/Poliamide with silikon (30 x30 cm)	592864 / Fuel Cell Store	2	Rp 2.300.000	Rp 4.600.000
11	Nafion Membrane 117 (61 x 250 cm)	591539-3 / Fuel Cell Store	1	Rp 88.450.000	Rp 88.450.000
12	Teflon PTFE DISP 30 Fluoropolymer Dispersion	72500300 / Fuel Cell Store	1	Rp 3.300.000	Rp 3.300.000
13	D1021 Nafion Dispersion - Water based 1100 EW at 10 wt% (125mL)	592263 / Fuel Cell Store	1	Rp 7.600.000	Rp 7.600.000



CV. TRI RESTU ABADI

SUPLIER OF LABORATORY EQUIPMENT, INSTRUMENT, ANALYTICAL, GLASSWARE, CHEMICAL, SAFETY SHOES AND REPAIR
Jl. Mayor Ruslan No. 804 RT.13 RW.4 Kel.20 Ilir I Kec Ilir Timur I Palembang
Telp/Fax.0711-378974 / 0711-378918 e-mail : trirestuabadi@gmail.com

14	Silicone Gasketing (Thickness 0.010 inc)	590363 / Fuel Cell Store	1	Rp 2.570.000	Rp 2.570.000
15	Silicone Gasketing (Thickness 0.015 inc)	591663 / Fuel Cell Store	1	Rp 2.700.000	Rp 2.700.000
16	Karbon dioksida (40L)		5		
17	Nafion Membrane 212 (61 x 250 cm)	593263-3 / Fuel Cell Store	1	Rp 40.800.000	Rp 40.800.000
TOTAL					Rp 285.520.000
PAJAK 10%					Rp 28.552.000
SUB TOTAL					Rp 314.072.000

Keterangan :

Harga : Belum termasuk pajak
Franko : Palembang
Validity : 14 hari Kalender
Delivery Time : 90 hari kalender

Demikian kami sampaikan penawaran ini dan kami menunggu kabar baik selanjutnya dari Bapak/Ibu.
Atas perhatian dan kerjasamanya kami ucapkan terima kasih.

Palembang, 12 April 2019

Ria Harsanti

081327372971



PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

**SUPPLIER, INSTALLATION AND REPAIR FOR COMPUTER,
INSTRUMENTATION, MECHANICAL, AND ELECTRICAL EQUIPMENT**

Jl. Jend Ahmad Yani Ruko Mutiara Center Bekasi Blok B10 No.2 - KOTA BEKASI
Tel. 021-8885592, 88967054 Fax. 021.88967053 E-mail: salesengineer.pas@gmail.com
panjanganugrah@gmail.com

Bekasi, 11 April 2019

Attn. : Dr. Dedi Rohendi
To : PUR Fuel Cell Universitas Sriwijaya

REF No. : PAS-001Q-IV-19
RE : Quotation for Laboratory Equipment

No	Specifications	Quantity	Price (IDR)	Total Price (IDR)
1	Karbon vulcan XC-72R (200 gram) Tipe : 590106 Merek : Fuel Cell store	2	7.700.000	15.400.000
2	Carbon paper Avcarb P75T – wet proof 590642-1/ Fuel Cell Store	5	4.500.000	22.500.000
3	Isopropanol (2L) 1.09634.2500/ Merck	2	880.000	1.760.000
4	Methanol p.a (2,5 L) 1060092500 / Merck	2	750.000	1.500.000
5	40% Paladium on Vulcan (5 gram) 3151614 Fuel Cell Store	1	36.700.000	36.700.000
6	Ammonium hydrogen carbonate 250 gram 5.43835.0250/ Merck	1	2.900.000	2.900.000
7	Silicone Gasketing (Thickness 0,015 Inc) 591663 Fuel Cell Store	1	2.850.000	2.850.000
8	40% Platinum Ruthenium on Vulcan (10 gram) 592478-2 / Fuel Cell Store	1	45.500.000	45.500.000
9	D1021 Nafion Dispersion - Water based 1100 EW at 10 wt% (125mL) 592263 / Fuel Cell Store	1	7.800.000	7.800.000
10	Silicone Gasketing (Thickness 0,010 Inc) 590363 Fuel Cell Store	1	2.850.000	2.850.000
11	Teflon PTFE DISP 30 Fluoropolymer Dispersion 72500300 / Fuel Cell Store	1	3.500.000	3.500.000
12	Cu2O 566284-25G / Sigma Aldrich	1	7.500.000	7.500.000
13	Nafion Membrane 117 (61 x 250 cm) 591539-3 / Fuel Cell Store	1	89.500.000	89.500.000



PT. PANJANG ANUGRAH SEJAHTERA

**SUPPLIER, INSTALLATION AND REPAIR FOR COMPUTER,
INSTRUMENTATION, MECHANICAL, AND ELECTRICAL EQUIPMENT**

Jl. Jend Ahmad Yani Ruko Mutiara Center Bekasi Blok B10 No.2 - KOTA BEKASI
Tel. 021-8885592, 88967054 Fax. 021.88967053 E-mail: salesengineer.pas@gmail.com
panjanganagerah@gmail.com

14	ZnO	204951-25G / Sigma Aldrich	1	6.500.000	6.500.000
15	Capton/Poliamide with silikon (30 x30 cm)	592864 / Fuel Cell Store	2	2.500.000	5.000.000
16	Cu2O	566284-25G / Sigma Aldrich	1	7.500.000	7.500.000
17	Karbon dioksida (40 L)		5		
18	Nafion Membrane 212 (61 x 250 cm)	593263-3 / Fuel Cell Store	1	41.000.000	41.000.000
PRICE			IDR	300.260.000	
VAT			10%	30.026.000	
TOTAL PRICE			IDR	330.286.000	

TERMS AND CONDITIONS :

Validity : This quotation will remain **valid on 30 days**
Terms : All prices nett in IDR. Extcluding VAT 10% . Franco Jakarta.
Delivery : Indent 8-12 weeks after purchase order
Payment : **DP by 30% and 70% before delivery.**

Thank you very much for your interest in our product. I hope the above information is favourable to you.

Yours sincerely,

Aisah

Sales Administrator
PT. Panjang Anugrah Sejahtera

LAPORAN TAHAP II

PENGEMBANGAN PROSES KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA

FORUM IDEASI RISET PERTAMINA-UNSRI



**PUSAT UNGGULAN RISET (PUR)
FUEL CELL DAN HIDROGEN
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

http://: www.fuel-cell.rnd.unsri.ac.id

e-mail: pur-fuelcell@unsri.ac.id

Kampus UNSRI Bukit Besar Jl. Sriwijaya
Negara, Bukit Lama, Palembang

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas tersusunnya laporan tahap II Kerjasama riset dalam rangka Forum Ideasi Riset Pertamina-Unsri pelaksanaan tahun 2020. Laporan ini dibuat sebagai bagian tak terpisahkan dari rangkaian kerjasama antara Pertamina dan Unsri melalui Forum Ideasi Riset Pertamina-Universitas. Judul kerjasama riset ini adalah Pengembangan Konversi CO₂ Menjadi Metanol Melalui Proses Reduksi Elektrokimia.

Laporan tahap II ini mencakup laporan riset proses konversi CO₂ menjadi metanol menggunakan katalis, laju alir CO₂ dan tegangan bervariasi. Harapan kami, laporan ini dapat diterima sebagai landasan untuk memasuki tahap selanjutnya. Masukan, arahan dan saran dari berbagai pihak untuk kelancaran riset ini sangat kami harapkan. Terima kasih.

Palembang, Agustus 2020
Ketua Tim Peneliti,

Dr. Dedi Rohendi, M.T

RINGKASAN

Telah dilakukan pengujian reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dengan menggunakan 2 jenis *Membrane Electrode Assembly* (MEA), yaitu MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Pt-Ru/C, MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Cu₂O-ZnO/C dan MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Pd-SnO₂/C. **Tahap pertama**, elektroda dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk melihat keberadaan katalis dalam elektroda dan untuk mengetahui elektroda dengan kinerja elektrokimia yang terbaik. Hasil pengukuran XRD diperoleh puncak difraksi pada nilai $2\theta = 17,97^\circ$, $26,34^\circ$, dan $39,7^\circ$ yang merepresentasikan keberadaan katalis Pt/C. Puncak difraksi pada nilai $2\theta = 14,47^\circ$, $17,11^\circ$, $26,73^\circ$, $40,74^\circ$, $47,02^\circ$, $54,79^\circ$, dan $68,8^\circ$ menunjukkan keberadaan katalis Pt-Ru/C, dan puncak difraksi pada $13,76^\circ$, $16,55^\circ$, $25,67^\circ$, $26,49^\circ$, $36,12^\circ$, $44,47^\circ$, $54,63^\circ$, dan $68,2^\circ$ yang mengindikasikan katalis Cu₂O-ZnO/C. Difraktogram pada elektroda Pd-SnO₂/C menunjukkan keberadaan Carbon (C) pada sudut difraksi 2θ $26,16^\circ$ dan $26,65^\circ$, sedangkan pada daerah sudut difraksi $40,28^\circ$; $47,04^\circ$; dan $68,12^\circ$ merupakan peak yang menunjukkan keberadaan Palladium (Pd). Senyawa SnO₂ teridentifikasi pada sudut difraksi $54,799^\circ$.

Pengujian sifat elektrokimia elektroda menggunakan CV diperoleh nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) untuk Pt-Ru/C sebesar $48,419 \text{ cm}^2/\text{mg}$, katalis Cu₂O-ZnO sebesar $334,352 \text{ cm}^2/\text{mg}$, katalis Pd-SnO₂/C sebesar $13,3863 \text{ cm}^2/\text{g}$ dan pada katalis Pt/C yaitu sebesar $4805,714 \text{ cm}^2/\text{mg}$ dengan pemuatan katalis $2 \text{ mg}/\text{cm}^2$. Hasil pengukuran EIS diperoleh nilai konduktivitas listrik untuk Pt/C $4,718 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$, Pt-Ru/C sebesar $3,398 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$, Pd-SnO₂/C sebesar $6,196 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$ dan nilai konduktivitas tertinggi pada katalis Cu₂O-ZnO/C yaitu sebesar $6,4018 \times 10^{-3} \text{ S}/\text{cm}$. Berdasarkan hasil karakterisasi katalis pada elektroda, maka elektroda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C mempunyai kinerja terbaik.

Tahap kedua, dilakukan uji coba pengujian konversi CO₂ menjadi methanol secara elektrokimia dengan kondisi beda potensial bervariasi antara 1,2 - 3,0 V dan laju alir CO₂ konstan pada 0,06 L/menit untuk jenis katoda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C. Pengujian produk methanol dilakukan menggunakan refraktometer didapatkan produk methanol hanya pada tegangan 1,2V; 1,5V dan 2,1V. Pada tegangan 1,8V tidak didapatkan hasil methanol sehingga dilakukan stripping methanol untuk memastikan tegangan optimum. Dari hasil stripping methanol didapatkan puncak pada tegangan 1,64V sehingga tegangan yang didapat ini dijadikan tegangan optimum. Tegangan optimum digunakan untuk variasi laju alir. Hasil variasi laju alir memperlihatkan bahwa laju alir optimum berada pada 0,06 L/menit berdasarkan pengukuran GC-MS dan perhitungan efisiensi Coulumb.

Selanjutnya, pengujian variasi tegangan dan laju alir menggunakan MEA dengan katalis Pd-SnO₂/C. Pengukuran hasil konversi CO₂ menjadi methanol akan dilakukan menggunakan GC-MS tetapi GC-MS masih dalam masa perawatan sehingga pengukuran akan dilakukan setelah alat GC-MS dapat beroperasi kembali.

DAFTAR ISI

HALAMAN DEPAN	i
KATA PENGANTAR	ii
RINGKASAN	iii
DAFTAR ISI	v
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Dan Sasaran	3
1.4. Ruang Lingkup Kerjasama	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Karbon Dioksida	4
2.2 Metanol	5
2.3 Elektroda	8
2.3.1 Tembaga sebagai Elektroda	8
2.3.2 Platina sebagai Elektroda	8
2.3.3 Palladium sebagai Elektroda	9
2.4 Metode Konversi CO ₂ menjadi Metanol secara Elektrokimia	9
2.5 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	13
III. METODOLOGI	15
3.1 Tempat Riset	15
3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan	15
3.3 Prosedur Riset	15
3.3.1 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL)	15
3.3.2 Preparasi Katalis Cu ₂ O-ZnO/C dan Pd-SnO ₂ /C	15
3.3.3 Preparasi Elektroda	16
3.3.4 Karakterisasi Elektroda	16
3.3.5 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	18
3.3.6 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO ₂	18
3.3.7 Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk	19
3.3.8 Analisa Data	20
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Pengkondisian Rangkaian Peralatan dan Penyediaan CO ₂	22
4.2 Pembuatan dan Karakterisasi Membrane Electrode Assembly (MEA)	25
4.2.1 Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Berbagai Variasi Katalis	25
4.3 Proses Konversi CO ₂ menjadi Metanol pada Kondisi Bervariasi	31
4.3.1 Konversi CO ₂ pada Tegangan Bervariasi	31
4.3.2 Konversi CO ₂ pada Laju Alir CO ₂ Bervariasi	34
V. PENUTUP	38
DAFTAR PUSTAKA	39
LAMPIRAN	43

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Karbon dioksida merupakan gas yang banyak dihasilkan dalam produksi dan pengolahan minyak serta gas bumi. Keberadaan CO₂ merupakan permasalahan tersendiri karena kehadirannya dalam jumlah besar menyebabkan efek rumah kaca (Albo et al. 2015). Pemanfaatan CO₂ menjadi sangat penting karena dapat mengatasi dua hal sekaligus, yaitu mereduksi kehadiran gas rumah kaca dan menjadikan CO₂ sebagai bahan baku produk bernilai tambah. Dalam kaitan dengan penelitian yang dilakukan, dilakukan proses konversi CO₂ menjadi bahan bakar metanol. Metanol yang mempunyai densitas energi cukup tinggi dan mempunyai kestabilan dalam penyimpanan, merupakan salah satu produk konversi CO₂ yang paling memberikan harapan. Selain sebagai bahan bakar untuk fuel cell dan pelarut, metanol juga menjadi bahan baku untuk dimetil eter (DME) (Goeppert et al. 2014)

Proses konversi CO₂ menjadi metanol ada beberapa cara. Dua proses yang sudah dikenal luas adalah melalui jalur pembentukan syn gas dalam reformer dan melalui proses hidrogenasi, dimana pada kedua metode tersebut menggunakan suhu dan tekanan tinggi. Metode lain untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol adalah dengan metode elektrolisis yang mempunyai keunggulan ramah lingkungan, dapat mengkonversi CO₂ menjadi berbagai jenis bahan bakar dan bekerja pada suhu ambien (Venka 2016b).

Dalam kaitan produksi methanol melalui proses elektrokimia, ada beberapa mekanisme yang dapat dilakukan, antara lain produksi methanol melalui elektrolisis CO₂ dengan bantuan katalis Cu₂O-ZnO dengan elektrolit KHCO₃ (Albo et al. 2015), atau gabungan antara elektrolisis CO₂ langsung dan gabungan elektrolisis air dan elektrolisis CO₂ melalui pembentukan produk antara CO dan H₂ (Delacourt et al. 2008). Penguraian CO₂ secara elektrokimia sangat tergantung pada beberapa parameter, antara lain; jenis elektroda, jenis elektrolit dan kondisi operasi (suhu dan arus) (Venka 2016b).

Penelitian dalam rangka Forum Ideasi Pertamina-Universitas di Universitas Sriwijaya mengangkat topik mengenai Pengembangan Konversi CO₂ untuk Menghasilkan Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia. Karbon dioksida (CO₂) akan direduksi pada sisi katoda menghasilkan produk bahan bakar dan pada sisi anoda akan dioksidasi air (H₂O) menghasilkan elektron dan H⁺. Ion H⁺ akan menyebrang ke katoda melalui membran elektrolit penghantar proton berupa membrane nafion-117. Sistem elektrokimia yang digunakan sama seperti pada fuel cell. Teknologi fuel cell dan hidrogen merupakan bidang yang selama ini diteliti dan dikembangkan di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya (UNSRI).

Penelitian ini menggunakan metode elektrolisis dalam media *membrane electrode assembly* (MEA) untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol dengan menggunakan sumber energi terbarukan berupa solar cell yang dimiliki Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya. Penggunaan energi terbarukan solar cell selain untuk menekan biaya produksi metanol, juga ikut mendukung program pemerintah dalam meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan. Proses elektrokimia perubahan karbondioksida menjadi produk metanol dan hidrogen dilakukan melalui media *Membrane Electrode Assembly* (MEA) seperti yang digunakan pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) dan DMFC (*Direct Methanol Fuel Cell*). Pusat Unggulan Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya telah berhasil membuat dan menguji kinerja MEA yang digunakan pada kedua jenis fuel cell di atas.

1.2. Rumusan Masalah

Kehadiran CO₂ sebagai polutan di alam sudah dalam kondisi mengkhawatirkan. Diperlukan upaya untuk mereduksi kandungan CO₂ dengan cara mengkonversi CO₂ menjadi bahan yang bermanfaat. Salah satu bahan bermanfaat yang dapat dihasilkan dari konversi CO₂ adalah methanol. Proses konversi CO₂ menjadi methanol mendapatkan dua keuntungan sekaligus, yaitu mereduksi kandungan CO₂ dan mendapatkan methanol yang merupakan bahan baku bernilai tinggi. Diantara beberapa proses konversi CO₂ menjadi methanol, proses konversi secara elektrokimia mempunyai beberapa keuntungan diantaranya dilakukan pada suhu lingkungan dan tekanan rendah.

Metode reduksi elektrokimia CO₂ menjadi tantangan baru untuk dikembangkan, terutama untuk menghasilkan metanol sebagai hasil konversi. Umumnya reduksi CO₂ dilakukan pada elektroda logam dalam larutan elektrolit KHCO₃, namun ditemukan keterbatasan transfer massa pada CO₂ akibat rendahnya kelarutan CO₂ dalam air, sehingga diusulkan penggunaan Gas Diffusion Electrode (GDE) dan elektrolit polimer padat dalam bentuk MEA agar dapat meningkatkan karakteristik transfer massa. Katalis yang digunakan pada elektroda dapat bervariasi sesuai dengan karakteristik produk yang akan dihasilkan. Sementara itu, kondisi reaksi (arus/tegangan listrik dan laju alir gas) juga sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses konversi CO₂ menjadi methanol.

Oleh karena itu, pada penelitian akan dilakukan pembuatan dan karakterisasi elektroda dengan variasi katalis pada katoda yaitu Pt-Ru/C dan Cu₂O-ZnO/C, dan anoda Pt/C untuk mengamati dan mengetahui bagaimana kinerja yang dihasilkan dan pengaruh dari variasi tegangan, laju alir CO₂ dan katalis yang diterapkan terhadap hasil konversi karbondioksida menjadi metanol dengan metode reduksi elektrokimia.

1.3. Tujuan dan Sasaran

Tujuan kerjasama ini adalah untuk:

- a) Mengembangkan proses konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung dengan berbagai jenis katalis, yaitu katalis Pt-Ru/C, Pd/SnO₂ dan Cu₂O/ZnO. Elektroda dengan katalis bervariasi dikarakterisasi menggunakan XRD, analisis *Cyclic Voltammetry (CV)* dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*.
- b) Mendapatkan kondisi operasi terbaik dengan memvariasikan tegangan listrik dan laju alir CO₂ dalam upaya menghasilkan metanol dengan rendemen tinggi.

Adapun sasaran kerjasama ini adalah:

- a) Diperoleh teknologi konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung berbasis *Membrane Electrode Assembly (MEA)*,
- b) Diperoleh kemampuan memproduksi metanol dari karbondioksida yang merupakan polutan gas rumah kaca.
- c) Diperoleh prototype teknologi konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung berbasis *Membrane Electrode Assembly (MEA)*.

1.4. Ruang Lingkup Kerjasama

Kerjasama ini mencakup penelitian dan pengembangan:

- a) Pembuatan elektroda dengan beberapa jenis katalis dan *membrane electrode assembly* untuk perangkat elektrolisis.
- b) Optimasi konversi CO₂ menjadi metanol langsung secara elektrokimia pada variasi tegangan listrik dan laju alir CO₂.
- c) Karakterisasi produk methanol dan penentuan rendemen methanol dari proses elektrokimia langsung CO₂ menjadi methanol.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karbon Dioksida

Karbon dioksida dengan rumus molekul CO₂ memiliki massa molar 44 g/mol, pada suhu normal membentuk fase gas dan bersifat inert (sangat tidak reaktif). CO₂ merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau (pada konsentrasi atmosfer 0,039% (v/v)) tidak mudah terbakar dan memiliki rasa yang sedikit asam, serta dikenal sebagai gas rumah kaca (Services 2011; Qiao, Liu, and Zhang 2016). Molekulnya relatif stabil dan tidak mudah terpecah menjadi senyawa yang lebih kecil. Hanya dengan pemanasan, sinar ultraviolet, atau arus listrik, CO₂ dapat terpecah seperti pada persamaan (1):



Suhu tinggi atau penggunaan katalis dapat mengarahkan ke reaksi yang lain pada karbon dioksida. Pada reaksi RWGS (*Reverse Water-Gas Shift*), dimana karbon dioksida bereaksi dengan hidrogen menghasilkan karbon monoksida, ditunjukkan pada persamaan (2):

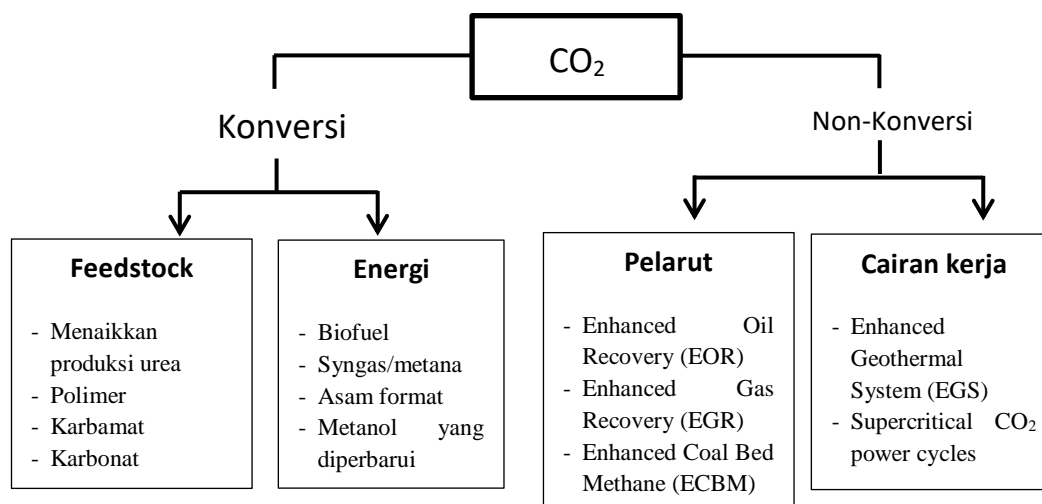


atau pada suhu yang lebih tinggi, karbon monoksida terbentuk dari reaksi karbon dioksida dengan karbon, seperti pada persamaan (3) (Vanhove 2015):



Kelarutan yang rendah dari CO₂ adalah salah satu keterbatasan yang utama dari beberapa riset tentang reduksi CO₂. Pada temperatur dan tekanan standar, kelarutan CO₂ dalam air sebesar ~ 34 mM atau 0,033 M, yang berarti densitas arus maksimum yang tersedia sebesar ~ 30 mA/cm² sedangkan kelarutan CO₂ pada metanol sebesar 0,06 M (Lu and Jiao 2016; Qiao, Liu, and Zhang 2016). Pada prakteknya, untuk reduksi CO₂ cair densitas arus rata-rata yang diperoleh sedikit rendah yaitu pada 10-20 mA/cm². Meskipun densitas arus ini cukup tinggi untuk studi selektivitas/mekanistik, perangkat untuk menyimpan listrik pada bahan bakar yang menghasilkan H₂ seperti *electrolyzers* beroperasi pada densitas arus 100-300 mA/cm² pada kondisi basa dan mencapai nilai yang lebih tinggi (800-1600 mA/cm²) pada *electrolyzers* dalam kondisi asam (Turner et al. 2008). Penelitian terkait menunjukkan bahwa reduksi CO₂ dapat menekan biaya yang cukup signifikan jika tercapai densitas arus yang lebih tinggi pada overpotensial yang rendah (150 mA/cm² @ 1 V

ncell) (Verma et al. 2017) dan hal ini tidak mungkin terjadi pada elektrolit cair, bahkan jika dalam kondisi ekstrim untuk meningkatkan kelarutan CO₂ secara signifikan, misalnya suhu di bawah nol dan tekanan >10 bar. Skema perubahan CO₂ menjadi bahan-bahan yang berguna disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Ringkasan Aplikasi Carbon Capture Utilities (CCU) (Vanhove 2015)

Aplikasi dari CO₂ seperti ditunjukkan pada gambar 1, dibagi menjadi 2 kelompok utama, yaitu dikonversi menjadi produk yang lebih bernilai misalnya methanol atau sifat spesifik molekul yang digunakan, misalnya sebagai pelarut atau cairan kerja .

2.2. Metanol

Metanol (CH₃OH) banyak digunakan sebagai pelarut dalam industri kimia karena kemampuannya yang dapat melarutkan berbagai senyawa organik maupun anorganik. Metanol juga digunakan sebagai reaktan dalam pembentukan formaldehida atau metil ester yang diaplikasikan sebagai bahan anti beku (anti-freeze) pada industri otomotif maupun pesawat terbang (Salimy and Alimah 2016).

Metil alkohol atau yang dikenal dengan metanol merupakan produksi industri petrokimia yang mempunyai rumus molekul CH₃OH. Metanol mempunyai berat molekul 32,04 g/mol dan suhu ruangan. Titik didih metanol sebesar 64,5 °C dan titik leburnya sebesar -98 °C, serta konduktivitas < 1 μS/cm. Metanol mempunyai sifat mudah menguap, tidak berwarna, mudah terbakar, dan beracun dengan bau yang menyengat (Merck 2018).

Metanol juga diproyeksikan sebagai bahan bakar alternatif masa depan karena memiliki bilangan oktan yang tinggi dengan pembakaran yang lebih sempurna sehingga gas karbon monoksida sebagai hasil samping reaksi utama yang dihasilkan semakin sedikit (Park et al. 2014). Metanol merupakan bahan bakar ramah lingkungan dengan densitas

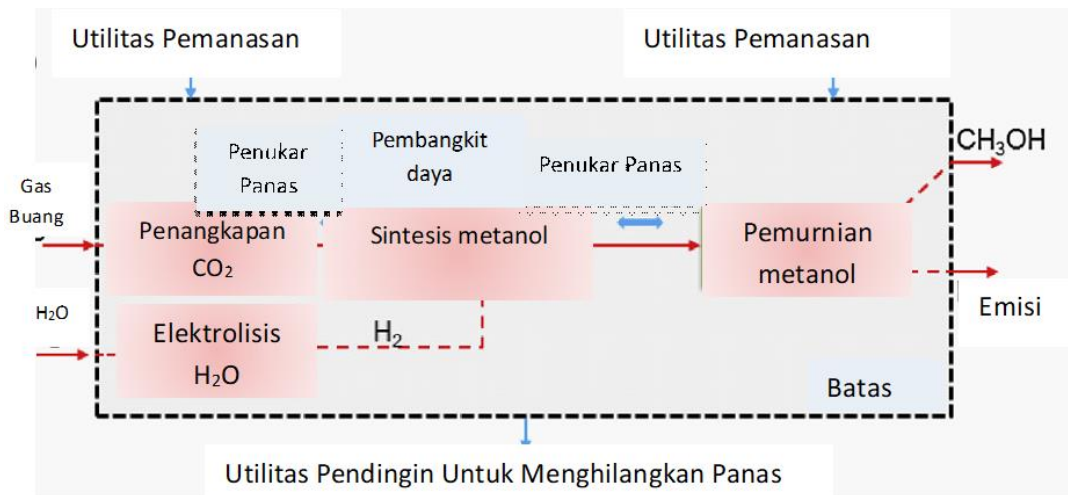
energi hampir setengah dari bensin (metanol: 15,6 MJ.L⁻¹; bensin: 34,2 MJ.L⁻¹), namun juga perantara yang penting untuk beberapa zat kimia curah yang digunakan dalam produk sehari-hari seperti silikon, cat, dan plastik. Dibandingkan hidrogen, metanol memiliki densitas energi yang tinggi, yang dapat disimpan dalam tekanan atmosfer, dan dapat digunakan secara langsung dalam sistem konversi energi seperti mesin pembakar internal, karena nilai oktannya yang tinggi, atau digunakan langsung seperti pada *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC) atau secara tidak langsung (setelah dikonversi menjadi hidrogen). Saat ini, kebanyakan dari metanol komersial diproduksi dari metana melalui syngas (campuran CO dan H₂) dengan reforming uap dalam kapasitas jutaan ton per tahun pada industri skala besar (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013).

Transformasi CO₂ menjadi metanol membutuhkan 6 elektron agar terjadi reaksi reduksi (dianggap lebih lambat secara kinetik), oleh karena itu material katalis yang dibutuhkan harus sangat aktif dan selektif. (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013). Pada sintesis metanol, pemilihan jenis katalis berperan penting dalam mempengaruhi kondisi operasi sintesis metanol. Setiap katalis memiliki kinerja optimum pada kondisi operasi tertentu, misal katalis Cu/Zn/Al₂O₃ bekerja baik pada kondisi operasi suhu 200 °C – 450 °C dan tekanan 40 bar - 100 bar. Proses hidrogenasi karbondioksida menggunakan katalis Cu/Zn/Al₂O₃ dapat menghasilkan produk utama berupa metanol, CO dan air (Saito 2000).

Berikut salah satu proses dalam pembuatan metanol: Proses Elektrokimia; Reaksi pembuatan metanol dari CO₂ dan H₂ dimulai dengan pembuatan gas H₂ dari elektrolisis air. Elektrolisis air adalah peristiwa penguraian senyawa air menjadi gas O₂ dan gas H₂ dengan menggunakan arus listrik. Pada katoda, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H₂ dan ion hidroksida (OH⁻). Sementara itu pada anoda, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O₂), melepaskan 4 ion H⁺ serta mengalirkan elektron ke katoda. Ion H⁺ dan OH⁻ selanjutnya mengalami netralisasi sehingga membentuk kembali beberapa molekul air. Reaksi keseluruhan yang setara dari elektrolisis air dapat dituliskan sebagai berikut.



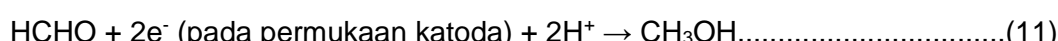
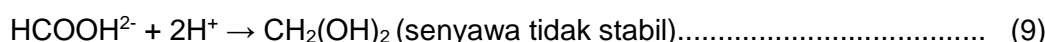
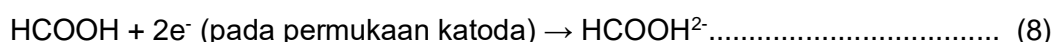
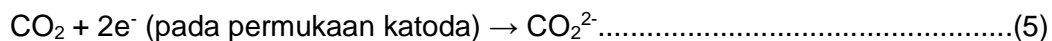
Gas H₂ yang dihasilkan dari elektrolisis dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan metanol. Sedangkan bahan baku lainnya, gas CO₂, didapatkan dari *flue gas* atau emisi yang dihasilkan oleh *geothermal power plant*. Secara umum, proses pembuatan metanol dari flue gas dan H₂O tersaji dalam gambar 2.



Gambar 2. Produksi Metanol dengan *Electrochemical Process* dan *Flue Gas* (Al-Kalbani et al. 2016)

Pembuatan metanol dari *electrochemical process* pada gambar 2 menggunakan elektrolisis air untuk produksi H₂, akan tetapi masih jarang digunakan karena membutuhkan energi listrik yang tinggi. Walaupun membutuhkan energi listrik yang tinggi, tetapi hasil dari unit elektrolisis tidak menimbulkan emisi dan juga menghasilkan produk samping berupa gas O₂. Hal ini dapat menutupi pengeluaran biaya listrik dari pabrik karena menghasilkan gas oksigen yang umumnya lebih banyak dipakai di unit elektrolisis. Di samping itu, proses ini dapat mengurangi emisi yang ada di lingkungan dengan mengurangi emisi CO₂ yang berasal dari *fluegas* (Al-Kalbani et al. 2016).

Mekanisme reaksi yang mungkin terjadi pada reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dapat dituliskan sebagai berikut (Qiao, Liu, and Zhang 2016):



Meskipun mekanisme membutuhkan konfirmasi lebih lanjut, reaksi yang pasti terjadi pada proses enam elektron (Persamaan 12):



Dan senyawa lainnya seperti HCOOH, HCHO, dan CH₄ juga terbentuk.

2.3. Elektroda

Kondisi operasi dalam proses sintesis metanol salah satunya dipengaruhi oleh pemilihan jenis elektroda. Masing-masing elektroda memiliki aktivitas katalitik yang optimum pada kondisi tertentu (Saito 2000). Penelitian ini menggunakan elektroda berbasis tembaga (Cu), platina (Pt), Rhutenium (Ru), Paladium (Pd) dan timah (Sn).

2.3.1 Tembaga sebagai elektroda

Tembaga telah lama dianggap sebagai bahan elektroda yang sangat menarik untuk reduksi CO₂. Costentin (2013) menyatakan bahwa reduksi CO₂ yang dikatalisis oleh Cu₂O memberikan hasil yang jauh lebih baik dalam laju dan overpotensial dibandingkan elektroda Cu biasa (Costentin, Robert, and Savéant 2013). Terkait dengan katalis yang digunakan pada reduksi elektrokimia, Albo (2015) melakukan penelitian reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol pada elektroda Cu₂O dan Cu₂O-ZnO menggunakan larutan elektrolit 0,5 M KHCO₃, dari hasil penelitian diperoleh efisiensi konversi CO₂ pada Cu₂O sebesar 54,8% dan 31,4%. Namun, elektroda Cu₂O-ZnO diperkirakan akan tetap stabil selama 20 jam, sedangkan pada permukaan Cu₂O mengalami deaktivasi yang kuat seiring dengan waktu (Albo and Irabien 2015)

Arena (2008) mengkaji interaksi solid-state, fungsionalitas, dan situs adsorpsi dari katalis Cu-ZnO/ZrO₂ dan kemampuannya untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol. Data karakterisasi menunjukkan bahwa interaksi yang kuat Cu-ZnO secara efektif dapat meningkatkan dispersi dan reaktivitas tembaga ke oksigen (Arena et al. 2008). Sedangkan Le (2011) menguji kimia permukaan dan pembentukan CH₃OH dari beberapa elektrokatalis dengan situs permukaan Cu(I) dan mempertimbangkan kemungkinan cara untuk reduksi elektrokimia langsung dari CO₂ menjadi metanol (Le et al. 2011b).

2.3.2 Platina sebagai elektroda

Platina merupakan salah satu unsur transisi golongan VIII dengan kelimpahan terbesar, yaitu 10⁻⁶% dimana unsur golongan VIII lainnya hanya memiliki kelimpahan 10⁻⁷%. Logam platina berwarna putih keabu-abuan dan bersifat inert serta merupakan salah satu unsur kimia pada tabel periodik yang mempunyai simbol Pt dengan nomor atom 78 dan

memiliki konfigurasi [Xe] 4f¹⁴ 5d⁹ 6s¹. Titik lelehnya mencapai 1768,3 °C dan massa atom relatifnya adalah 195,09 g/mol (Cotton and Wilkinson 2007). Shironita (2013) menguji reduksi CO₂ pada elektrokatalis Pt/C dan Pt-Ru/C menggunakan MEA dan memperoleh *yield* metanol 0,03% pada Pt/C dan 7,5% pada Pt-Ru/C, dengan efisiensi Coulomb 35% pada Pt/C dan 75% pada Pt-Ru/C (Shironita et al. 2013).

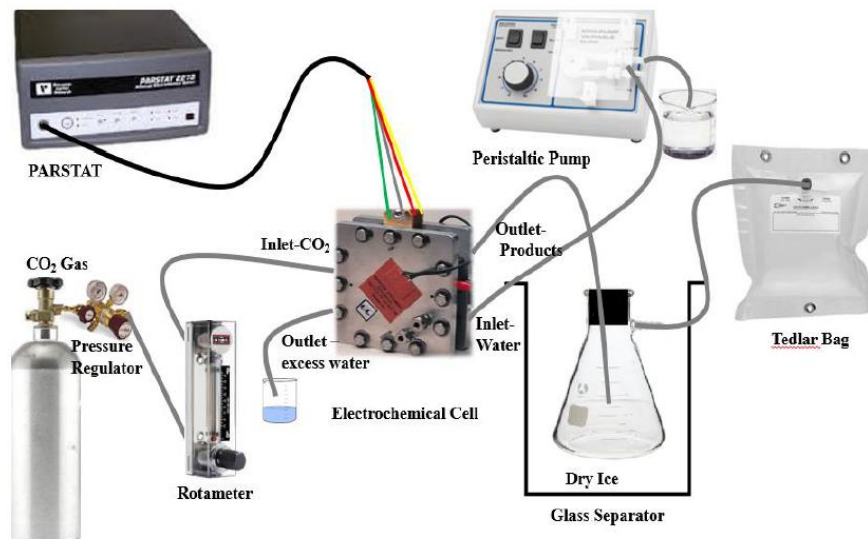
2.3.3 Palladium sebagai Elektroda

Palladium pertama kali digunakan sebagai elektroda dalam elektoreduksi CO₂ dalam larutan NaHCO₃ pada tahun 1985 oleh Spichinger-Ulmann. Dilaporkan bahwa HER dapat ditekan pada permukaan Pd, sehingga aktivitas elektrokatalitik dapat ditingkatkan. Produksi CH₃OH pada elektroda Pd yang dimodifikasi dengan Cu yang terhidrogenasi memiliki efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan elektroda nonhidrogenasi, hal ini disebabkan oleh hydrogen yang teradsorpsi selama proses reduksi (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, 2013). Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Zhang et al. yang menggunakan katalis Pd/SnO₂ *nanosheets* untuk mengkonversi CO₂ menjadi CH₃OH dan memperoleh FE sebesar 34% (Zhang et al., 2018)

2.4. Metode Konversi CO₂ Menjadi Metanol Secara Elektrokimia

Al-Saydeh (2018) melaporkan bahwa terdapat 4 metode untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol, antara lain: konversi kimia; reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol; reduksi fotokimia CO₂ menjadi metanol; dan reduksi fotoelektrokimia CO₂ menjadi metanol (Al-Saydeh 2018). Pada penelitian ini digunakan metode reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dengan pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi.

Reduksi elektrokimia CO₂ secara langsung menghasilkan produk yang bervariasi, umumnya bergantung pada material katalis dan medium reaksi. Gambar 3 menunjukkan representasi bergambar dari rangkaian elektrokimia.



Gambar 3. Representasi Bergambar Dari Rangkaian Elektrokimia (Venka 2016a)

Reduksi elektrokimia CO_2 dapat diproses melalui jalur reduksi dua-, empat-, enam-, dan delapan elektron pada fase gas, berair dan non-aqueous pada sel dan konfigurasi elektroda yang berbeda, baik pada temperatur rendah maupun tinggi. Produk reduksi yang utama antara lain karbon monoksida (CO), asam format (HCOOH) atau format (HCOO^-) pada larutan basa, asam oksalat ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) atau oksalat ($\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ pada larutan basa), formaldehida ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), metanol (CH_3OH), metana (CH_4), etilena (CH_2CH_2), etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$), dan lain-lain. Di antara berbagai zat yang dihasilkan, merupakan tantangan yang besar untuk mengubah CO_2 menjadi CH_3OH , namun potensial yang diperoleh juga sangat besar (Qiao, Liu, and Zhang 2016; Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013).

Karbon dioksida (CO_2) adalah molekul yang sepenuhnya teroksidasi dan stabil secara termodinamik, pemanfaatan CO_2 melalui pendekatan elektrolisis dalam elektrolit berair menimbulkan beberapa tantangan teknis utama. Dalam beberapa dekade terakhir, pengurangan CO_2 telah dipelajari secara intensif menggunakan metode termokimia, elektrokimia, dan fotokimia. Untuk konversi termokimia CO_2 melalui proses reformasi, tidak hanya membutuhkan suhu reaksi dan tekanan tinggi, tetapi juga memerlukan jumlah hidrogen sebagai zat pereduksi yang cukup banyak, yang secara energetik bermasalah dalam penerapan pada aplikasi skala besar. Sebaliknya, reduksi CO_2 secara elektrokimia menjadi lebih menarik karena memiliki beberapa keunggulan karakteristik dibandingkan dengan pendekatan lain, sebagai contoh, reaksi dapat dilakukan pada kondisi ambien dengan laju reaksi yang mudah dikendalikan dengan menyetel bias eksternal (yaitu overpotential) (Lu and Jiao 2016).

Fitriani (2012) melaporkan bahwa reduksi elektrokimia CO₂ ini merupakan reaksi yang terjadi secara tidak spontan dimana dibutuhkan sumber energi dari luar yang berasal dari *power supply*. Metode elektrokimia yang digunakan adalah elektrolisis dengan menggunakan arus tetap. Metode ini dipilih karena pada elektrolisis arus tetap tidak diperlukan kondisi potensial yang stabil dan juga untuk mempermudah mengamati efisiensi faraday dari hasil reduksi CO₂ (Fitriani 2012).

Poin penting dari proses elektoreduksi CO₂ menjadi metanol antara lain: (1) material katoda yang digunakan, (2) efek dari medium reaksi, (3) kondisi operasi, (4) konfigurasi sel elektrokimia, dan (5) perbandingan dengan rute elektrokatalitik yang lain. (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013). Selama dekade terakhir, konversi elektrokimia CO₂ telah digunakan secara luas di skala laboratorium, tapi belum berhasil digunakan dalam proses industri (skala besar). Metode reduksi elektrokimia digunakan untuk konversi CO₂ menjadi zat kimia yang bernilai dan bahan bakar seperti metanol menggunakan listrik sebagai sumber energi utama. Reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol secara langsung adalah proses yang menjanjikan untuk mengurangi sejumlah CO₂ yang di perangkap (Al-Saydeh 2018). Produksi metanol melalui reduksi elektrokimia CO₂ merupakan pilihan yang lebih baik karena dapat dilakukan dibawah kondisi ringan dan dapat mencapai efisiensi yang lebih baik dengan biaya yang lebih rendah. Tabel 1 menunjukkan reaksi elektrokimia konversi CO₂ menjadi methanol pada kondisi standar.

Tabel 1. Reaksi elektrokimia untuk konversi CO₂ menjadi metanol di bawah kondisi standar

	Reaksi elektrokimia	E (V)
Katoda	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	-0,22 vs SCE
Anoda	$3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 1.5\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	0,99 vs SCE
Reaksi Keseluruhan	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2$	1,21

(Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013)

Fitriani (2012) melakukan penelitian tentang reduksi elektrokimia CO₂ pada suhu sekitar 15 °C dengan menggunakan elektroda Cu sebagai elektroda kerja dan platina sebagai elektroda pembantu. Larutan elektrolit yang digunakan adalah NaHCO₃ dengan berbagai konsentrasi serta buffer fosfat dengan variasi pH asam, netral, dan basa (Fitriani 2012).

Penggunaan elektrolit berbeda dalam proses elektrokimia konversi CO₂ menjadi produk lain sudah banyak dilaporkan. Membran nafion-117 sebagai elektrolit padatan merupakan membrane elektrolit yang banyak digunakan dalam konversi CO₂ karena

beberapa pertimbangan diantaranya mampu mencegah crossover methanol (Shironita et al. 2013; Yang et al. 2019; Albo et al. 2017; 2015). Sementara itu, penggunaan KHCO_3 sebagai elektrolit digunakan dengan mempertimbangkan kesetimbangan pasokan CO_2 (Hazarika and Manna 2019; Le et al. 2011a; Albo et al. 2017; Albo and Irabien 2015). Laporan lain menggunakan membrane penukar cation dan anion CMI-7000 dan AMI 7001 menunjukkan bahwa penggunaan membrane penukar anion menghasilkan produk methanol lebih besar (Aeshala, Uppaluri, and Verma 2013), sementara itu Gutiérre menggunakan membrane sterion sebagai media elektrolit dengan produk utama metanaol dan asetaldehida (Gutiérrez-Guerra et al. 2016). Data selengkapnya hasil penelusuran penggunaan berbagai komponen dalam proses konversi CO_2 disajikan dalam Tabel 2.

Tabel 2. Ihtisar Penelitian Mengenai Konversi CO₂ Secara Elektrokimia

No.	Elektroda		Elektrolit	Kondisi operasi						%yield /Farad aic eff	Ref.
	Katoda	Anoda		Waktu operasi	Laju alir CO ₂	Current Density	Applied Voltage	Katalis loading	Produk Target		
1.	Pt-Ru/C (Pt: 32,6 wt%, Ru: 16,9 wt%); Pt/C	Pt/C (Pt:45,7 wt%)	Nafion 117	5 jam	50 mL/min	-	0,06 - 0,70 V vs. DHE	1 mg/cm ²	metanol	Pt-Ru/C Yield : 7,5% FE: 75%	(Shironita et al., 2013)
2.	Cu ₂ O	Cu	KHCO ₃	50 menit	3,0 x 10 ⁻⁶ m ³ /s	7,8 mA.cm ⁻²	-2,0 V vs. SHE	-	metanol	FE: 47,5%	(Hazarika and Manna, 2019)
3.	Cu _{2-x} Se _y /CP	Platinum gauzes	Nafion 117	25 jam	10 sccm	41,5 mA.cm ⁻²	2,67 V	1 mg/cm ²	metanol	FE: 77,6%	(Yang et al., 2019)
4.	Cu ₂ O	Cu foil	KHCO ₃ 0,5M	10 menit	-	0,025 mA.cm ⁻²	-1,1 V vs SCE	-	metanol	Yield: 43 μmol.cm ⁻² .h ⁻¹ FE: 38%	(Le et al., 2011)
5.	Cu-G	IrO ₂	membran Sterion	300 menit (5 jam)	0,039 Nml min ⁻¹ cm ⁻² (CO ₂) 0,47 Nml min ⁻¹ cm ⁻² (60% H ₂ O/N ₂)	applied current : -10, -20 dan -30 mA	Cu-AC : -2,72 V	0,5 mg/cm ²	metanol	pada -30 mA = 75% (selektivitas)	(Gutiérrez-Guerra et al., 2016)
	Cu-G : -1,54 V						asetaldehid				
	Cu-CNF : -2,11 V										
6.	Cu ₂ O Cu ₂ O/ZnO	Platinized titanium electrode	0,5 M KHCO ₃ Nafion 117	90 menit	-	10,64 mA.cm ⁻²	-1,3 V vs Ag/AgCl	0,5 ; 1 ; 1,8 mg/cm ²	metanol	17,7%	(Albo et al., 2015)
7.	Cu ₂ O	platinized titanium plate	0,5 M KHCO ₃	90 menit	10-40 mL/min .cm ²	5-40 mA.cm ⁻²	(-1,39 V) vs Ag/AgCl	1 mg/cm ²	metanol	54,80%	(Albo and Irabien, 2015)
	Cu ₂ O/ZnO						(-1,16 V) vs Ag/AgCl			31,40%	
8.	Cu ₂ O/C	Pt/C 40%	CMI-7000 dan AMI-7001	25 menit	CO ₂ : 20 mL/menit H ₂ O : 1,5 mL/menit	CMI : 2,5 mA.c m-2 AMI : 5,4 mA.cm-2	2 V dan 2,5 V (CH ₄)	Pt/C : 0,5 mg/c m ² Cu ₂ O/C : 2 mg/cm ²	CH ₃ OH, C ₂ H ₄ , CH ₃ OH	CH ₃ OH CMI : <6% AMI : 19%	(Aeshala, Uppaluri and Verma, 2013)
9.	Cu ₂ O/ZnO	Platinized titanium	0,5 M KHCO ₃ piridin-based Nafion 117	90 menit	20 mL/menit	1 mA.cm-2	-0,62 V vs. Ag/AgCl	1 mg/cm ²	metanol	25,6%	(Albo et al., 2017)

2.5. Membrane Electrode Assembly (MEA)

Membrane Electrode Assembly (MEA) dapat dibuat menggunakan metode *Catalyst-Coated Substrate (CCS)* atau *Catalyst-Coated Membrane (CCM)* (Thanasilp and Hunsom 2010). Pada metode CCS, lapisan katalis diletakkan di substrat *Gas Diffusion Layer (GDL)*.

Setelah pasta katalis di spray ke GDL, membran diapit diantara GDL yang telah dilapisi katalis menggunakan *hot-pressing*. *Hot-pressing* sangat penting untuk preparasi MEA berkinerja tinggi karena dapat meningkatkan adhesi antara lapisan katalis dan membran, yang mengarah pada peningkatan koneksi ion (Vielstich, Yokokawaa, and Gasteiger 2009). Namun, panas dan tekanan yang kuat dapat menyebabkan perubahan struktural pada MEA dan GDL, sehingga berpotensi menurunkan kinerja sel (Frey and Linardi 2004). Sebaliknya, dalam metode CCM, lapisan katalis langsung dibuat pada membran tanpa di *hot-press*. Metode CCM menghindari kerusakan struktural MEA dan GDL, mengurangi resistensi ohmik, dan menyederhanakan proses pembuatan karena tidak memerlukan proses tambahan (Peng et al. 2016).

Upaya untuk memahami dan menghasilkan MEA yang efektif telah dilakukan oleh Sossenburg (2018). Sistem MEA digunakan untuk menggabungkan reaksi fase cair dan gas serta membatasi crossover produk sambil menyediakan kedua setengah reaksi dengan reagen yang dibutuhkan masing-masing. Secara teori MEA hanya memiliki dua konstituen; membran dan katalis elektroda yang dikemas rapat. Namun, pemanfaatan MEA memiliki tujuan khusus bila dikombinasikan dengan *gas diffusion layer* (GDL). Dengan menggabungkan membran, lapisan katalis dan *gas diffusion layer* (GDL) hidrofobik, sistem ini mampu melakukan reaksi reduksi CO₂ dalam elektrolit cair sambil menggunakan aliran umpan gas CO₂. Konfigurasi yang sedikit berbeda yang mengintegrasikan elektroda dengan lapisan difusi gas juga dikenal sebagai *gas diffusion electrode* (GDE) di mana membran merupakan komponen terpisah pada jarak tertentu (Sassenburg 2018).

BAB III METODOLOGI

3.1. Tempat Riset

Riset dipusatkan dan dilaksanakan di Pusat Unggulan Riset (PUR) Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya dengan fasilitas yang relatif memadai, sementara karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) akan dilakukan di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya dan analisa produk metanol sementara dilakukan dengan GC-MS yang ada di Jurusan Kimia FMIPA UNSRI.

3.2. Alat dan Bahan yang Digunakan

Peralatan yang akan digunakan pada penelitian ini antara lain; Sel *Electrolyzer*, *Mass Flow Controller*, *Spray Gun*, *High Temperature Vacuum Tube Furnace* OTF-1200X-S, *Hydraulic lamination hot press* EQ-HP-88V-LD, *Ultrasonic homogenizer* MSK-USP-3N, neraca analitik, peralatan gelas, Potensiostat AUTOLAB Metrohm PGSTAT128N, *Power Supply* LW-K3010D 30V/10A, pompa air, *X-Ray Diffraction*, Reaktor penampung methanol, Methanol analyzer, sensor dan pompa serta instalasi pipa.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian antara lain, *carbon paper* Avcarb P75T, *carbon vulcan* XC-72R, amonium bikarbonat (NH_4CO_3), *Polytetrafluoroethylene* (PTFE), Membran Nafion 117, Larutan Nafion 20%, 2-propanol, air *ultrapure*, air demineralisasi, bubuk elektrokatalis Pt/C 10%, bubuk elektrokatalis Pt-Ru/C, bubuk elektrokatalis Cu_2O dan ZnO, Larutan H_2O_2 3%, Larutan H_2SO_4 0,5 M, katalis Pd/C, katalis SnO_2

3.3. Prosedur Riset

3.3.1 Preparasi *Gas Diffusion Layer* (GDL)

GDL dipreparasi dengan mencampurkan *carbon vulcan* XC-72R, ammonium bikarbonat, PTFE, dan 2-propanol, kemudian diaduk menggunakan ultrasonik homogenizer selama 15 menit hingga membentuk pasta. Pasta yang dihasilkan disemburkan di atas *carbon paper* Avcarb P75T sampai habis, kemudian GDL disintering selama ± 3 jam pada suhu 350°C .

3.3.2 Preparasi Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$

Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dipreparasi terlebih dahulu karena bahan yang tersedia adalah Cu_2O , ZnO, Pd/C dan SnO_2 . Untuk membuat paduan katalis, sejumlah bubuk Cu_2O , bubuk ZnO, dan *carbon vulcan* XC-72R dimasukkan ke dalam jar HEM-shaker

dengan perbandingan katalis : ball mill (1:10), kemudian dimilling selama 5 jam. Katalis yang diperoleh disimpan ke dalam wadah yang kering dan tertutup rapat. Pemuatan katalis Cu₂O-ZnO/C 40% adalah 2 mg.cm⁻². Komposisi pembuatan elektroda ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Komposisi pembuatan elektroda Cu₂O-ZnO/C

Loading Cu ₂ O (mg/cm ²)	Loading ZnO (mg/cm ²)	Luas elektroda (cm ²)	Cu ₂ O (g)	ZnO (g)	Total massa (mg)	Total massa carbon (mg)
1	1	49	0,0539	0,0539	269,5	171,5

Hal yang relatif sama dilakukan pada proses pembuatan katalis Pd-SnO₂/C yang dilakukan dengan mencampurkan katalis Pd/C dengan katalis SnO₂ pada peralatan ball milling.

3.3.3 Preparasi Elektroda

Elektroda yang digunakan terdiri atas katoda dan anoda dengan ukuran 7 x 7 cm². Anoda menggunakan katalis Pt/C, sementara di katoda menggunakan katalis yang berbeda. Katoda pertama menggunakan katalis Pt-Ru/C, katoda yang kedua menggunakan katalis Cu₂O/ZnO, dan katoda ketiga menggunakan katalis Pd-SnO₂/C dengan pemuatan katalis 2 mg.cm⁻².

Preparasi elektrokatalis dibuat dengan cara mencampurkan bubuk katalis dengan air destilat secukupnya hingga kalis dan diaduk menggunakan spatula. Selanjutnya, Larutan Nafion 20% dan 2-propanol ditambahkan ke dalam campuran katalis, kemudian campuran diagitasi selama 10 menit dalam *ultrasonic homogenizer*. Campuran ditambahkan PTFE dan pengadukan dilanjutkan selama 5 menit hingga membentuk pasta. Pasta disebarkan ke GDL, kemudian dikeringkan pada suhu ruangan.

Pasta Cu₂O/ZnO/C dan Pd-SnO₂/C dipreparasi dengan cara yang sama seperti yang telah disebutkan diatas dan disemprotkan pada GDL (Carmo et al. 2019). Elektroda yang telah dikeringkan, dikarakterisasi dengan XRD, CV dan EIS.

3.3.4 Karakterisasi Elektroda

Karakterisasi pada elektroda Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C dilakukan untuk mengetahui kristalinitas dengan XRD, kemudian dilakukan pengujian menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV) dan EIS untuk mengetahui aktivitas katalitik. Selain itu juga dilakukan pengukuran konduktivitas elektrik.

1) Karakterisasi Menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Elektroda diletakkan ke dalam sampel holder. Pengukuran dilakukan pada daerah 2θ menggunakan metode *continuous scan* dari 3 hingga 90° . Perpindahan langkah setiap sudut hamburan sebesar $0,02^\circ$ dengan kecepatan scan 10 deg/min, tegangan 30,0 kV, dan kuat arus 10,0 mA.

2) Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV)

Sifat elektrokimia elektroda karbon ditentukan dengan menggunakan teknik Cyclic Voltammetry (CV), dimana nilai densitas arus adalah hasil pembagian nilai arus hasil pengukuran dengan berat elektroda karbon dalam satuan gram. Pengujian Cyclic Voltammetry (CV) dilakukan dengan potensiostat AUTOLAB PGSTAT204 Metrohm dengan elektroda Ag/AgCl sebagai elektroda referensi, kawat platinum sebagai elektroda counter, dan elektroda (Pt/C; Pt-Ru/C; Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C) sebagai elektroda kerja. Pengukuran CV direkam dengan batas potensial dari -0,1 V hingga 0,2 V (vs Ag/AgCl) dengan laju pemindaian 50 mV/s dalam larutan elektrolit natrium hidroksida (NaOH) 1 M pada suhu ruang. Hasil pengukuran CV berupa kurva voltammogram yang menunjukkan terjadinya reaksi reduksi oksidasi pada katalis. Voltammogram yang dihasilkan digunakan untuk menghitung nilai ECSA (Electrochemical Surface Area).

3) Pengujian dan Pengukuran Konduktivitas Elektrik Menggunakan EIS.

Pengujian aktivitas katalitik dilakukan pada suhu ruang. Sisi anoda dijepit pada elektroda kerja. Elektroda cacah (Pt) diletakkan diantara elektroda kerja dan elektroda referensi (Ag/AgCl). Ketiga elektroda direndam pada larutan elektrolit NaOH 1 M. Pengukuran konduktivitas elektroda ditentukan dengan menggunakan metode FRA Impedance Potential. Pengukuran konduktivitas dilakukan dengan cara mengalirkan arus listrik AC. Hasil pengukuran konduktivitas elektroda didapatkan data berupa nilai hambatan real (Z') dan hambatan imajiner (Z'') dimana data tersebut merupakan hasil respon bahan terhadap rentang frekuensi yang diberikan. Frekuensi yang digunakan pada pengujian berada pada rentang 0,1 Hz – 100 kHz. Dari data pengukuran EIS didapat data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer (R_p) sehingga nilai konduktivitas dapat dihitung.

Elektroda kerja dihubungkan pada potensiostat/galvanostat Metrohm. Pengujian EIS diperoleh data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer muatan (R_p) dan selanjutnya nilai konduktivitas elektrik elektroda ditentukan dengan menggunakan rumus pada persamaan 13.

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} \quad (13)$$

dimana:

$$Z_R = R_p + R_s$$

Keterangan:

R_s : tahanan larutan (Ω)

R_p : tahanan transfer muatan (Ω)

l : jarak antar elektroda (cm)

A : luas permukaan elektroda (cm²)

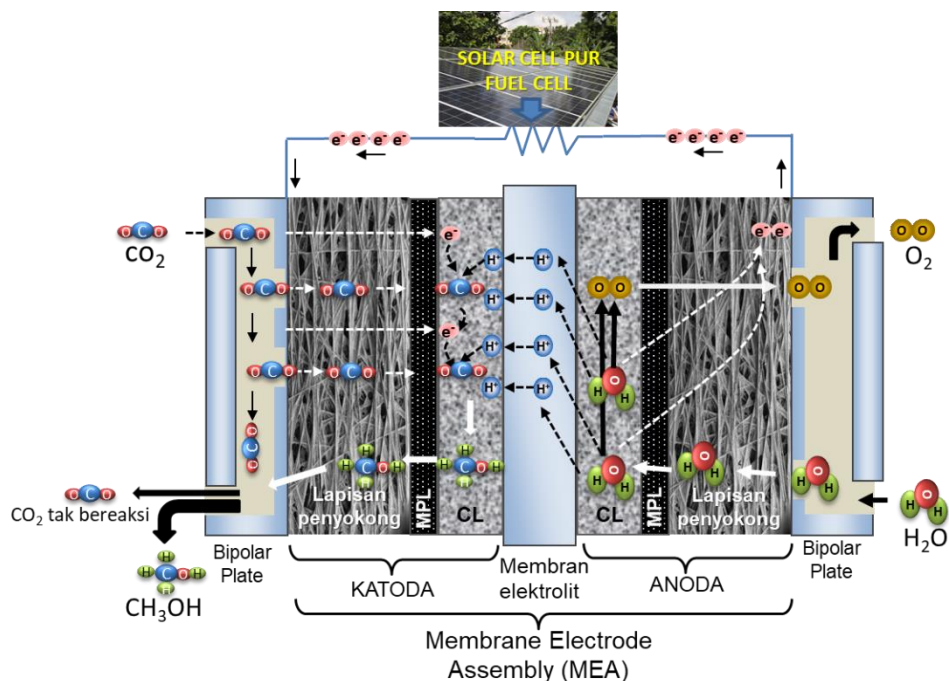
Dimana R adalah hambatan listrik (Ω), ρ adalah resistivitas (Ω cm), l adalah tebal pellet (mm), A adalah luas permukaan pellet karbon (cm²), dan K adalah konduktivitas (S/cm).

3.3.5 Preparasi *Membrane Electrode Assembly* (MEA)

Membrane Electrode Assembly (MEA) dipreparasi dengan menggabungkan kedua buah elektroda pada kedua sisi membran nafion-117 menggunakan penekanan panas. Sebelum digunakan, membran diaktivasi menggunakan H₂O₂ 3% pada 80 °C selama 1 jam, kemudian direndam dalam H₂SO₄ 0,5 M pada 80 °C selama 1 jam. Terakhir, membran dibilas beberapa kali dalam air deionisasi untuk menghilangkan sisa asam, kemudian disimpan dalam air deionisasi untuk menghindari dehidrasi. Elektroda yang dihasilkan dari prosedur 3.3.3 direkatkan pada kedua sisi membran elektrolit, dilapisi dengan aluminium foil pada kedua sisi elektroda. Penekanan panas pada pembuatan MEA dilakukan pada suhu 135°C dan tekanan 2.000 psi dalam waktu 3 menit (Shironita et al. 2013; Le et al. 2011b; Carmo et al. 2019).

3.3.6 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO₂

Gas CO₂ dialirkan pada sisi katoda, sedangkan air dialirkan pada sisi anoda. Sumber energi listrik diperoleh dari power supply yang dihubungkan pada electrolyzer. Laju alir CO₂ diatur menggunakan mass flow controller. Oksigen diproduksi pada sisi anoda meninggalkan reaktor *electrolyzer* dan dilepas ke atmosfer tanpa dianalisis, CO₂ sisa yang tidak bereaksi diumpungkan kembali ke line tabung CO₂ demikian pula kelebihan air dikembalikan ke dalam penampungan air. Konfigurasi Sel Elektrokimia tercantum pada Gambar 4.



Gambar 4. Bagan Reaksi dan Komponen MEA

1) Pengaruh Tegangan

Reduksi elektrokimia CO_2 pada tegangan bervariasi diteliti pada laju alir CO_2 0,06 L/menit dan tegangan dengan interval 1,2 V – 3 V menggunakan potensiostat dan power supply pada masing-masing MEA dengan katoda yang berbeda. Proses elektrolisis dilakukan selama 2 jam untuk masing-masing variasi.

2) Pengaruh Laju Alir CO_2

Reduksi elektrokimia CO_2 diteliti pada laju alir CO_2 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 dan 0,1 L/min pada tegangan optimum dengan katalis pada katoda berbeda. Setiap variasi kondisi elektrolisis berlangsung selama 2 jam.

3.3.7. Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk

Analisa kuantitatif dalam menentukan kadar metanol dilakukan dengan menggunakan refraktometer sebagai uji pendahuluan. Uji produk methanol selanjutnya dilakukan dengan *Gas Chromatograph* TRACE 1310 dilengkapi dengan detektor *Mass Spectroscopy* sebelum alat uji utama berupa Methanol Analyzer datang. Penentuan senyawa berdasarkan indeks kemiripan dan pola fragmentasi senyawa. Konsentrasi metanol yang terbentuk dari hasil reduksi elektrokimia (analisis kuantitatif) dapat dibuktikan dengan membandingkan antara luas *peak* sampel dengan luas *peak* propanol standar melalui metode spike menggunakan propanol 20 % v/v dengan persamaan:

konsentrasi metanol sampel (%)

$$= \frac{\text{luas } peak \text{ metanol sampel}}{\text{luas } peak \text{ propanol standar}} \times \text{konsentrasi propanol \% (20\%)}$$

3.3.8. Analisis Data

1) Analisis XRD

Analisis XRD dilakukan untuk menganalisis kristalinitas pada katalis Pt/C, Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂. Hasil karakterisasi XRD berupa pola-pola difraksi atau difraktogram yang merupakan puncak-puncak karakteristik struktur kristal katalis. Hasil pengukuran XRD dilihat dari letak dan bentuk puncak difraktogram yang muncul sesuai dengan nomor masing-masing komponen pada data file JCPDS (*Joint Committee Powder Diffraction Standard*).

2) Analisis Pengujian Elektrokimia Elektroda menggunakan *Cyclic Voltammetry (CV)*

Dari analisis CV didapat data berupa kurva yang menunjukkan adanya reaksi bolak balik, dimana reaksi ini ditunjukkan dengan terbentuknya puncak anodik (kurva atas) dan katodik (kurva bawah). Hal ini menunjukkan telah terjadi reaksi redoks. Analisis yang dilakukan meliputi perhitungan ECSA (*Electrochemical Surface Area*) dengan rumus:

$$ECSA = \frac{Q_h}{210 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2} \times \text{loading katalis}} \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

Qh = L rata-rata/ luas sampel

210 = konstanta muatan yang terdesorpsi oleh polikristal katalis

Loading katalis = jumlah katalis yang digunakan (Kumar et al. 2018).

3) Analisis Pengukuran Konduktivitas Elektrik

Pengukuran EIS menghasilkan *Nyquist plot* yang terdiri dari lengkungan di daerah frekuensi tinggi dan kenaikan yang signifikan di daerah frekuensi rendah. Data yang didapat digambarkan dalam grafik *Nyquist plot* menggunakan software NOVA, dimana sumbu x merupakan hambatan *real* (Z') dan sumbu y merupakan hambatan imajiner (Z''). *Nyquist plot* lalu di *fitting* menyesuaikan sirkuit ekuivalen yang diinginkan (Tang et al. 2014).

Tabel 4. Data Hasil *Fitting* Kurva *Nyquist*

No.	Katalis pada MEA	Parameter Impedansi		
		R _p (Ω)	R _s (Ω)	X ²
1.	Pt/C			
2.	Pt-Ru/C			
3.	Cu ₂ O-ZnO/C			

Dari data uji EIS dan setelah didapat data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer (R_p), selanjutnya nilai konduktivitas dapat ditentukan dengan rumus sesuai persamaan 14:

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} \dots \dots \dots (14)$$

dimana:

Nilai Z_R ditentukan dengan (R_p + R_s)

Z_R = hambatan real total (Ω)

σ = konduktivitas (S/cm)

l = ketebalan sampel (cm)

A = luas permukaan kontak elektroda (cm²)






BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengkondisian Rangkaian Peralatan dan Kalibrasi

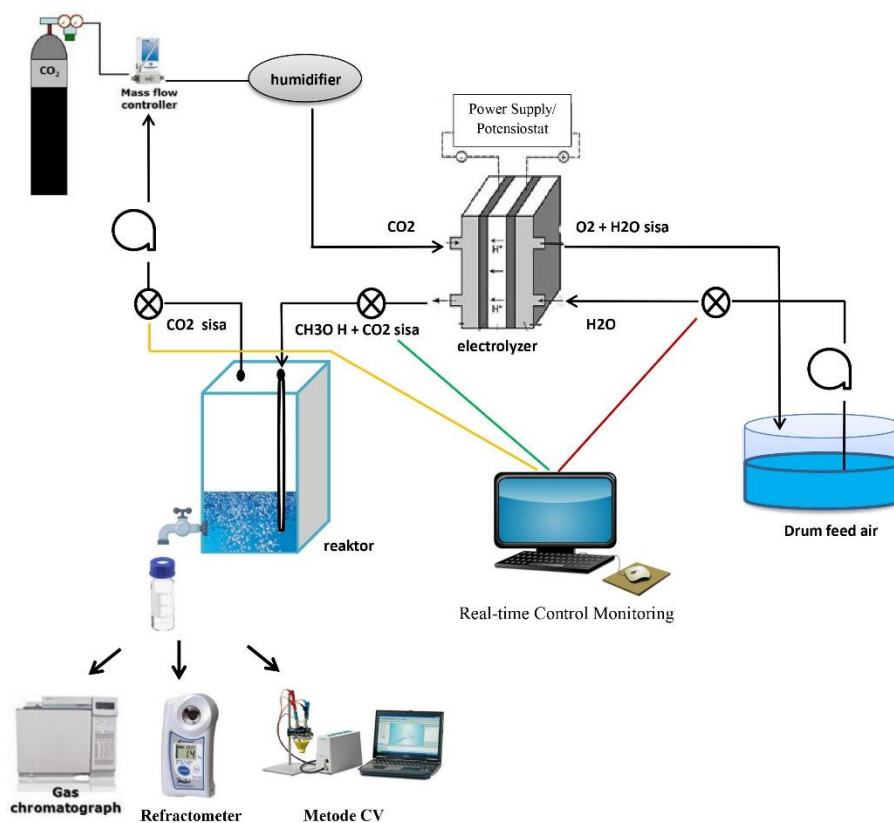
Rangkaian peralatan beserta asesorisnya sudah dipasang. Beberapa alat yang dibeli atau dibuat dengan pendanaan tahap I sudah dilakukan, diantaranya seperti tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5. Daftar Peralatan Penunjang Penelitian

No	Peralatan	Deskripsi	Keterangan
1	Electrolyser		Dibeli melalui supplier
2	Power supply		Dibeli melalui supplier
3	Rangkaian peralatan pendukung		Dibuat dan dirangkai sendiri
4	Alat Refraktometer		Dibeli melalui supplier
5	Pengadaan sebagian bahan		Dibeli melalui supplier

Karbon-dioksida telah dibeli sebanyak tiga tabung ukuran besar (40 L) dan telah digunakan.

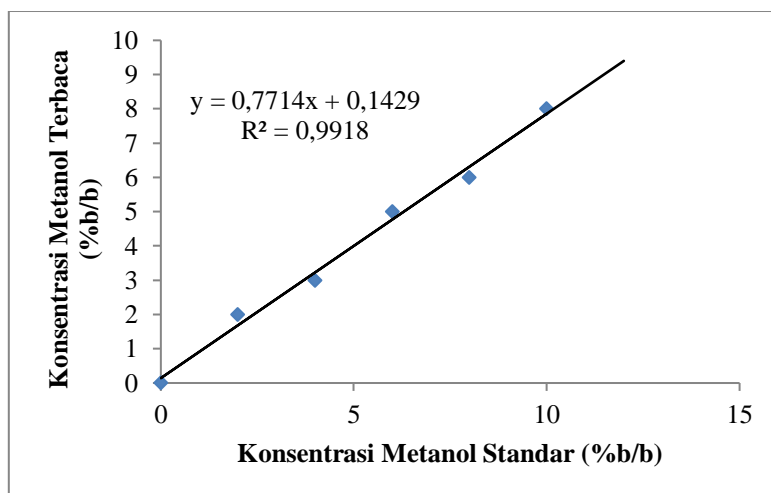
Skema peralatan secara keseluruhan ditampilkan pada gambar 5.



Gambar 5. Skema Peralatan dan Alur Proses Konversi CO₂ Menjadi Metanol

Untuk pengujian produk, peralatan yang digunakan adalah refractometer sebagai peralatan uji awal. Keputusan penggunaan refractometer didasarkan pada kondisi peralatan uji utama berupa methanol analyzer belum bisa direalisasikan karena anggaran pembeliannya dialokasikan pada tahap kedua. Peralatan uji kandungan produk methanol yang lebih akurat sementara menggunakan peralatan GC-MS yang ada di Jurusan Kimia FMIPA UNSRI. Sebelum digunakan, peralatan refractometer dan GC dikalibrasi.

Proses kalibrasi peralatan refractometer dilakukan dengan membuat kurva kalibrasi menggunakan methanol standar. Pembuatan kurva kalibrasi dengan menggunakan *refractometer* dilakukan dengan menggunakan larutan methanol 2, 4, 6, 8 dan 10% b/b. Hasil pengukuran ditampilkan pada gambar 5. Selain itu, dilakukan konversi konsentrasi %b/b menjadi kemolaran (M) dengan metode pengukuran. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada Tabel 6. Selain dengan metode pengukuran, konversi konsentrasi methanol dari persen berat menjadi kemolaran dapat dihitung menggunakan data densitas/rapat massa larutan standar.



Gambar 5. Kurva Kalibrasi Larutan Metanol Standar

Tabel 6. Penentuan Konsentrasi Metanol dalam Molar Berdasarkan Pengukuran.

No.	Konsentrasi Metanol Standar(%b/b)	Pengulangan			massa piknometer kosong (g)	massa piknometer + larutan (g)	Volume piknometer (mL)	Massa larutan (g)	Masa jenis (g/mL)	Molaritas (M)
		I	II	III						
1.	2	2	2	2	19,2682	44,6196	25,499	25,3514	0,994	0,621
2.	4	3	3	3	19,2682	44,5540	25,499	25,2858	0,992	1,238
3.	6	5	5	5	19,2682	44,4600	25,499	25,1918	0,988	1,850
4.	8	6	6	6	19,2682	44,2837	25,499	25,0155	0,981	2,450
5.	10	8	8	8	19,2682	44,1971	25,499	24,9289	0,978	3,051

Analisa kuantitatif dalam menentukan kadar metanol salah satunya dilakukan dengan menggunakan *Gas Chromatograph* TRACE 1310 dilengkapi dengan detektor *Mass Spectroscopy*. Sampel yang diujikan yaitu sampel cair hasil reduksi elektrokimia sebanyak 0,5 mikroliter, tanpa dilakukan destilasi. Kondisi operasi dari alat GC-MS disajikan pada Tabel 7 dan Lampiran 1. Proses kalibrasi peralatan dilakukan dengan metode spike menggunakan larutan propanol yang diketahui konsentrasinya kemudian diinjeksikan bersama-sama sampel.

Tabel 7. Kondisi Operasi GC-MS

No.	Parameter	Keterangan
1.	Gas Pembawa	Helium
2.	Laju Alir Gas Pembawa	1 mL/menit
3.	Temperatur Injeksi	130 °C
4.	Temperatur Detektor	250 °C
5.	Panjang Kolom	30 m
6.	Ketebalan Film	0,25 mikrometer
7.	Internal Diameter Kolom	0,25 mm
8.	Detektor	Mass Spectrometry

4.2. Pembuatan dan Karakterisasi Membrane Electrode Assembly (MEA)

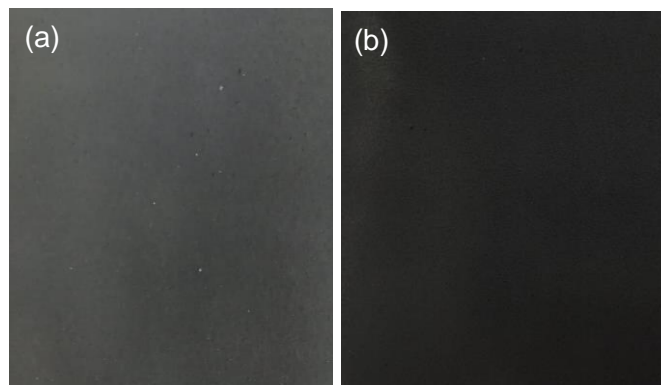
Membrane Electrode Assembly (MEA) sebagai tempat terjadinya konversi elektrokimia CO_2 menjadi metanol terdiri atas dua buah elektroda (anoda dan katoda) yang mengapit membrane elektrolit yang dalam hal ini menggunakan membrane Nafion-117. Elektroda sendiri terdiri atas *Gas Diffusion Layer (GDL)* dan *Catalyst Layer (CL)*. Pada penelitian ini, katalis yang digunakan pada catalyst layer di anoda adalah Pt/C 40%b/b, sementara di katoda ada tiga jenis katalis yang digunakan, yaitu katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C.

Pembuatan *Membrane Electrode Assembly (MEA)* dilakukan dengan metode *spraying*. MEA terdiri dari 2 buah elektroda dan membran elektrolit. Pada penelitian ini digunakan katalis Pt/C sebagai anoda, pada katoda digunakan 2 jenis katalis yang berbeda yaitu Pt-Ru/C dan Cu₂O-ZnO/C sebagai perbandingan untuk memperoleh katalis yang dapat menghasilkan *yield* metanol yang paling tinggi. Elektroda terdiri dari *backing layer* yang berupa kertas karbon, kemudian dilapisi dengan *Micro Porous Layer (MPL)* yang kemudian disebut dengan *Gas Diffusion Layer (GDL)*, dan *catalyst layer*. MPL dibuat dari campuran antara *carbon vulcan XC-72*, PTFE, ammonium bikarbonat, 2-propanol yang diaduk dengan *ultrasonic homogenizer* agar partikel-partikel dapat terpecah melalui getaran yang dihasilkan sehingga dapat larut secara sempurna dan partikel dapat menempel dengan baik pada pori-pori kertas karbon. Penambahan PTFE bertujuan agar air tidak menempel pada elektroda yang berakibat pada menurunnya konduktivitas dari elektroda. Campuran ini akan membentuk tinta katalis yang disemprotkan pada karbon paper. *Catalyst layer* terdiri dari campuran katalis, larutan nafion, PTFE, dan 2-propanol. Elektroda yang diperoleh dikarakterisasi dengan menggunakan *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Cyclic Voltammetry (CV)* dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*.

Sebelum dilakukan penekanan panas, membran diaktivasi terlebih dahulu dengan pemanasan 80°C selama 1 jam untuk masing-masing larutan. Pertama, direndam dalam H₂O₂ 3% untuk menghilangkan pengotor organik (lemak), kedua direndam dalam H₂SO₄ 0,5 M untuk menghilangkan pengotor logam, dan terakhir direndam dengan H₂O untuk menghilangkan sisa asam (Shironita *et al.*, 2013). Penekanan panas dilakukan pada suhu 135°C selama 3 menit, hal ini dilakukan agar elektroda dapat merekat pada kedua sisi membran elektrolit.

4.2.1. Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Berbagai Variasi Katalis

Pembuatan elektroda dilakukan dengan metode penyemprotan tinta *catalyst layer* pada GDL. Gambaran GDL dan Elektroda dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. (a) GDL, (b) ELektroda

Dalam proses pembuatan elektroda, dilakukan pula karakterisasi elektroda yang meliputi: Analisa XRD, Analisa *Cyclic voltammetry (CV)*, dan *Analisa Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*, serta Efisiensi Coulomb.

1) Karakterisasi Elektroda

a. Analisa XRD

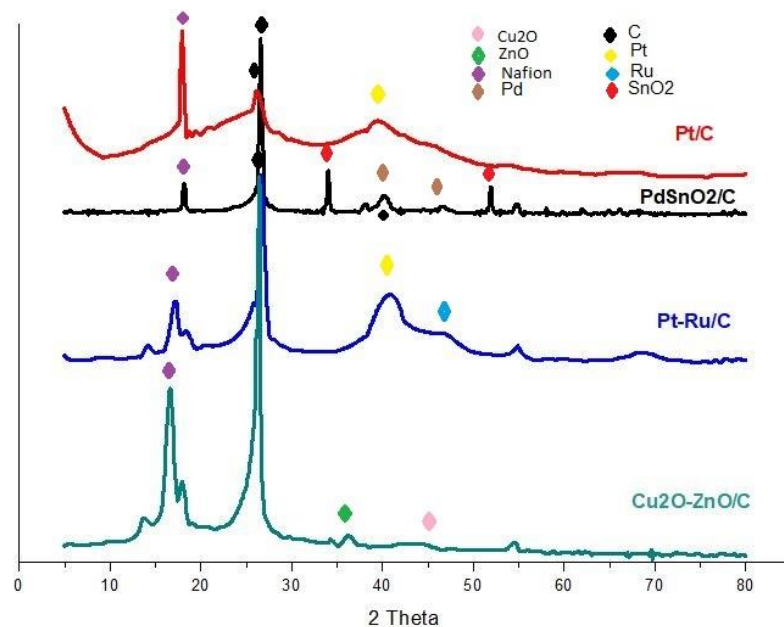
Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal dari katalis yang digunakan dengan membandingkan data yang diperoleh dengan *Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)*. Data XRD menunjukkan puncak-puncak kristalin pada 2θ yang mengindikasikan adanya partikel logam pada sampel. Beberapa puncak menunjukkan kemiripan dengan standar *JCPDS*. Gambar 7 menunjukkan difraktogram dari elektroda yang digunakan.

Gambar 7 untuk elektroda dengan katalis Pt/C diperoleh puncak difraksi pada nilai $2\theta = 17,97^\circ, 26,34^\circ, \text{ dan } 39,7^\circ$ yang menunjukkan adanya kristal Pt berdasarkan *JCPDS 04-0802*, selain itu puncak yang melebar pada $2\theta = 26,34^\circ$ tidak begitu jelas teramati hal ini karena adanya struktur heksagonal dari *carbon vulcan XC-72R* yang merupakan karbon amorf (Huy et al. 2016). Difraktogram dari Pt-Ru/C dapat dilihat adanya puncak pada $2\theta = 14,47^\circ, 17,11^\circ, 26,73^\circ, 40,74^\circ, 47,02^\circ, 54,79^\circ, \text{ dan } 68,8^\circ$, puncak difraksi pada katalis Pt-Ru sedikit bergeser ke nilai 2θ yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan difraktogram Pt/C, hal ini disebabkan karena adanya paduan dari Pt-Ru dalam katalis, sedangkan nanokristalin dari rutenium oksida terlihat dari bahu puncak yang melebar disekitar $28-35^\circ$ yang merefleksikan fase tetragonal dari RuO_2 berdasarkan *JCPDS 21-1172* (Aricò et al. 2000). Difraktogram dari support (*carbon vulcan*) terlihat pada 2θ di sekitar $24^\circ, 43^\circ \text{ dan } 79^\circ$ yang dipengaruhi oleh *carbon vulcan XC-72R (carbon support)*.

Difraktogram dari elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ diperoleh puncak difraksi yang cukup tajam dan berhimpit pada nilai $2\theta = 13,76^\circ, 16,55^\circ, 25,67^\circ, 26,49^\circ, 36,12^\circ, 44,47^\circ, 54,63^\circ, \text{ dan } 68,2^\circ$ yang mengindikasikan fase kubik dari Cu_2O berdasarkan *JCPDS*

75-1531 dan fase heksagonal ZnO berdasarkan JCPDS 36-1451 (Liu et al. 2016; Sakellis et al. 2014). Puncak yang terbentuk pada difraktogram Cu₂O-ZnO/C mengindikasikan sifat kekristalan yang dimiliki katalis.

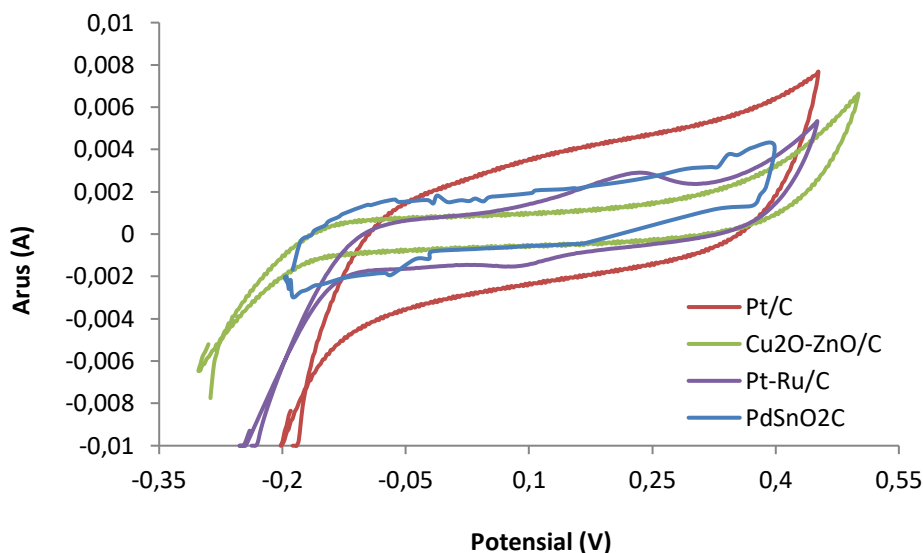
Berdasarkan hasil pengukuran XRD dari elektroda Pd-SnO₂/C masih pada gambar 7 menunjukkan keberadaan Carbon (C) pada sudut difraksi 2-theta 26,16° dan 26,65°, sedangkan pada daerah sudut difraksi 40,28°; 47,04°; dan 68,12° merupakan peak yang menunjukkan keberadaan Palladium (Pd). Senyawa SnO₂ teridentifikasi pada sudut difraksi 54,799°.



Gambar 7. Difraktogram Elektroda dengan Katalis yang Berbeda

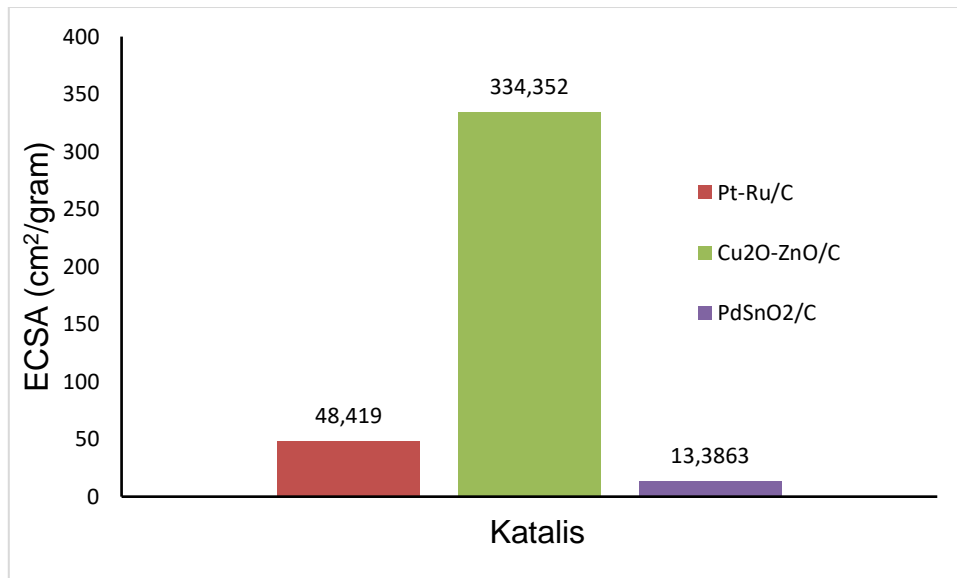
b. Analisa CV

Pengujian dengan metode *cyclic voltammetry* atau voltametri siklik dilakukan pada elektroda Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) yang merepresentasikan ukuran jumlah situs aktif secara elektrokimia per gram katalis, serta untuk mengetahui reaktivitas dari elektrolit dengan melihat reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) sampel. Adanya kemungkinan reaksi lain saat reduksi-oksidasi berlangsung dapat dilihat dari voltamogramnya. Prinsip dari voltametri siklik adalah mengamati hubungan antara potensial yang diberikan terhadap arus yang terukur. Voltamogram yang dihasilkan merupakan kurva antara potensial (sumbu X) dan arus (sumbu Y). Voltamogram terdiri dari 2 puncak yaitu puncak oksidasi pada daerah arus positif dan puncak reduksi pada daerah arus negatif (Lestariningsih, Sabina and Majid, 2017). Adapun hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Voltamogram dari setiap elektroda

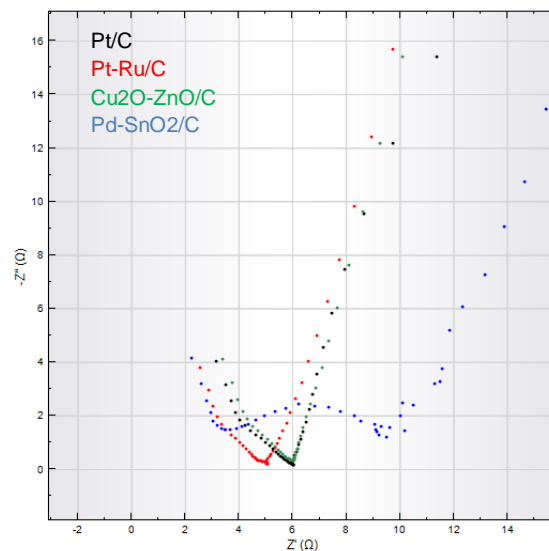
Gambar 8 menunjukkan puncak oksidasi reduksi dari beberapa elektroda yang digunakan. Hasil perhitungan nilai ECSA untuk masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 9. Dari hasil ECSA didapatkan bahwa elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ menghasilkan luasan aktif yang paling besar yaitu sebesar $334,352 \text{ cm}^2/\text{g}$. Sedangkan elektroda dengan katalis Pt-Ru/C memiliki nilai ECSA sebesar $48,419 \text{ cm}^2/\text{g}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ sebesar $13,3863 \text{ cm}^2/\text{g}$. Nilai ECSA yang tinggi mengindikasikan bahwa situs aktif pada permukaan elektroda terdapat dalam jumlah yang banyak, sehingga memungkinkan reaksi elektrokimia terjadi dengan optimal. Nilai ECSA juga menggambarkan *effective charge-transfer resistance* pada elektroda, dimana semakin besar nilai ECSA maka tahanannya akan semakin kecil. *Effective charge transfer resistance* berpengaruh pada kemampuan MEA dalam menghantarkan proton (Cha, 1999).



Gambar 9. Nilai ECSA setiap Katoda

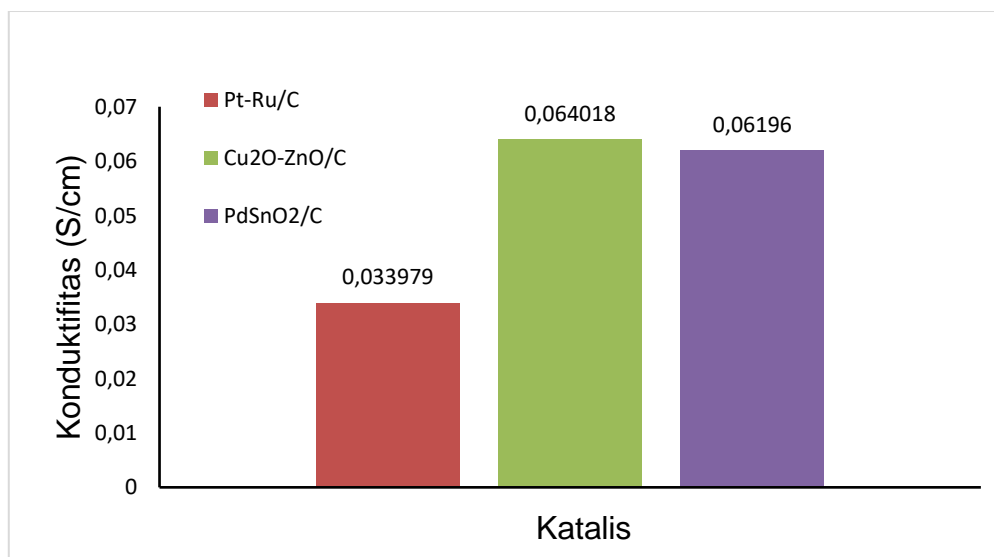
c. Analisa EIS

Pengukuran dengan menggunakan metode EIS digunakan untuk menentukan berbagai parameter kinerja dari elektroda, salah satunya menghitung nilai konduktivitas listrik elektroda. Kurva Nyquist dari sebagai dasar penentuan konduktivitas elektroda disajikan pada gambar 10.



Gambar 10. Kurva Nyquist setiap Elektroda

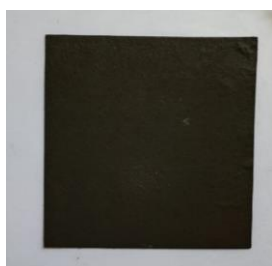
Berdasarkan Gambar 10 dapat diketahui bahwa elektroda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C memiliki hambatan yang lebih kecil dibandingkan elektroda dengan katalis Pd-SnO₂/C dan Pt-Ru/C. Besarnya hambatan menunjukkan bahwa banyaknya rintangan antar muka yang mengakibatkan konduktivitas elektrik kecil. Gambar 11 menunjukkan nilai konduktivitas pada setiap elektroda.



Gambar 11. Nilai Konduktivitas setiap Katoda

2) Pengaturan Elektroda pada Membrane Electrode Assembly

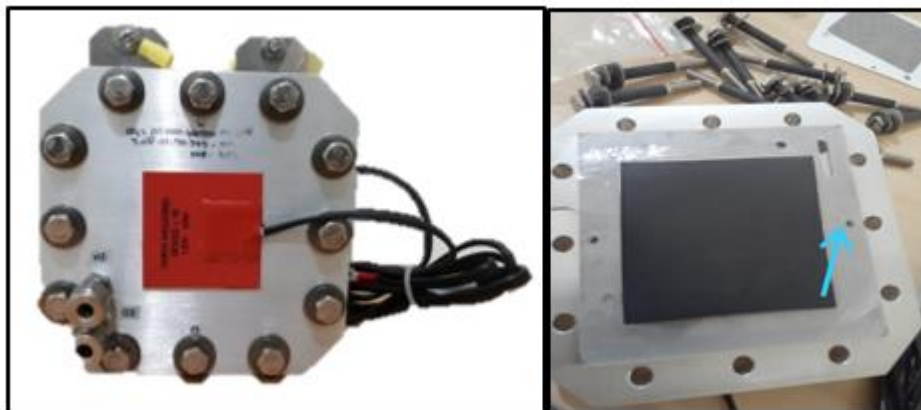
Pembuatan MEA dengan katalis Pt/C (di anoda) dan katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C (di katoda) sudah dilakukan. MEA dibuat dengan menempelkan kedua buah elektroda pada kedua sisi membran Nafion-117 yang sebelumnya sudah diaktivasi. MEA yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 12.



Gambar 12. Membrane Electrode Assembly (MEA)

3) Set-up MEA pada Elektroliser

MEA yang sudah dibuat dipasang pada electrolyser dan melakukan kondisioning peralatan. Bentuk elektroliser dan posisi MEA dalam elektroliser disajikan pada Gambar 13.



Gambar 13. Elektroliser dan posisi MEA pada Elektroliser

Elektroliser mempunyai dua ruang katoda dan anoda yang dipisahkan dengan MEA. Untuk mengatasi kebocoran, pada kedua sisi ruang anoda dan katoda dilapisi dengan gasket.

4.3. Proses Konversi CO₂ Menjadi Metanol pada Kondisi Bervariasi

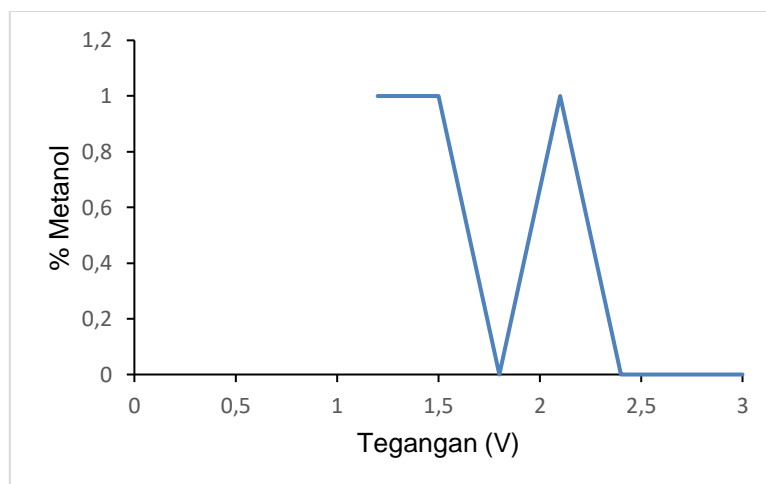
Berdasarkan hasil karakterisasi elektroda, maka elektroda (katoda) dengan katalis Cu₂O-ZnO/C merupakan elektroda terbaik dibandingkan dengan elektroda yang menggunakan katalis Pt-Ru/C dan Pd-SnO₂/C. Dengan demikian, penentuan kondisi operasi optimum dilakukan dengan menggunakan elektroda yang mengandung katalis Cu₂O-ZnO/C.

4.3.1. Proses Konversi CO₂ pada Tegangan Bervariasi

Pengujian kandungan metanol dari hasil konversi CO₂ dilakukan dengan memvariasikan tegangan pada 1,2; 1,5; 1,8, 2,1; 2,4; 2,7 dan 3 V yang diatur menggunakan power supply. Pengujian dilakukan selama 2 jam dengan laju alir konstan yakni 0,06 L/menit. Produk konversi CO₂ selanjutnya diukur dengan menggunakan refraktometer dan GC-MS untuk menentukan persentase kandungan metanol.

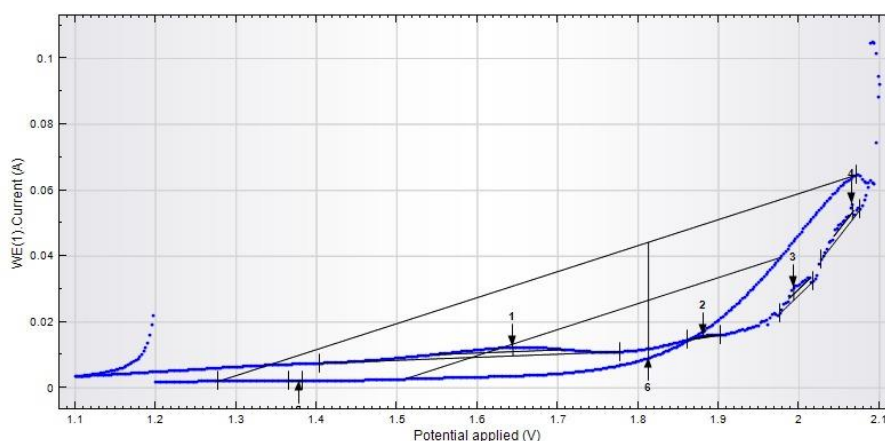
a. Pengujian Tegangan pada MEA dengan Katoda Cu₂O-ZnO/C

Pengujian variasi tegangan menggunakan elektroda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C menunjukkan adanya pembentukan metanol yang diukur menggunakan refraktometer pada tegangan 1,2; 1,5 dan 2,1 V. Hal lain yang didapatkan pada pengujian ini yakni pada tegangan 1,8 V juga tidak ditemukan adanya pembentukan metanol seperti yang dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 14. Persentase metanol menggunakan refraktometer pada katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$.

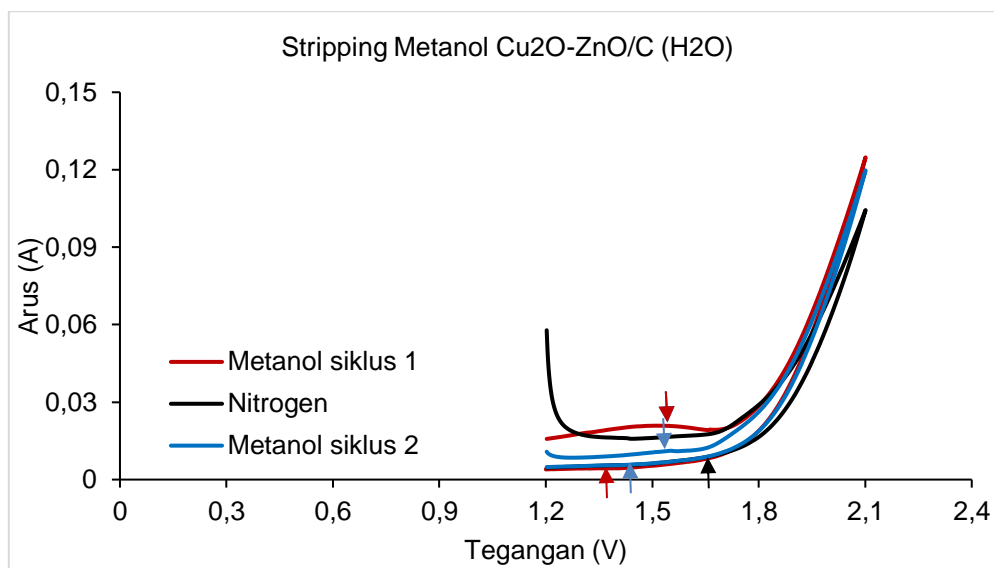
Berdasarkan Gambar 14 , pada tegangan 1,8 V terjadi penyimpangan dimana hasil pengukuran refraktometer tidak terdeteksi adanya methanol (%Metanol = 0). Untuk memastikan hal tersebut dilakukan stripping metanol menggunakan alat Potensiostat Autolab PGSTAT 204 Metrohm untuk mengidentifikasi adanya arus pada daerah tersebut. Metode stripping methanol dilakukan dengan cara mengalirkan uap methanol di katoda dengan gas N_2 sebagai pembawa. Hasil stripping metanol dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Penentuan Tegangan Optimum Elektrolisis CO_2 menggunakan air di anoda dengan Metode Stripping Methanol

Berdasarkan hasil stripping metanol pada Gambar 15 diperoleh puncak pada tegangan 1,64 V yang menunjukkan adanya metanol. Hasil pengujian ini selanjutnya diukur menggunakan GC-MS untuk menghitung persentase metanol dalam air hasil konversi CO_2 . Akan tetapi, puncak metanol masih sulit terpisah dengan air sehingga persentase metanol tidak dapat dihitung. Untuk memastikan bahwa methanol berada pada tegangan tersebut,

maka dilakukan verifikasi dengan menggunakan gas nitrogen pada stripping methanol. Hasil verifikasi stripping methanol dapat dilihat pada Gambar 16.

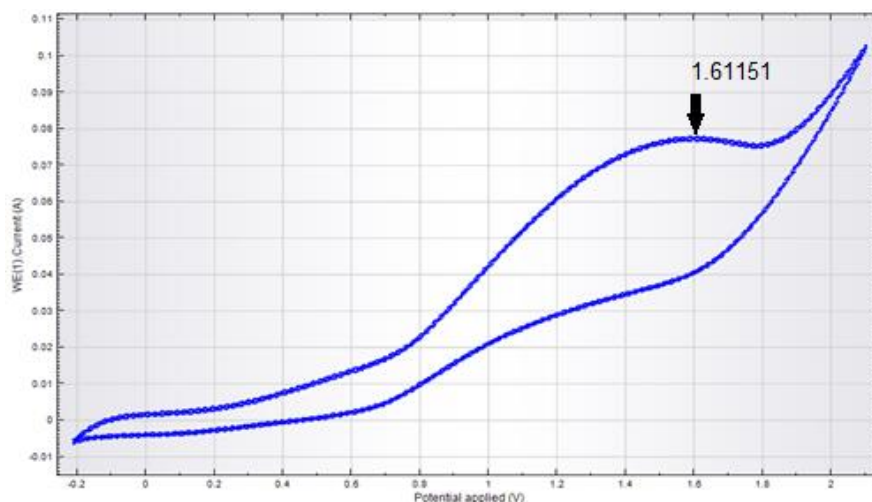


Gambar 16. Stripping Metanol $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ (H_2O)

Berdasarkan Gambar 16 Terlihat bahwa nitrogen tidak memiliki puncak pada daerah 1,64 V seperti ditunjukkan oleh methanol. Hal ini menunjukkan bahwa methanol memiliki tegangan operasional pada 1,64 V.

b. Pengujian Tegangan pada MEA dengan Katoda $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$

Pada konversi CO_2 menggunakan air di anoda pada MEA dengan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dengan variasi tegangan tidak menunjukkan adanya metanol dari hasil pengukuran menggunakan refraktometer. Untuk memastikan adanya metanol, maka dilakukan pengujian menggunakan GC-MS. Saat ini sampel sudah masuk ke dalam lab pengujian dan tinggal menunggu hasil analisis namun peralatan GC-MS masih dalam masa perawatan sehingga pengukuran sampel belum dapat dilakukan. Karena penentuan tegangan optimum berdasarkan refractometer dan GC-MS belum bisa dilakukan, maka penentuan tegangan optimum metanol dilakukan dengan stripping metanol seperti pada Gambar 17.



Gambar 17. Stripping metanol pada elektroda dengan katalis Pd-SnO₂/C

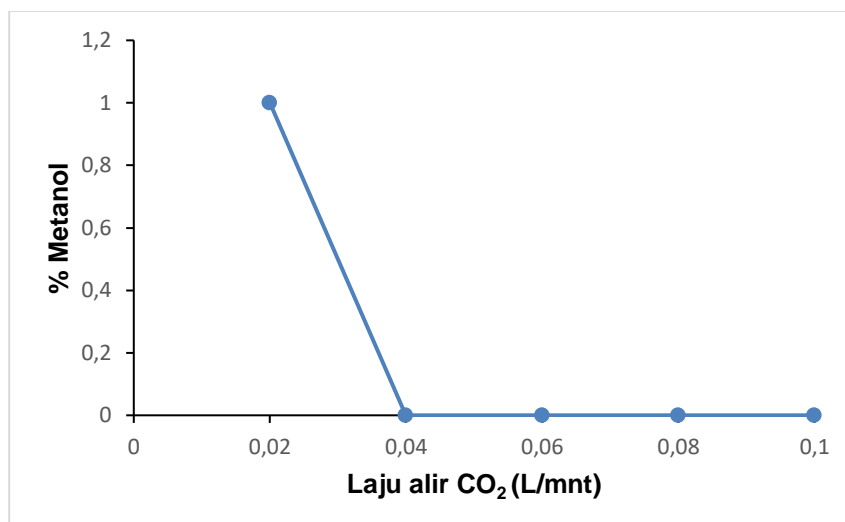
Berdasarkan hasil stripping metanol pada Gambar 17, didapatkan tegangan optimum pada 1.6115 V yang menunjukkan munculnya puncak karakteristik dari metanol. Dengan demikian, tegangan 1,6115 V digunakan pada variasi laju alir elektroda dengan katalis Pd-SnO₂/C.

4.3.2 Proses Konversi CO₂ pada Laju Alir CO₂ Bervariasi

Pengujian kandungan metanol dari hasil konversi CO₂ sebagai fungsi dari laju alir dilakukan dengan memvariasikan laju alir CO₂ pada 0,02; 0,04; 0,06; 0,08 dan 0,10 L/menit yang diatur menggunakan *Mass Flow Controller* (MFC). Pengujian dilakukan selama 2 jam. Produk konversi CO₂ selanjutnya diukur dengan menggunakan refractometer dan GC-MS untuk menentukan persentase kandungan metanol.

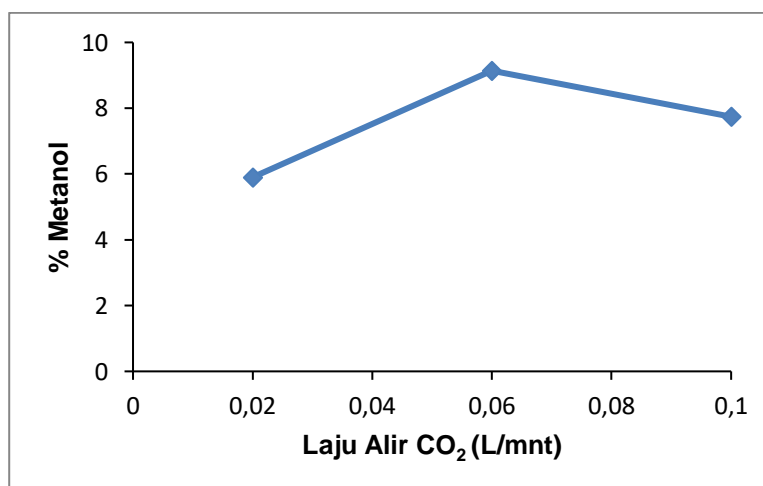
a. Pengujian Laju Alir CO₂ pada MEA dengan Katoda Cu₂O-ZnO/C

Setelah dilakukan stripping metanol untuk menentukan tegangan optimum, selanjutnya dilakukan pengujian laju alir menggunakan potensiostat pada rentang tegangan 1,2-2,1 V untuk melihat kandungan metanol hasil konversi CO₂ dengan menggunakan katalis Cu₂O-ZnO/C.



Gambar 18. Persentase metanol menggunakan refraktometer pada katalis Cu₂O-ZnO/C.

Berdasarkan grafik pada Gambar 18, laju alir CO₂ yang menunjukkan hasil pada refraktometer yakni pada laju alir CO₂ 0,02 L/mnt. Akan tetapi, hal berbeda terjadi saat dilakukan pengujian menggunakan GC-MS dimana laju alir 0,06 L/mnt menunjukkan persentase metanol yang lebih tinggi sebesar 9,14%, seperti yang disajikan pada Gambar 19. Persentase metanol tersebut diukur menggunakan metode spike dengan larutan standar propanol 20%. Data selengkapnya pada lampiran 5.



Gambar 19. Persentase metanol menggunakan GC-MS pada katalis Cu₂O-ZnO/C.

Sebagai pembandingan hasil pengukuran kandungan metanol dengan menggunakan peralatan GC-MS, dilakukan juga penentuan kandungan produk metanol melalui pengukuran efisiensi Coulomb dari proses elektrolisis. Perhitungan kandungan methanol secara kuantitatif dilakukan dengan metode GC dan metode CV sebagai pembandingan. Perhitungan kuantitas atau kandungan methanol dalam sampel dengan metode GC dilakukan dengan menghitung peak area dari sampel methanol dibandingkan dengan peak

area propanol 20% sebagai standar dengan metode spike. Metode spike ini berguna untuk mengeliminir pengaruh matriks air. Sebelumnya telah dicoba dilakukan metode spike dengan menggunakan methanol, akan tetapi tidak berhasil karena puncaknya tidak terpisah. Hasil uji analisa untuk penentuan kandungan metanol dapat dilihat pada Tabel 8. Sementara itu, perhitungan kandungan metanol dalam sampel dengan metode CV dilakukan sebagai pembandingan metode GC yang sudah baku. Walaupun hasilnya tidak persis sama, hasil perhitungan kandungan methanol dengan metode CV menunjukkan hasil yang relevan. Penentuan kandungan methanol dengan metode CV dihitung berdasarkan Efisiensi Coulomb/Efisiensi faradic sesuai dengan persamaan (1) dan (2) sebagai berikut:

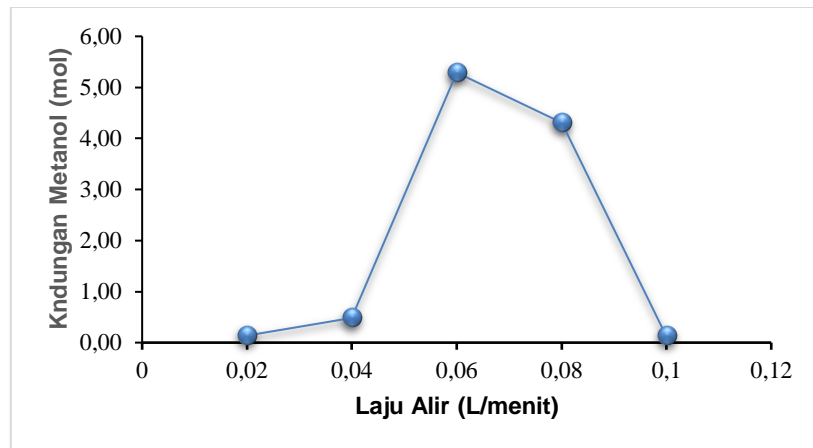
$$Ec = \frac{Q_3}{Q_1} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1) \text{ (Shironita, 2013)}$$

$$Ec = \frac{n \times F \times [MeOH]}{i \times t} \quad \dots\dots\dots(2)$$

Metode efisiensi Coulomb dilakukan dengan terlebih dahulu mengalirkan gas N₂ pada kedua sisi ruang anoda dan katoda dengan laju alir 50 mV/s. Selanjutnya pada sisi katoda dialirkan gas CO₂ dan gas H₂ pada sisi anoda dengan laju alir 0,6 L/menit. Pengukuran efisiensi coulomb diawali dengan melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengetahui puncak anodik dan katodik pada MEA. Tegangan diatur pada interval 0,05 - 0,2 V dengan laju telusur 10 mV/s. Hasil pengukuran digunakan untuk menghitung Q1 dan Q2 yang direpresentasikan sebagai puncak anodik dan Q3 sebagai puncak katodik. Data hasil perhitungan nilai efisiensi coulomb pada variasi laju alir dapat dilihat pada Tabel 8 dan gambar 20.

Tabel 8. Hasil Uji Analisa Untuk Penentuan Kandungan Metanol Dalam Sampel

No	Kode Sampel	Kondisi Operasi	Peak Area		% Methanol dalam Sampel (Hasil GC)	% Methanol dalam Sampel (Hasil EF)	Keterangan
			Methanol	Propanol			
1	A089	Katalis Cu2O-ZnO, H2, 0,06-0,7 V, Laju alir CO2 0,06 L/m	2,812,364,422	6,625,296,800	8.49		
2	A90	Katalis Cu2O-ZnO, Air, 2,1 V, Laju alir CO2 0,02 L/m	2,896,102,360	9,973,505,757	5.81		
3	A91	Katalis Cu2O-ZnO, Air, 1,2-2,1 V, Laju alir CO2 0,02 L/m	2,824,379,260	9,585,338,983	5.89	0,03 mol	
4	A92	Katalis Cu2O-ZnO, Air, 1,2-2,1 V, Laju alir CO2 0,1 L/m	3,369,595,524	8,711,521,071	7.74	0,12 mol	
5	A93	Katalis Cu2O-ZnO, Air, 1,2-2,1 V, Laju alir CO2 0,06 L/m	2,828,384,295	6,187,069,464	9.14	5,28 mol	Kondisi Laju Alir CO2 Optimal



Gambar 20. Hasil Perhitungan CV untuk Penentuan Produk Metanol

Berdasarkan tabel 8 dan gambar 20 dapat dilihat bahwa laju alir optimum CO_2 terjadi pada 0,06 L/menit. Data ini akan digunakan selanjutnya untuk optimasi produksi methanol. Berdasarkan perbandingan hasil pengukuran refractometer dengan GC-MS menunjukkan bahwa pengukuran dengan refraktometer tidak valid.

b. Pengujian Laju Alir CO_2 pada MEA dengan Katoda Pd-SnO₂/C

Pengaruh laju alir menggunakan elektroda dengan katalis Pd-SnO₂/C sudah dilakukan. Akan tetapi, pengujian menggunakan GC-MS belum dapat dilakukan karena masih dalam tahap perawatan sehingga hasil pengaruh laju alir pada elektroda Pd-SnO₂/C menunggu sampai alat dapat dioperasikan kembali.

BAB V

PENUTUP

Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan katalis yang terbaik berdasarkan karakterisasi adalah $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$, kondisi optimum didapatkan pada tegangan 1,64V dan laju alir 0,06 L/menit. Akan tetapi pengujian dengan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ akan tetap dilakukan sebagai pembandingan. Untuk saat ini hasil pengukuran kadar methanol dari konversi CO_2 melalui reduksi elektrokimia menggunakan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ belum mendapatkan hasil dikarenakan GC-MS yang digunakan masih dalam masa perawatan. Sehingga rencana kerja selanjutnya dari penelitian ini secara garis besar adalah membandingkan hasil pengukuran GC-MS antara produk methanol hasil konversi CO_2 secara elektrokimia dari katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dan $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$, serta memproduksi methanol dengan kondisi operasi optimum.

DAFTAR PUSTAKA

- Aeshala, L. M., R. G. Uppaluri, and A. Verma. 2013. "Effect of Cationic and Anionic Solid Polymer Electrolyte on Direct Electrochemical Reduction of Gaseous CO₂ to Fuel." *Journal of CO₂ Utilization* 3–4: 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.09.004>.
- Al-Kalbani, Haitham, Jin Xuan, Susana García, and Huizhi Wang. 2016. "Comparative Energetic Assessment of Methanol Production from CO₂: Chemical versus Electrochemical Process." *Applied Energy* 165: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.027>.
- Al-Saydeh, Sajeda. 2018. "Carbon Dioxide Conversion to Methanol: Opportunities and Fundamental Challenges." <https://doi.org/10.5772/intechopen.74779>.
- Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, A. 2013. "Towards the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide into Methanol." *The Royal Society of Chemistry* 00: 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>.
- Albo, Jonathan, Garikoitz Beobide, Pedro Castaño, and Angel Irabien. 2017. "Methanol Electrosynthesis from CO₂ at Cu₂O/ZnO Prompted by Pyridine-Based Aqueous Solutions." *Journal of CO₂ Utilization* 18: 164–72. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.02.003>.
- Albo, Jonathan, and Angel Irabien. 2015. "Cu₂O-Loaded Gas Diffusion Electrodes for the Continuous Electrochemical Reduction of CO₂ to Methanol." <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.11.014>.
- Albo, Jonathan, Alfonso Sáez, Jose Solla-Gullón, Vicente Montiel, and Angel Irabien. 2015. "Production of Methanol from CO₂ Electroreduction at Cu₂O and Cu₂O/ZnO-Based Electrodes in Aqueous Solution." *Applied Catalysis B: Environmental* 176–177: 709–17. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.055>.
- Arena, Francesco, Giuseppe Italiano, Katia Barbera, Silvia Bordiga, Giuseppe Bonura, Lorenzo Spadaro, and Francesco Frusteri. 2008. "Applied Catalysis A: General Solid-State Interactions, Adsorption Sites and Functionality of Cu-ZnO / ZrO₂ Catalysts in the CO₂ Hydrogenation to CH₃OH" 350: 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.07.028>.
- Aricò, A. S., E. Modica, P. Cretì, P. L. Antonucci, and V. Antonucci. 2000. "An Electrode-Kinetic Investigation of CO and CO/H₂ Oxidation in Phosphotungstic Acid (H₃PW₁₂O₄₀) Electrolyte." *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 3 (3): 207–20.
- Carmo, Marcelo, Gareth P. Keeley, Daniel Holtz, Thomas Grube, Martin Robinius, Martin Müller, and Detlef Stolten. 2019. "PEM Water Electrolysis: Innovative Approaches towards Catalyst Separation, Recovery and Recycling." *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (7): 3450–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.030>.
- Cha, S. Y. 1999. "Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Electrodes Prepared by Direct Deposition of Ultrathin Platinum on the Membrane Surface." *Journal of The Electrochemical Society* 146 (11): 4055. <https://doi.org/10.1149/1.1392591>.
- Costentin, Cyrille, Marc Robert, and Jean Michel Savéant. 2013. "Catalysis of the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide." *Chemical Society Reviews* 42 (6): 2423–36. <https://doi.org/10.1039/c2cs35360a>.
- Cotton, F.A, and G Wilkinson. 2007. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: UI Press.

- Delacourt, Charles, Paul L. Ridgway, John B. Kerr, and John Newman. 2008. "Design of an Electrochemical Cell Making Syngas (CO+H₂) from CO₂ and H₂O Reduction at Room Temperature." *Journal of The Electrochemical Society* 155 (1): B42. <https://doi.org/10.1149/1.2801871>.
- Fitriani, Lisa. 2012. "STUDI REAKSI REDUKSI CO₂ DENGAN METODE ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ELEKTRODA Cu," 1–71.
- Frey, Th, and M. Linardi. 2004. "Effects of Membrane Electrode Assembly Preparation on the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance." *Electrochimica Acta* 50 (1): 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.07.017>.
- Goeppert, Alain, Miklos Czaun, John-paul Jones, G K Surya Prakash, and George A Olah. 2014. "Chem Soc Rev Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Derived Products – Closing the Loop." <https://doi.org/10.1039/c4cs00122b>.
- Gutiérrez-Guerra, N., L. Moreno-López, J. C. Serrano-Ruiz, J. L. Valverde, and A. de Lucas-Consuegra. 2016. "Gas Phase Electrocatalytic Conversion of CO₂ to Syn-Fuels on Cu Based Catalysts-Electrodes." *Applied Catalysis B: Environmental* 188: 272–82. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.010>.
- Hazarika, Jenasree, and Mriganka Sekhar Manna. 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>.
- Huy, Hoang Anh, Tran Van Man, Huynh Thien Tai, and Ho Thi Thanh Van. 2016. "Preparation and Characterization of High-Dispersed Pt/c Nano-Electrocatalysts for Fuel Cell Applications." *Journal of Science and Technology* 54 (4). <https://doi.org/10.15625/0866-708x/54/4/7308>.
- Kumar, S Shiva, S U B Ramakrishna, B Rama Devi, and V Himabindu. 2018. "Phosphorus-Doped Graphene Supported Palladium (Pd / PG) Electrocatalyst for the Hydrogen Evolution Reaction in PEM Water Electrolysis." *International Journal of Green Energy* 1 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1508468>.
- Le, M., M. Ren, Z. Zhang, P. T. Sprunger, R. L. Kurtz, and J. C. Flake. 2011a. "Electrochemical Reduction of CO₂ to CH₃OH at Copper Oxide Surfaces." *Journal of The Electrochemical Society* 158 (5): E45. <https://doi.org/10.1149/1.3561636>.
- Le, M, M Ren, Z Zhang, P T Sprunger, R L Kurtz, and J C Flake. 2011b. "Electrochemical Reduction of CO₂ to CH₃OH at Copper Oxide Surfaces" 158 (5): 45–49. <https://doi.org/10.1149/1.3561636>.
- Lestariningsih, T., Q. Sabina, and N. Majid. 2017. "PENAMBAHAN TiO₂ DALAM PEMBUATAN LEMBARAN POLIMER ELEKTROLIT BERPENGARUH TERHADAP KONDUKTIVITAS DAN KINERJA BATERAI LITHIUM." *Jurnal Material Dan Energi Indonesia* 07 (01): 31–37.
- Liu, Hongdong, Zhongli Hu, Rong Hu, Bitao Liu, Haibo Ruan, Lei Zhang, and Wei Xiao. 2016. "Large-Scale Synthesis of Cu₂O Nanocubes and Their Electrochemical Properties." *International Journal of Electrochemical Science* 11 (4): 2756–61. <https://doi.org/10.20964/110402756>.
- Lu, Qi, and Feng Jiao. 2016. "Electrochemical CO₂ Reduction: Electrocatalyst, Reaction Mechanism, and Process Engineering." <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.04.009>.
- Merck. 2018. "Lembaran Data Keselamatan Bahan Metanol" 1253 (1907): 1–21.

- Park, Nonam, Myung-june Park, Kyoung-su Ha, Yun-jo Lee, and Ki-won Jun. 2014. "Modeling and Analysis of a Methanol Synthesis Process Using a Mixed Reforming Reactor : Perspective on Methanol Production and CO₂ Utilization." *FUEL* 129: 163–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.068>.
- Peng, Xiong, Travis Omasta, William Rigdon, and William E. Mustain. 2016. "Fabrication of High Performing PEMFC Catalyst-Coated Membranes with a Low Cost Air-Assisted Cylindrical Liquid Jets Spraying System." *Journal of The Electrochemical Society* 163 (14): E407–13. <https://doi.org/10.1149/2.0981614jes>.
- Pranoto, Bono, Verina J Wargadalam, Harun Al Rasyid, Puslitbangtek Ketenagalistrikan, Energi Baru, Konservasi Energi, Jl Ciledug, Kebayoran Lama, and Jakarta Selatan. 2013. "PELAPISAN KATALIS PADA PROSES PABRIKASI MEA FUEL CELL JENIS PEM CATALYST COATING ON FUEL CELL OF MEA FABRICATION PROCESS TYPE PEM Percobaan" 12 (1): 21–34.
- Qiao, J, Y Liu, and J Zhang. 2016. *Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide: Fundamentals and Technologies*. Boca Raton: CRC Press.
- Saito, Masahiro. 2000. "R & D Activities in Japan on Methanol Synthesis from CO₂ and H₂" 2 (1998): 175–84.
- Sakellis, I., S. Giamini, I. Moschos, C. Chandrinou, A. Travlos, C. Y. Kim, J. H. Lee, J. G. Kim, and N. Boukos. 2014. "A Novel Method for the Growth of Cu₂O/ZnO Heterojunctions." *Energy Procedia* 60 (C): 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.339>.
- Salimy, Djati Hoesen, and Siti Alimah. 2016. "HTGR Kogenerasi Produksi Hidrogen Untuk Konversi CO₂ Menjadi Metanol." *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 17 (2): 109. <https://doi.org/10.17146/jpen.2015.17.2.2556>.
- Sassenburg, M. 2018. "Conducting CO₂ Reduction at a Bipolar Membrane Electrode Assembly."
- Services, N V. 2011. "Material Safety Data Sheet Carbon Dioxide."
- Shironita, Sayoko, Ko Karasuda, Kazutaka Sato, and Minoru Umeda. 2013. "Methanol Generation by CO₂ Reduction at a Pt e Ru / C Electrocatalyst Using a Membrane Electrode Assembly." *Journal of Power Sources* 240: 404–10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.034>.
- Tang, Hongjie, Jiangyan Wang, Huajie Yin, Huijun Zhao, Dan Wang, and Zhiyong Tang. 2014. "Growth of Polypyrrole Ultrathin Films on MoS₂ Monolayers as High-Performance Supercapacitor Electrodes." *Advanced Material* 1 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201404622>.
- Thanasilp, Sarawalee, and Mali Hunsom. 2010. "Effect of MEA Fabrication Techniques on the Cell Performance of Pt-Pd/C Electrocatalyst for Oxygen Reduction in PEM Fuel Cell." *Fuel* 89 (12): 3847–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.008>.
- Turner, John, George Sverdrup, Margaret K Mann, Pin-ching Maness, Ben Kroposki, Maria Ghirardi, Robert J Evans, and Dan Blake. 2008. "Renewable Hydrogen Production," no. March 2007: 379–407. <https://doi.org/10.1002/er>.
- Vanhove, Arthur. 2015. "Improvements on the Design of Carbon Dioxide Conversion to Methanol Process Using Aspen Plus ® Interface," no. June.

Venka, Rishika. 2016a. "No Title," no. August.

———. 2016b. "Thesis - Design and Development of Electrochemical Cell for Converting Carbon Dioxide to Useful Fuel," no. August.

Verma, Sumit, Yuki Hamasaki, Chaerin Kim, Wenxin Huang, Shawn Lu, Huei-ru Molly, Andrew A Gewirth, Tsuyohiko Fujigaya, Naotoshi Nakashima, and Paul J A Kenis. 2017. "Insights into the Low Overpotential Electroreduction of CO₂ to CO on a Supported Gold Catalyst in an Alkaline Flow Electrolyzer." <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.7b01096>.

Vielstich, W, H Yokokawaa, and H.A Gasteiger. 2009. *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology and Applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons.

Yang, Dexin, Qinggong Zhu, Chunjun Chen, Huizhen Liu, Zhimin Liu, Zhijuan Zhao, Xiaoyu Zhang, Shoujie Liu, and Buxing Han. 2019. "Selective Electroreduction of Carbon Dioxide to Methanol on Copper Selenide Nanocatalysts." *Nature Communications* 10 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08653-9>.

LAMPIRAN

Lampiran I. Kondisi Operasi GC-MS

```

Method type: Acquisition - General
MS transfer line temperature: 250 °C
Ion source temperature: 220 °C
Use acquisition threshold: No
Ionization mode: EI
Run completion: GC run time
Segment #1:
  Start time: 0 min
  Filament/multiplier/dynode on: Yes
  Chromatography filter on: Yes
  Chrom. filter peak width time: 1 sec
  Use tune file emission current: Yes
  Use last tuned detector gain: Yes
  Use tune file electron energy: Yes
  Calibration gas: Off
Scan #1
  Tune file: (Last Saved)
  Ion polarity: Positive
  Data type: Centroid
  Start mass: 15 amu
  End mass: 100 amu
  Scan time: 0.2 sec

```

NOTICE: If this method uses a linked external file in timed mode or is used for an AutoSIM acquisition run, please see the scan header report in the raw file for scan event source information.

```

-----
Acquisition Time
  Use oven run time: Yes

Oven Method
  Maximum temperature: 350.0 °C
  Prep-run timeout: 10.00 min
  Equilibration time: 0.50 min
  Ready delay: 0.00 min
  Oven on/off: On
  Cryogenics enable: Off
  Cryogenics threshold: 50.0 °C
  Cryogenics timeout: 60.00 min
  Initial temperature: 100.0 °C
  Initial hold time: 5.00 min
  Number of ramps: 0

S/SL - Front Method
  S/SL mode: Splitless
  Temperature enable: On
  Temperature: 130 °C
  Split flow enable: On
  Split flow: 50.0 mL/min
  Splitless time: 1.00 min
  Purge flow: 5.0 mL/min
  Constant septum purge: On
  Carrier mode: Constant Flow
  Carrier flow enable: On
  Carrier flow: 1.000 mL/min
  Vacuum compensation: On
  Carrier gas saver enable: Off
  Backflush enable: On
  Backflush start time: 1.50 min
  Backflush duration: GC Run Time

Run Table Method
  Ext. event #1 prep-run value: Off
  Ext. event #2 prep-run value: Off
  Ext. event #3 prep-run value: Off
  Ext. event #4 prep-run value: Off
  Ext. event #5 prep-run value: Off
  Ext. event #6 prep-run value: Off
  Ext. event #7 prep-run value: Off
  Ext. event #8 prep-run value: Off

```

```

Aux. oven event #1 prep-run value: Off
Aux. oven event #2 prep-run value: Off
Aux. oven event #3 prep-run value: Off
Aux. oven event #4 prep-run value: Off
Aux. oven event #5 prep-run value: Off
Aux. oven event #6 prep-run value: Off
Aux. oven event #7 prep-run value: Off
Aux. oven event #8 prep-run value: Off
-----

```

```

Sampling
Sample volume (µl): 1.00
Plunger strokes: 6
Viscous sample: No
Sampling depth in vial: Bottom

```

```

Injection
Injection depth: Standard
Pre-Inj dwell time (s): 0.0
Post-Inj dwell time (s): 0.0

```

```

Washes
Pre-Inj solvent: B
Pre-Inj solvent cycles: 3
Sample rinses: 3
Post-Inj solvent: B
Post-Inj solvent cycles: 7
-----

```

Identification

```

Created By: LAB_UNRSRI
When Created: 4/23/2019
Last Modification: 6/30/2020
Modified By: LAB_UNRSRI
Summary:
Void Time: Value (min): 0.0

```

Baseline

```

Baseline and Noise Window (min): 2.0
Baseline Noise Tolerance (%): 10.0
Min. Number of Scans in Baseline: 16

```

Options

```

Chromatography By: GC
Calibration By: Internal Standard

```

Identification

```

Detector Type: MS
Detector Delay(min): N/A

```

Filter:

```

1st Trace Type: TIC
Operator: None
2nd Trace Type: N/A
Mass Range 1 (m/z):
Wavelength Range 1 (nm): N/A
Mass Range 2 (m/z):
Wavelength Range 2 (nm): N/A
Range (min): 1.50-3.10

```

Detection Options

```

Peak Detection Algorithm: ICIS

```

Genesis Peak Integration

Genesis Smoothing Points:	5
S/N Threshold:	0.5
Valley Detection:	Disabled
Expected Peak Width (sec):	N/A
Genesis Constrain Peak Width:	Disabled
Genesis Peak Height (%):	N/A
Genesis Tailing Factor:	N/A

ICIS Peak Integration

ICIS Smoothing Points:	5
Baseline Window:	100
Area Noise Factor:	2
Peak Noise Factor:	5
ICIS Constrain Peak Width:	Disabled
ICIS Peak Height (%):	N/A
ICIS Tailing Factor:	N/A

Avalon Peak Integration

Avalon Smoothing Points:	5
--------------------------	---

Limit Peaks

Select Top Peaks:	Enabled
Select By:	Area
Number To Select:	20
Relative Peak Height Threshold:	Disabled
Percent Of Highest Peak:	N/A

Advanced Detection Options

Genesis Peak Detection

Genesis Identify By:	Highest peak
Minimum Masses Required:	N/A
Minimum Percent Of Masses Found:	N/A
Minimum Peak Height (S/N):	2.0

Genesis Peak Edge Detection

Peak S/N Cutoff:	200.0
Report Noise As:	Peak to Peak

Genesis Apex Detection

Window Size:	5
Filter Width:	3

Genesis Valley Detection

Rise (%):	10.0
Valley S/N:	2.0

Genesis Background Subtraction (for all Components)

Recomputation Interval (min):	5.0
Number of Scans in Background:	5

ICIS Advanced Parameters

Noise Method:	Incso
Minimum Peak Width:	3
Multiplet Resolution:	10
Area Tail Extension:	5
Area Scan Window:	0

Spectrum Enhancement

Spectrum Enhancement Usage:	Combine
-----------------------------	---------

Refine

Window Size (sec): N/A
Noise Threshold: N/A

Combine

Background Subtraction Left Region

Left Region Width (points): 5
Region End: Peak Start

Peak Top Region

Width (points): 2

Background Subtraction Right Region

Right Region Width (points): 5
Region Start: Peak End

Threshold

Cutoff Threshold (%): N/A

Library Search Options

Search Type

Identity: Normal
Similarity: N/A

Options

Maximum Number Of Hits: 3
Reverse Search: No
Search With MW: N/A

Append To User Library

Availability: Disabled
User Library: N/A
Match Factor: N/A
Reverse Match Factor: N/A
Probability (%): N/A

Search Libraries: mainlib

Library Search Constraints

Molecular Weight Range: Disabled
Other Databases: Disabled

Name Fragment: Disabled

Elements Constraints Enabled: Disabled
Elements In Compound: N/A
Element Infiltration: N/A

Mass Spectral Peak Constraints Enabled: Disabled
Mass Spectral Peak Measurement: N/A

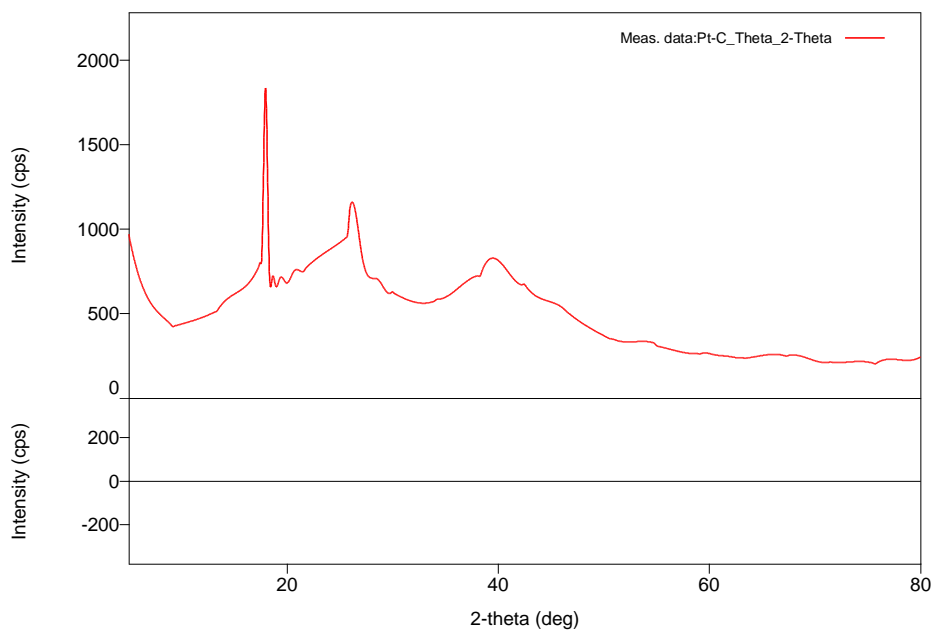
Peak Purity Options

Scan Threshold (mAU): Disabled
Peak Coverage (%): Disabled

Limit Scan Wavelength Range (nm): Disabled

Lampiran II. Difraktogram Hasil Pengukuran XRD pada Elektroda

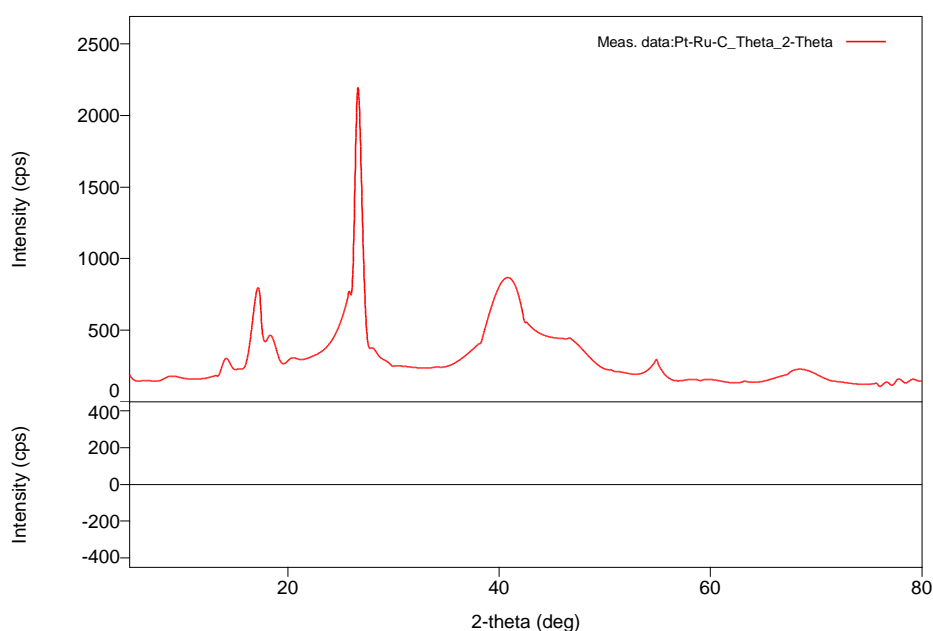
A. Difraktogram Pt/C



List Puncak

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	17.973(13)	4.932(4)	878(86)	0.351(14)	428(10)	0.49(6)	1.4(2)
2	26.34(4)	3.381(5)	380(56)	1.68(8)	1358(28)	3.6(6)	2.9(5)
3	39.7(2)	2.269(12)	141(34)	6.4(2)	970(40)	6.9(19)	0.52(8)

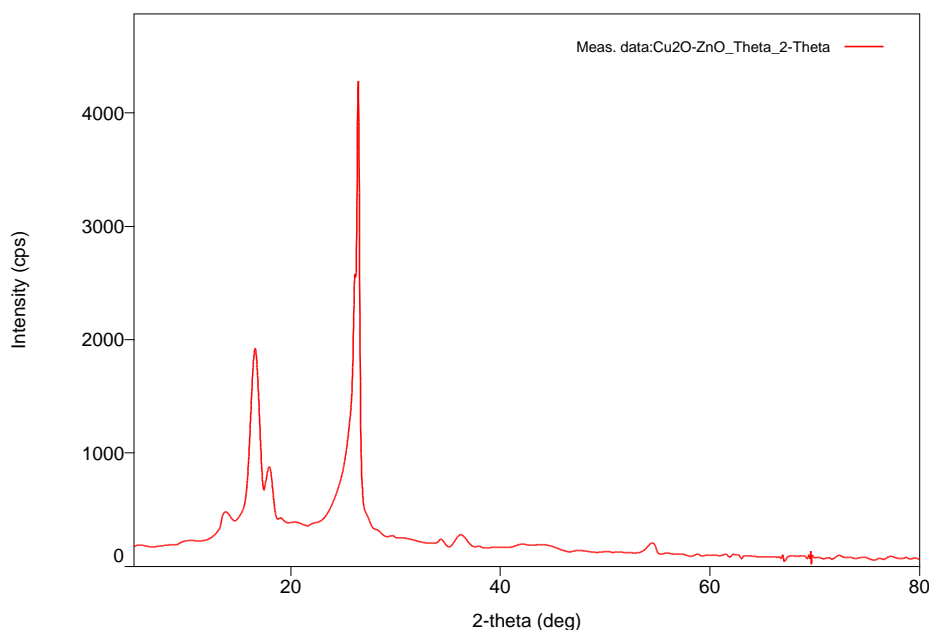
B. Difraktogram Pt-Ru/C



List Puncak

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	14.47(9)	6.12(4)	76(25)	0.68(9)	60(8)	0.8(4)	4(4)
2	17.11(3)	5.179(9)	381(56)	1.03(4)	646(15)	1.7(3)	0.99(13)
3	26.734(19)	3.332(2)	1255(102)	0.84(3)	1777(21)	1.42(13)	1.53(17)
4	40.74(6)	2.213(3)	373(56)	3.07(7)	1384(55)	3.7(7)	1.34(12)
5	47.02(8)	1.931(3)	122(32)	6.8(4)	923(57)	8(2)	4.9(11)
6	54.79(2)	1.6742(6)	139(34)	0.35(5)	93(5)	0.7(2)	1.2(3)
7	68.8(2)	1.364(4)	51(21)	3.3(2)	179(15)	3.5(17)	1.4(4)

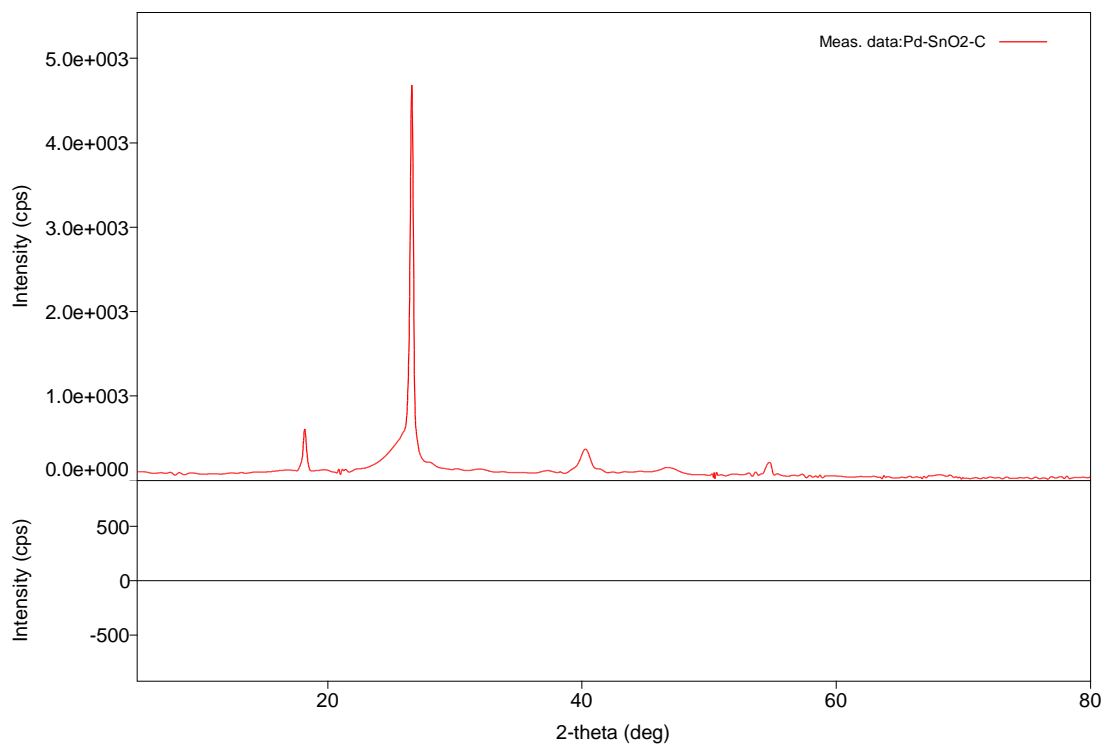
C. Difraktogram Cu₂O-ZnO/C



List Puncak

No.	2-theta (deg)	d (ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)	Int. I (cps deg)	Int. W (deg)	Asym. Factor
1	13.76(1)	6.43(8)	128(33)	4.2(3)	993(68)	8(3)	0.24(5)
2	16.55(2)	5.352(	1074(9)	0.98(3)	1791(51)	1.67(19)	0.84(6)
3	25.67(1)	3.47(2)	378(56)	2.37(15)	1360(110)	3.6(8)	1.5(4)
4	26.492(	3.361	2307(1)	0.46(2)	1562(120)	0.68(9)	4.8(7)
5	36.12(3)	2.484	115(31)	0.46(10)	88(8)	0.8(3)	0.3(3)
6	44.47(1)	2.035(	28(15)	2.6(4)	78(11)	2.8(19)	5(5)
7	54.63(3)	1.678	81(26)	0.71(11)	78(8)	1.0(4)	5(6)
8	68.2(6)	1.374(	12(10)	1.1(5)	13(8)	1.1(17)	0.7(16)

D. Difraktogram Pd-SnO₂/C



Peak List

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM (deg)	Int. I(cps) deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	18.25(2)	4.858(6)	351(54)	0.29(2)	141(6)	0.40(8)	1.8(7)
2	26.16(18)	3.40(2)	238(45)	2.47(9)	766(21)	3.2(7)	1.64(15)
3	26.650(7)	3.3422(8)	3038(159)	0.267(7)	1051(22)	0.35(3)	2.0(3)
4	40.28(6)	2.237(3)	181(39)	0.91(5)	205(10)	1.1(3)	1.3(4)
5	47.04(7)	1.930(3)	43(19)	1.80(19)	85(12)	2.0(11)	2.1(11)
6	54.799(17)	1.6739(5)	133(33)	0.37(6)	69(6)	0.52(17)	4(4)
7	68.12(9)	1.3754(1)	20(13)	1.4(2)	30(6)	1.5(13)	0.9(7)

Lampiran 3. Data Pengukuran Metanol menggunakan Refraktometer**a. Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$**

No	Tegangan	Refraktometer	Rata-rata
1	1,2	1/1/1/	1
2	1,5	1/1/1/	1
3	1,8	0/0/0	0
4	2,1	1/1/1/	1
5	2,4	0/0/0	0
6	2,7	0/0/0	0
7	3	0/0/0	0

No.	Laju Alir (L/menit)	Refraktometer	Rata-rata
1	0,02	1/1/1/	1
2	0,04	0/0/0	0
3	0,06	0/0/0	0
<u>4</u>	0,08	0/0/0	0
5	0,1	0/0/0	0

Lampiran 4. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Tegangan

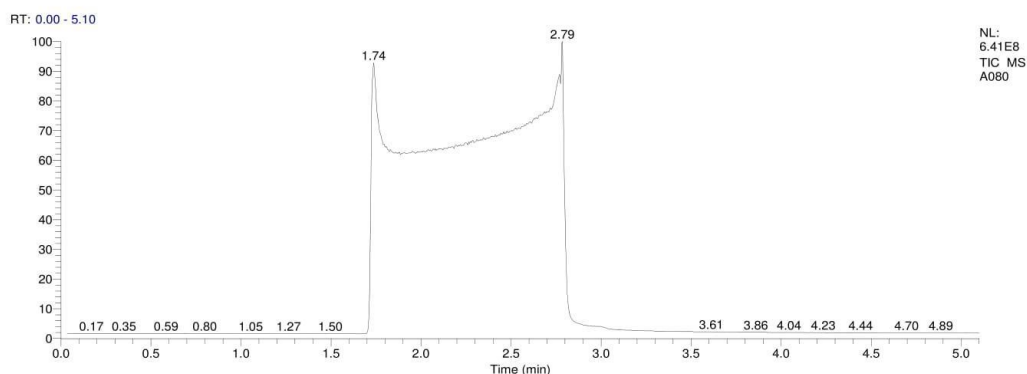
a. Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ 1,2 V



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/15/20 09:38:54 AM
Run Time(min):	5.07	Vial:	2
Scans:	1491	Data File:	A080
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
0,1	7532224	1152071,5	0,07	68,8
0,17	4502487	1163795,55	0,04	69,5
0,26	4692605	968146,58	0,05	57,82
0,35	4294642	851765,83	0,04	50,87
0,48	1475078	494870,78	0,01	29,55
0,59	1062380	420935,45	0,01	25,14
0,69	1224220	315017,19	0,01	18,81
0,97	1348314	295462,05	0,01	17,64
1,27	895257,8	316963,87	0,01	18,93
1,44	1264290	333637,7	0,01	19,92
1,74	4,89E+09	547110492,8	48,48	32672,05
2,15	10790201	4690271,37	0,11	280,09
2,19	10297201	5925623,26	0,1	353,86
2,25	5466958	5546793,13	0,05	331,24
2,29	8774754	6965116,36	0,09	415,94
2,31	18903599	5628061,96	0,19	336,09
2,41	1750878	4599251,17	0,02	274,66
2,79	5,1E+09	551560145,6	50,59	32937,77
3	8777278	2474834,67	0,09	147,79
3,84	1010689	332331,07	0,01	19,85

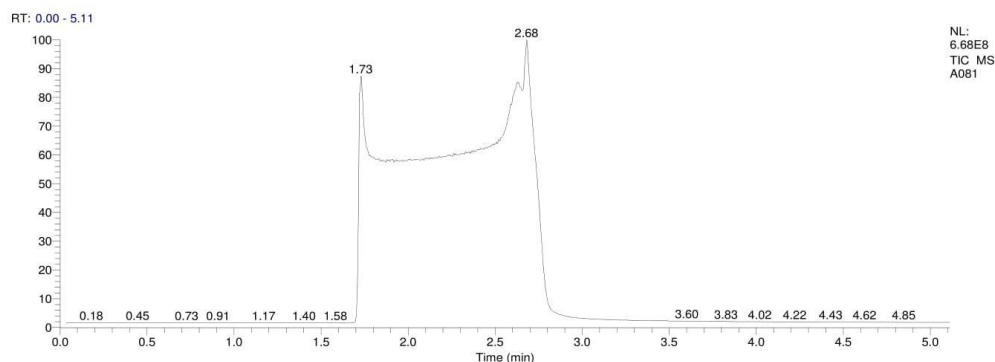
b. Katalis Cu₂O-ZnO/C 1,5 V



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/15/20 09:46:00 AM
Run Time(min):	5.08	Vial:	3
Scans:	1494	Data File:	A081
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
0,09	6730482	998910,93	0,07	52,52
0,18	4881580	940313,54	0,05	49,44
0,29	3934415	732671,19	0,04	38,52
0,73	851708,4	271987,07	0,01	14,3
1,12	679463,1	274604,5	0,01	14,44
1,17	700916,6	317527,89	0,01	16,7
1,23	641951,9	286666,59	0,01	15,07
1,4	1301026	389664,17	0,01	20,49
1,47	626015,1	320588,72	0,01	16,86
1,53	715649,1	342341,66	0,01	18
1,58	589931,9	275179,36	0,01	14,47
1,73	4,45E+09	539157144,2	44,72	28347,97
2,1	9818513	5616510,33	0,1	295,31
2,18	6308524	4542341,01	0,06	238,83
2,23	9528105	4918365,65	0,1	258,6
2,26	10774844	7283522,54	0,11	382,96
2,33	6843621	5768416,98	0,07	303,29
2,68	5,44E+09	516467238,1	54,62	27154,97
4,34	534246,7	277172,32	0,01	14,57
4,48	658995,2	323530,68	0,01	17,01

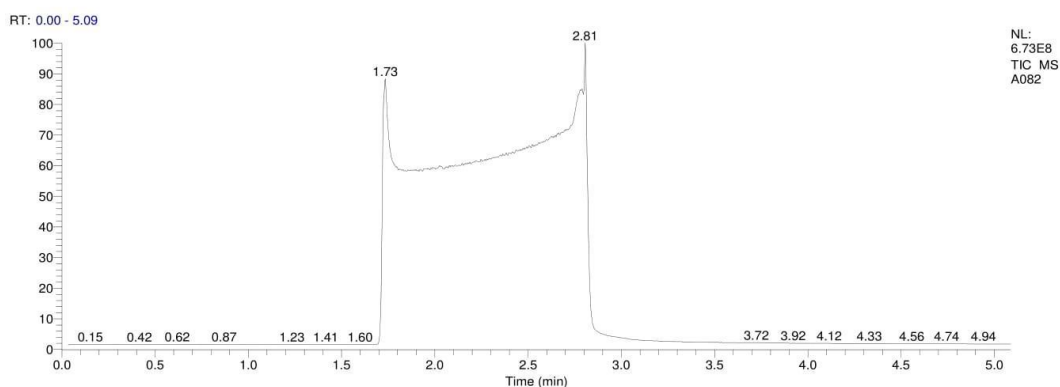
c. Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ 2,1 V



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269


Sample ID:	Metanol	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/15/20 09:53:07 AM
Run Time(min):	5.05	Vial:	4
Scans:	1487	Data File:	A082
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



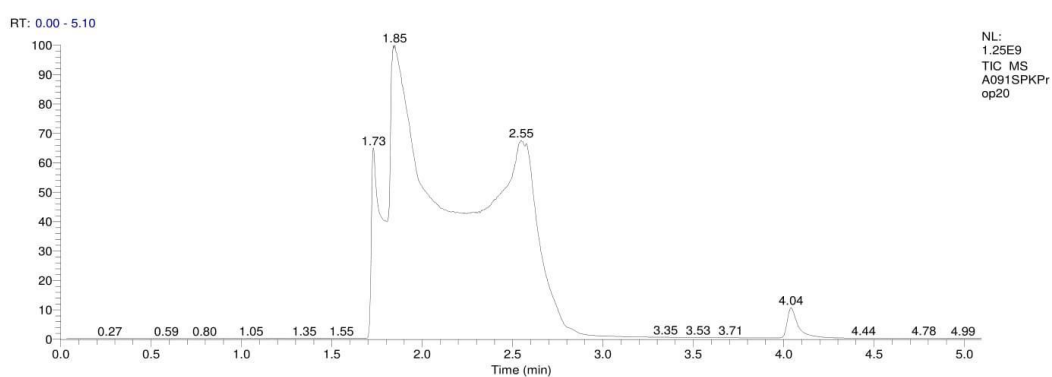
RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
0.08	17828472.71	1129075.60	0.16	60.54
0.62	793497.25	394437.40	0.01	21.15
0.70	624851.46	394009.87	0.01	21.13
0.74	630049.45	402180.64	0.01	21.56
0.77	1312013.63	320570.75	0.01	17.19
0.91	817252.01	327878.82	0.01	17.58
0.98	1336680.77	384729.61	0.01	20.63
1.03	670009.05	357912.51	0.01	19.19
1.12	1581617.15	338334.62	0.01	18.14
1.23	1029022.37	393345.07	0.01	21.09
1.32	958952.78	342327.99	0.01	18.36
1.41	1749432.71	341621.01	0.02	18.32
1.47	983556.66	348380.31	0.01	18.68
1.73	5563944248.54	551635530.93	50.40	29578.21
2.25	11686181.35	5457734.23	0.11	292.64
2.28	8650830.22	3739625.73	0.08	200.52
2.38	9536193.09	5671744.23	0.09	304.11
2.41	5994864.54	4456909.36	0.05	238.98
2.81	5409390063.47	582879758.93	49.00	31253.49
3.03	987700.05	445454.89	0.01	23.88

Lampiran 5. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO₂

a. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 0,02 L/menit


 LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA
 Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPANOL	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:15:25 PM
Run Time(min):	5.06	Vial:	9
Scans:	1489	Data File:	A091SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,51	186044,01	72917,03	0	5,06
1,62	169710,38	87707,72	0	6,08
1,73	2824379260	754864220,5	14,38	52370,41
1,84	9585338983	1075863449	48,79	74640,45
2,19	3201985,94	3056152,61	0,02	212,03
2,24	325758,62	671177,66	0	46,56
2,58	7225355672	579397680,7	36,78	40197,02
2,83	3873855,28	2245560,31	0,02	155,79
3,02	1379807,56	573755,63	0,01	39,81
3,08	95316,79	88913,07	0	6,17

% Metanol 5,9
 Metanol
 Propanol

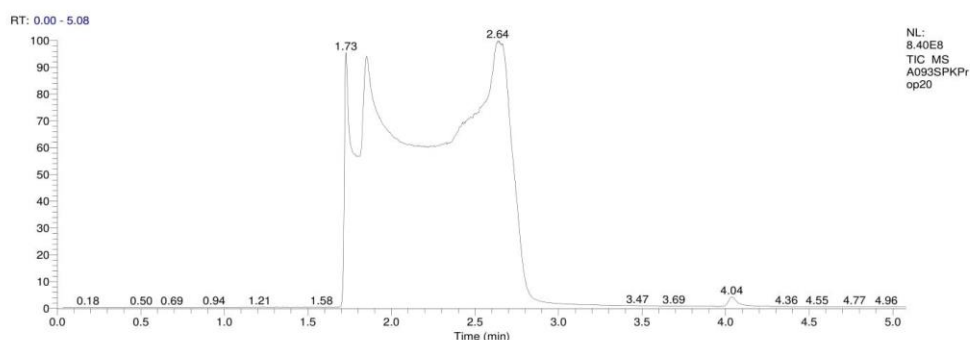
b. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 0,06 L/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPAT	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:29:36 PM
Run Time(min):	5.05	Vial:	11
Scans:	1485	Data File:	A093SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,56	122207,36	75678,28	0	5,6
1,73	2828384295	747195000,7	16,96	55283,81
1,85	6187069464	632650515	37,1	46808,84
2,23	3923051,98	2798049,76	0,02	207,02
2,27	1383883,44	1973628,07	0,01	146,03
2,33	4901413,94	3651780,47	0,03	270,19
2,34	628183,32	1565437,94	0	115,82
2,66	7650774212	614590219,9	45,87	45472,59
2,93	64593,59	154939,23	0	11,46
2,96	125966,63	190426,96	0	14,09
3,02	89183,65	120064,84	0	8,88
3,09	80862,36	144301,19	0	10,68

% Metanol 9,142888

metanol
 Propanol

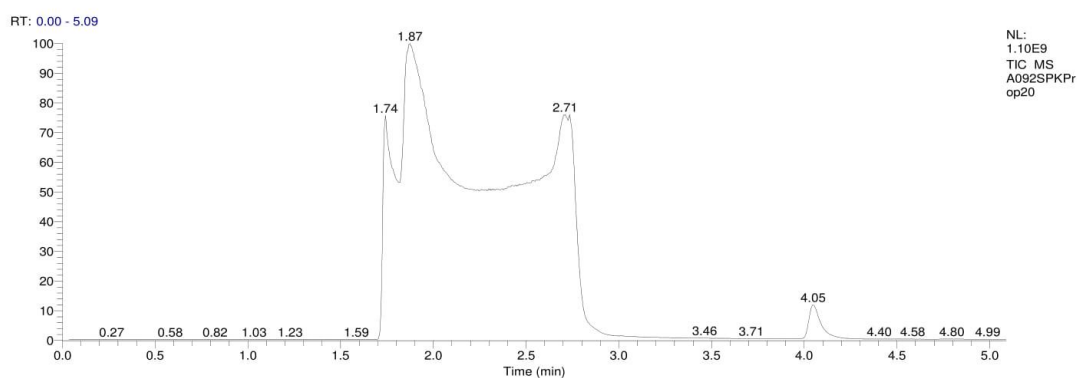
c. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 0,1 L/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

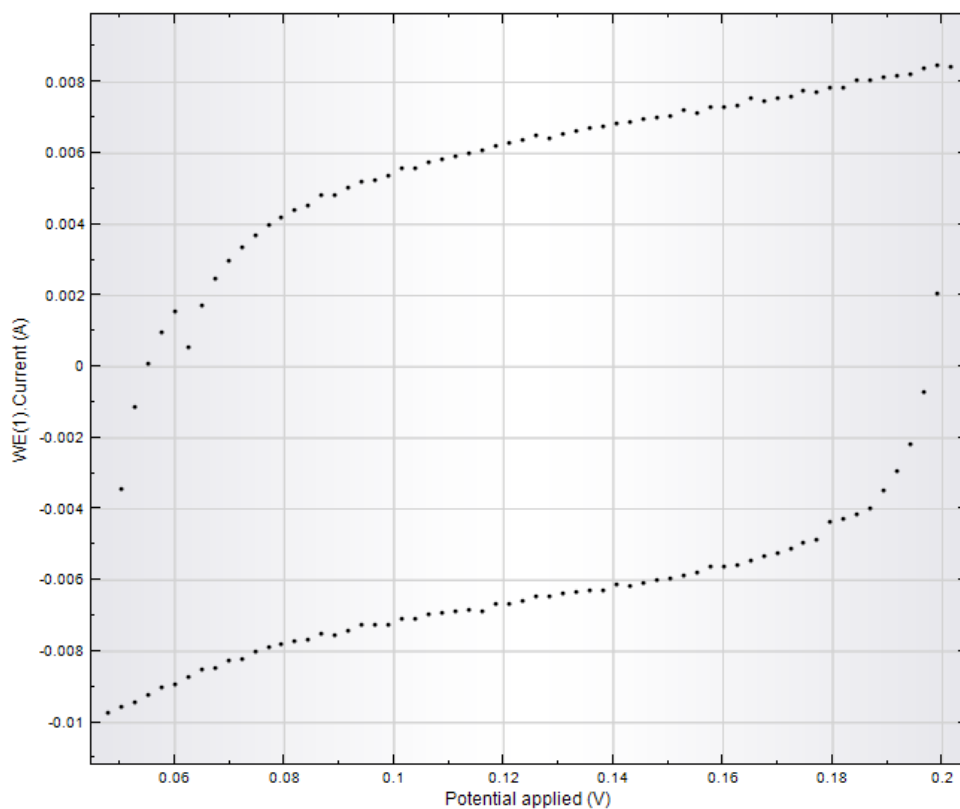
Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPANOL	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:22:31 PM
Run Time(min):	5.05	Vial:	10
Scans:	1487	Data File:	A092SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,74	3369595524	766868714,7	17,44	55417,91
1,87	8711521071	892214635,3	45,08	64476,06
2,18	876676,29	1402123,82	0	101,32
2,2	2253385,43	1556926,3	0,01	112,51
2,24	1121568,49	2291857,68	0,01	165,62
2,26	11916717,47	4118578,98	0,06	297,63
2,37	1421987,07	2781706,89	0,01	201,02
2,73	7225135014	656871423,2	37,39	47468,94
2,87	306123,55	338190,4	0	24,44
3,02	1114518,58	592410,96	0,01	42,81
3,09	776437,95	299817,16	0	21,67

%Metanol 7,735952
 Metanol
 Propanol

Lampiran 5. Pengukuran Kadar Methanol dengan Perhitungan Efisiensi Coulumb



Gambar Kurva Voltamogram CV Cu₂O-ZnO/C

Tabel Hasil Pengukuran Muatan Listrik

No.	Tegangan		Arus		Coloumb	
	(V)	Waktu (s)	(A)	(Q)	(Q)	(Q)
1.	0,150299	25,1424	0,00593445	0,14920632 (Q1)		
2.	0,125885	12,4471	0,00649506	0,08084466 (Q3)		

$$Ec = \frac{Q3}{Q1} \times 100\%$$

$$Ec = \frac{Q3}{Q1} \times 100\% = \frac{0,08084466}{0,14920632} \times 100\% = 54,1831363 \%$$

LAPORAN AKHIR

PENGEMBANGAN PROSES KONVERSI CO₂ MENJADI METANOL DENGAN METODE REDUKSI ELEKTROKIMIA

FORUM IDEASI RISET PERTAMINA-UNSRI

2021



**PUSAT UNGGULAN RISET (PUR)
FUEL CELL DAN HIDROGEN
UNIVERSITAS SRIWIJAYA**
<http://www.fuel-cell.md.unsri.ac.id>
e-mail: pur-fuelcell@unsri.ac.id
Kampus UNSRI Bukit Besar
Jl. Srijaya Negara, Bukit Lama, Palembang

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT atas tersusunnya laporan akhir Kerjasama riset dalam rangka Forum Ideasi Riset Pertamina-Unsri pelaksanaan tahun 2020 - 2021. Laporan ini dibuat sebagai bagian tak terpisahkan dari rangkaian kerjasama antara Pertamina dan Unsri melalui Forum Ideasi Riset Pertamina - Universitas. Judul kerjasama riset ini adalah Pengembangan Konversi CO₂ Menjadi Metanol Melalui Proses Reduksi Elektrokimia.

Laporan akhir ini mencakup tiga tahap laporan sesuai tahapan pekerjaan yang mengacu pada Kerangka Acuan Kerja (KAK) ditambah pekerjaan tambahan di luar KAK. Harapan kami, laporan ini dapat diterima sebagai bentuk pertanggungjawaban kami kepada PT. Pertamina (Persero). Kami mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang tinggi atas masukan, arahan dan saran dari Tim CCUS RTI Pertamina dan terima kasih juga disampaikan untuk Unsri dalam hal ini Badan Pengelola Usaha (BPU) Universitas Sriwijaya yang telah memfasilitasi terjalannya kerjasama ini. Terakhir, tentunya ucapan terima kasih dan penghargaan disampaikan kepada tim peneliti Unsri yang telah bekerja keras untuk keberhasilan kerjasama riset ini.

Palembang, Mei 2021
Atas nama Tim Peneliti UNSRI,

Dr. Dedi Rohendi, M.T
Ketua Tim

RINGKASAN

Telah dilakukan Penelitian Pengembangan Konversi CO₂ menjadi methanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia. Proses konversi CO₂ menjadi metanol dilakukan dengan menggunakan 3 jenis *Membrane Electrode Assembly* (MEA), yaitu MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Pt-Ru/C, MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Cu₂O-ZnO/C dan MEA dengan anoda Pt/C dan katoda Pd-SnO₂/C. Tahapan penelitian meliputi: Pembuatan dan karakterisasi elektroda dengan berbagai katalis; Pembuatan MEA dan pengujian MEA pada sel elektrolisis untuk proses konversi CO₂ menjadi metanol pada jenis katalis, tegangan dan laju alir CO₂ bervariasi, dan Proses optimasi produksi metanol melalui proses konversi CO₂ dengan metode elektrokimia. Pada tahap pertama, elektroda dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *Cyclic Voltammetry* (CV), dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk melihat keberadaan katalis dalam elektroda dan untuk mengetahui elektroda dengan kinerja elektrokimia yang terbaik. Hasil pengukuran XRD diperoleh puncak difraksi pada nilai 2θ = 17,97°, 26,34°, dan 39,7° yang merepresentasikan keberadaan katalis Pt/C. Puncak difraksi pada nilai 2θ = 14,47°, 17,11°, 26,73°, 40,74°, 47,02°, 54,79°, dan 68,8° menunjukkan keberadaan katalis Pt-Ru/C, dan puncak difraksi pada 13,76°, 16,55°, 25,67°, 26,49°, 36,12°, 44,47°, 54,63°, dan 68,2° yang mengindikasikan katalis Cu₂O-ZnO/C. Difraktogram pada elektroda Pd-SnO₂/C menunjukkan keberadaan Carbon (C) pada sudut difraksi 2-theta 26,16° dan 26,65°, sedangkan pada daerah sudut difraksi 40,28°; 47,04°; dan 68,12° merupakan puncak yang menunjukkan keberadaan Palladium (Pd). Senyawa SnO₂ teridentifikasi pada sudut difraksi 54,799°.

Pengujian sifat elektrokimia elektroda menggunakan analisis CV diperoleh nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) untuk Pt-Ru/C sebesar 12,484 cm²/g, katalis Cu₂O-ZnO sebesar 26,044 cm²/g, katalis Pd-SnO₂/C sebesar 13,3863 cm²/g dan pada katalis Pt/C yaitu sebesar 121,076 cm²/g dengan pemuatan katalis masing-masing 2 mg/cm². Sementara itu, hasil pengukuran EIS diperoleh nilai konduktivitas listrik untuk Pt/C 3,5 x 10⁻³ S/cm, Pt-Ru/C sebesar 2,1 x 10⁻³ S/cm, Pd-SnO₂/C sebesar 2,0 x 10⁻³ S/cm dan nilai konduktivitas tertinggi pada katalis Cu₂O-ZnO/C yaitu sebesar 3,4 x 10⁻³ S/cm. Berdasarkan hasil karakterisasi katalis pada elektroda, maka elektroda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C mempunyai kinerja terbaik.

Penelitian pengujian MEA pada konversi CO₂ menjadi metanol secara elektrokimia dengan kondisi beda potensial bervariasi antara 1,2 – 2,1 V dan laju alir CO₂ konstan pada 60 mL/menit dilakukan dengan metode *stripping* methanol. Hasil *stripping* methanol memperlihatkan adanya puncak pada tegangan sekitar 1,6 V untuk MEA dengan katoda yang mengandung katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C. Dengan demikian, berdasarkan hasil *stripping* methanol menggunakan katoda dengan katalis bervariasi didapatkan tegangan optimum proses konversi CO₂ menjadi metanol pada tegangan 1,6 V. Dengan menggunakan tegangan optimum, selanjutnya dilakukan pengujian produksi methanol untuk menentukan laju alir CO₂ optimum. Hasil variasi laju alir CO₂ (20; 60; 100 mL/menit) menggunakan katoda dengan katalis bervariasi memperlihatkan bahwa laju alir optimum bervariasi untuk masing-masing-MEA dengan katoda yang berbeda. Konsentrasi metanol tertinggi dari penggunaan katoda dengan katalis Cu₂O-ZnO/C sebesar 9,14% v/v diperoleh dengan laju alir CO₂ sebesar 60 mL/menit, pada katoda dengan katalis Pt-Ru/C diperoleh konsentrasi methanol tertinggi pada laju alir 100 L/menit sebesar 6,85% v/v dan pada katoda dengan katalis Pd-SnO₂ konsentrasi methanol tertinggi pada laju alir CO₂ 20 mL/menit sebesar 1,58 % v/v. Walaupun laju alir optimum dari berbagai katalis tidak sama, akan tetapi produksi metanol tertinggi didapatkan dari katalis Cu₂O-ZnO/C dengan laju alir 60 mL/menit, hal ini pun diverifikasi menggunakan perhitungan efisiensi Coulomb.

Tahap selanjutnya yaitu optimasi produksi metanol pada variasi loading katalis, variasi waktu (2, 4, 6 dan 8 jam) serta variasi suhu (40, 60 dan 80°C) dan melakukan optimasi variasi kondisi operasi dan variasi jenis elektroliser untuk memperoleh konsentrasi metanol yang lebih tinggi. Hasil penelitian menunjukkan hasil loading katalis Cu₂O-ZnO/C 2 mg/cm² memiliki nilai ECSA, konduktivitas, serta persentase metanol yang lebih besar dibandingkan loading katalis 3 dan 4 mg/cm². Pada variasi temperatur, konversi CO₂ optimal pada suhu ruang dan terus meningkat dengan semakin lama waktu yang digunakan.

Berdasarkan hal tersebut dilakukan perbandingan antara loading katalis 1 dan 2 mg/cm². Karakterisasi CV dan EIS menunjukkan bahwa MEA dengan loading katalis 1 mg/cm² menunjukkan hasil yang lebih besar yakni 209, 886 cm²/g dan 0,799 S/cm. Begitu pula pada persentase metanol hasil konversi CO₂. Selanjutnya diketahui bahwa penggunaan elektroliser akrilik lebih baik yakni sebesar 11,47% dibandingkan dengan elektroliser komersial yang hanya sebesar 8,84%.

Peningkatan persentase metanol yang diperoleh dengan elektroliser akrilik mencapai 22.9% Maka, pengujian berikutnya dilakukan dengan menggunakan elektroliser berbahan akrilik.

Selain itu, dilakukan variasi di anoda dengan menggunakan gas H₂. Berdasarkan pengujian yang dilakukan, tegangan optimum menggunakan gas H₂ yakni 0,5 V. Untuk memaksimalkan proses konversi CO₂ menjadi metanol maka dilakukan pula penggunaan elektrolit KHCO₃ yang dapat membantu distribusi gas CO₂. Pada penggunaan elektrolit KHCO₃ loading katalis yang optimum pada 2 mg/cm² dengan konsentrasi KHCO₃ 1 M. Akan tetapi, persentase menurun dengan semakin lama waktu konversi karena kelarutan CO₂ berkurang.

Untuk memaksimalkan proses konversi CO₂ menjadi metanol maka dilakukan perbesaran luasan MEA serta jenis stek. Dari hasil pengujian menunjukkan bahwa MEA dengan ukuran 10x10 cm² stek tunggal memberikan hasil yang lebih baik sebesar 26,5% dibandingkan MEA dengan ukuran 7x7 cm² stek tunggal yakni sebesar 21,9% . Pada variasi jenis stek menunjukkan bahwa penggunaan 7x7 cm² stek ganda mampu meningkatkan persentase metanol dibandingkan 10x10 cm² stek tunggal dengan persentase metanol sebesar 30,25% . Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa memperbanyak susunan MEA lebih efisien dibandingkan dengan hanya memperluas permukaan MEA.

DAFTAR ISI

HALAMAN DEPAN	i
KATA PENGANTAR	ii
RINGKASAN	iii
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan Dan Sasaran	3
1.4. Ruang Lingkup Kerjasama	4
1.5. <i>Deliverable</i> Penelitian	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Karbon Dioksida	6
2.2 Metanol.....	7
2.3 Elektroda	10
2.3.1 Tembaga sebagai Elektroda.....	12
2.3.2 Platina sebagai Elektroda.....	12
2.3.3 Palladium sebagai Elektroda.....	12
2.4 Metode Konversi CO ₂ menjadi Metanol secara Elektrokimia.....	13
2.5 <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	17
2.6 Pemisahan dan Pemurnian Metanol.....	18
III. METODOLOGI	19
3.1 Tempat Riset	19
3.2 Alat dan Bahan yang Digunakan.....	19
3.3 Prosedur Riset.....	19
3.3.1 Preparasi <i>Gas Diffusion Layer</i> (GDL).....	19
3.3.2 Preparasi Katalis Cu ₂ O-ZnO/C dan Pd-SnO ₂ /C	20
3.3.3 Preparasi Elektroda	20
3.3.4 Karakterisasi Elektroda.....	21
3.3.5 Preparasi <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	23
3.3.6 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO ₂	24
3.3.7 Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk.....	25
3.3.8 Analisa Data.....	25
3.3.9 Rancangan Percobaan.....	26
3.3.10Skedul Pegujian Reduksi Elektrokimia CO ₂	29
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	30
4.1 Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Variasi Katalis.....	30

4.1.1 Pembuatan Elektroda dengan Berbagai Variasi Katalis	30
4.1.2 Karakterisasi Elektroda.....	30
4.1.3 Pembuatan <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA)	37
4.1.4 Set-up MEA pada Elektroliser	38
4.1.5 Proses konversi CO ₂ menjadi methanol pada berbagai kondisi	39
4.1.5.1 Penentuan tegangan optimum	40
4.1.5.2 Penentuan laju alir CO ₂ optimum	41
4.2 Pengaruh Variasi Loading Katalis terhadap Konsentrasi Metanol.....	45
4.2.1 Analisis Cyclic Voltammetry (CV)	45
4.2.2 Analisis Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)	46
4.2.3 Konversi CO ₂ menjadi Metanol dengan Berbagai Variasi Katalis	48
4.2.4 Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Konsentrasi Metanol	48
4.2.5 Pengaruh Variasi Waktu terhadap Konsentrasi Metanol	49
4.2.6 Penggunaan MEA dengan loading katalis Cu ₂ O-ZnO/C 1 mg/cm ²	50
4.2.6.1 Karakterisasi elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm ²	50
4.2.6.2 Analisis menggunakan FT-IR.....	52
4.2.6.3 Pengujian Produksi Metanol dengan Loading Katalis 1 mg/cm ²	53
4.2.7 Variasi Jenis Elektroliser pada MEA dengan loading katalis 1 mg/cm ² ..	53
4.2.8 Proses konversi CO ₂ menjadi methanol menggunakan elektroliser akrilik dengan MEA loading katalis 1 mg/cm ² pada waktu bervariasi ..	55
4.2.9 Variasi Penggunaan gas H ₂ di anoda	56
4.2.9.1 Variasi Tegangan	56
4.2.9.2 Variasi Waktu.....	57
4.2.10 Penggunaan Larutan Elektrolit KHCO ₃	57
4.2.10.1 Variasi konsentrasi larutan elektrolit KHCO ₃ menggunakan MEA dengan loading katalis 1 mg/cm ²	57
4.2.10.2 Variasi waktu menggunakan MEA dengan loading katalis 2 mg/cm ²	58
4.2.10.3 Penggunaan Elektrolit KHCO ₃ dengan H ₂ di anoda	59
4.2.11 Pengaruh Ukuran MEA	60
4.2.12 Pengaruh Jenis Stek	62
V. PENUTUP	64
5.1 Kesimpulan.....	64
DAFTAR PUSTAKA.....	65
LAMPIRAN	69

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Keunggulan dan Kelemahan Katalis yang Digunakan	10
Tabel 2. Reaksi Elektrokimia untuk Konversi CO ₂ menjadi Metanol	15
Tabel 3. Review Penelitian Mengenai Konversi CO ₂ Secara Elektrokimia	16
Tabel 4. Komposisi Pembuatan Elektroda Cu ₂ O-ZnO/C	20
Tabel 5. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Cu ₂ O-ZnO/C ..	36
Tabel 6. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Pd-SnO/C	36
Tabel 7. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Pt-Ru/C	37
Tabel 8. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Pt/C	37
Tabel 9. Hasil Uji Analisa Untuk Penentuan Kandungan Metanol Dalam Sampel.....	45
Tabel 10. Perbandingan nilai ECSA dan konduktivitas elektroda dengan loading katalis 1 dan 2 mg/cm ²	52
Tabel 11. Persentase methanol dengan variasi jenis elektrolizer.....	55

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1. Ringkasan Aplikasi <i>Carbon Capture Utilities</i> (CCU)	7
Gambar 2. Produksi Metanol dengan <i>Electrochemical Process</i> dan <i>Flue Gas</i>	9
Gambar 3. Representasi Bergambar dari Rangkaian Elektrokimia	13
Gambar 4. Proses Pembuatan/ Preparasi MEA.....	23
Gambar 5. Bagan Reaksi dan Komponen MEA.....	24
Gambar 6. (a) GDL (b) Elektroda	30
Gambar 7. Difraktogram elektroda dengan katalis yang berbeda	31
Gambar 8. Voltamogram dari Setiap Elektroda.....	32
Gambar 9. Nilai ECSA Katoda dengan Katalis Bervariasi	33
Gambar 10. Kurva Nyquist Setiap Elektroda.....	34
Gambar 11. Nilai Konduktivitas Katoda dengan Katalis Bervariasi	34
Gambar 12. Morfologi Elektroda Hasil Analisis SEM-EDX (a) $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$, (b) $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$, (c) Pt-Ru/C dan (d) Pt/C	36
Gambar 13. Komponen Lapisan Elektroda	38
Gambar 14. <i>Membrane Electrode Assembly</i> (MEA).....	38
Gambar 15. Elektroliser dan Posisi MEA pada Elektroliser	39
Gambar 16. Diagram Alir Proses Konversi CO_2 Menjadi Metanol dan Optimasinya.....	39
Gambar 17. Penentuan Tegangan Optimum Elektrolisis CO_2 dengan Metode <i>Stripping</i> Metanol pada MEA yang mengandung Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$	40
Gambar 18. <i>Stripping</i> Metanol $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ (H_2O).....	41
Gambar 19. Persentase Metanol Hasil Konversi CO_2 menggunakan Berbagai Katalis pada Laju Alir yang Bervariasi.....	42
Gambar 20. Voltamogram Variasi Loading Katalis (a) 2 mg/cm^2 , 3 (b) mg/cm^2 dan (c) 4 mg/cm^2	45
Gambar 21. Nilai ECSA Elektroda dengan Loading Katalis Bervariasi.....	46
Gambar 22. Kurva <i>Nyquist</i> elektroda dengan loading katalis bervariasi	47
Gambar 23. Nilai konduktivitas elektroda dengan loading katalis bervariasi	47
Gambar 24. Persentase methanol pada loading katalis bervariasi	48
Gambar 25. Persentase metanol pada berbagai variasi temperatur.....	49
Gambar 26. Persentase metanol pada berbagai variasi waktu	49
Gambar 27. Voltamogram elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm^2	50
Gambar 28. Kurva <i>Nyquist</i> elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm^2	51
Gambar 29. Hasil FT-IR elektroda $\text{Cu}_2\text{O-Zn/C}$ (a) 1 mg/cm^2 dan (b) 2 mg/cm^2	52

Gambar 30. Persentase metanol dengan loading katalis 1 dan 2 mg/cm ² menggunakan elektroliser komersial	53
Gambar 31. Bentuk <i>Bipolar Plate/Current Collector</i> pada Elektrolizer Komersial	54
Gambar 32. E lektrolizer berbahan akrilik ukuran 7x7 cm ²	54
Gambar 33. Persentase metanol loading katalis 1 mg/cm ² menggunakan elektroliser akrilik	55
Gambar 34. Persentase metanol dengan variasi tegangan menggunakan H ₂ di anoda.....	56
Gambar 35. Persentase methanol menggunakan H ₂ di anoda	57
Gambar 36. Perbandingan hasil elektrolisis dengan elektrolit KHCO ₃ dengan loading 1 mg/cm ² pada tegangan yang bervariasi.....	58
Gambar 37. Perbandingan hasil elektrolisis dengan elektrolit KHCO ₃ dengan loading 2 mg/cm ² pada waktu dan tegangan bervariasi	59
Gambar 38. Persentase metanol pada elektrolit KHCO ₃ menggunakan gas H ₂ di anoda ...	60
Gambar 39. ELektroliser akrilik Ukuran 10 x 10 cm ²	61
Gambar 40. Pengaruh ukuran MEA terhadap persentase metanol	61
Gambar 41. Data persentase methanol dari konversi CO ₂ menggunakan jenis stek berbeda.....	62
Gambar 42. Pengaruh ukuran MEA tdan jenis stek terhadap persentase metanol	63

DAFTAR LAMPIRAN**Halaman**

Lampiran 1. Data Pengukuran <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	71
Lampiran 2. Karakterisasi Elektroda (ECSA dan Konduktivitas Elektrik)	75
Lampiran 3. Hasil Analisis SEM-EDX.....	76
Lampiran 4. Kurva Standar Metanol GC-MS.....	78
Lampiran 5. Data Pengukuran Metanol menggunakan Refraktometer	79
Lampiran 6. Grafik Stripping Metanol untuk Katalis Pt-Ru/C dan Pd-SnO ₂ /C.....	81
Lampiran 7. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO ₂ pada Katalis Cu ₂ O-ZnO/C.....	82
Lampiran 8. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO ₂ pada Katalis Pt-Ru/C	85
Lampiran 9. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO ₂ pada Katalis Pd-SnO ₂ /C	88
Lampiran 10. Pengukuran Kadar Metanol dengan Perhitungan Effisiensi Coulomb.....	91
Lampiran 11. Perhitungan Kadar Metanol menggunakan GC-MS dengan Metode Internal Standar	92
Lampiran 12. Perhitungan Kerapatan Arus pada Masing-Masing MEA	93
Lampiran 13. Dokumentasi Riset.....	94
Lampiran 14. Diagram Reaktor Konversi CO ₂ menjadi Metanol dengan Elektrolit KHCO ₃	97
Lampiran 15. Gambar Sel Elektrolisis dengan Stek Menggunakan Acrylic.....	98
Lampiran 16. Perhitungan Hasil Konversi CO ₂ menjadi Metanol pada Berbagai Konsentrasi	99
Lampiran 17. Daftar Peralatan Penunjang Penelitian.....	100
Lampiran 18. Perhitungan ECSA dan Konduktivitas	101

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Karbondioksida merupakan gas yang banyak dihasilkan dalam produksi dan pengolahan minyak serta gas bumi. Keberadaan CO₂ merupakan permasalahan tersendiri karena kehadirannya dalam jumlah besar menyebabkan efek rumah kaca (Albo et al. 2015). Pemanfaatan CO₂ menjadi sangat penting karena dapat mengatasi dua hal sekaligus, yaitu mereduksi kehadiran gas rumah kaca dan menjadikan CO₂ sebagai bahan baku produk bernilai tambah. Dalam kaitan dengan penelitian yang dilakukan, dilakukan proses konversi CO₂ menjadi bahan bakar metanol. Metanol yang mempunyai densitas energi cukup tinggi dan mempunyai kestabilan dalam penyimpanan, merupakan salah satu produk konversi CO₂ yang paling memberikan harapan. Selain sebagai bahan bakar untuk fuel cell dan pelarut, metanol juga menjadi bahan baku untuk dimetil eter (DME) (Goepfert et al. 2014)

Proses konversi CO₂ menjadi metanol ada beberapa cara. Dua proses yang sudah dikenal luas adalah melalui jalur pembentukan syngas dalam reformer dan melalui proses hidrogenasi, dimana pada kedua metode tersebut menggunakan suhu dan tekanan tinggi. Metode lain untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol adalah dengan metode elektrolisis yang mempunyai keunggulan ramah lingkungan, dapat mengkonversi CO₂ menjadi berbagai jenis bahan bakar dan bekerja pada suhu ambien (Venka 2016b).

Dalam kaitan produksi metanol melalui proses elektrokimia, ada beberapa mekanisme yang dapat dilakukan, antara lain produksi metanol melalui elektrolisis CO₂ dengan bantuan katalis Cu₂O-ZnO dengan elektrolit KHCO₃ (Albo et al. 2015), atau gabungan antara elektrolisis CO₂ langsung dan gabungan elektrolisis air dan elektrolisis CO₂ melalui pembentukan produk antara CO dan H₂ (Delacourt et al. 2008). Penguraian CO₂ secara elektrokimia sangat tergantung pada beberapa parameter, antara lain; jenis elektroda, jenis elektrolit dan kondisi operasi (suhu dan arus) (Venka 2016b).

Penelitian dalam rangka Forum Ideasi Pertamina-Universitas di Universitas Sriwijaya mengangkat topik mengenai Pengembangan Konversi CO₂ untuk Menghasilkan Metanol dengan Metode Reduksi Elektrokimia. Karbondioksida

(CO₂) akan direduksi pada sisi katoda menghasilkan produk bahan bakar dan pada sisi anoda menghasilkan elektron dan H⁺. Ion H⁺ akan menyebrang ke katoda melalui membran elektrolit penghantar proton berupa membrane nafion-117. Sistem elektrokimia yang digunakan sama seperti pada fuel cell. Teknologi fuel cell dan hidrogen merupakan bidang yang selama ini diteliti dan dikembangkan di Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya (UNSRI).

Penelitian ini menggunakan metode elektrolisis dalam media *membrane electrode assembly* (MEA) untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol dengan menggunakan sumber energi terbarukan berupa solar cell dengan kapasitas 7 kW yang dimiliki Pusat Unggulan Riset Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya. Penggunaan energi terbarukan solar cell selain untuk menekan biaya produksi metanol, juga ikut mendukung program pemerintah dalam meningkatkan bauran energi baru dan terbarukan. Proses elektrokimia Untuk konversi karbondioksida menjadi produk metanol dan hidrogen dilakukan melalui media *Membrane Electrode Assembly* (MEA) seperti yang digunakan pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) dan DMFC (*Direct Metanol Fuel Cell*). Pusat Unggulan Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya telah berhasil membuat dan menguji kinerja MEA yang digunakan pada kedua jenis fuel cell di atas.

1.2. Rumusan Masalah

Kehadiran CO₂ sebagai polutan di alam sudah dalam kondisi mengkhawatirkan. Diperlukan upaya untuk mereduksi kandungan CO₂ dengan cara mengkonversi CO₂ menjadi bahan yang bermanfaat. Salah satu bahan bermanfaat yang dapat dihasilkan dari konversi CO₂ adalah metanol. Proses konversi CO₂ menjadi metanol mendapatkan dua keuntungan sekaligus, yaitu mereduksi kandungan CO₂ dan mendapatkan metanol yang merupakan bahan baku bernilai tinggi. Diantara beberapa proses konversi CO₂ menjadi metanol, proses konversi secara elektrokimia mempunyai beberapa keuntungan diantaranya dilakukan pada suhu lingkungan dan tekanan rendah.

Metode reduksi elektrokimia CO₂ menjadi tantangan baru untuk dikembangkan, terutama untuk menghasilkan metanol sebagai hasil konversi. Umumnya reduksi CO₂ dilakukan pada elektroda logam dalam larutan elektrolit KHCO₃, namun ditemukan keterbatasan transfer massa pada CO₂ akibat rendahnya kelarutan CO₂ dalam air, sehingga diusulkan penggunaan *Gas Diffusion Electrode* (GDE) dan elektrolit polimer padat dalam bentuk MEA agar

dapat meningkatkan karakteristik transfer massa. Katalis yang digunakan pada elektroda dapat bervariasi sesuai dengan karakteristik produk yang akan dihasilkan. Sementara itu, kondisi reaksi (arus/tegangan listrik dan laju alir gas) juga sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses konversi CO₂ menjadi metanol.

Oleh karena itu, pada penelitian dilakukan pembuatan dan karakterisasi elektroda dengan variasi katalis pada katoda yaitu Pt-Ru/C, PdSnO₂/C dan Cu₂O-ZnO/C, dan anoda Pt/C untuk mengamati dan mengetahui bagaimana kinerja yang dihasilkan dan pengaruh dari variasi tegangan, laju alir CO₂, temperatur, waktu operasi, muatan katalis, jenis stek dan luas permukaan MEA yang diterapkan terhadap hasil konversi karbondioksida menjadi metanol dengan metode reduksi elektrokimia.

1.3. Tujuan dan Sasaran

Tujuan kerjasama ini adalah untuk:

- a) Mengembangkan proses konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung dengan berbagai jenis katalis, yaitu katalis Pt-Ru/C, Pd-SnO₂/C dan Cu₂O-ZnO/C. Elektroda dengan katalis bervariasi dikarakterisasi menggunakan XRD, analisis *Cyclic Voltammetry* (CV) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS).
- b) Mendapatkan kondisi operasi terbaik dengan memvariasikan tegangan, laju alir CO₂, temperatur, waktu operasi, muatan katalis, luas permukaan MEA dan jenis stek dalam upaya menghasilkan metanol dengan rendemen tinggi.

Sasaran kerjasama ini adalah:

- a) Diperoleh teknologi konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung berbasis *Membrane Electrode Assembly* (MEA),
- b) Diperoleh kemampuan memproduksi metanol dari karbondioksida yang merupakan polutan gas rumah kaca.
- c) Diperoleh prototype teknologi konversi CO₂ menjadi metanol melalui metode elektrolisis langsung berbasis *Membrane Electrode Assembly* (MEA).

1.4. Ruang Lingkup Kerjasama

Kerjasama ini mencakup penelitian dan pengembangan:

- a) Pembuatan elektroda dengan beberapa jenis katalis dan *membrane electrode assembly* untuk perangkat elektrolisis.
- b) Optimasi konversi CO₂ menjadi metanol langsung secara elektrokimia pada variasi tegangan listrik dan laju alir CO₂.
- c) Karakterisasi produk metanol dan penentuan rendemen metanol dari proses elektrokimia langsung CO₂ menjadi metanol.

1.5. *Deliverable* Penelitian

A. Laporan Tahap I

1. Mengurus administrasi dan perizinan;
2. Persiapan pengadaan bahan;
3. Desain dan setting peralatan;
4. Menyusun rancangan percobaan

B. Laporan Tahap II

1. Pembuatan dan karakterisasi elektroda dengan jenis katalis di katoda bervariasi dan katalis pada anoda tetap (menggunakan katalis Pt/C). Variasi katalis yang digunakan di katoda adalah katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C.
2. Pembuatan MEA dengan pasangan elektroda yang bervariasi.
3. Penentuan tegangan optimum elektrolisis dengan MEA dari ketiga jenis elektroda.
4. Penentuan Laju alir CO₂ optimum untuk MEA dengan ketiga jenis elektroda.

C. Laporan Tahap III

1. Variasi loading katalis Cu₂O-ZnO/C pada tegangan 1, 6 V dan laju alir CO₂ 60 mL/menit. Loading katalis yang digunakan adalah 2, 3 dan 4 mg/cm². Sebelum dilakukan produksi methanol pada loading katalis bervariasi, elektroda dengan loading katalis berbeda dikarakterisasi terlebih dahulu. Pengukuran konsentrasi methanol terproduksi dilakukan menggunakan peralatan Methanol Analyzer AM 5.
2. Variasi temperatur stek. Temperatur diduga berpengaruh terhadap jalannya reaksi.

3. Variasi waktu. Waktu elektrolisis yang makin lama diharapkan akan meningkatkan produksi methanol.
4. Perluasan rentang loading katalis. Berdasarkan data yang ada, efektifitas produksi methanol terjadi dengan makin menurunnya loading katalis. Dengan demikian, berdasarkan hasil diskusi bulanan maka dilakukan penelitian tambahan untuk mencoba loading katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ 1 mg/cm^2 .
5. Variasi jenis elektroliser. Selain elektroliser komersial, upaya optimasi produk juga dilakukan dengan menggunakan elektroliser yang dibuat sendiri menggunakan akrilik. Variasi jenis elektroliser ini merupakan perluasan ruang lingkup dari raung lingkup yang tercantum di KAK.
6. Optimasi produksi methanol dengan menggunakan elektroliser akrilik pada loading katalis 1 mg/cm^2 . Optimasi pada kondisi ini dilakukan setelah mendapatkan data data yang menunjukkan bahwa produksi methanol lebih baik dengan menggunakan elektroliser akrilik dan loading rendah (dalam hal ini 1 mg/cm^2). Percobaan ini dilakukan pada waktu bervariasi.
7. Variasi bahan di anoda. Ruang anoda sesuai proposal awal berisi air. Berdasarkan hasil diskusi bulanan disepakati untuk membandingkan penggunaan air dengan penggunaan H_2 di ruang anoda. Variasi bahan di anoda juga di luar ruang lingkup KAK.
8. Penggunaan larutan elektrolit KHCO_3 di katoda. Penggunaan larutan KHCO_3 sebagai elektrolit dilakukan dengan mengacu pada literatur lain, walaupun dengan metode dan media reaksi yang berbeda.
9. Variasi luas permukaan MEA. MEA yang digunakan dengan menggunakan elektroliser komersial mempunyai luas 7 x 7 cm^2 . Salah satu kelebihan penggunaan elektroliser akrilik adalah mempunyai keleluasaan dalam modifikasi luas permukaan. Secara teoritik, makin luas permukaan MEA, maka produksi methanol akan lebih banyak. Variasi luas permukaan MEA juga di luar ruang lingkup KAK.
10. Variasi jenis stek. Selain luas permukaan, produksi methanol dengan jenis stek berbeda juga dilakukan. Pada penelitian ini dibandingkan penggunaan elektroliser sel tunggal dengan elektroliser sel ganda.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Karbon Dioksida

Karbon dioksida dengan rumus molekul CO₂ memiliki massa molar 44 g/mol, pada suhu normal membentuk fase gas dan bersifat inert (sangat tidak reaktif). CO₂ merupakan gas yang tidak berwarna, tidak berbau (pada konsentrasi atmosfer 0,039% (v/v)) tidak mudah terbakar dan memiliki rasa yang sedikit asam, serta dikenal sebagai gas rumah kaca (Services 2011; Qiao, Liu, and Zhang 2016). Molekulnya relatif stabil dan tidak mudah terpecah menjadi senyawa yang lebih kecil. Hanya dengan pemanasan, sinar ultraviolet, atau arus listrik, CO₂ dapat terpecah seperti pada persamaan (1):



Suhu tinggi atau penggunaan katalis dapat mengarahkan ke reaksi yang lain pada karbon dioksida. Pada reaksi RWGS (*Reverse Water-Gas Shift*), dimana karbon dioksida bereaksi dengan hidrogen menghasilkan karbon monoksida, ditunjukkan pada persamaan (2):

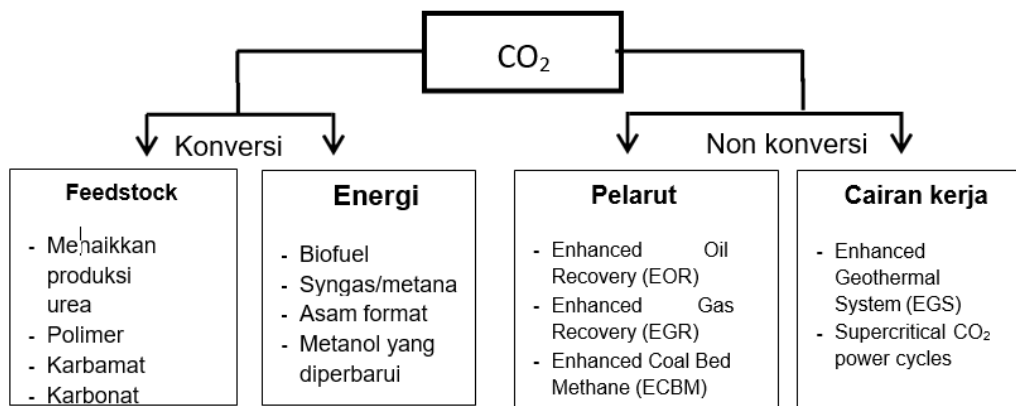


atau pada suhu yang lebih tinggi, karbon monoksida terbentuk dari reaksi karbon dioksida dengan karbon, seperti pada persamaan (3) (Vanhove 2015):



Kelarutan yang rendah dari CO₂ adalah salah satu keterbatasan yang utama dari beberapa riset tentang reduksi CO₂. Pada temperatur dan tekanan standar, kelarutan CO₂ dalam air sebesar ~ 34 mM atau 0,033 M, yang berarti densitas arus maksimum yang tersedia sebesar ~ 30 mA/cm² sedangkan kelarutan CO₂ pada metanol sebesar 0,06 M (Lu and Jiao 2016; Qiao, Liu, and Zhang 2016). Pada prakteknya, untuk reduksi CO₂ cair densitas arus rata-rata yang diperoleh sedikit rendah yaitu pada 10-20 mA/cm². Meskipun densitas arus ini cukup tinggi untuk studi selektivitas/mekanistik, perangkat untuk menyimpan listrik pada bahan bakar yang menghasilkan H₂ seperti *electrolyzers* beroperasi pada densitas arus 100-300 mA/cm² pada kondisi basa dan mencapai nilai yang lebih tinggi (800-1600 mA/cm²) pada *electrolyzers* dalam kondisi asam (Turner et al. 2008). Penelitian

terkait menunjukkan bahwa reduksi CO₂ dapat menekan biaya yang cukup signifikan jika tercapai densitas arus yang lebih tinggi pada overpotensial yang rendah (150 mA/cm² @ 1 V η_{cell}) (Verma et al. 2017) dan hal ini tidak mungkin terjadi pada elektrolit cair, bahkan jika dalam kondisi ekstrim untuk meningkatkan kelarutan CO₂ secara signifikan, misalnya suhu di bawah nol dan tekanan >10 bar. Skema perubahan CO₂ menjadi bahan-bahan yang berguna disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Ringkasan Aplikasi Carbon Capture Utilities (CCU) (Vanhove 2015)

Aplikasi dari CO₂ seperti ditunjukkan pada gambar 1, dibagi menjadi 2 kelompok utama, yaitu dikonversi menjadi produk yang lebih bernilai misalnya metanol atau sifat spesifik molekul yang digunakan, misalnya sebagai pelarut atau cairan kerja.

2.2. Metanol

Metanol (CH₃OH) banyak digunakan sebagai pelarut dalam industri kimia karena kemampuannya yang dapat melarutkan berbagai senyawa organik maupun anorganik. Metanol juga digunakan sebagai reaktan dalam pembentukan formaldehida atau metil ester yang diaplikasikan sebagai bahan anti beku (anti-freeze) pada industri otomotif maupun pesawat terbang (Salimy and Alimah 2016).

Metil alkohol atau yang dikenal dengan metanol merupakan produksi industri petrokimia yang mempunyai rumus molekul CH₃OH. Metanol mempunyai berat molekul 32,04 g/mol dan suhu ruangan. Titik didih metanol sebesar 64,5 °C dan titik leburnya sebesar -98 °C, serta konduktivitas < 1 μS/cm. Metanol mempunyai sifat mudah menguap, tidak berwarna, mudah terbakar, dan beracun dengan bau yang menyengat (Merck 2018).

Metanol juga diproyeksikan sebagai bahan bakar alternatif masa depan karena memiliki bilangan oktan yang tinggi dengan pembakaran yang lebih sempurna sehingga gas karbon monoksida sebagai hasil samping reaksi utama yang dihasilkan semakin sedikit (Park et al. 2014). Metanol merupakan bahan bakar ramah lingkungan dengan densitas energi hampir setengah dari bensin (metanol: $15,6 \text{ MJ.L}^{-1}$; bensin: $34,2 \text{ MJ.L}^{-1}$), namun juga perantara yang penting untuk beberapa zat kimia curah yang digunakan dalam produk sehari-hari seperti silikon, cat, dan plastik. Dibandingkan hidrogen, metanol memiliki densitas energi yang tinggi, yang dapat disimpan dalam tekanan atmosfer, dan dapat digunakan secara langsung dalam sistem konversi energi seperti mesin pembakar internal, karena nilai oktannya yang tinggi, atau digunakan langsung seperti pada *Direct Metanol FuelCell* (DMFC) atau secara tidak langsung (setelah dikonversi menjadi hidrogen). Saat ini, kebanyakan dari metanol komersial diproduksi dari metana melalui syngas (campuran CO dan H_2) dengan reforming uap dalam kapasitas jutaan ton per tahun pada industri skala besar (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013).

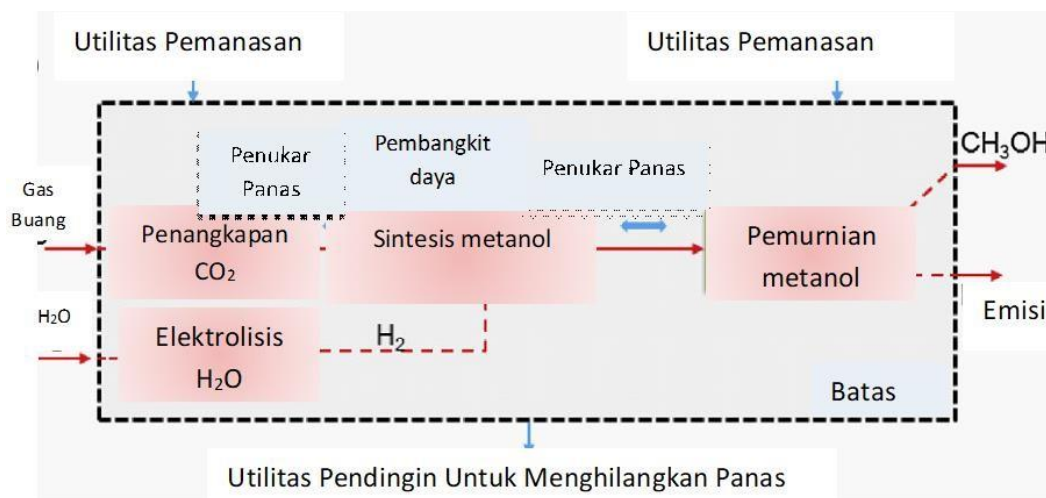
Transformasi CO_2 menjadi metanol membutuhkan 6 elektron agar terjadi reaksi reduksi (dianggap lebih lambat secara kinetik), oleh karena itu material katalis yang dibutuhkan harus sangat aktif dan selektif. (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013). Pada sintesis metanol, pemilihan jenis katalis berperan penting dalam mempengaruhi kondisi operasi sintesis metanol. Setiap katalis memiliki kinerja optimum pada kondisi operasi tertentu, misal katalis $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ bekerja baik pada kondisi operasi suhu $200 \text{ }^\circ\text{C} - 450 \text{ }^\circ\text{C}$ dan tekanan 40 bar - 100 bar. Proses hidrogenasi karbondioksida menggunakan katalis $\text{Cu/Zn/Al}_2\text{O}_3$ dapat menghasilkan produk utama berupa metanol, CO dan air (Saito 2000).

Berikut salah satu proses dalam pembuatan metanol: Proses Elektrokimia; Reaksi pembuatan metanol dari CO_2 dan H_2 dimulai dengan pembuatan gas H_2 dari elektrolisis air. Elektrolisis air adalah peristiwa penguraian senyawa air menjadi gas O_2 dan gas H_2 dengan menggunakan arus listrik. Pada katoda, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H_2 dan ion hidroksida (OH^-). Sementara itu pada anoda, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O_2), melepaskan 4 ion H^+ serta mengalirkan elektron ke katoda. Ion H^+ dan OH^- selanjutnya mengalami netralisasi sehingga membentuk

kembali beberapa molekul air. Reaksi keseluruhan yang setara dari elektrolisis air dapat dituliskan sebagai berikut.



Gas H₂ yang dihasilkan dari elektrolisis dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan metanol. Sedangkan bahan baku lainnya, gas CO₂, didapatkan dari *flue gas* atau emisi yang dihasilkan oleh *geothermal power plant*. Secara umum, proses pembuatan metanol dari flue gas dan H₂O tersaji dalam gambar 2.

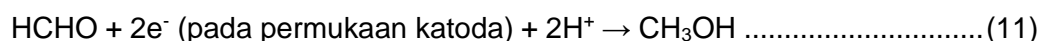
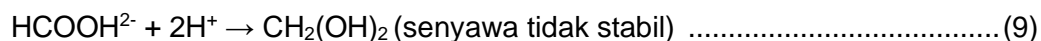
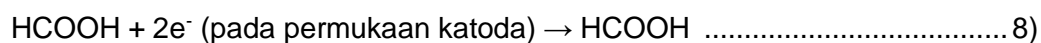


Gambar 2. Produksi Metanol dengan *Electrochemical Process* dan *Flue Gas* (Al-Kalbani et al. 2016)

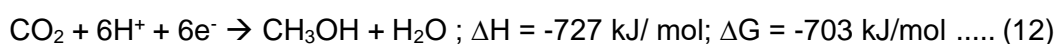
Pembuatan metanol dari *electrochemical process* pada gambar 2 menggunakan elektrolisis air untuk produksi H₂, akan tetapi masih jarang digunakan karena membutuhkan energi listrik yang tinggi. Walaupun membutuhkan energi listrik yang tinggi, tetapi hasil dari unit elektrolisis tidak menimbulkan emisi dan juga menghasilkan produk samping berupa gas O₂. Hal ini dapat dapat menutupi pengeluaran biaya listrik dari pabrik karena menghasilkan gas oksigen yang umumnya lebih banyak dipakai di unit elektrolisis. Di samping itu, proses ini dapat mengurangi emisi yang ada di lingkungan dengan mengurangi emisi CO₂ yang berasal dari *flue gas* (Al-Kalbani et al. 2016).

Mekanisme reaksi yang mungkin terjadi pada reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol dapat dituliskan sebagai berikut (Qiao, Liu, and Zhang 2016):





Meskipun mekanisme membutuhkan konfirmasi lebih lanjut, reaksi yang pasti terjadi pada proses enam elektron (Persamaan 12):



Dan senyawa lainnya seperti HCOOH, HCHO, dan CH₄ juga terbentuk.

2.3. Elektroda

Kondisi operasi dalam proses sintesis metanol salah satunya dipengaruhi oleh pemilihan jenis elektroda. Masing-masing elektroda memiliki aktivitas katalitik yang optimum pada kondisi tertentu (Saito 2000). Penelitian ini menggunakan elektroda berbasis tembaga (Cu), platina (Pt), Rhutenium (Ru), Paladium (Pd) dan timah (Sn). Keunggulan dan kelemahan dari masing – masing katalis dapat dilihat pada Tabel. 1.

Tabel. 1 Keunggulan dan Kelemahan Katalis yang Digunakan

No.	Jenis Katalis	Keunggulan Katalis	Kelemahan Katalis
1.	Platina (Pt)	<ul style="list-style-type: none"> - Ketersediaan di alam banyak - Tidak mudah korosi - HOR (Hydrogen Oxidation Reaction) yang tinggi. - Efisiensi coulomb pembentukan metanol dari CO₂ sebesar 35% (Shironita,2013a) 	<ul style="list-style-type: none"> - Harganya mahal - Mudah keracunan CO
2.	Rhutenium (Ru)	<ul style="list-style-type: none"> - Dapat mengurangi keracunan CO pada Pt - Ketersediaan dialam banyak 	<ul style="list-style-type: none"> - Harganya mahal - Belum banyak penelitian menggunakan Ru sebagai katalis tunggal

3.	Tembaga (Cu)	<ul style="list-style-type: none"> - Harganya murah - Ketersediaan di alam berlimpah - Efisiensi faraday pembentukan metanol dari CO₂ sebesar 54,8% (Albo,2015) - Dalam pembentukan metanol dari CO₂ stabil sampai 20 jam. - Banyak digunakan dalam proses reduksi elektrokimia CO₂ 	<ul style="list-style-type: none"> - Mudah teroksidasi sehingga mengurangi kinerja - Mudah korosi
4.	Paladium (Pd)	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi faraday pembentukan metanol dari CO₂ sebesar 34% (Zheng.2018) - Ketersediaan di alam banyak 	<ul style="list-style-type: none"> - Harga relatif mahal
5.	Timah (Sn)	<ul style="list-style-type: none"> - Nano-SnO₂/carbon black dapat menghasilkan asam format dari CO₂ dengan efisiensi faraday 93,6% (Zhang, Kang and Meyer, 2014) - Ketersediaan di alam berlimpah - Harganya terjangkau 	<ul style="list-style-type: none"> - Aktifitas katalitiknya rendah untuk pembentukan metanol

2.3.1 Tembaga sebagai elektroda

Tembaga telah lama dianggap sebagai bahan elektroda yang sangat menarik untuk reduksi CO₂. Costentin (2013) menyatakan bahwa reduksi CO₂ yang dikatalisis oleh Cu₂O memberikan hasil yang jauh lebih baik dalam laju dan overpotensial dibandingkan elektroda Cu biasa (Costentin, Robert, and Savéant 2013). Terkait dengan katalis yang digunakan pada reduksi elektrokimia, Albo (2015) melakukan penelitian reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol pada elektroda Cu₂O dan Cu₂O-ZnO menggunakan larutan elektrolit 0,5 M KHCO₃, dari hasil penelitian diperoleh efisiensi konversi CO₂ pada Cu₂O sebesar 54,8% dan 31,4%. Namun, elektroda Cu₂O-ZnO diperkirakan akan tetap stabil selama 20 jam, sedangkan pada permukaan Cu₂O mengalami deaktivasi yang kuat seiring dengan waktu (Albo and Irabien 2015)

Arena (2008) mengkaji interaksi solid-state, fungsionalitas, dan situs adsorpsi dari katalis Cu-ZnO/ZrO₂ dan kemampuannya untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol. Data karakterisasi menunjukkan bahwa interaksi yang kuat Cu-

ZnO secara efektif dapat meningkatkan dispersi dan reaktivitas tembaga ke oksigen (Arena et al. 2008). Sedangkan Le (2011) menguji kimia permukaan dan pembentukan CH_3OH dari beberapa elektrokatalis dengan situs permukaan Cu(I) dan mempertimbangkan kemungkinan cara untuk reduksi elektrokimia langsung dari CO_2 menjadi metanol (Le et al. 2011b).

2.3.2 Platina sebagai elektroda

Platina merupakan salah satu unsur transisi golongan VIII dengan kelimpahan terbesar, yaitu $10^{-6}\%$ dimana unsur golongan VIII lainnya hanya memiliki kelimpahan $10^{-7}\%$. Logam platina berwarna putih keabu-abuan dan bersifat inert serta merupakan salah satu unsur kimia pada tabel periodik yang mempunyai simbol Pt dengan nomor atom 78 dan memiliki konfigurasi $[\text{Xe}] 4f^{14} 5d^9 6s^1$. Titik lelehnya mencapai $1768,3\text{ }^\circ\text{C}$ dan massa atom relatifnya adalah $195,09\text{ g/mol}$ (Cotton and Wilkinson 2007). Shironita (2013) menguji reduksi CO_2 pada elektrokatalis Pt/C dan Pt-Ru/C menggunakan MEA dan memperoleh *yield* metanol $0,03\%$ pada Pt/C dan $7,5\%$ pada Pt-Ru/C, dengan efisiensi Coulomb 35% pada Pt/C dan 75% pada Pt-Ru/C (Shironita et al. 2013a).

2.3.3 Palladium sebagai Elektroda

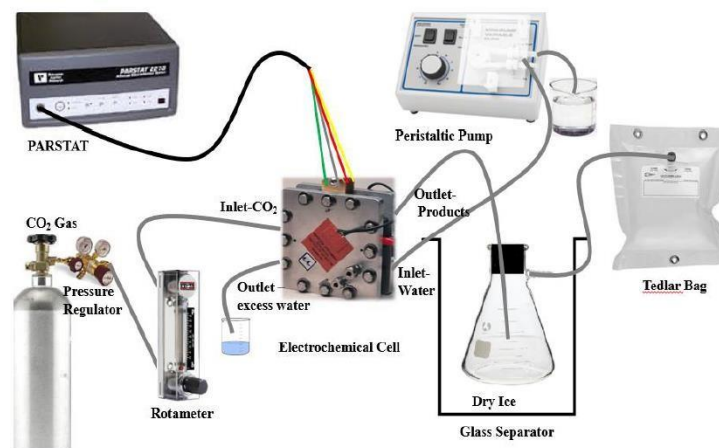
Palladium pertama kali digunakan sebagai elektroda dalam elektoreduksi CO_2 dalam larutan NaHCO_3 pada tahun 1985 oleh Spichinger-Ulmann. Dilaporkan bahwa HER dapat ditekan pada permukaan Pd, sehingga aktivitas elektrokatalitik dapat ditingkatkan. Produksi CH_3OH pada elektroda Pd yang dimodifikasi dengan Cu yang terhidrogenasi memiliki efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan elektroda nonhidrogenasi, hal ini disebabkan oleh hydrogen yang teradsorpsi selama proses reduksi (Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013). Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Zhang et al. yang menggunakan katalis Pd/ SnO_2 *nanosheets* untuk mengkonversi CO_2 menjadi CH_3OH dan memperoleh FE sebesar 34% (Zhang et al. 2018).

2.4. Metode Konversi CO_2 Menjadi Metanol Secara Elektrokimia

Al-Saydeh (2018) melaporkan bahwa terdapat 4 metode untuk mengkonversi CO_2 menjadi metanol, antara lain: konversi kimia; reduksi elektrokimia CO_2 menjadi metanol; reduksi fotokimia CO_2 menjadi metanol; dan reduksi fotoelektrokimia CO_2 menjadi metanol (Al-Saydeh 2018). Pada penelitian ini digunakan metode reduksi elektrokimia CO_2 menjadi metanol dengan

pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi.

Reduksi elektrokimia CO₂ secara langsung menghasilkan produk yang bervariasi, umumnya bergantung pada material katalis dan medium reaksi. Gambar 3 menunjukkan representasi bergambar dari rangkaian elektrokimia.



Gambar 3. Representasi Bergambar Dari Rangkaian Elektrokimia (Venka 2016a)

Reduksi elektrokimia CO₂ dapat diproses melalui jalur reduksi dua-, empat-, enam-, dan delapan elektron pada fase gas, berair dan non-aqueous pada sel dan konfigurasi elektroda yang berbeda, baik pada temperatur rendah maupun tinggi. Produk reduksi yang utama antara lain karbon monoksida (CO), asam format (HCOOH) atau format (HCOO⁻) pada larutan basa, asam oksalat (H₂C₂O₄) atau oksalat (C₂O²⁻ pada larutan basa), formaldehida (CH₃CH₂OH), metanol (CH₃OH), metana (CH₄), etilena (CH₂CH₂), etanol (CH₃CH₂OH), dan lain-lain. Di antara berbagai zat yang dihasilkan, merupakan tantangan yang besar untuk mengubah CO₂ menjadi CH₃OH, namun potensial yang diperoleh juga sangat besar (Qiao, Liu, and Zhang 2016; Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013).

Karbon dioksida (CO₂) adalah molekul yang sepenuhnya teroksidasi dan stabil secara termodinamik, pemanfaatan CO₂ melalui pendekatan elektrolisis dalam elektrolit berair menimbulkan beberapa tantangan teknis utama. Dalam beberapa dekade terakhir, pengurangan CO₂ telah dipelajari secara intensif menggunakan metode termokimia, elektrokimia, dan fotokimia. Untuk konversi termokimia CO₂ melalui proses reformasi, tidak hanya membutuhkan suhu reaksi dan tekanan tinggi, tetapi juga memerlukan jumlah hidrogen sebagai zat pereduksi yang cukup banyak, yang secara energetik bermasalah dalam penerapan pada

aplikasi skala besar. Sebaliknya, reduksi CO₂ secara elektrokimia menjadi lebih menarik karena memiliki beberapa keunggulan karakteristik dibandingkan dengan pendekatan lain, sebagai contoh, reaksi dapat dilakukan pada kondisi ambien dengan laju reaksi yang mudah dikendalikan dengan menyetel bias eksternal (yaitu overpotential) (Lu and Jiao 2016).

Fitriani (2012) melaporkan bahwa reduksi elektrokimia CO₂ ini merupakan reaksi yang terjadi secara spontan dimana dibutuhkan sumber energi dari luar yang berasal dari *power supply*. Metode elektrokimia yang digunakan adalah elektrolisis dengan menggunakan arus tetap. Metode ini dipilih karena pada elektrolisis arus tetap tidak diperlukan kondisi potensial yang stabil dan juga untuk mempermudah mengamati efisiensi faraday dari hasil reduksi CO₂ (Fitriani 2012).

Poin penting dari proses elektroreduksi CO₂ menjadi metanol antara lain: (1) material katoda yang digunakan, (2) efek dari medium reaksi, (3) kondisi operasi, (4) konfigurasi sel elektrokimia, dan (5) perbandingan dengan rute elektrokatalitik yang lain. (Albo, J; Alvarez- Guerra, M; Castano, P; Irabien 2013). Selama dekade terakhir, konversi elektrokimia CO₂ telah digunakan secara luas di skala laboratorium, tapi belum berhasil digunakan dalam proses industri (skala besar). Metode reduksi elektrokimia digunakan untuk konversi CO₂ menjadi zat kimia yang bernilai dan bahan bakar seperti metanol menggunakan listrik sebagai sumber energi utama. Reduksi elektrokimia CO₂ menjadi metanol secara langsung adalah proses yang menjanjikan untuk mengurangi sejumlah CO₂ yang di perangkap (Al- Saydeh 2018). Produksi metanol melalui reduksi elektrokimia CO₂ merupakan pilihan yang lebih baik karena dapat dilakukan dibawah kondisi ringan dan dapat mencapai efisiensi yang lebih baik dengan biaya yang lebih rendah. Tabel 2 menunjukkan reaksi elektrokimia konversi CO₂ menjadi metanol pada kondisi standar.

Tabel 2. Reaksi elektrokimia untuk konversi CO₂ menjadi metanol di bawah kondisi standar

	Reaksi elektrokimia	E ₀ (V)
Katoda	$\text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	0,38 vs SHE
Anoda	$3\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 1,5\text{O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$	1,23 vs SHE
Reaksi Keseluruhan	$\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CH}_3\text{OH} + 1,5\text{O}_2$	1,61 vs SHE

(Hazarika and Manna, 2019)

Fitriani (2012) melakukan penelitian tentang reduksi elektrokimia CO₂ pada

suhu sekitar 15°C dengan menggunakan elektroda Cu sebagai elektroda kerja dan platina sebagai elektroda pembantu. Larutan elektrolit yang digunakan adalah NaHCO_3 dengan berbagai konsentrasi serta buffer fosfat dengan variasi pH asam, netral, dan basa (Fitriani 2012).

Penggunaan elektrolit berbeda dalam proses elektrokimia konversi CO_2 menjadi produk lain sudah banyak dilaporkan. Membran nafion-117 sebagai elektrolit padatan merupakan membrane elektrolit yang banyak digunakan dalam konversi CO_2 karena beberapa pertimbangan diantaranya mampu mencegah crossover metanol (Shironita et al. 2013a; Yang et al. 2019; Albo et al. 2017; 2015). Sementara itu, penggunaan KHCO_3 sebagai elektrolit digunakan dengan mempertimbangkan kesetimbangan pasokan CO_2 (Hazarika and Manna 2019; Le et al. 2011a; Albo et al. 2017; Albo and Irabien 2015). Laporan lain menggunakan membran penukar kation dan anion CMI-7000 dan AMI 7001 menunjukkan bahwa penggunaan membrane penukar anion menghasilkan produk metanol lebih besar (Aeshala, Uppaluri, and Verma 2013), sementara itu Gutiérrez menggunakan membran sterion sebagai media elektrolit dengan produk utama metanaol dan asetaldehida (Gutiérrez-Guerra et al. 2016). Data selengkapnya hasil penelusuran penggunaan berbagai komponen dalam proses konversi CO_2 disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Review Penelitian Terdahulu Mengenai Konversi CO₂ Secara Elektrokimia

No.	Elektroda		Elektrolit	Kondisi operasi						%yield /Farad ic eff	Ref.
	Katoda	Anoda		Waktu operasi	Laju alir CO ₂	Current Density	Applied Voltage	Katalis loading	Produk Target		
1.	Pt-Ru/C (Pt: 32,6 wt%, Ru: 16,9 wt%); Pt/C	Pt/C (Pt:45,7 wt%)	Nafion 117	5 jam	50 mL/min	-	0.06 - 0.70 V vs. DHE	1 mg/cm ²	metanol	Pt-Ru/C Yield : 7,5% FE: 75%	(Shironita <i>et al.</i> , 2013)
2.	Cu ₂ O	Cu	KHCO ₃	50 menit	3.0 x 10 ⁻⁶ m ³ /s	7.8 mA.cm ⁻²	-2.0 V vs. SHE	-	metanol	FE: 47,5%	(Hazarika and Manna, 2019)
3.	Cu ₂ -xSe(y)/CP	Platinium gauzes	Nafion 117	25 jam	10 sccm	41,5 mA.cm ⁻²	2,67 V	1 mg/cm ²	metanol	FE: 77,6%	(Yang <i>et al.</i> , 2019)
4.	Cu ₂ O	Cu foil	KHCO ₃ 0,5M	10 menit	-	0.025 mA.cm ⁻²	-1,1 V vs SCE	-	metanol	Yield: 43 μmol.c m ² .h ⁻¹ FE: 38%	(Le <i>et al.</i> , 2011)
5.	Cu-G	IrO ₂	membran Sterion	300 menit (5 jam)	0.039 NmL min-1 cm-2 (CO ₂)	applied current : -10, -20 dan -30 mA	Cu-AC : -2.72 V	0,5 mg/cm ²	metanol	pada -30 mA = 75% (selektivitas)	(Gutiérrez-Guerra <i>et al.</i> , 2016)
	Cu-AC				Cu-G : -1.54 V						
	Cu-CNF				Cu-CNF : -2.11 V						
6.	Cu ₂ O Cu ₂ O/ZnO	Platinized titanium electrode	0,5 M KHCO ₃ Nafion 117	90 menit	-	10,64 mA.cm ⁻²	-1,3 V vs Ag/AgCl	0,5 ; 1 ; 1,8 mg/cm ²	metanol	17,7%	(Albo <i>et al.</i> , 2015)
7.	Cu ₂ O	platinized titanium plate	0,5 M KHCO ₃	90 menit	10-40 mL/min .cm ²	5-40 mA.cm-2	(- 1,39 V) vs Ag/AgCl	1 mg/cm ²	metanol	54,80%	(Albo and Irabien, 2015)
	Cu ₂ O/ZnO						(-1,16 V) vs Ag/AgCl			31,40%	
8.	Cu ₂ O/C	Pt/C 40%	CMI-7000 dan AMI-7001	25 menit	CO ₂ : 20 mL/menit H ₂ O : 1,5 mL/menit	CMI : 2,5 mA.c m-2 AMI : 5,4 mA.cm-2	2 V dan 2,5 V (CH ₄)	Pt/C : 0,5 mg/c m ² Cu ₂ O/C : 2 mg/cm ²	CH ₄ , C ₂ H ₄ , CH ₃ OH	CH ₃ OH CMI : <6% AMI : 19%	(Aeshala, Uppaluri and Verma, 2013)
9.	Cu ₂ O/ZnO	Platinized titanium	0,5 M KHCO ₃ pyridine-based Nafion 117	90 menit	20 mL/menit	1 mA.cm-2	-0,62 V vs. Ag/AgCl	1 mg/cm ²	metanol	25,6%	(Albo <i>et al.</i> , 2017)

2.5. *Membrane Electrode Assembly (MEA)*

Membrane Electrode Assembly (MEA) dapat dibuat menggunakan metode *Catalyst-Coated Substrate (CCS)* (Gambar x.(a)) atau *Catalyst-Coated Membrane (CCM)* (Gambar x.(b)) (Thanasilp and Hunsom 2010). Pada metode CCS, lapisan katalis diletakkan di substrat *Gas Diffusion Layer (GDL)*. Setelah pasta katalis di spray ke GDL, membran diapit diantara GDL yang telah dilapisi katalis menggunakan *hot-pressing*. *Hot-pressing* sangat penting untuk preparasi MEA berkinerja tinggi karena dapat meningkatkan adhesi antara lapisan katalis dan membran, yang mengarah pada peningkatan koneksi ion (Vielstich, Yokokawaa, and Gasteiger 2009). Namun, panas dan tekanan yang kuat dapat menyebabkan perubahan struktural pada MEA dan GDL, sehingga berpotensi menurunkan kinerja sel (Frey and Linardi 2004). Sebaliknya, dalam metode CCM, lapisan katalis langsung dibuat pada membran tanpa di *hot-press*. Metode CCM menghindari kerusakan struktural MEA dan GDL, mengurangi resistensi ohmik, dan menyederhanakan proses pembuatan karena tidak memerlukan proses tambahan (Peng et al. 2016).

Upaya untuk memahami dan menghasilkan MEA yang efektif telah dilakukan oleh Sossenburg (2018). Sistem MEA digunakan untuk menggabungkan reaksi fase cair dan gas serta membatasi crossover produk sambil menyediakan kedua setengah reaksi dengan reagen yang dibutuhkan masing-masing. Secara teori MEA hanya memiliki dua konstituen; membran dan katalis elektroda yang dikemas rapat. Namun, pemanfaatan MEA memiliki tujuan khusus bila dikombinasikan dengan *gas diffusion layer (GDL)*. Dengan menggabungkan membran, lapisan katalis dan *gas diffusion layer (GDL)* hidrofobik, sistem ini mampu melakukan reaksi reduksi CO₂ dalam elektrolit cair sambil menggunakan aliran umpan gas CO₂. Konfigurasi yang sedikit berbeda yang mengintegrasikan elektroda dengan lapisan difusi gas juga dikenal sebagai *gas diffusion electrode (GDE)* di mana membran merupakan komponen terpisah pada jarak tertentu (Sassenburg 2018).

2.6. *Pemisahan dan Pemurnian Metanol*

Pemisahan dan pemurnian metanol menggunakan metode destilasi. Destilasi merupakan metode pemisahan komponen larutan berdasarkan perbedaan titik didih larutan. Pada destilasi metanol, air mendidih pada suhu

100°C dan metanol mendidih pada suhu 65°C. Adanya perbedaan titik didih yang cukup besar antara air dan metanol menjadi dasar untuk memisahkan air dan metanol. Metanol akan menguap terlebih dahulu karena titik didihnya lebih rendah dibandingkan dengan air.

Prinsip dasar metode destilasi adalah dengan menguapkan metanol yang memiliki titik didih lebih rendah dibandingkan dengan titik didih dari air. Metanol yang menguap tersebut kemudian didinginkan atau diembunkan pada kondensor. Kondensor akan menurunkan suhu uap metanol sampai di bawah titik didihnya yang akan menyebabkan metanol berubah fase dari fase gas ke fase cair. Metanol yang cair akan ditampung pada wadah penampung. Destilator yang baik adalah destilator yang dapat menghasilkan metanol dengan tingkat kemurnian tinggi dan lebih efisien dalam penggunaan energi (Wahyudi *et al.*, 2018).

BAB III

METODOLOGI

3.1. Tempat Riset

Riset dipusatkan dan dilaksanakan di Pusat Unggulan Riset (PUR) Fuel Cell dan Hidrogen Universitas Sriwijaya dengan fasilitas yang relatif memadai, sementara karakterisasi struktur kristal menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) dilakukan di Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya dan analisa produk metanol sementara dilakukan dengan menggunakan refractometer dan peralatan GC-MS yang ada di Jurusan Kimia FMIPA UNSRI. Tahap selanjutnya, pengukuran konsentrasi produk methanol dilakukan menggunakan peralatan methanol analyzer AM 5 dari Analox. Analisis SEM-EDX dilakukan di Laboratorium Research & Technology Innovation Pertamina di Pulogadung, Jakarta dan analisis FTIR dilakukan di laboratorium Program Studi Farmasi FMIPA UNSRI.

3.2. Alat dan Bahan Yang Digunakan

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini antara lain; Sel *Electrolyzer*, *Mass Flow Controller*, *Spray Gun*, *High Temperature Vacuum Tube Furnace* OTF-1200X-S, *Hydraulic lamination hot press* EQ-HP-88V-LD, *Ultrasonic homogenizer* MSK-USP-3N, neraca analitik, peralatan gelas, Potensiostat AUTOLAB Metrohm PGSTAT128N, *Power Supply* LW- K3010D 30V/10A, refractometer, GC-MS, Methanol Analyzer AM-5, pompa air, *X-Ray Diffraction*, Reaktor penampung metanol, Metanol analyzer, sensor dan pompa serta instalasi pipa.

Bahan-bahan yang digunakan pada penelitian antara lain, *carbon paper* Avcarb P75T, *carbon vulcan* XC-72R, amonium bikarbonat (NH_4CO_3), *Polytetrafluoroethylene* (PTFE), Membran Nafion 117, Larutan Nafion 20%, 2-propanol, air *ultrapure*, air demineralisasi, bubuk elektrokatalis Pt/C 40%, bubuk elektrokatalis Pt-Ru/C, bubuk elektrokatalis Cu_2O dan ZnO, Larutan H_2O_2 3%, Larutan H_2SO_4 0,5 M, katalis Pd/C, dan katalis SnO_2 .

3.3. Prosedur Riset

3.3.1 Preparasi Gas Diffusion Layer (GDL)

GDL dipreparasi dengan mencampurkan *carbon vulcan* XC-72R, ammonium bikarbonat, PTFE, dan 2-propanol, kemudian diaduk menggunakan ultrasonik

homogenizer selama 15 menit hingga membentuk pasta. Pasta yang dihasilkan disemprotkan di atas *carbon paper* Avcarb P75T dengan metode spraying secara keseluruhan dan merata, kemudian GDL disintering selama ± 3 jam pada suhu 350°C menggunakan furnace horizontal OTF-1200X MTI.

3.3.2 Preparasi Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$

Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dipreparasi terlebih dahulu karena bahan yang tersedia adalah Cu_2O , ZnO , Pd/C dan SnO_2 , sementara untuk katalis Pt/C dan Pt-Ru/C telah tersedia. Untuk membuat paduan katalis, sejumlah bubuk Cu_2O , bubuk ZnO , dan carbon vulcan XC-72R dimasukkan ke dalam jar HEM-shaker dengan *ball per ratio* (BPR) (1:10), kemudian dimilling selama 5 jam. Katalis yang diperoleh disimpan ke dalam wadah yang kering dan tertutup rapat. Pemuatan (loading) katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ 40% adalah 1 mg/cm^2 . Komposisi pembuatan elektroda ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4. Komposisi pembuatan elektroda $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$

Loading Cu_2O (mg/cm^2)	Loading ZnO (mg/cm^2)	Luas elektroda (cm^2)	Cu_2O (g)	ZnO (g)	Massa katalis (mg)	Total massa carbon (mg)
1	1	49	0,0539	0,0539	269,5	171,5

Hal yang relatif sama dilakukan pada proses pembuatan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ yang dilakukan dengan mencampurkan katalis Pd/C dengan katalis SnO_2 pada peralatan ball milling.

3.3.3 Preparasi Elektroda

Elektroda yang digunakan terdiri atas katoda dan anoda dengan ukuran $7 \times 7 \text{ cm}^2$ dan pada bagian selanjutnya digunakan juga elektroda dengan ukura $10 \times 10 \text{ cm}^2$. Anoda menggunakan katalis Pt/C , sementara di katoda menggunakan katalis yang berbeda. Katoda pertama menggunakan katalis Pt-Ru/C , katoda yang kedua menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O/ZnO}$, dan katoda ketiga menggunakan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dengan pemuatan katalis yang bervariasi.

Preparasi elektrokatalis dibuat dengan cara mencampurkan bubuk katalis dengan air deionisasi secukupnya hingga kalis dan diaduk menggunakan spatula. Selanjutnya, Larutan Nafion 20% dan 2-propanol ditambahkan ke dalam campuran

katalis, kemudian campuran diagitasi selama 10 menit dalam *ultrasonic homogenizer*. Campuran ditambahkan PTFE dan pengadukan dilanjutkan selama 5 menit hingga membentuk pasta. Pasta disemurkan ke GDL, kemudian dikeringkan pada suhu ruangan.

Pasta $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}/\text{C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dipreparasi dengan cara yang sama seperti yang telah disebutkan di atas dan disemprotkan pada GDL (Carmo et al. 2019). Elektroda yang telah dikeringkan, dikarakterisasi dengan XRD, SEM-EDX, CV dan EIS.

3.3.4 Karakterisasi Elektroda

Karakterisasi pada elektroda Pt-Ru/C, $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}/\text{C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dilakukan untuk mengetahui kristalinitas dengan XRD, kemudian dilakukan pengujian menggunakan *Scanning Electrode Microscopy* (SEM-EDX) untuk mengetahui morfologi permukaan elektroda, lalu dilakukan pengujian *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk menentukan ECSA (*Electrochemical Surface Area*) dan *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) untuk menentukan nilai konduktivitas elektrik.

1) Karakterisasi Menggunakan X-Ray Diffraction (XRD)

Elektroda diletakkan ke dalam sampel holder. Pengukuran dilakukan menggunakan metode *continuous scan* dari 3 hingga 90° . Perpindahan langkah setiap sudut hamburan sebesar $0,02^\circ$ dengan kecepatan scan 10 deg/min, tegangan 30,0 kV, dan kuat arus 10,0 mA.

2) Pengujian Sifat Elektrokimia Elektroda menggunakan *Cyclic Voltammetry* (CV)

Sifat elektrokimia elektroda karbon ditentukan dengan menggunakan teknik *Cyclic Voltammetry* (CV), dimana nilai densitas arus adalah hasil pembagian nilai arus hasil pengukuran dengan berat elektroda karbon dalam satuan gram. Pengujian CV dilakukan dengan potensiostat AUTOLAB PGSTAT204 Metrohm dengan elektroda Ag/AgCl sebagai elektroda referensi, kawat platinum sebagai elektroda counter, dan elektroda (Pt/C; Pt-Ru/C; $\text{Cu}_2\text{O-ZnO}/\text{C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$) sebagai elektroda kerja. Pengukuran CV direkam dengan batas potensial dari -0,1 V hingga 0,2 V (vs Ag/AgCl) dengan laju pemindaian 50 mV/s dalam larutan elektrolit natrium hidroksida (NaOH) 1 M pada suhu ruang. Hasil pengukuran CV

berupa kurva voltammogram yang menunjukkan terjadinya reaksi reduksi oksidasi pada katalis. Voltammogram yang dihasilkan digunakan untuk menghitung nilai ECSA (Electrochemical Surface Area).

3) **Pengujian dan Pengukuran Konduktivitas Elektrik Menggunakan Metode Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)**

Pengujian aktivitas katalitik dilakukan pada suhu ruang. Sisi anoda dijepit pada elektroda kerja. Elektroda cacah (Pt) diletakkan diantara elektroda kerja dan elektrodareferensi (Ag/AgCl). Ketiga elektroda direndam pada larutan elektrolit NaOH 1 M. Pengukuran konduktivitas elektroda ditentukan dengan menggunakan metode FRA Impedance Potential. Pengukuran konduktivitas dilakukan dengan cara mengalirkan arus listrik AC. Hasil pengukuran konduktivitas elektroda didapatkan data berupa nilai hambatan real (Z') dan hambatan imajiner (Z'') dimana data tersebut merupakan hasil respon bahan terhadap rentang frekuensi yang diberikan. Frekuensi yang digunakan pada pengujian berada pada rentang 0,1 Hz – 100 kHz. Dari data pengukuran EIS didapat data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer (R_p) sehingga nilai konduktivitas dapat dihitung.

Elektroda kerja dihubungkan pada potensiostat/galvanostat Metrohm. Pengujian EIS diperoleh data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer muatan (R_p) dan selanjutnya nilai konduktivitas elektrik elektroda ditentukan dengan menggunakan rumus pada persamaan 13.

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} \dots \dots \dots (13)$$

dimana:

$$Z_R = R_p + R_s$$

Keterangan:

R_s : tahanan larutan (Ω)

R_p : tahanan transfer muatan (Ω)

l : jarak antar elektroda(cm)

A : luas permukaan elektroda (cm²)

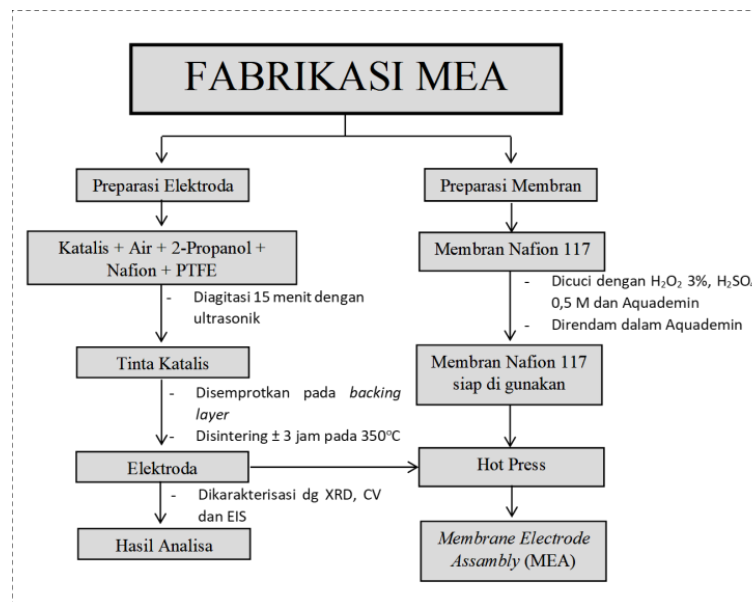
Dimana R adalah hambatan listrik (Ω), ρ adalah resistivitas ($\Omega \text{ cm}$), l adalah tebal pellet (mm), A adalah luas permukaan pellet karbon (cm^2), dan K adalah konduktivitas (S/cm).

4) Karakterisasi Morfologi Permukaan Elektroda Menggunakan SEM-EDX

Karakterisasi elektroda menggunakan SEM-EDX untuk melihat morfologi permukaan elektroda (SEM) dan kandungan katalis pada permukaan (EDX).

3.3.5 Preparasi Membrane Electrode Assembly (MEA)

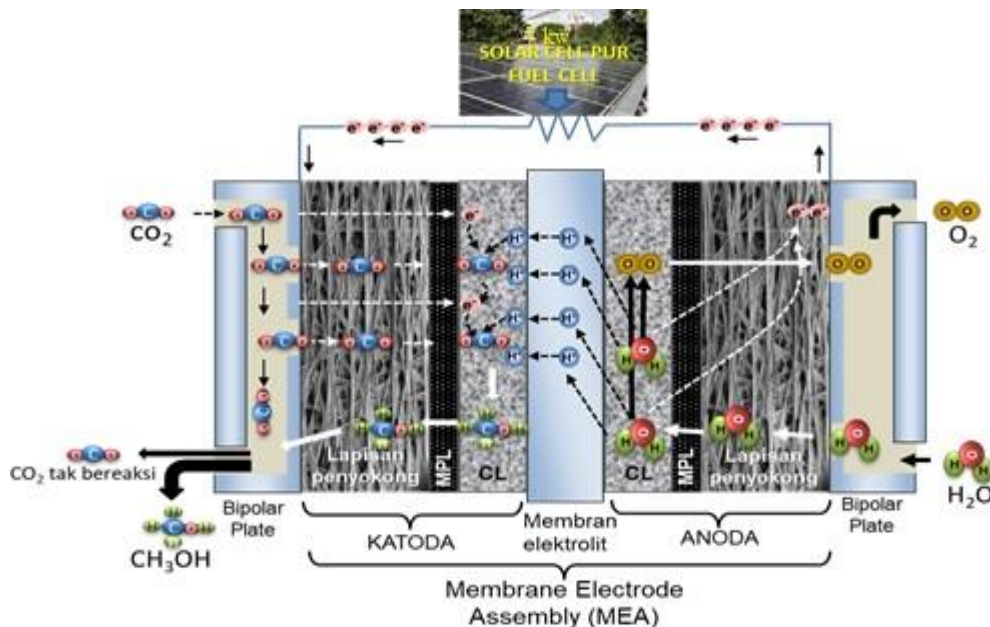
Membrane Electrode Assembly (MEA) dipreparasi dengan menggabungkan kedua buah elektroda pada kedua sisi membran nafion-117 menggunakan penekanan panas. Sebelum digunakan, membran diaktivasi menggunakan H_2O_2 3% pada 80°C selama 1 jam, kemudian direndam dalam H_2SO_4 0,5 M pada 80°C selama 1 jam. Terakhir, membran dibilas beberapa kali dalam air deionisasi untuk menghilangkan sisa asam, kemudian disimpan dalam air deionisasi untuk menghindari dehidrasi. Elektroda yang dihasilkan dari prosedur 3.3.3 direkatkan pada kedua sisi membran elektrolit, dilapisi dengan aluminium foil pada kedua sisi elektroda. Penekanan panas pada pembuatan MEA dilakukan pada suhu 135°C dan tekanan 2.000 psi dalam waktu 3 menit (Shironita et al. 2013a; Le et al. 2011b; Carmo et al. 2019). Diagram alir prosedur pembuatan MEA disajikan pada gambar 4.



Gambar 4. Proses Pembuatan/Preparasi MEA

3.3.6 Pengujian Reduksi Elektrokimia CO₂

MEA dipasang pada rangkaian elektroliser dan gas CO₂ dialirkan pada sisi katoda, sedangkan air dialirkan pada sisi anoda. Sumber energi listrik diperoleh dari power supply yang dihubungkan pada elektroliser. Energi listrik yang digunakan berasal dari fasilitas solar panel 7 kW. Laju alir CO₂ diatur menggunakan *mass flow controller*. Oksigen diproduksi pada sisi anoda meninggalkan reaktor *electroliser* dan dilepas ke atmosfer tanpa dianalisis. Konfigurasi sel elektrokimia tercantum pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan Reaksi dan Komponen MEA pada skema single stack

1) Penentuan Tegangan Optimum

Tegangan optimum dilakukan dengan metode stripping metanol untuk mengetahui potensial kerja konversi metanol. Metode stripping metanol dilakukan dengan mengalirkangas nitrogen pada botol yang mengandung metanol dengan laju alir 50 mL/menit, kemudian gas nitrogen dan uap metanol yang terbawa dialirkan ke ruang katoda, sementara pada sisi anoda dialirkan air. Stripping metanol dilakukan pada tegangan dengan interval 1,2 V – 2,1 V menggunakan potensiostat pada masing-masing MEA dengan katoda yang berbeda. Prosesstripping dilakukan selama

2 jam untuk masing-masing variasi (Shironita et al. 2013a).

2) Penentuan Laju Alir CO₂ Optimum

Reduksi elektrokimia CO₂ diteliti pada laju alir CO₂ 20; 40; 60; 80; 100; 120 dan 140 mL/menit pada tegangan optimum dengan katalis pada katoda berbeda. Setiap variasi kondisi elektrolisis berlangsung selama 2 jam.

3.3.7. Identifikasi dan Perhitungan Rendemen Produk

Analisa kuantitatif dalam menentukan kadar metanol dilakukan dengan menggunakan refraktometer dan *Gas Chromatograph (GC)* TRACE 1310 dilengkapi dengan detektor *Mass Spectroscopy* sebagai uji pendahuluan. Uji produk metanol selanjutnya dilakukan dengan menggunakan alat uji utama berupa *Metanol Analyzer AM5 Analox*. Penentuan senyawa dengan metode GC berdasarkan indeks kemiripan dan pola fragmentasi senyawa. Konsentrasi metanol yang terbentuk dari hasil reduksi elektrokimia (analisis kuantitatif) dapat dibuktikan dengan membandingkan antara luas *peak* sampel dengan luas *peak* propanol standar melalui metode spike menggunakan propanol 20 % v/v dengan persamaan (14):

$$[\text{sampel metanol}] (\%) = \frac{\text{Luas } peak \text{ propanol sampel} \times [\text{propanol}](20\%)}{\text{luas } peak \text{ propanol standar}} \dots (14)$$

3.3.8. Analisis Data

1) Analisis XRD

Analisis XRD dilakukan untuk menganalisis kristalinitas pada katalis Pt/C, Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂. Hasil karakterisasi XRD berupa pola-pola difraksi atau difraktogram yang merupakan puncak-puncak karakteristik struktur kristal katalis. Hasil pengukuran XRD dilihat dari letak dan bentuk puncak difraktogram yang muncul sesuai dengan nomor masing-masing komponen pada data file JCPDS (*Joint Committee Powder Diffraction Standard*).

2) Analisis Pengujian Elektrokimia Elektroda menggunakan *Cyclic Voltammetry (CV)*

Dari analisis CV didapat data berupa kurva yang menunjukkan adanya reaksi bolak balik, dimana reaksi ini ditunjukkan dengan terbentuknya puncak anodik (kurva atas) dan katodik (kurva bawah). Hal ini menunjukkan telah terjadi reaksi redoks. Analisis yang dilakukan meliputi perhitungan ECSA (*Electrochemical Surface Area*) dengan rumus:

$$ECSA = \frac{Q_h}{210 \mu C \cdot cm^{-2} \times \text{loading katalis}} \dots\dots\dots (15)$$

Keterangan:

Q_h = L rata-rata/ luas sampel

210 = konstanta muatan yang terdesorpsi oleh

polikristal katalis Loading katalis = jumlah katalis yang digunakan (Kumar et al. 2018).

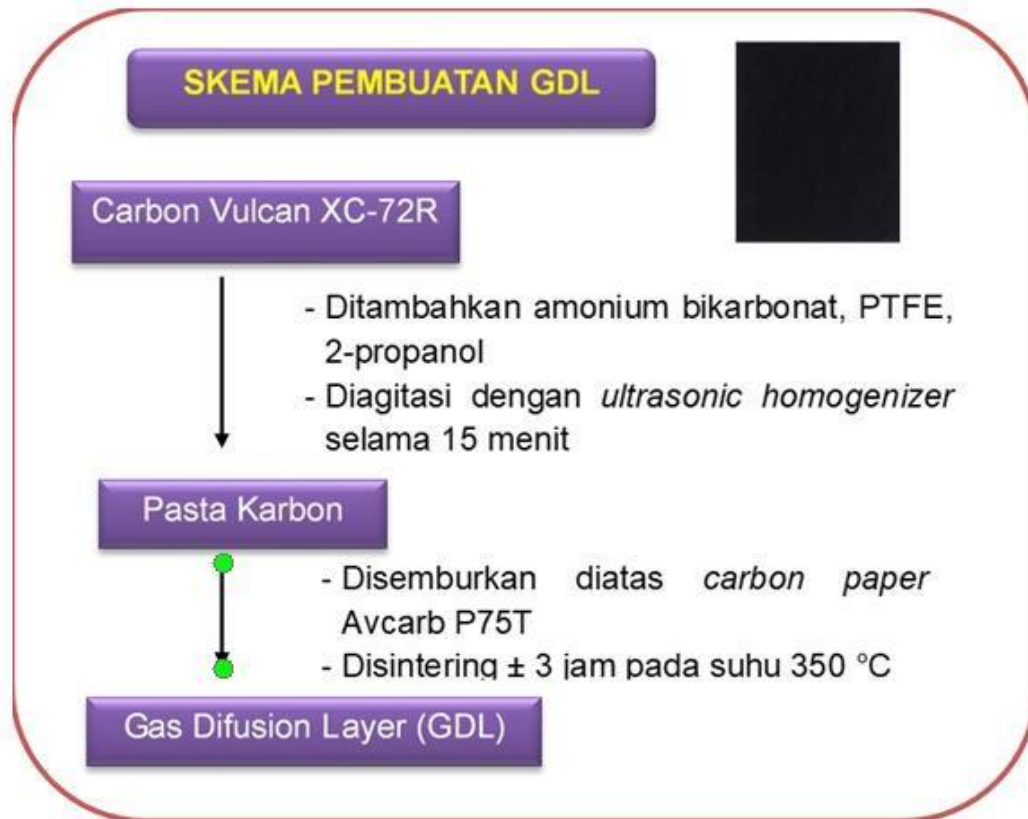
3) Analisis Pengukuran Konduktivitas Elektrik

Pengukuran EIS menghasilkan *Nyquist plot* yang terdiri dari lengkungan di daerah frekuensi tinggi dan kenaikan yang signifikan di daerah frekuensi rendah. Data yang didapat digambarkan dalam grafik *Nyquist plot* menggunakan software NOVA, dimana sumbu x merupakan hambatan *real* (Z') dan sumbu y merupakan hambatan imajiner (Z''). *Nyquist plot* lalu di *fitting* menyesuaikan sirkuit ekuivalen yang diinginkan (Tang et al. 2014).

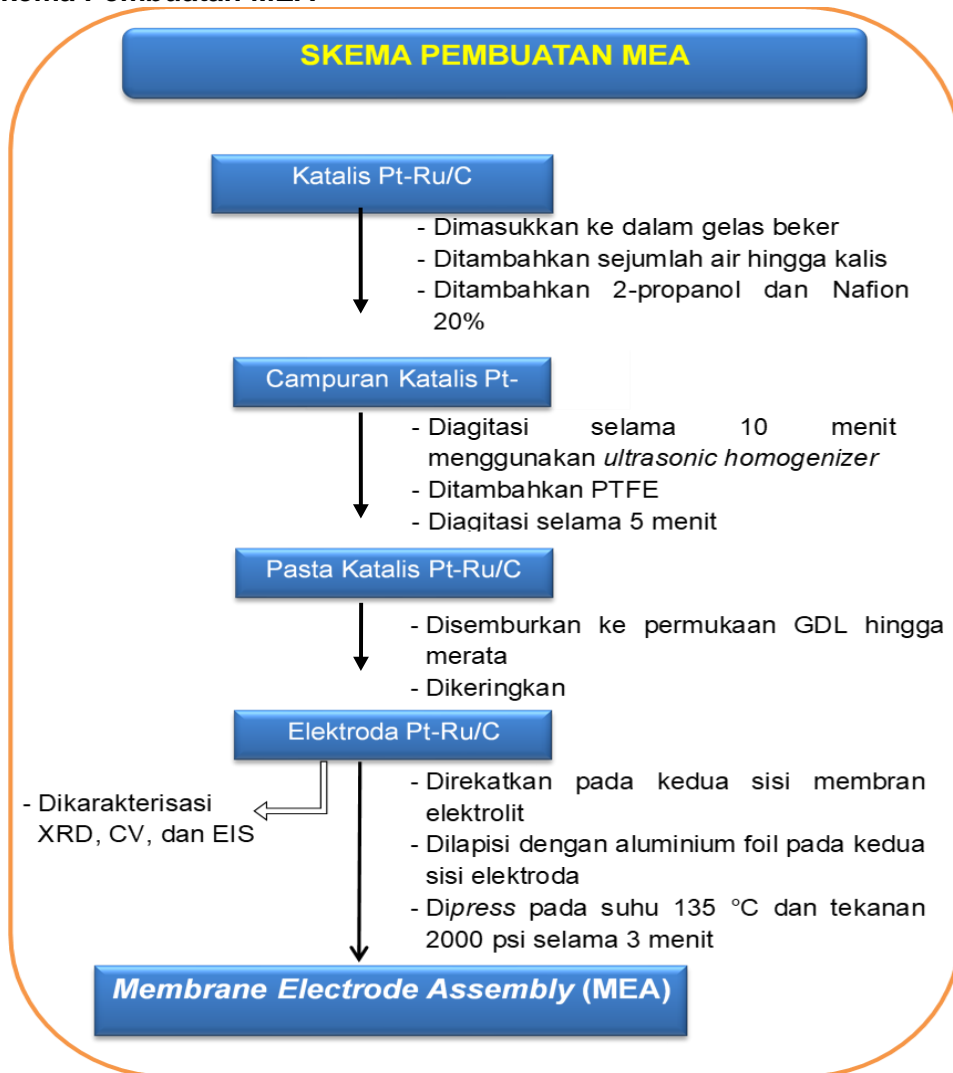
Dari data uji EIS dan setelah didapat data tahanan larutan (R_s) dan tahanan transfer (R_p), selanjutnya nilai konduktivitas dapat ditentukan dengan menggunakan rumus pada persamaan 13.

3.3.10 Rancangan Percobaan

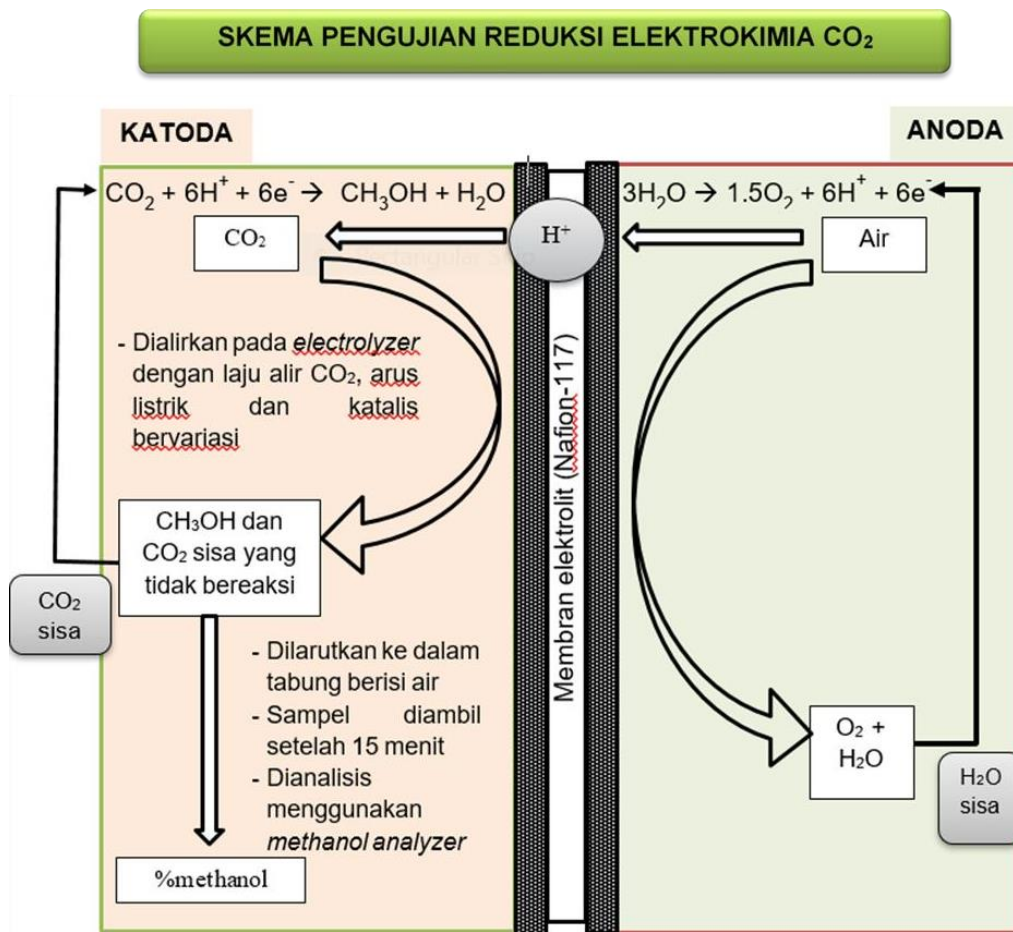
1) Skema Pembuatan GDL



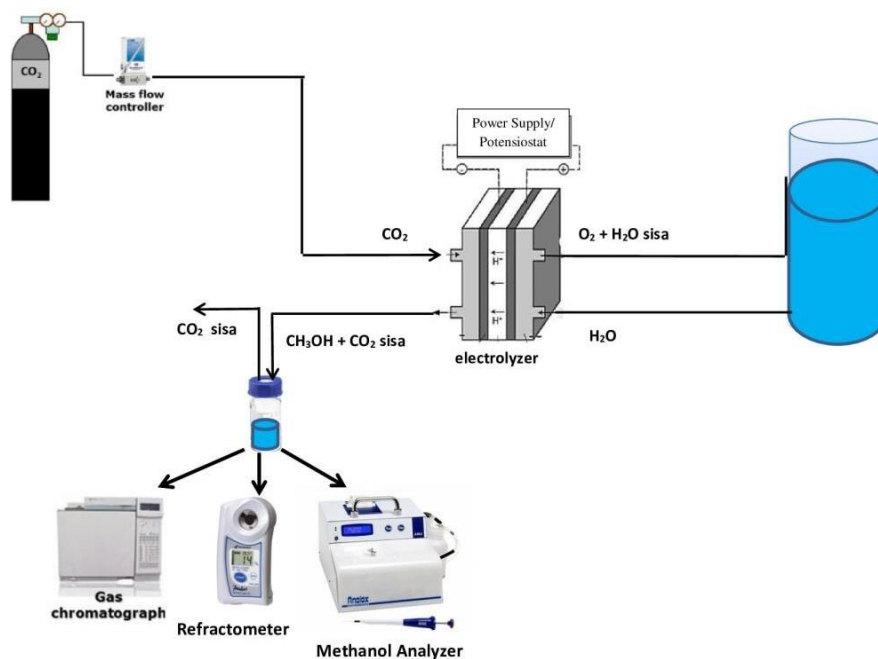
2) **Skema Pembuatan MEA**



3) Skema Pengujian Reduksi Elektrokimia CO₂



4) Desain dan Setting Peralatan



3.3.11 Skedul dan Sumber Daya yang Diperlukan

SKEDUL DAN SUMBER DAYA

No	KEGIATAN	BULAN KE-												PERALATAN/SUMBER DAYA YANG DIPERLUKAN	FASILITAS PUR	PIC
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12			
1	Pekerjaan Persiapan															
	a. Mengurus administrasi dan perizinan	■														Dedi, Dwi Hawa
	b. Persiapan pengadaan bahan	■												Dokumen pengadaan		Tim Pengadaan
	c. Desain dan setting peralatan	■												Desain peralatan, asesoris		Tim Peneliti
	d. Menyusun rancangan percobaan	■											Rancangan percobaan		Tim Peneliti	
2	Uji Skala Laboratorium dan Pengambangan Proses													Sistem Reaktor dan asesoris		Tim Peneliti
A	Pembuatan MEA															
	a. Pembuatan Elektroda dengan berbagai variasi katalis			■										Baking layer, Carbon, katalis, PTFE, Nafion, Propanol	Pembuat Electroda (Metode Dr.Blade); spray gun, ultrasonic	Dedi, Dwi dan Dea
	b. Pengaturan Elektroda pada membran			■										Elektroda, membran Nafion 117	homogenizer, Hot press, Oven,	Dedi, Dwi dan Dea
	c. set-up MEA pada electrolyser			■										Electrolyser, MEA	Furnace, HEM)	Dedi, Dwi dan Dea
B	Persiapan CO2													Tabung CO2 dan regulator	Tabung CO2	Dedi, Nirwan, Addy
C	Pengondisian rangkaian peralatan secara keseluruhan				■	■								Rangkaian Peralatan	Ruangan dan peralatan kunci	Dedi, Nirwan, Addy
D	Konversi CO2 menjadi CH3OH pada berbagai kondisi															
	a. Konversi CO2 menjadi methanol secara elektrokimia dengankatalis Pt-Ru/C, Cu2O/ZnO, dan Pd/SnO2							■	■	■	■	■	■	Katalis Pt-Ru/C, Cu2O/ZnO dam Pd/SNO2 denga berbagai konsentrasi	Mass flow Controller, bejana penampung produk.	Dedi, Dea, Nirwan, Addy
	b. Konversi dilakukan pada berbagai laju alir CO2 dan arus bervariasi							■	■	■	■	■	■	CO2, Pengukur laju, power supply	Power supply	Dedi, Dea, Nirwan, Addy
E	Analisis Produk dan penentuan rendemen methanol													Methanol Analyzer, Gas Chromatography		Dea, Dwi, Nirwan
3	Pembuatan Laporan Akhir															
	a. Pengolahan data dan pengumpulan dokumentasi												■	Data dan pengolah data (laptop dll)	Laptop, Printer	Tim peneliti
	b. Pembuatan dan presentasi laporan kemajuan penelitian												■	Laporan, bahan presentasi	Laptop, Printer	Tim peneliti
	c. Pembuatan dan presentasi laporan akhir												■	Laporan akhir, bahan presentasi	Laptop, Printer	Tim peneliti
	d. Memberikan rekomendasi hasil penelitian secara keseluruhan												■	Rekomendasi hasil penelitian		Tim peneliti

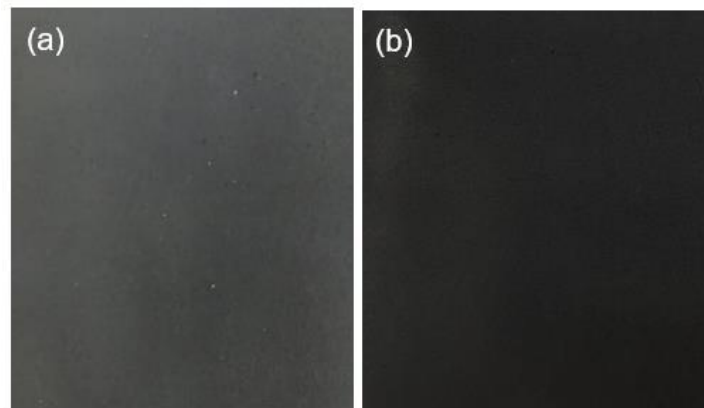
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Variasi Katalis

4.1.1 Pembuatan Elektroda dengan Berbagai Variasi Katalis

Pembuatan elektroda dilakukan dengan metode penyemprotan tinta *catalyst layer* pada GDL dengan variasi katalis Pt/C (anoda) dan Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C, serta Pd-SnO/C. Penampakan GDL dan Elektroda dapat dilihat pada gambar 6. Selanjutnya, Elektroda yang dibuat dikarakterisasi dengan menggunakan metode *X-Ray Diffractometer (XRD)*, *Cyclic Voltammetry (CV)*, *Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)*, dan *Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)*.

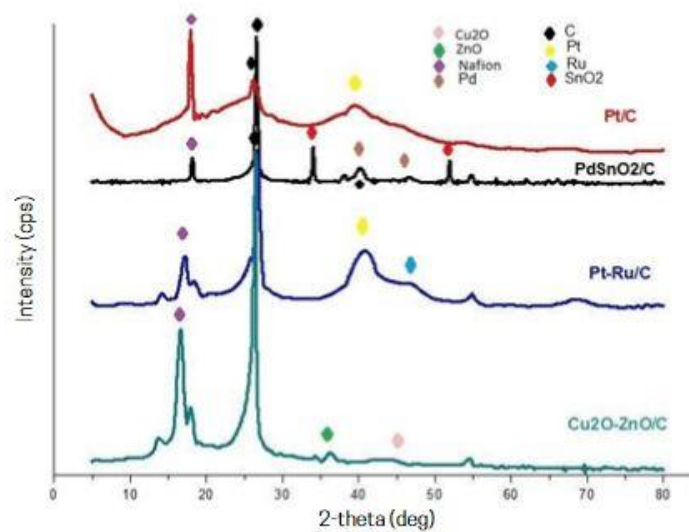


Gambar 6. (a) GDL (b) Elektroda

4.1.2 Karakterisasi Elektroda

1) *Analisa XRD*

Karakterisasi XRD dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal dari katalis yang digunakan dengan membandingkan data yang diperoleh dengan *Joint Committee on Powder Diffraction Standards (JCPDS)*. Data XRD menunjukkan puncak-puncak khas pada sudut difraksi tertentu yang mengindikasikan adanya partikel logam pada sampel. Beberapa puncak menunjukkan kemiripan dengan standar *JCPDS*. Gambar 7 menunjukkan difraktogram dari elektroda yang digunakan.



Gambar 7. Difraktogram Elektroda dengan Katalis yang Berbeda

Gambar 7 untuk elektroda dengan katalis Pt/C diperoleh puncak difraksi pada nilai $2\theta = 17,97^\circ$, $26,34^\circ$, dan $39,7^\circ$ yang menunjukkan adanya kristal Pt berdasarkan JCPDS 04- 0802, selain itu puncak yang melebar pada $2\theta = 26,34^\circ$ tidak begitu jelas teramati hal ini karena adanya struktur heksagonal dari *carbon vulcan XC-72R* yang merupakan karbon amorf (Huy et al. 2016). Difraktogram dari Pt-Ru/C dapat dilihat adanya puncak pada $2\theta = 14,47^\circ$, $17,11^\circ$, $26,73^\circ$, $40,74^\circ$, $47,02^\circ$, $54,79^\circ$, dan $68,8^\circ$, puncak difraksi pada katalis Pt-Ru sedikit bergeser ke nilai 2θ yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan difraktogram Pt/C, hal ini disebabkan karena adanya paduan dari Pt-Ru dalam katalis, sedangkan nanokristalin dari rutenium oksida terlihat dari bahu puncak yang melebar disekitar $28-35^\circ$ yang merefleksikan fase tetragonal dari RuO_2 berdasarkan JCPDS 21-1172 (Aricò et al. 2000). Difraktogram dari support (*carbon vulcan*) terlihat pada 2θ di sekitar 24° , 43° dan 79° yang dipengaruhi oleh *carbon vulcan XC-72R* (*carbon support*).

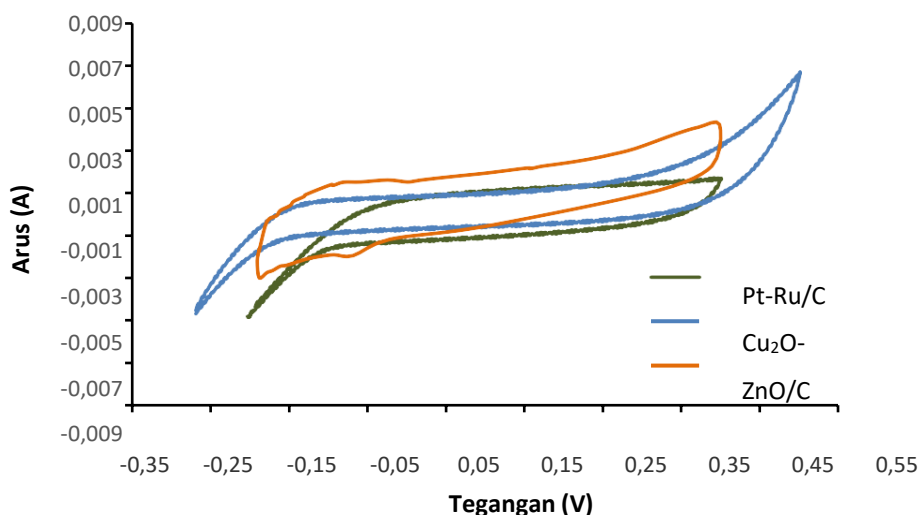
Difraktogram dari elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ diperoleh puncak difraksi yang cukup tajam dan berhimpit pada nilai $2\theta = 13,76^\circ$, $16,55^\circ$, $25,67^\circ$, $26,49^\circ$, $36,12^\circ$, $44,47^\circ$, $54,63^\circ$, dan $68,2^\circ$ yang mengindikasikan fase kubik dari Cu_2O berdasarkan JCPDS 75-1531 dan fase heksagonal ZnO berdasarkan JCPDS 36-1451 (Liu et al. 2016; Sakellis et al. 2014). Puncak yang terbentuk pada difraktogram $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ mengindikasikan sifat kekristalan yang dimiliki katalis.

Berdasarkan hasil pengukuran XRD dari elektroda Pd-SnO₂/C masih pada gambar 7 menunjukkan keberadaan Carbon (C) pada sudut difraksi 2-theta $26,16^\circ$

dan $26,65^\circ$, sedangkan pada daerah sudut difraksi $40,28^\circ$; $47,04^\circ$; dan $68,12^\circ$ merupakan peak yang menunjukkan keberadaan Palladium (Pd). Senyawa SnO_2 teridentifikasi pada sudut difraksi $54,799^\circ$.

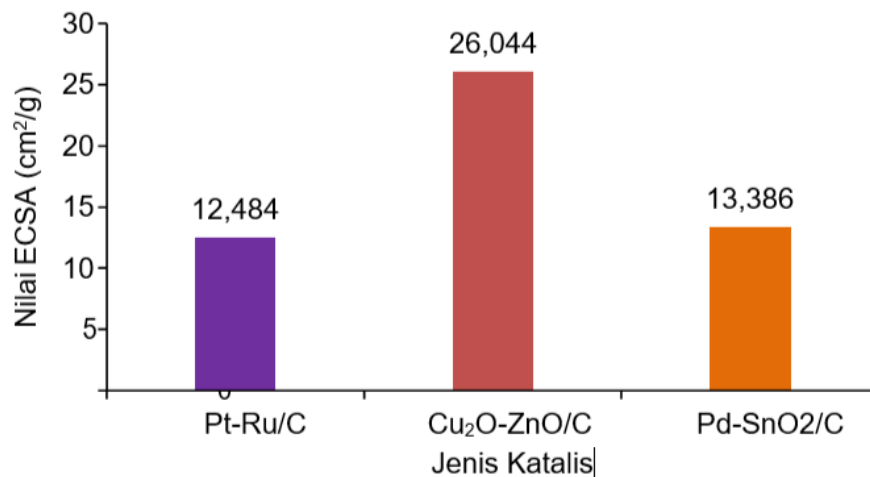
2) Analisa CV

Pengujian dengan metode *cyclic voltammetry* (CV) atau voltametri siklik dilakukan pada elektroda Pt-Ru/C, $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2\text{/C}$. Pengujian ini dilakukan untuk memperoleh nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA) yang merepresentasikan ukuran jumlah situs aktif secara elektrokimia per gram katalis, serta untuk mengetahui reaktivitas dari elektrolit dengan melihat reaksi reduksi dan oksidasi (redoks) sampel. Adanya kemungkinan reaksi lain saat reduksi-oksidasi berlangsung dapat dilihat dari voltamogramnya. Prinsip dari voltametri siklik adalah mengamati hubungan antara potensial yang diberikan terhadap arus yang terukur. Voltamogram yang dihasilkan merupakan kurva antara potensial (sumbu X) dan arus (sumbu Y). Voltamogram terdiri dari 2 puncak yaitu puncak oksidasi pada daerah arus positif dan puncak reduksi pada daerah arus negatif (Lestariningsih, Sabina, and Majid 2017). Adapun hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Voltamogram dari Setiap Elektroda

Gambar 8 menunjukkan voltamogram dari masing-masing elektroda yang didapatkan menggunakan pengukuran CV. Nilai puncak anodik dan katodik didapatkan dari hasil pengukuran beserta data-data yang digunakan dalam penentuan nilai ECSA dapat di lihat pada lampiran 18. Hasil perhitungan nilai ECSA untuk masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 9.

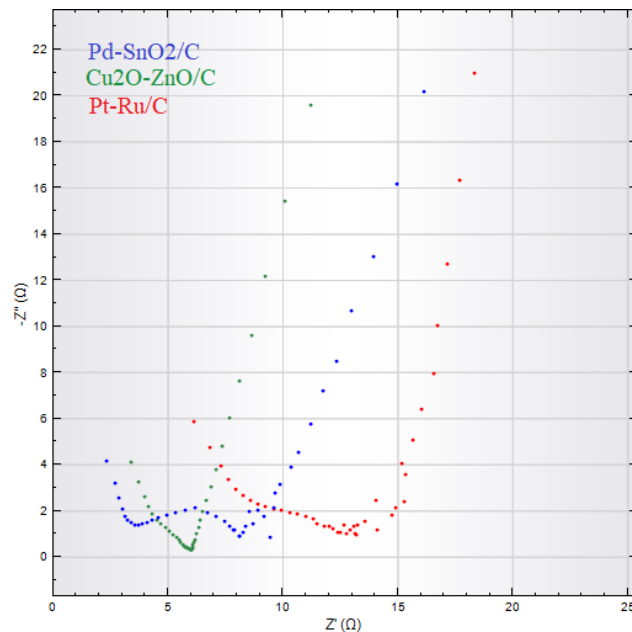


Gambar 9. Nilai ECSA Katoda dengan Katalis Bervariasi

Dari hasil ECSA didapatkan bahwa elektroda (sebagai katoda) dengan katalis Cu₂O-ZnO/C menghasilkan luasan aktif yang paling besar yaitu sebesar 26,044 cm²/g. Sedangkan elektroda dengan katalis Pt-Ru/C memiliki nilai ECSA sebesar 12,484 cm²/g dan Pd-SnO₂/C sebesar 13,386 cm²/g. Sementara itu, anoda dengan katalis Pt/C hasil pengukuran didapatkan nilai ECSA sebesar 121,076 cm²/g. Nilai ECSA yang tinggi mengindikasikan bahwa situs aktif pada permukaan elektroda terdapat dalam jumlah yang banyak, sehingga memungkinkan reaksi elektrokimia terjadi dengan optimal. Nilai ECSA juga menggambarkan *effective charge-transfer resistance* pada elektroda, dimana semakin besar nilai ECSA maka tahanannya akan semakin kecil. *Effective charge transfer resistance* berpengaruh pada kemampuan MEA dalam menghantarkan proton (Cha 1999).

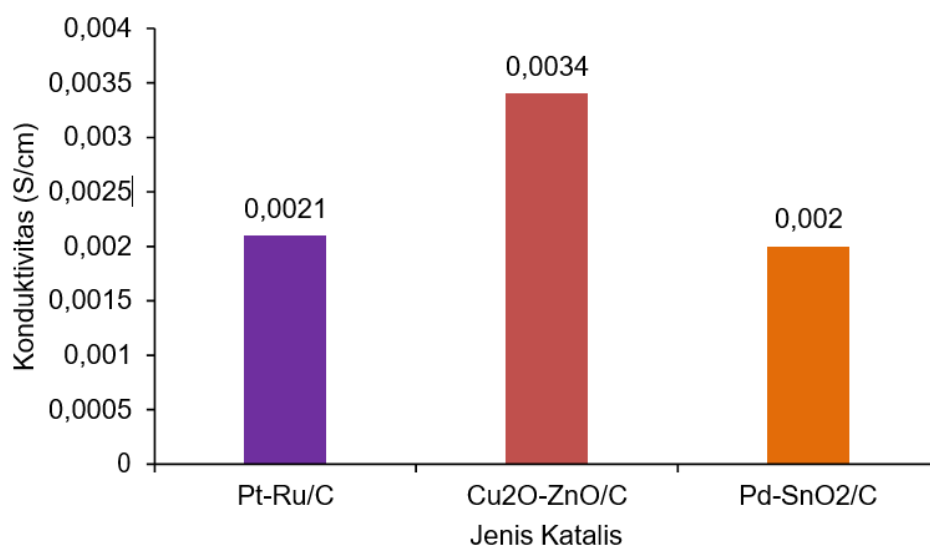
3) *Analisa EIS*

Pengukuran dengan menggunakan metode EIS digunakan untuk menentukan berbagai parameter kinerja dari elektroda, salah satunya menghitung nilai konduktivitas listrik elektroda. Kurva Nyquist sebagai dasar penentuan konduktivitas elektroda disajikan pada gambar 10.



Gambar 10. Kurva Nyquist setiap Elektroda

Berdasarkan Gambar 10 dapat diketahui bahwa elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ memiliki hambatan yang lebih kecil dibandingkan elektroda dengan katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$ dan Pt-Ru/C . Data lengkap dapat dilihat pada lampiran 18. Besarnya hambatan menunjukkan bahwa banyaknya rintangan antar muka yang mengakibatkan konduktivitas elektrik kecil.



Gambar 11. Nilai Konduktivitas Katoda dengan Katalis Bervariasi

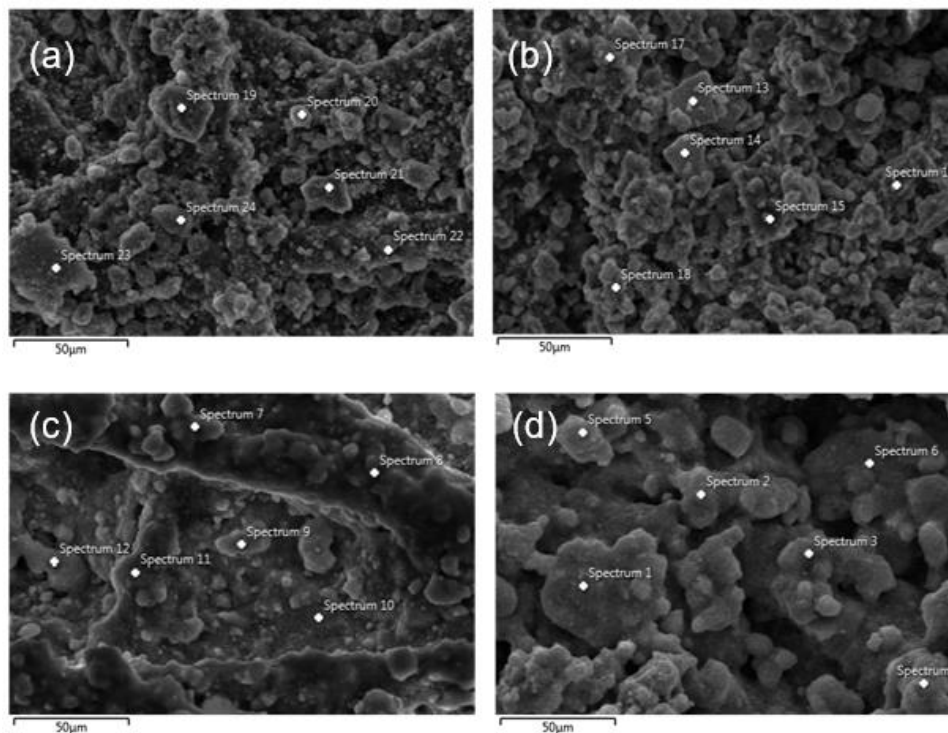
Gambar 11 menunjukkan nilai konduktivitas pada katoda dengan katalis bervariasi. Nilai konduktivitas tinggi menunjukkan kemampuan suatu elektroda

untuk menghantarkan arus listrik semakin besar. Nilai konduktivitas elektrik tertinggi dihasilkan pada katoda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ sebesar 0,0034 S/cm, sedangkan katoda dengan katalis Pt-Ru/C dan Pd-SnO₂/C mempunyai konduktivitas elektrik masing-masing sebesar 0,0021 dan 0,002 S/cm. Gabungan grafik ECSA dan Konduktivitas elektrik pada ketiga jenis elektroda ditampilkan pada lampiran 2.

4) **Analisis SEM-EDX**

Analisis menggunakan SEM-EDX dilakukan untuk mengetahui morfologi dan komposisi dari sampel yang dianalisis. Berdasarkan analisis yang dilakukan pada elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$, Pd-SnO₂/C Pt-Ru/C dan Pt/C seperti terlihat pada gambar 12 menunjukkan bahwa ukuran partikel tidak merata berkisar dari beberapa mikro sampai 50 mikrometer. Ukuran rata-rata dari partikel katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan Pd-SnO₂/C relatif lebih kecil dan merata dibandingkan katalis Pt-Ru/C dan Pt/C. Hal ini dapat disebabkan oleh karena komposit katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan Pd-SnO₂/C mendapatkan perlakuan Milling dalam proses pembuatannya, sementara katalis Pt-Ru/C dan Pt/C adalah katalis komersial.

Berdasarkan analisis SEM-EDX pada gambar 12 (Gambar lengkap pada lampiran 3), dapat dilihat bahwa unsur-unsur katalis terdeteksi dalam jumlah yang cukup besar. Selain unsur katalis, terdapat pula unsur lain seperti C yang berasal dari matriks karbon, unsur F yang berasal dari larutan nafion dan PTFE, sementara unsur O muncul dari katalis oksida yang digunakan. Unsur-unsur lain muncul sebagai pengotor yang kemungkinan berasal dari jar milling.



Gambar 12. Morfologi Elektroda Hasil Analisis SEM-EDX (a) $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$, (b) $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$, (c) Pt-Ru/C dan (d) Pt/C .

Data sebaran unsur yang terdeteksi dari analisis SEM-EDX dari masing-masing elektroda disajikan pada tabel 5 s.d. 8.

Tabel 5. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$

Statistics	C	O	F	Na	Al	Si	S	Cr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn
Max (wt %)	84.06	13.60	13.03	1.16	0.40	0.13	0.47	5.69	5.79	33.30	0.51	16.18	9.72
Min (wt %)	39.96	3.27	0.49	0.44	0.07	0.13	0.12	0.09	5.79	0.08	0.51	1.44	1.57
Average (wt %)	69.94	7.14								5.72		5.12	5.23
Standard Deviation (σ)	16.42	3.70								13.52		5.55	2.86

Tabel 6. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$

Statistics	C	O	F	Al	S	Cr	Fe	Pd	Sn
Max (wt%)	46.07	8.74	35.86	0.11	0.30	0.32	1.23	28.65	22.28
Min (wt%)	20.08	1.31	6.38	0.09	0.20	0.19	0.38	16.10	10.39
Average (wt%)	31.36	3.88	24.66		0.23		0.74	22.29	16.67
Standard Deviation (σ)	10.77	2.59	10.37		0.04		0.34	5.26	4.82

Tabel 7. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Pt-Ru/C

Statistics	C	O	F	S	K	Ru	Pt
Max (wt%)	55.86	2.89	30.97	0.81	0.12	14.61	22.92
Min (wt%)	35.20	1.73	19.29	0.48	0.10	4.52	10.24
Average (wt%)	48.75	2.16	24.55	0.66		7.93	15.92
Standard Deviation (σ)	7.73	0.48	4.21	0.12		3.67	4.91

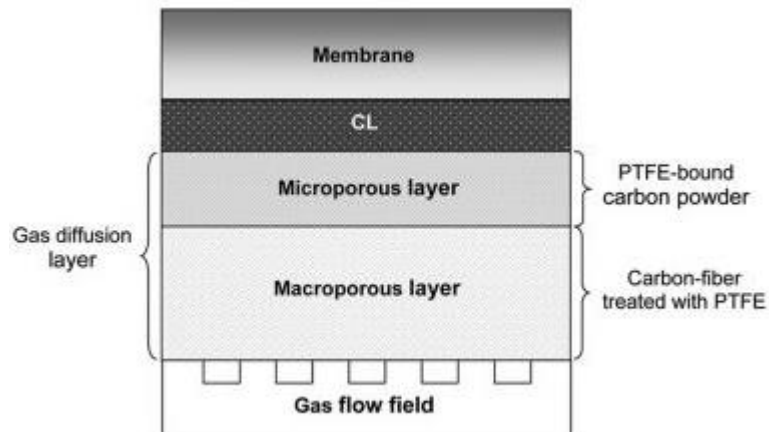
Tabel 8. Data Unsur yang Terdeteksi pada Analisa SEM-EDX dari Katalis Pt/C

Statistics	C	O	F	S	Pt
Max (wt%)	62.12	2.33	15.45	0.76	46.37
Min (wt%)	46.77	1.77	6.10	0.40	25.20
Average (wt%)	56.66		10.32		31.28
Standard Deviation (σ)	5.95		3.56		7.69

Berdasarkan hasil karakterisasi elektroda dengan katalis katoda Pt-R/C, $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dan $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$, maka elektroda yang memiliki kinerja terbaik adalah elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ karena memiliki permukaan yang lebih homogen dilihat dari bentuk partikel yang relatif lebih kecil. Ukuran partikel yang besardapat mengurangi aktivitas katalitik dari elektroda sehingga dapat memicu penurunan kinerja dari elektroda tersebut.

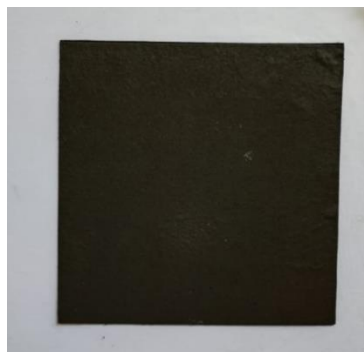
4.1.3 Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA)

Membrane Electrode Assembly (MEA) sebagai tempat terjadinya konversi elektrokimia CO_2 menjadi metanol terdiri atas dua buah elektroda (anoda dan katoda) yang mengapit membran elektrolit yang dalam hal ini menggunakan membran Nafion-117. Proses pembuatan MEA dilakukan dengan proses penekanan panas menggunakan peralatan hot press pada suhu 135°C dan tekanan 2000 psi. Elektroda terdiri dari *backing layer* yang berupa kertas karbon, kemudian dilapisi dengan *Micro Porous Layer* (MPL) yang kemudian disebut dengan *Gas Diffusion Layer* (GDL), dan *catalyst layer*. MPL dibuat dari campuran antara *carbon vulcan XC-72*, PTFE, ammonium bikarbonat, 2-propanol yang diaduk dengan *ultrasonic homogenizer* agar partikel-partikel dapat terpecah melalui getaran yang dihasilkannya sehingga dapat larut secara sempurna dan partikel dapat menempel dengan baik pada pori-pori kertas karbon. Komponen lapisan pada elektroda dapat dilihat pada gambar 13.



Gambar 13. Komponen Lapisan Elektroda (Majlan, dkk., 2018)

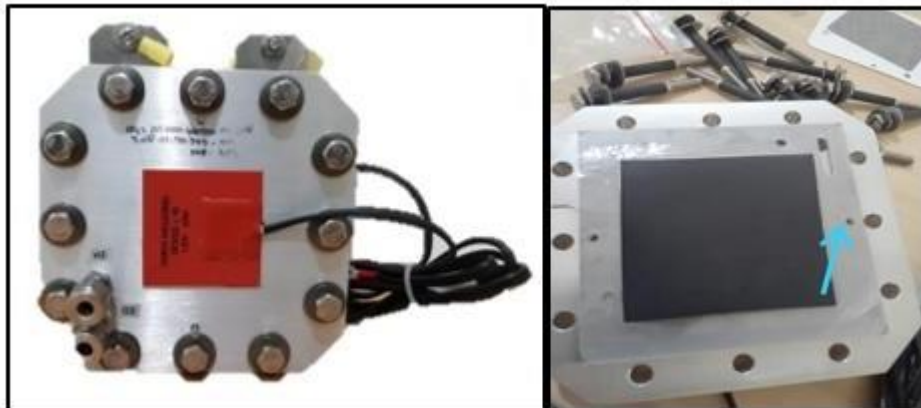
Pada penelitian ini, katalis yang digunakan pada *catalyst layer* di anoda adalah Pt/C 40%b/b, sementara di katoda ada tiga jenis katalis yang digunakan, yaitu katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C. Penggunaan katalis yang beragam untuk melihat katalis mana yang dapat menghasilkan produk metanol terbanyak pada kondisi yang sama. MEA yang dihasilkan dapat dilihat pada gambar 14



Gambar 14. *Membrane Electrode Assembly* (MEA)

4.1.4 Set-up MEA pada Elektroliser

MEA yang sudah dibuat dipasang pada elektroliser dan melakukan kondisioning peralatan. Bentuk elektroliser dan posisi MEA dalam elektroliser disajikan pada Gambar 15.

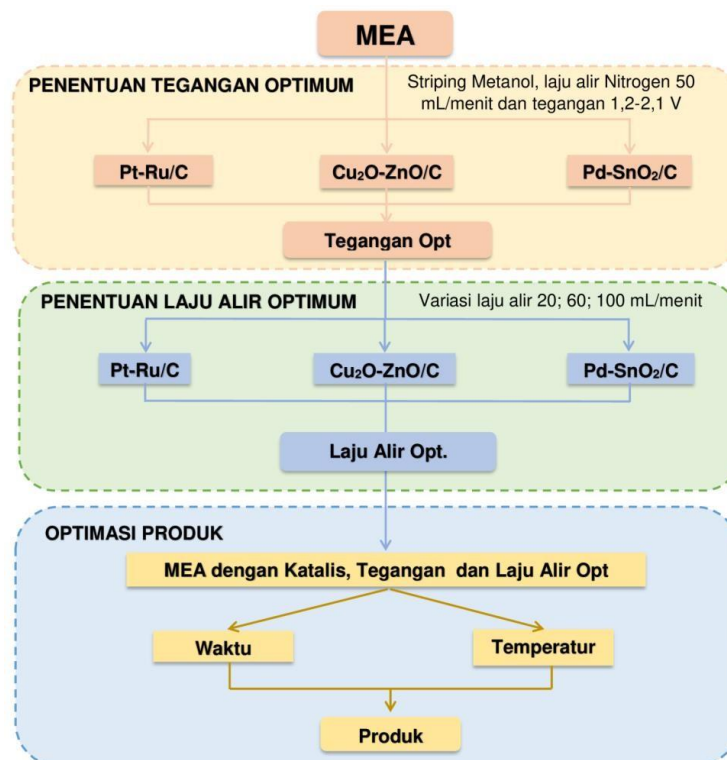


Gambar 15. Elektroliser dan posisi MEA pada Elektroliser

Elektroliser mempunyai dua ruang masing-masing ruang katoda dan anoda yang dipisahkan dengan MEA. Untuk mengatasi kebocoran, pada kedua sisi ruang anoda dan katoda dilapisi dengan gasket.

4.1.5 Proses Konversi CO₂ Menjadi Metanol pada Berbagai kondisi

Proses konversi CO₂ menjadi metanol pada berbagai kondisi dapat digambarkan pada diagram alir seperti pada gambar 16.

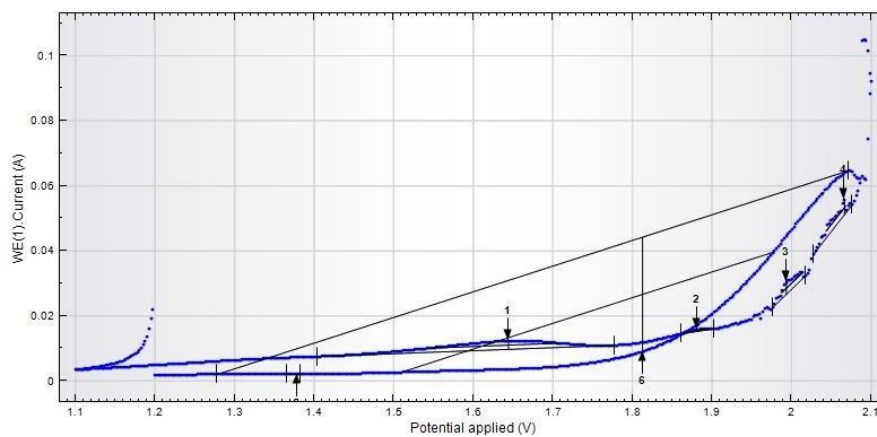


Gambar 16. Diagram Alir Proses Konversi CO₂ Menjadi Metanol dan Optimasinya

4.1.5.1 Penentuan Tegangan Optimum

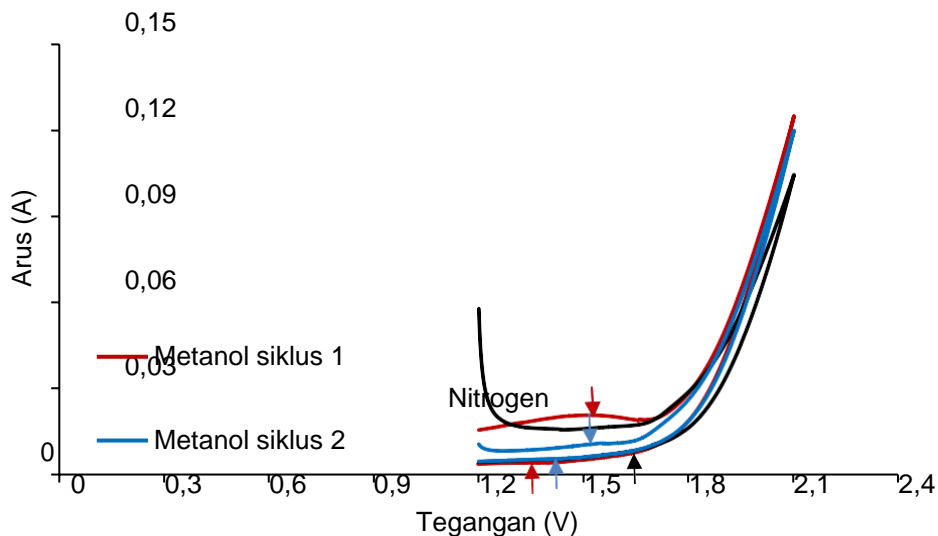
Penentuan tegangan optimum dilakukan dengan metode stripping metanol, yang manauap metanol dengan gas pembawa N_2 dialirkan pada ruang katoda electrolyser pada rentang tegangan 1,2 – 2,1 V yang diatur menggunakan alat potensiostat/galvanostat Autolab PGSTAT 204 Metrohm (Shironita et al. 2013a). Pemunculan puncak anodik pada voltammogram menunjukkan aktivitas oksidasi metanol menghasilkan metanal atau asam metanoat. Penentuan tegangan optimum dengan menggunakan metode stripping metanol dilakukan selama 2 jam dengan laju alir gas 60 mL/menit.

Hasil penentuan tegangan optimum menggunakan metode stripping dengan katalis Cu_2O-ZnO/C pada katoda ditunjukkan pada gambar 17.



Gambar 17. Penentuan Tegangan Optimum Elektrolisis CO_2 dengan Metode *Stripping* Metanol pada MEA yang mengandung katalis Cu_2O-ZnO/C

Berdasarkan hasil *stripping* metanol pada Gambar 19 diperoleh puncak pada tegangan 1,64 V yang menunjukkan adanya metanol. Penentuan tegangan optimum ini didasarkan pada munculnya puncak arus pada kurva sebagai respon dari metanol yang disuplai bersamaan dengan gas nitrogen. Untuk memastikan bahwa metanol berada pada tegangan tersebut, maka dilakukan verifikasi dengan menggunakan gas nitrogen murni tanpa kontaminasi metanol. Hasil verifikasi *stripping* metanol dapat dilihat pada Gambar 18.



Gambar 18. *Stripping* Metanol Cu₂O-ZnO/C (H₂O)

Berdasarkan Gambar 18 terlihat bahwa nitrogen tidak memiliki puncak pada daerah 1,64 V seperti ditunjukkan oleh metanol. Hal ini menunjukkan bahwa metanol memiliki tegangan operasional pada 1,64 V. Hal yang sama terjadi pada elektroda dengan katalis Pt-Ru/C dan Pd-SnO₂/C yang menunjukkan tegangan optimum pada daerah sekitar 1,6 V (data selengkapnya pada lampiran 6). Berdasarkan Tabel 1 (Hazarika and Manna 2019), tegangan teoritik konversi CO₂ menjadi metanol juga terjadi pada tegangan 1,61 V.

Berdasarkan hasil stripping metanol, didapatkan tegangan optimum untuk konversi CO₂ menjadi metanol dengan metode reduksi elektrokimia terjadi pada tegangan 1,6 V.

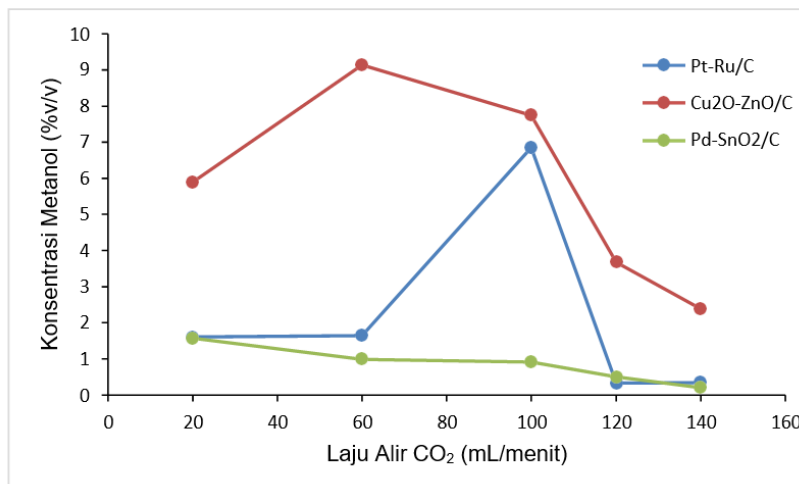
4.1.5.2 Penentuan Laju Alir CO₂ Optimum

Setelah dilakukan *stripping* metanol untuk menentukan tegangan optimum, selanjutnya dilakukan pengujian laju alir menggunakan power supply pada tegangan optimum 1,6 V untuk melihat kandungan metanol hasil konversi CO₂ dengan menggunakan katalis Pt-Ru/C, Cu₂O-ZnO/C dan Pd-SnO₂/C.

Pengujian kandungan metanol dari hasil konversi CO₂ sebagai fungsi dari laju alir dilakukan dengan memvariasikan laju alir CO₂ pada 20; 60; 100; 120 dan 140 mL/menit yang diatur menggunakan *Mass Flow Controller* (MFC). Pengujian dilakukan selama 2 jam. Produk konversi CO₂ selanjutnya diukur dengan menggunakan GC-MS untuk menentukan persentase kandungan metanol (Gambar 19).

Perhitungan kuantitas atau kandungan metanol dalam sampel dengan

metode GC dilakukan dengan menghitung peak area dari sampel metanol dibandingkan dengan peak area propanol 20% sebagai standar dengan metode *spike*. Metode *spike* ini berguna untuk mengeliminir pengaruh matriks air. Sebelumnya telah dicoba dilakukan metode *spike* dengan menggunakan metanol, akan tetapi tidak berhasil karena puncaknya tidak terpisah.



Gambar 19. Persentase Metanol Hasil Konversi CO₂ Menggunakan Berbagai Katalis pada Laju Alir yang Bervariasi

Gambar 19 memperlihatkan persentase metanol dari konversi CO₂ menggunakan MEA dengan berbagai katalis pada laju alir bervariasi yang menunjukkan persentase metanol optimum didapatkan dari MEA dengan katalis Cu₂O-ZnO/C sebesar 9,14% v/v dengan laju alir CO₂ 60 mL/menit dengan arus listrik terbaca 0,75 A (15,3 mA/cm²), pada katalis Pt-Ru/C laju alir optimum pada 100 mL/menit sebesar 6,85% dengan arus 0,5A (densitas arus 10,20 mA/cm²) (data densitas arus selengkapnya pada lampiran 12) dan pada katalis Pd-SnO₂ laju alir optimum pada 20 mL/menit sebesar 1,57 % v/v. Jika dilihat dari persentase metanol hasil konversi CO₂ untuk setiap katalis mempunyai hasil yang berbeda. Masing-masing katalis memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda sehingga respon yang diberikan juga tentu akan berbeda pula (Ma et al. 2009). Walaupun laju alir CO₂ optimum dari berbagai katalis tidak sama, akan tetapi produksi metanol tertinggi didapatkan dari konversi CO₂ dengan MEA yang mengandung katalis Cu₂O-ZnO/C dengan laju alir 60 mL/menit dengan arus listrik terbaca 0,75 A (densitas arus 15,3 mA/cm²). Densitas arus menunjukkan jumlah arus yang mengalir atau digunakan untuk reaksi per satuan luas. Secara umum, proses konversi akan berjalan optimum jika densitas arusnya tinggi. Akan tetapi,

densitas arus untuk proses konversi CO₂ menjadi metanol biasa terjadi pada rentang 16 s.d. 24 mA/cm² (Merino-Garcia, Albo, and Irabien 2017). Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan densitas arus dan optimalisasi produk metanol adalah dengan menaikkan pemuatan katalis.

Berdasarkan hasil pengukuran GC-MS pada MEA dengan katalis Cu₂O-ZnO/C pada laju alir 120 dan 140 mL/menit menunjukkan bahwa persentase metanol menurun dengan bertambahnya laju alir CO₂. Hal ini terjadi dapat disebabkan oleh pembentukan asam formiat yang lebih dominan dibandingkan pembentukan metanol (García et al. 2018). Selain itu, peningkatan laju alir CO₂ dapat menyebabkan terganggunya difusi CO₂ ke MEA karena pengaruh fluks aliran CO₂. Seperti diketahui, arah difusi CO₂ ke MEA tegak lurus dengan arah fluks aliran CO₂. Pengaruh laju alir yang diberikan pada MEA dengan katalis Cu₂O-ZnO/C, Pt-Ru/C dan Pd-SnO₂/C ini menunjukkan bahwa katalis Cu₂O-ZnO/C merupakan katalis yang lebih banyak dalam memproduksi metanol pada konversi CO₂ melalui proses reduksi elektrokimia.

Penurunan persentase metanol yang cukup signifikan terjadi pada katalis Pt-Ru/C dengan laju alir CO₂ 120 dan 140 mL/menit. Hal ini dikarenakan pada laju di atas 100 mL/menit, arus yang dihasilkan menurun dari 0,5 A (10,2 mA/cm²) menjadi 0,33 A (6,7 mA/cm²) pada laju alir 120 mL/menit dan terus mengalami penurunan pada laju alir 140 mL/menit hingga 0,03 A (0,6 mA/cm²). Penurunan arus ini mengakibatkan pembentukan metanol yang tidak optimal karena kemungkinan yang terbentuk adalah gas karbon monoksida (CO) yang merupakan intermediate dari pembentukan metanol. Gas CO juga merupakan produk utama yang dihasilkan oleh katalis berbasis platinum (Shironita et al. 2013b).

Produk metanol yang dihasilkan dari MEA yang menggunakan katalis Pd-SnO₂/C tergolong lebih rendah dibandingkan dengan jenis katalis yang lainnya. Salah satu faktor yang mempengaruhi hal tersebut yakni sisi aktif katalis dan konduktivitas elektrik yang dimiliki oleh katalis Pd-SnO₂/C yang rendah sehingga berdampak pula pada hasil konversi CO₂ menjadi metanol yang rendah. Selain itu, persentase metanol juga mengalami penurunan dengan bertambahnya laju alir CO₂. Hal ini diindikasikan bahwa dengan meningkatnya laju alir terjadi erosi atau pengikisan lapisan katalis Pd-SnO₂/C

Selain pengukuran menggunakan GC-MS, untuk memverifikasi kondisi optimum laju alir CO₂ dengan katalis Cu₂O-ZnO/C, maka dilakukan juga

penentuan kandungan produk metanol melalui perhitungan efisiensi Coulomb dari proses elektrolisis. Perhitungan kandungan metanol dalam sampel melalui perhitungan efisiensi Coulomb dilakukan dengan metode CV sebagai pembanding metode GC yang sudah baku. Walaupun hasilnya tidak persis sama, hasil perhitungan kandungan metanol dengan metode CV menunjukkan hasil yang relevan. Penentuan kandungan metanol dengan metode CV dihitung berdasarkan Efisiensi Coulomb/Efisiensi faradic sesuai dengan persamaan (16) dan (17) sebagai berikut:

$$E_c = Q_3/Q_1 \times 100 \dots\dots\dots(16) \text{ (Shironita, 2013)}$$

$$E_c = \frac{nxFx[MeOH]}{ixt} \dots\dots\dots(17)$$

Metode Efisiensi Coulomb dilakukan dengan terlebih dahulu mengalirkan gas N₂ pada kedua sisi ruang anoda dan katoda dengan laju alir 50 mV/s. Selanjutnya pada sisi katoda dialirkan gas CO₂ dan H₂O pada sisi anoda dengan laju alir 60 mL/menit. Pengukuran efisiensi coulomb diawali dengan melalui metode *Cyclic Voltammetry* (CV) untuk mengetahui puncak anodik dan katodik pada MEA. Hasil pengukuran digunakan untuk menghitung Q1 dan Q2 yang direpresentasikan sebagai puncak anodik dan Q3 sebagai puncak katodik. Data hasil perhitungan nilai efisiensi coulomb dan GC-MS pada variasi laju alir dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Uji Analisa Untuk Penentuan Kandungan Metanol Dalam Sampel

No.	Kode Sampel	Kondisi Operasi	Peak Area		% Methanol dalam sampel	
			Methanol	Propanol	(GC-MS)	Effisiensi Faraday
1	A91	Katalis Cu ₂ O-ZnO/C, 0,02 L/menit	2,824,379,260	9,585,338,983	5,89	0,03
2	A93	Katalis Cu ₂ O-ZnO/C, 0,06 L/menit	2,828,384,295	6,187,069,464	9,14	5,28
3	A92	Katalis Cu ₂ O-ZnO/C, 0,1 L/menit	3,369,595,524	8,711,521,071	7,74	0,12

Berdasarkan hasil penelitian variasi tegangan dan laju alir CO₂ didapatkan tegangan optimum untuk konversi CO₂ menjadi metanol dengan metode reduksi

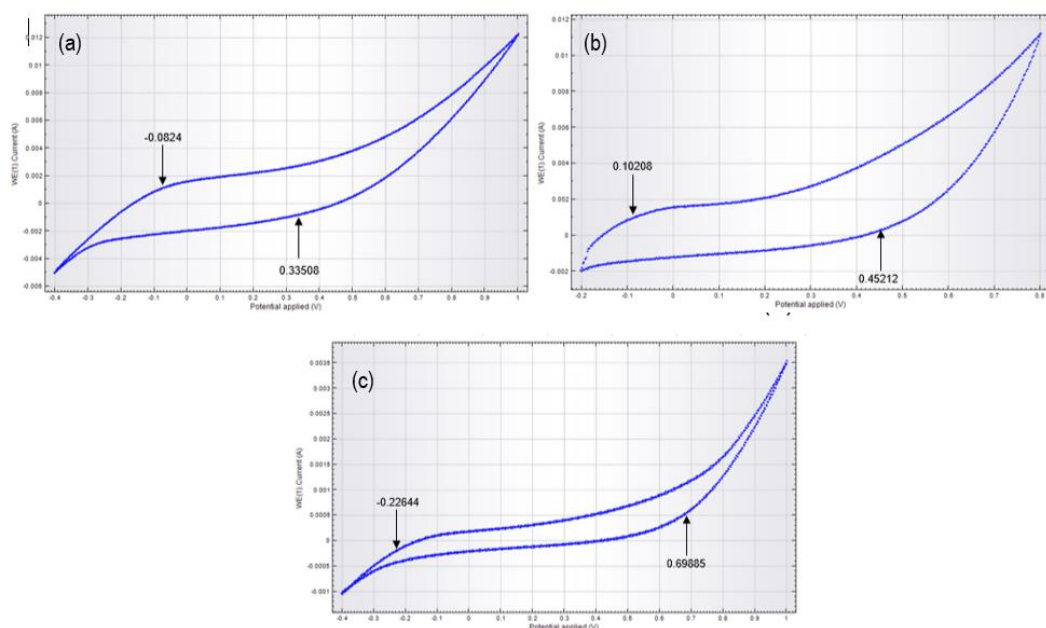
elektrokimia untuk berbagai katalis adalah pada tegangan 1,6 V dan laju alir CO₂ terbaik untuk MEA dengan katalis Cu₂O-ZnO/C adalah 60 mL/meit. Kondisi optimum ini menjadi parameter tetap penentuan variasi percobaan selanjutnya.

4.2 Pengaruh Variasi Loading Katalis terhadap Konsentrasi Metanol

Sebelum dilakukan pengujian produksi metanol pada loading katalis Cu₂O-ZnO/C bervariasi (2, 3 dan 4 mg/cm²), dilakukan karakterisasi elektroda yang meliputi analisis CV dan EIS, dilanjutkan pengujian produksi metanol.

4.2.1 Analisis *Cyclic Voltammetry* (CV)

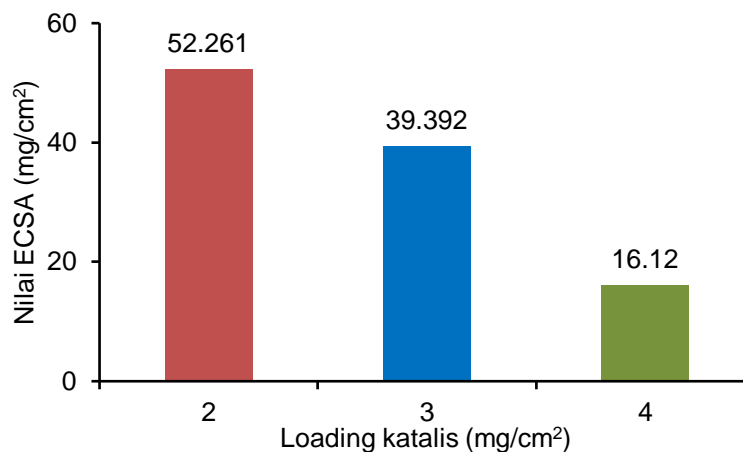
Pengujian dengan metode *cyclic voltammetry* (CV) dilakukan pada elektroda Cu₂O-ZnO/C dengan variasi loading katalis 2, 3 dan 4 mg/cm². Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh loading katalis terhadap produk metanol yang dihasilkan melalui reaksi reduksi elektrokimia. Hasil pengukuran ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Voltamogram Variasi Loading Katalis (a) 2 mg/cm², 3 (b) mg/cm² dan (c) 4 mg/cm²

Gambar 20 menunjukkan perbedaan bentuk kurva voltamogram pada masing-masing variasi loading katalis Cu₂O-ZnO/C. Semakin besar loading katalis maka puncak kurva yang diperoleh semakin kecil. Hal ini menunjukkan bahwa situs aktif katalis semakin kecil dengan bertambahnya loading katalis. Situs aktif katalis dapat diketahui berdasarkan perhitungan nilai *Electrochemical Surface Area* (ECSA). Grafik yang menggambarkan pengaruh loading katalis terhadap nilai

ECSA dapat dilihat pada gambar 21.

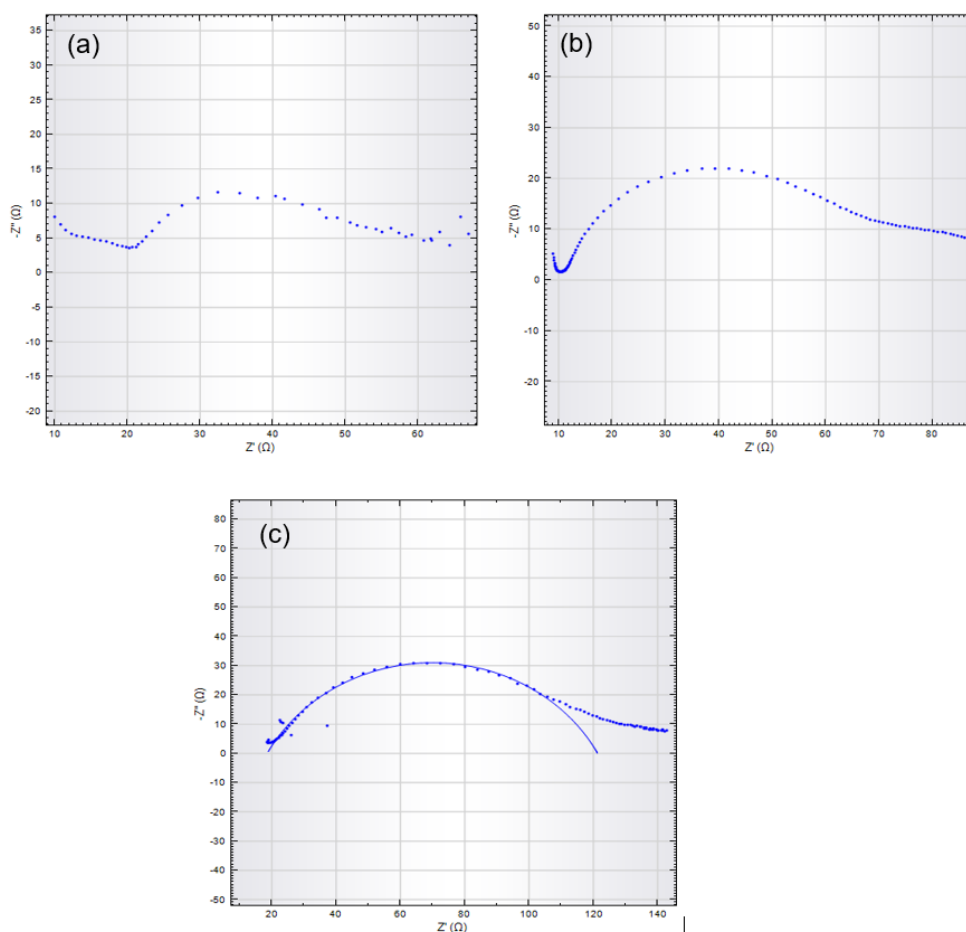


Gambar 21. Nilai ECSA Elektroda dengan Loading Katalis Bervariasi

Berdasarkan gambar 21, elektroda dengan katalis 2 mg/cm² menunjukkan nilai ECSA yang lebih besar dibandingkan dengan loading katalis 3 dan 4 mg/cm². Penurunan nilai ECSA dengan meningkatnya loading katalis ini dapat disebabkan oleh adanya penumpukan katalis/aglomerasi karena jumlah katalis yang semakin banyak dengan luas permukaan yang sama. Aglomerasi akan mengurangi situs aktif katalis karena sebaran katalis tidak merata, sehingga dapat menjadi salah satu faktor yang menyebabkan menurunnya kinerja elektroda atau MEA.

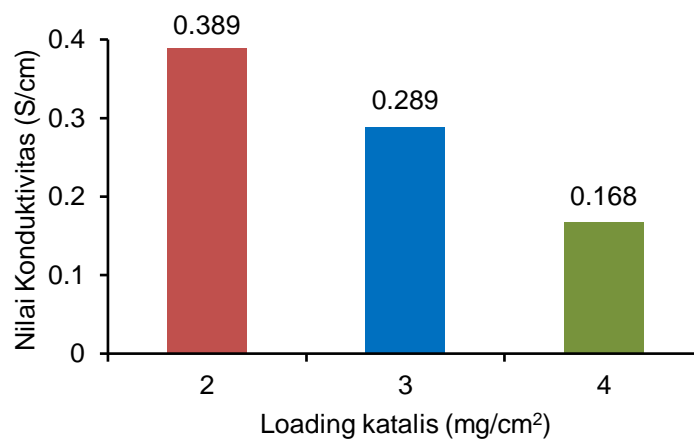
4.2.2 Analisis *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS)

Analisis dengan menggunakan metode EIS dilakukan untuk mengetahui besarnya kemampuan suatu elektroda dalam menghantarkan listrik dalam hal ini ditentukan dengan pengukuran nilai konduktivitas. Nilai konduktivitas dapat dihitung melalui proses *fitting* kurva *nyquist*. Kurva *nyquist* masing-masing elektroda dengan variasi loading katalis disajikan pada gambar 22.



Gambar 22. Kurva *Nyquist* elektroda dengan loading katalis bervariasi

Gambar 22 menunjukkan bahwa impedansi terkecil dimiliki oleh elektroda dengan loading katalis 2 mg/cm^2 digambarkan pula dengan bentuk puncak kurva yang lebih rendah. Impedansi berbanding terbalik dengan konduktivitas sehingga semakin kecil impedansi yang dimiliki suatu elektroda, maka semakin besar nilai konduktivitas seperti yang disajikan dalam grafik pada gambar 23.



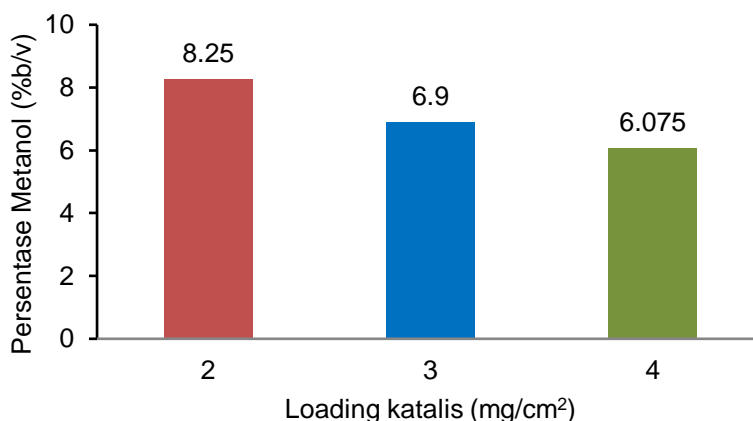
Gambar 23. Nilai Konduktivitas Elektroda dengan Loading Katalis Bervariasi

4.2.3 Konversi CO₂ menjadi Metanol dengan Berbagai Variasi Katalis

Metanol Analyzer AM5 merupakan alat yang digunakan dalam pengukuran konsentrasi metanol. Konsentrasi metanol ditentukan oleh oksidasi enzimatik dengan buffer alkohol oksidase. Dalam kondisi terkontrol, laju pengangkutan/pengambilan oksigen dari buffer berbanding lurus dengan konsentrasi metanol. Prinsip alat *Metanol Analyzer* AM5 dapat dilihat pada persamaan 18.



Masing-masing MEA dengan berbagai loading katalis berukuran 7X7 cm² dipasangkan pada elektroliser komersial kemudian CO₂ dialirkan dengan laju alir 60 mL/menit dengan H₂O di anoda dengan tegangan 1,6 V selama 2 jam. Hasil pengukuran menggunakan *Metanol Analyzer* AM5 dapat dilihat pada Gambar 24.



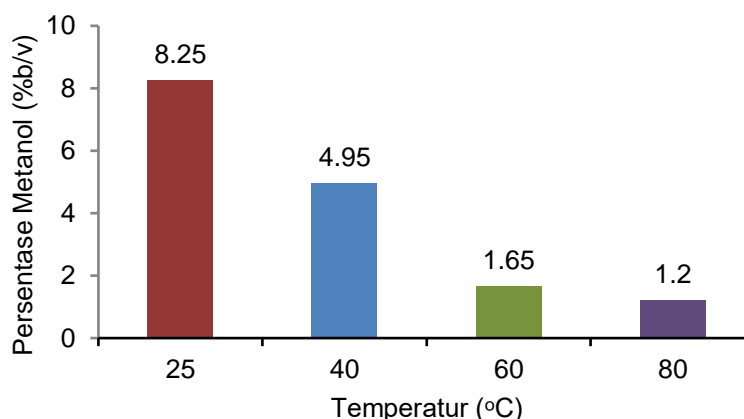
Gambar 24. Persentase metanol pada loading katalis bervariasi

Semakin tinggi loading katalis, densitas arus makin tinggi (Albo, 2015b). Akan tetapi, pada densitas arus terlampaui tinggi, produk dominan adalah produk lain (Albo, 2015a; Gracia, 2018). Berdasarkan analisis CV dan EIS serta pengukuran menggunakan *Metanol Analyzer* AM5 menunjukkan bahwa loading katalis 2 mg/cm² merupakan elektroda dan MEA terbaik sehingga pada pengujian dengan variasi temperatur dan waktu digunakan MEA dengan loading katalis 2 mg/cm².

4.2.4 Pengaruh Variasi Temperatur terhadap Konsentrasi Metanol

Temperatur merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kecepatan reaksi dan mempengaruhi hasil reaksi. Proses konversi CO₂ menjadi metanol dilakukan dengan memvariasikan temperatur pada loading katalis 2 mg/cm². Hasil

persentase metanol dengan variasi temperatur dapat dilihat pada gambar 25.



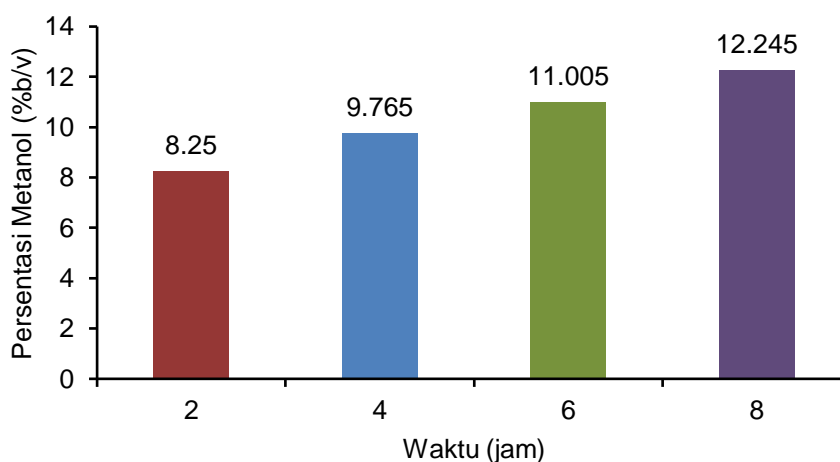
Gambar 25. Persentase metanol pada berbagai variasi temperatur

Berdasarkan hasil eksperimen, persentase produk metanol menurun dengan naiknya temperatur. Hal ini dikarenakan reaksi konversi CO_2 menjadi CH_3OH adalah reaksi eksoterm (sesuai persamaan 19), maka reaksi akan berlangsung efektif (bergerak ke arah pembentukan metanol) pada suhu rendah seperti pada persamaan reaksi 19.

$\text{CO}_{2(g)} + 2\text{H}_2\text{O}_{(l)} \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}_{(l)} + 3/2 \text{O}_2$; $H^{\circ} = -727 \text{ kJ mol}^{-1}$, $G^{\circ} = -703 \text{ kJ mol}^{-1}$ (19)
(Ganesh Ibram, 2014).

4.2.5 Pengaruh Variasi Waktu terhadap Konsentrasi Metanol

Variasi waktu konversi CO_2 menjadi metanol dilakukan untuk melihat pengaruh jumlah suplai gas CO_2 terhadap produk yang dihasilkan. Data hasil *running* dengan variasi waktu operasi disajikan dalam bentuk grafik pada gambar 26.



Gambar 26. Persentase metanol pada berbagai variasi waktu

Berdasarkan gambar 28 dapat dilihat bahwa produksi metanol berbanding

lurus dengan bertambahnya waktu elektrolisis. Meskipun demikian, peningkatan persentase metanol tidak terjadi secara signifikan karena kinerja MEA semakin lama berkurang sehingga kemampuannya dalam mengkonversi CO₂ menjadi metanol juga semakin berkurang

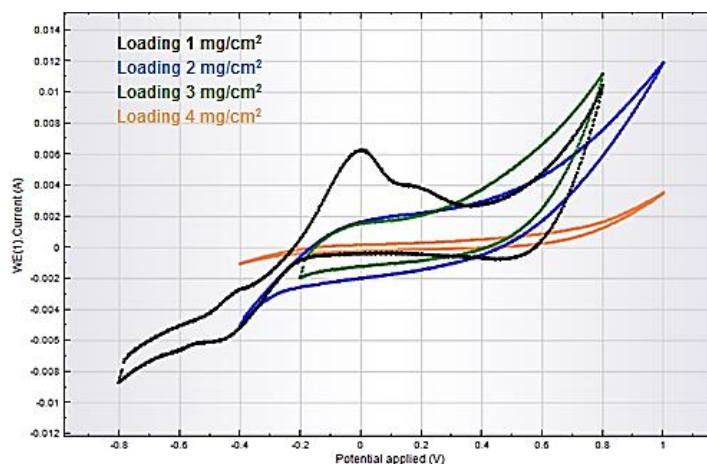
4.2.6 Penggunaan MEA dengan loading katalis Cu₂O-ZnO/C 1 mg/cm²

Berdasarkan data variasi loading katalis, didapatkan data bahwa produksi metanol makin baik dengan menurunnya loading katalis. Oleh karena itu, berdasarkan kesepakatan dari diskusi bulanan dilakukan uji coba produksi metanol pada konsentrasi yang lebih rendah (dalam hal ini 1 mg/cm²). Sebelum dilakukan pengujian produksi metanol, elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm² dikarakterisasi dan diuji kinerja elektrokimianya. Penggunaan katalis pada berbagai variasi loading akan mempengaruhi produksi methanol. Akan tetapi, penggunaan katalis akan mencapai titik optimum. Semakin sedikit loading katalis yang ditambahkan, makin kesulitan untuk memfasilitasi reaksi, akan tetapi, pada loading katalis terlampaui tinggi akan menyebabkan terjadinya aglomerasi katalis yang akan menurunkan fungsionalitas dari katalis (Albo et al. 2015).

4.2.6.1 Karakterisasi Elektroda dengan Loading Katalis 1 mg/cm²

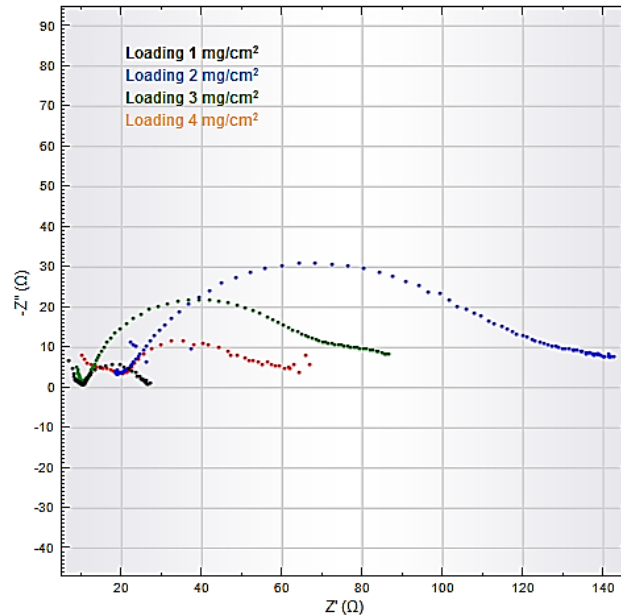
1) Analisis CV dan EIS

Analisis CV pada elektroda Cu₂O-ZnO/C dengan loading katalis 1 mg/cm² menunjukkan puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan pada elektroda dengan loading katalis 2, 3 dan 4 mg/cm². Kurva voltamogram dari pengukuran CV dapat dilihat pada gambar 27.



Gambar 27. Voltamogram elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm²

Selain dari analisis CV, data lain yang menunjukkan bahwa loading katalis 1 mg/cm² memiliki kinerja yang lebih baik adalah dengan melakukan analisis EIS melalui perhitungan nilai konduktivitas. Kurva *nyquist* elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm² dapat dilihat pada gambar 28.



Gambar 28. Kurva *Nyquist* elektroda dengan loading katalis 1 mg/cm²

Data-data yang telah diperoleh menunjukkan bahwa elektroda Cu₂O-ZnO/C dengan loading katalis 1 mg/cm² lebih unggul dibandingkan dengan variasi loading katalias elektroda Cu₂O-ZnO/C lainnya. Perbandingan hasil karakterisasi elektroda Cu₂O-ZnO/C dengan loading katalis 1 dan 2 mg/cm² dapat dilihat dalam tabel 10.

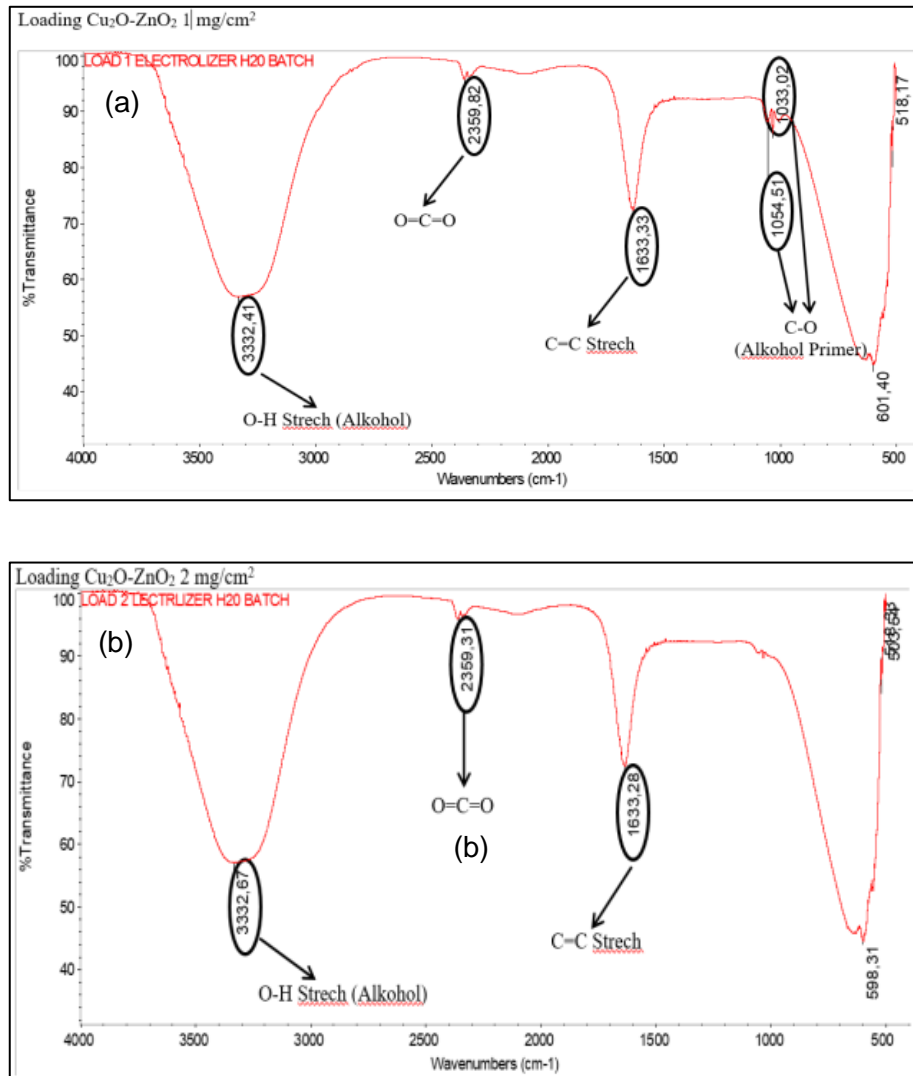
Tabel 10. Perbandingan Nilai ECSA dan Konduktivitas Elektroda dengan Loading Katalis 1 dan 2 mg/cm²

Loading katalis (mg/cm ²)	Nilai ECSA (cm ² /g)	Nilai Konduktivitas (S/cm)
1	209, 886	0,799
2	52,261	0,389

Berdasarkan tabel 10 dapat dilihat bahwa penggunaan katalis dengan loading lebih rendah meningkatkan nilai ECSA dan konduktivitas listrik elektroda. Katalis dengan loading 1 mg/cm² dapat menyebar secara luas dan merata yang ditunjukkan oleh nilai ECSA yang lebih tinggi dan mampu meningkatkan nilai konduktivitas listrik elektroda dibandingkan katalis dengan loading 2 mg/cm²

4.2.6.2 Analisis menggunakan FT-IR

Hasil pengujian menggunakan alat FT-IR elektroda $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ dengan loading katalis 1 dan 2 mg/cm^2 dapat dilihat pada gambar 29.



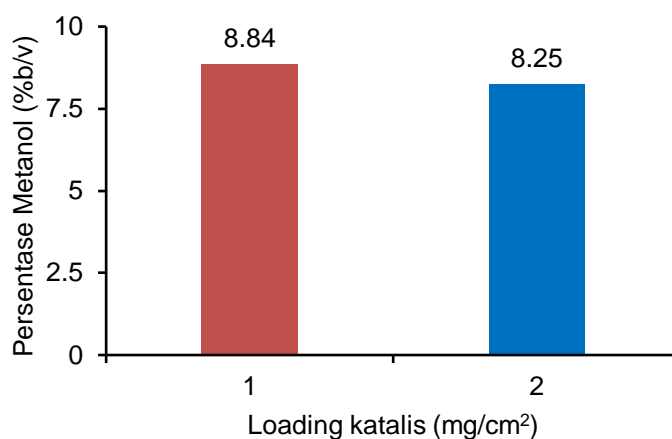
Gambar 29. Hasil FT-IR elektroda $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ (a) 1 mg/cm^2 dan (b) 2 mg/cm^2

Dari kedua spektrum FT-IR pada gambar 29 pada hasil pengujian sampel metanol dalam air menunjukkan adanya gugus O-H tarikan yang spesifik terlihat pada daerah 3332 cm^{-1} . Peak pada daerah 2359 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya CO_2 yang tidak terkonversi menjadi metanol dan peak pada daerah 1633 cm^{-1} yang mengindikasikan adanya gugus C=C stretch untuk senyawa alkena. Spektrum FT-IR dari sampel dengan loading katalis 1 mg/cm^2 terlihat peak pada daerah 1033 dan 1054 cm^{-1} yang mengindikasikan gugus C-O stretch untuk alkohol primer dan munculnya peak pada daerah $3600\text{-}3000 \text{ cm}^{-1}$ dan $1300\text{-}1000$

cm⁻¹ yang indetik menunjukkan keberadaan methanol (Sansone, 2007)

4.2.6.3 Pengujian Produksi Metanol dengan Loading Katalis 1 mg/cm²

Pengujian persentase metanol dilakukan pada jenis elektroliser komersial dengan loading katalis 1 mg/cm². Hasil yang didapat menunjukkan bahwa MEA dengan loading katalis 1 mg/cm² memiliki persentase metanol yang lebih tinggi yaitu sebesar 8,84% pada waktu operasi 2 jam seperti yang disajikan pada gambar 30 (sebagai pembandingan ditampilkan persentase metanol pada loading katalis 2 mg/cm²).



Gambar 30. Persentase metanol dengan loading katalis 1 dan 2 mg/cm² menggunakan elektroliser komersial

Berdasarkan karakterisasi dari CV dan EIS serta persentase produk metanol yang diperoleh, maka pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan loading katalis Cu₂O-ZnO/C 1 mg/cm². Dari berbagai pengujian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa faktor-faktor yang menyebabkan peningkatan konsentrasi metanol tergantung jenis katalis, loading katalis, tegangan dan laju alir gas CO₂.

4.2.7 Variasi Jenis Elektroliser pada MEA dengan Loading Katalis 1 mg/cm²

Elektroliser sebagai alat yang digunakan dalam proses konversi CO₂ menjadi metanol dengan melibatkan reaksi oksidasi dan reduksi pada MEA sangat mempengaruhi produk yang dihasilkan. Elektroliser komersial yang dipakai berukuran 7x7 cm² memiliki *bipolar plate* yang berfungsi juga sebagai *current collector* yang membantu transfer elektron dari anoda ke katoda. Bentuk *bipolar plate* yang digunakan pada elektroliser komersial adalah *pin-type* seperti yang

disajikan pada gambar 31.



Gambar 31. Bentuk *Bipolar Plate/Current Collector* pada Elektroliser Komersial

Bipolar plate jenis ini memiliki kelemahan pada daerah sentuh sehingga tidak seluruh MEA bersentuhan langsung dengan *current collector*. Selain itu, distribusi reaktan (dalam hal ini CO_2) tidak merata. Hal tersebut mengakibatkan elektron yang mengalir tidak maksimal (Porstmann, Wannemacher and Drossel, 2020). Untuk itu, dilakukan pembuatan elektroliser dengan bentuk *current collector* yang datar dan lebih rapat sehingga MEA memiliki daya sentuh yang besar dan mampu meningkatkan proses transfer elektron. Elektroliser yang didesain dan dibuat sendiri dengan bahan baku dari akrilik dan *current collector stainless steel* disajikan pada gambar 32.



Gambar 32. Elektroliser berbahan akrilik ukuran 7x7 cm²

Hasil pengujian menggunakan elektroliser komersial dan akrilik dapat dilihat pada tabel 11.

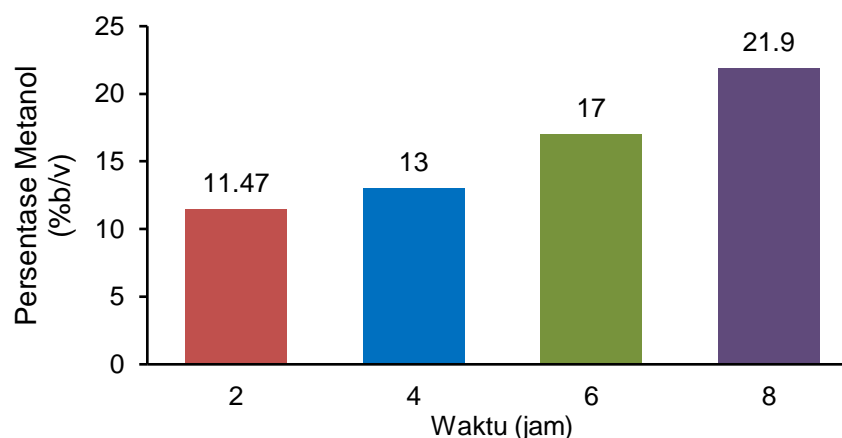
Tabel 11. Persentase Metanol dengan Variasi Jenis Elektroliser

Loading Katalis	Jenis Elektroliser	Persentase Metanol (%b/v)
1	Komersial	8,84
1	Akrilik	11,47

Berdasarkan data pada tabel 11, persentase metanol dengan menggunakan bahan akrilik menunjukkan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan elektroliser komersial. Hal ini sangat menguntungkan karena biaya yang dikeluarkan untuk pembuatan elektroliser berbahan akrilik jauh lebih murah yakni sekitar Rp. 500.000,- sedangkan elektroliser komersial mencapai Rp. 162.000.000,- dengan ukuran 7x7 cm². Selain itu, akrilik dapat dibentuk dengan ukuran dan desain yang diinginkan sehingga lebih fleksibel. Dengan demikian, pengujian selanjutnya dilakukan dengan menggunakan elektroliser berbahan akrilik.

4.2.8 Proses Konversi CO₂ Menjadi Metanol Menggunakan Elektroliser Akrilik dengan MEA Loading Katalis 1 mg/cm² pada Waktu Bervariasi

Konversi CO₂ menjadi metanol dengan loading katalis 1 mg/cm² menggunakan elektroliser berbahan akrilik berukuran 7x7 cm² pada waktu bervariasi dilakukan untuk melihat sejauhmana pengaruh waktu elektrolisis terhadap persentase metanol yang dihasilkan. Hasil pengujian produk hasil konversi dilakukan pengukuran menggunakan alat *Metanol Analyzer* AM5 disajikan pada gambar 33.



Gambar 33. Persentase metanol loading katalis 1 mg/cm² menggunakan elektroliser akrilik

Berdasarkan gambar 33 dapat dilihat bahwa produksi metanol bertambah

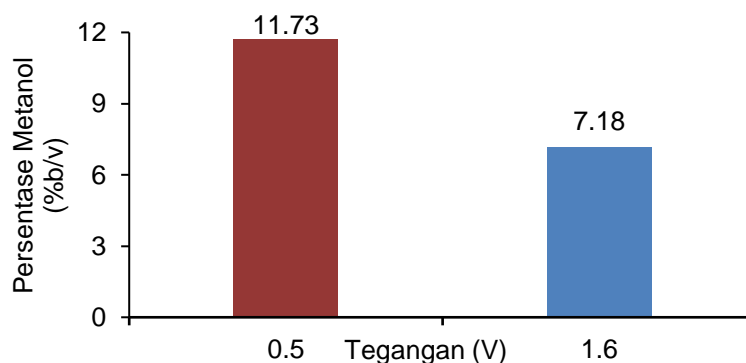
dengan makin bertambahnya waktu dan paling tinggi pada waktu 8 jam mencapai 21,9 % (b/v). Besarnya persentase metanol yang didapatkan menunjukkan pengaruh jenis elektroliser begitu besar. Lamanya waktu yang digunakan dalam proses konversi akan memaksimalkan reaksi, baik itu pemecahan H₂O menjadi H⁺ ataupun penangkapan elektron serta reduksi CO₂ membentuk metanol. Perhitungan hasil konversi CO₂ menjadi metanol dapat dilihat pada lampiran 16.

4.2.9 Variasi Penggunaan Gas H₂ di Anoda

Ruangan anoda adalah tempat terjadinya oksidasi air untuk menghasilkan ion H⁺ yang akan mengalir melalui membrane elektrolit ke ruang katoda untuk bereaksi dengan CO₂ menghasilkan metanol. Selain menggunakan air, produksi ion H⁺ bisa dilakukan dengan menggunakan gas H₂ di anoda (seperti yang terjadi pada fuel cell berbahan bakar hidrogen). Oleh karena itu, penggunaan gas H₂ di anoda untuk proses konversi CO₂ menjadi metanol bisa menjadi alternatif sebagai pembanding hasil yang konversi yang diperoleh dengan penggunaan H₂O di anoda.

4.2.9.1 Variasi Tegangan

Proses pembentukan metanol dari CO₂ tidak lepas dari keterlibatan proton. Pemecahan proton pada H₂O lebih sulit dibanding H₂ sehingga diujicobakan menggunakan gas H₂ di anoda. Tegangan divariasikan pada 0,5 V dan 1,6 V seperti yang disajikan pada gambar 34. Proses konversi berlangsung pada waktu 2 jam dengan loading katalis 1 mg/cm². Penentuan tegangan 0,5 V berdasarkan acuan penelitian sebelumnya (Shironita, dkk 2013).



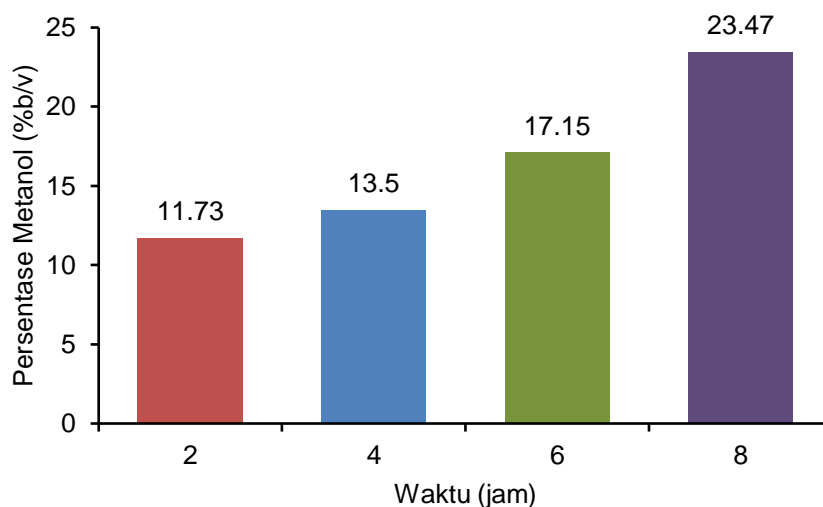
Gambar 34. Persentase metanol dengan variasi tegangan menggunakan H₂ di anoda

Berdasarkan grafik pada gambar 34 menunjukkan bahwa penggunaan H₂ di anoda mampu meningkatkan persentase metanol dengan tegangan yang lebih rendah yakni 0,5 V. Penggunaan gas H₂ dengan tegangan 0,5 V mampu mengkonversi CO₂ menjadi metanol mencapai 45,24% sedangkan pada tegangan 1,6 V persen konversi yang diperoleh hanya 27,69% (Lampiran 16).

$$\text{Konversi CO}_2 \text{ menjadi metanol}(\%) = \frac{\text{Massa metanol yang dihasilkan}}{\text{Massa CO}_2 \text{ yang digunakan}} \times 100\%$$

4.2.9.2 Variasi Waktu

Tegangan 0,5 V digunakan dalam proses konversi CO₂ menjadi metanol dengan H₂ di anoda pada loading katalis 1 mg/cm² dan variasi waktu 2, 4, 6 dan 8 jam. Semakin lama waktu konversi maka akan meningkatkan konsentrasi dari produk metanol yang dihasilkan. Pada waktu 8 jam metanol yang dihasilkan mencapai 23,47% dengan persen konversi CO₂ menjadi metanol sebesar 22,63% (Lampiran 16). Hasil pengukuran persentase metanol dapat dilihat pada gambar 35.



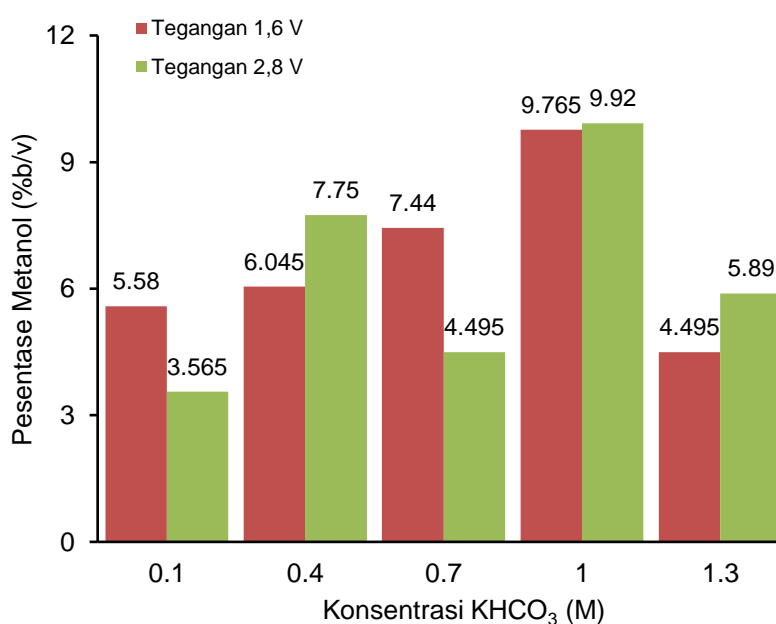
Gambar 35. Persentase konsentrasi metanol menggunakan H₂ di anoda

4.2.10 Penggunaan Larutan Elektrolit KHCO₃

Penggunaan larutan KHCO₃ sebagai elektrolit didasarkan pada pertimbangan KHCO₃ menjadi pelarut yang baik untuk CO₂ dan dapat terkonversi menjadi KOH dan CO₂ dalam kesetimbangan (Albo, 2015). Penggunaan KHCO₃ diharapkan dapat meningkatkan produksi methanol.

4.2.10.1 Variasi Konsentrasi Larutan Elektrolit KHCO_3 menggunakan MEA dengan Loading Katalis 1 mg/cm^2

Berdasarkan variasi konsentrasi larutan elektrolit KHCO_3 pada loading katalis 1 mg/cm^2 menunjukkan bahwa konsentrasi 1 M memiliki persentase produk metanol yang lebih tinggi yaitu $9,765\%$ ($1,6 \text{ V}$) dan $9,92\%$ ($2,8 \text{ V}$) dibandingkan variasi konsentrasi larutan elektrolit KHCO_3 lainnya. Persentase metanol yang dihasilkan dari penggunaan elektrolit KHCO_3 pada berbagai konsentrasi dan pada tegangan yang berbeda dapat dilihat pada Gambar 36. Penggunaan tegangan $2,8 \text{ V}$ dengan memperhitungkan sampai terjadi gelembung udara di anoda.



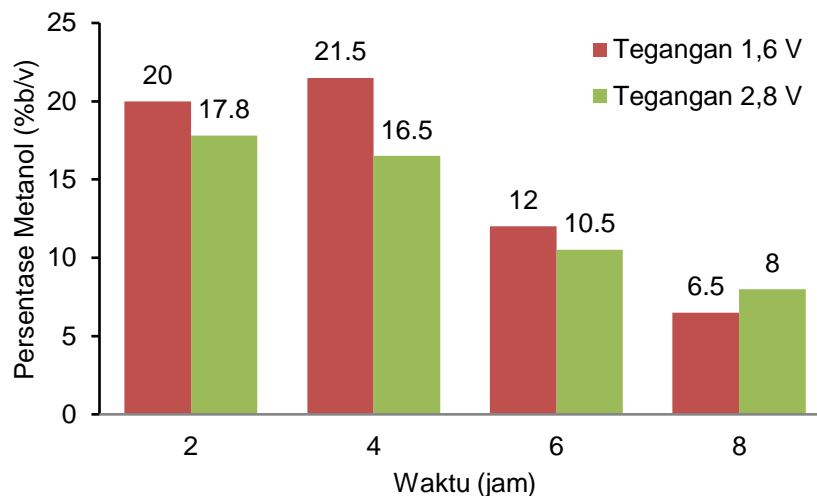
Gambar 36. Perbandingan hasil elektrolisis dengan elektrolit KHCO_3 dengan loading 1 mg/cm^2 pada tegangan yang bervariasi

Berdasarkan gambar 36, konsentrasi elektrolit mempengaruhi produksi metanol. Keberadaan elektrolit KHCO_3 berfungsi sebagai media terakumulasinya CO_2 didalam larutan yang mampu meningkatkan transfer CO_2 sehingga konversi berjalan lebih optimal. Produksi methanol akan bertambah hingga mencapai konsentrasi elektrolit yang sesuai dengan kelarutan CO_2 yang optimum.

4.2.10.2 Variasi Waktu menggunakan MEA dengan Loading Katalis 2 mg/cm^2

Konsentrasi KHCO_3 1 M digunakan pada MEA dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ 2 mg/cm^2 pada variasi waktu dan tegangan yang berbeda. Berdasarkan

hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi metanol tertinggi dicapai pada waktu 4 jam dan pada tegangan 1,6 V seperti yang dapat dilihat pada gambar 37.

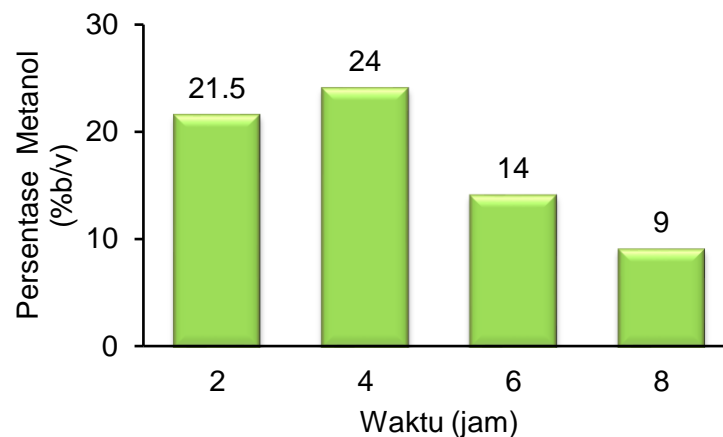


Gambar 37. Perbandingan hasil elektrolisis dengan elektrolit KHCO_3 dengan loading 2 mg/cm^2 pada waktu dan tegangan bervariasi

Berdasarkan gambar 37 menunjukkan bahwa konversi CO_2 menjadi metanol dengan menggunakan KHCO_3 pada tegangan 1,6 V optimal pada waktu 4 jam dengan konsentrasi metanol 21,5% dan persen konversi CO_2 sebesar 41,46% (Lampiran X). Akan tetapi, secara umum proses konversi CO_2 menjadi metanol menggunakan elektrolit KHCO_3 mengalami penurunan dengan bertambahnya waktu. Semakin lama proses konversi, konsentrasi larutan KHCO_3 akan mengalami peningkatan pH. Larutan elektrolit yang sifatnya semakin basa akan mengurangi kelarutan CO_2 sehingga proses konversi akan terhambat (Konig, et al., 2019).

4.2.10.3 Penggunaan Elektrolit KHCO_3 dengan H_2 di Anoda

Penggunaan gas H_2 di anoda menunjukkan peningkatan yang cukup signifikan dibandingkan penggunaan H_2O pada proses konversi CO_2 menjadi metanol menggunakan elektrolit KHCO_3 . Hal ini terjadi karena interaksi proton yang baik dengan elektrolit KHCO_3 sehingga memudahkan pembentukan metanol. Data yang menunjukkan persentase metanol menggunakan gas H_2 pada elektrolit KHCO_3 dengan loading katalis 2 mg/cm^2 dapat dilihat pada gambar 38.



Gambar 38. Persentase metanol pada elektrolit KHCO_3 menggunakan gas H_2 di anoda

Gambar 38 menunjukkan bahwa persentase metanol tertinggi diperoleh pada waktu 4 jam dengan kadar metanol sebesar 24%. Sama halnya dengan penggunaan H_2O , penurunan persentase metanol kembali menurun dengan bertambahnya waktu sehingga dapat disimpulkan bahwa peningkatan persentase metanol tidak linier terhadap waktu.

4.2.11 Pengaruh Ukuran MEA Terhadap Konsentrasi Metanol

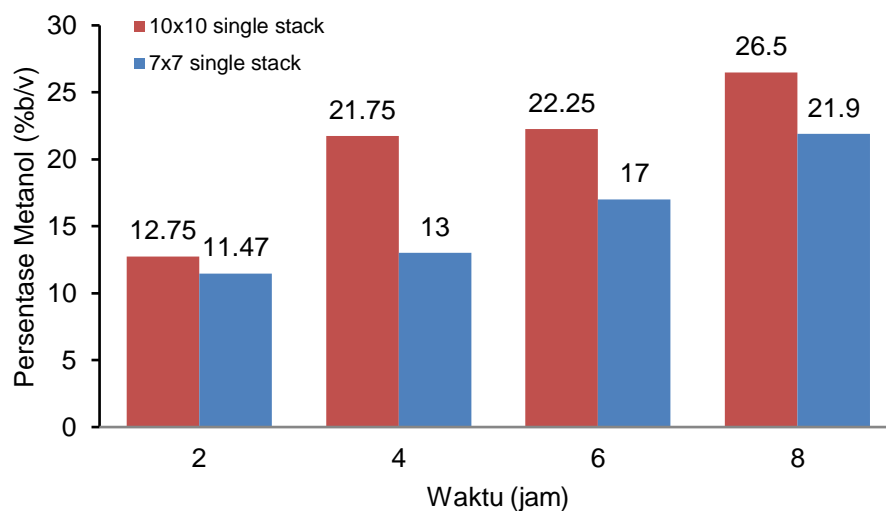
Ukuran MEA menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi persentase metanol yang didapatkan dari proses konversi CO_2 menjadi metanol. Hal ini disebabkan oleh semakin besar luas permukaan maka situs aktif serta daya sentuh/interaksi terhadap katalis akan semakin besar sehingga reaksi dapat meningkat.

Untuk melihat pengaruh luas permukaan MEA terhadap persentase metanol yang dihasilkan, maka dibuat MEA dengan ukuran yang lebih besar, yaitu ukuran $10 \times 10 \text{ cm}^2$ sebagai pembanding MEA dengan ukuran $7 \times 7 \text{ cm}^2$. Pengujian dilakukan dengan menggunakan elektroliser dari akrilik (gambar 39).



Gambar 39. Elektroliser akrilik Ukuran 10 x 10 cm²

Hasil pengujian kinerja MEA dengan ukuran 10 x 10 cm² dibandingkan dengan hasil kinerja MEA dengan ukuran 7 x 7 cm² menggunakan katalis Cu₂O-ZnO/C dengan loading 1 mg/cm² disajikan pada gambar 40.

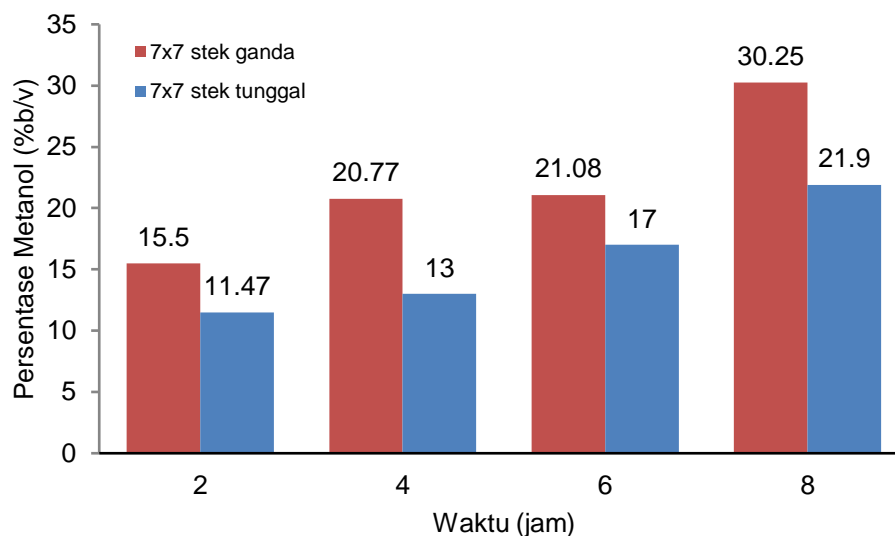


Gambar 40. Pengaruh ukuran MEA terhadap persentase metanol

Berdasarkan gambar 40 dapat diketahui bahwa peningkatan konsentrasi metanol terjadi pada MEA dengan ukuran 10x10 cm² mencapai 26,5% dibandingkan pada pengukuran pada *MEA single stek* berukuran 7x7 cm² sebesar 21,9% dengan lama waktu elektrolisis 8 jam. Semakin besar luas permukaan maka semakin besar pula sisi aktif katalis pada elektroda sehingga mampu meningkatkan produksi metanol (Young *et al.*, 2013).

4.2.12 Pengaruh Jenis Stek

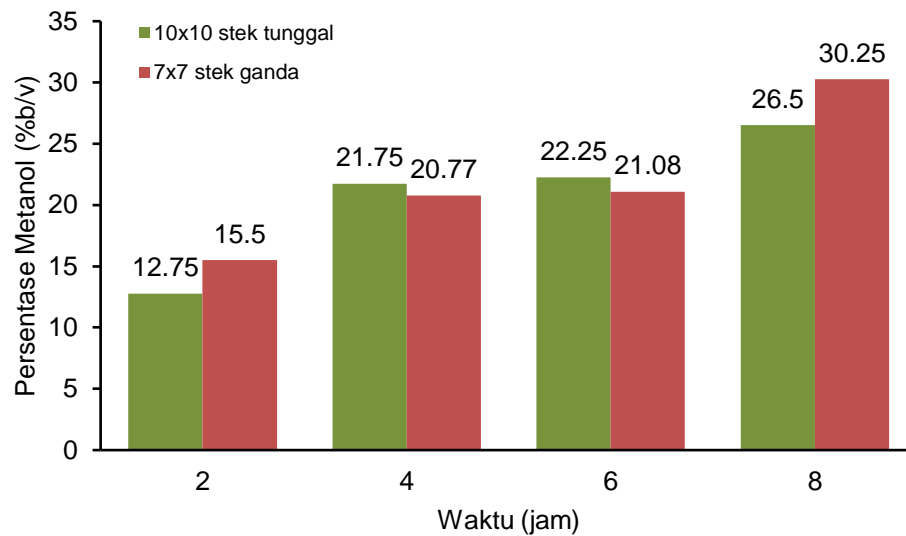
Jenis stek terbagi mejadi dua yaitu stek tunggal dan ganda. Masing-masing akan memberikan respon berbeda terhadap produk yang dihasilkan. Persentase produk metanol yang dihasilkan dari multistek lebih besar dibandingkan stek tunggal. Pada penelitian ini dilakukan pengujian untuk membandingkan hasil konversi CO₂ menjadi metanol pada stek tunggal dan stek ganda dengan ukuran yang sama seperti yang disajikan pada gambar 41.



Gambar 41. Data persentase metanol dari konversi CO₂ menggunakan jenis stek berbeda

Berdasarkan gambar 41, persentase metanol dari stek ganda lebih tinggi dibandingkan stek tunggal dengan ukuran luas MEA yang sama hingga mencapai 43,8%. Hal ini terjadi karena besarnya luasan MEA sehingga mengakibatkan lebih banyak katalis yang berinteraksi dan reaksi elektrokimia berjalan lebih optimal.

Untuk melihat sejauh mana pengaruh jenis stek dengan ukuran luasan permukaan MEA yang hampir sama, maka pada gambar 44 disajikan data hasil pengujian konversi CO₂ menjadi metanol antara stek tunggal ukuran 10 x 10 cm² (luas total 100 cm²) dengan stek ganda ukuran 7 x 7 cm² (luas total 98 cm²)



Gambar 42. Pengaruh Ukuran MEA dan Jenis stek terhadap persentase metanol

Berdasarkan gambar 42 dapat diketahui bahwa penggunaan MEA 7x7 cm² stek ganda ternyata menunjukkan persentase metanol yang lebih tinggi mencapai 30,25% dibandingkan dengan MEA dengan ukuran 10x10 cm² stek tunggal yakni 26,5%. Hal ini menunjukkan bahwa memperbanyak susunan MEA lebih efisien dibandingkan dengan hanya memperluas permukaan MEA.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian dan pembahasan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil karakterisasi katalis pada elektroda menunjukkan bahwa elektroda dengan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ di katoda mempunyai kinerja terbaik dengan nilai ECSA sebesar $26,044 \text{ cm}^2/\text{g}$ dan nilai konduktivitas elektrik sebesar $0,0034 \text{ S/cm}$.
2. Kondisi optimum untuk proses konversi CO_2 menjadi metanol terjadi pada tegangan $1,6 \text{ V}$ dengan densitas arus rata-rata $15,3 \text{ mA/cm}^2$ dan laju alir CO_2 60 mL/menit menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ di katoda dan Pt/C di anoda dengan produksi metanol sebesar $9,14 \text{ \% v/v}$.
3. Kondisi optimum untuk proses konversi CO_2 menjadi metanol terjadi pada tegangan $1,6 \text{ V}$ dengan laju alir CO_2 60 mL/menit menggunakan katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ di katoda dan Pt/C di anoda dengan loading katalis 2 mg/cm^2 dan persentase metanol yang diperoleh sebesar $9,14 \text{ \% v/v}$.
4. Berdasarkan karakterisasi CV, EIS dan pengujian persentase metanol didapatkan bahwa variasi loading katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$ terbaik ditunjukkan pada loading katalis 1 mg/cm^2 dengan elektroliser berbahan akrilik pada suhu ruang dan peningkatan konsentrasi metanol berbanding lurus dengan waktu konversi.
5. Penggunaan KHCO_3 sebagai elektrolit pada loading katalis 2 mg/cm^2 menunjukkan persentase yang lebih besar yakni dibandingkan tanpa elektrolit pada waktu 2 jam. Akan tetapi, semakin memingkatnya waktu terjadi penurunan konsentrasi metanol akibat kelarutan CO_2 yang semakin berkurang.
6. Penggunaan gas H_2 di anoda mampu meningkatkan persentase metanol pada tegangan $0,5 \text{ V}$ disebabkan oleh pemecahan proton yang lebih cepat dibandingkan pada penggunaan H_2O .
7. Penggunaan MEA berukuran $10 \times 10 \text{ cm}^2$ sel tunggal lebih optimal dalam proses konversi CO_2 mejadi metanol dibandingkan MEA dengan ukuran $7 \times 7 \text{ cm}^2$ sel tunggal. Hal ini karena semakin besar luasan MEA maka semakin banyak sisi aktif pada katalis sehingga reaksi elektrokia berjalan lebih optimal.

8. Penggunaan MEA 7x7 cm² stek ganda ternyata menunjukkan persentase metanol yang lebih tinggi dibandingkan dengan MEA dengan ukuran 10x10 cm² stek tunggal Hal ini menunjukkan bahwa memperbanyak susunan MEA lebih efisien dibandingkan dengan hanya memperluas permukaan MEA.

DAFTAR PUSTAKA

- Aeshala, L. M., R. G. Uppaluri, and A. Verma. 2013. "Effect of Cationic and Anionic Solid Polymer Electrolyte on Direct Electrochemical Reduction of Gaseous CO₂ to Fuel." *Journal of CO₂ Utilization* 3–4: 49–55. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2013.09.004>.
- Al-Kalbani, Haitham, Jin Xuan, Susana García, and Huizhi Wang. 2016. "Comparative Energetic Assessment of Methanol Production from CO₂: Chemical versus Electrochemical Process." *Applied Energy* 165:1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.027>.
- Al-Saydeh, Sajeda. 2018. "Carbon Dioxide Conversion to Methanol: Opportunities and Fundamental Challenges." <https://doi.org/10.5772/intechopen.74779>.
- Albo, J; Alvarez-Guerra, M; Castano, P; Irabien, A. 2013. "Towards the Electrochemical Conversion of Carbon Dioxide into Methanol." *The Royal Society of Chemistry* 00: 1–3. <https://doi.org/10.1039/x0xx00000x>.
- Albo, Jonathan, Garikoitz Beobide, Pedro Castaño, and Angel Irabien. 2017. "Methanol Electrosynthesis from CO₂ at Cu₂O/ZnO Prompted by Pyridine-Based Aqueous Solutions." *Journal of CO₂ Utilization* 18:164–72. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.02.003>.
- Albo, Jonathan, and Angel Irabien. 2015. "Cu₂O-Loaded Gas Diffusion Electrodes for the Continuous Electrochemical Reduction of CO CO₂ to Methanol." <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2015.11.014>.
- Albo, Jonathan, Alfonso Sáez, Jose Solla-Gullón, Vicente Montiel, and Angel Irabien. 2015. "Production of Methanol from CO₂ Electroreduction at Cu₂O and Cu₂O/ZnO-Based Electrodes in Aqueous Solution." *Applied Catalysis B: Environmental* 176–177: 709–17. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.04.055>.
- Arena, Francesco, Giuseppe Italiano, Katia Barbera, Silvia Bordiga, Giuseppe Bonura, Lorenzo Spadaro, and Francesco Frusteri. 2008. "Applied Catalysis A: General Solid- State Interactions , Adsorption Sites and Functionality of Cu-ZnO / ZrO₂ Catalysts in the CO₂ Hydrogenation to CH₃OH" 350:16–23. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2008.07.028>.
- Aricò, A. S., E. Modica, P. Cretì, P. L. Antonucci, and V. Antonucci. 2000. "An

- Electrode- Kinetic Investigation of CO and CO/H₂ Oxidation in Phosphotungstic Acid (H₃PW₁₂O₄₀) Electrolyte." *Journal of New Materials for Electrochemical Systems* 3 (3): 207–20.
- Carmo, Marcelo, Gareth P. Keeley, Daniel Holtz, Thomas Grube, Martin Robinius, Martin Müller, and Detlef Stolten. 2019. "PEM Water Electrolysis: Innovative Approaches towards Catalyst Separation, Recovery and Recycling." *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (7): 3450–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.12.030>.
- Cha, S. Y. 1999. "Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Electrodes Prepared by Direct Deposition of Ultrathin Platinum on the Membrane Surface." *Journal of The Electrochemical Society* 146 (11): 4055. <https://doi.org/10.1149/1.1392591>.
- Costentin, Cyrille, Marc Robert, and Jean Michel Savéant. 2013. "Catalysis of the Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide." *Chemical Society Reviews* 42 (6): 2423–36. <https://doi.org/10.1039/c2cs35360a>.
- Cotton, F.A, and G Wilkinson. 2007. *Kimia Anorganik Dasar*. Jakarta: UI Press.
- Delacourt, Charles, Paul L. Ridgway, John B. Kerr, and John Newman. 2008. "Design of an Electrochemical Cell Making Syngas (CO+H₂) from CO₂ and H₂O Reduction at Room Temperature." *Journal of The Electrochemical Society* 155 (1): B42. <https://doi.org/10.1149/1.2801871>.
- Fitriani, Lisa. 2012. "STUDI REAKSI REDUKSI CO₂ DENGAN METODE ELEKTROKIMIA MENGGUNAKAN ELEKTRODA Cu," 1–71.
- Frey, Th, and M. Linardi. 2004. "Effects of Membrane Electrode Assembly Preparation on the Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Performance." *Electrochimica Acta* 50 (1): 99–105. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.07.017>.
- García, Jesús, Carlos Jiménez, Fabiola Martínez, Rafael Camarillo, and Jesusa Rincón. 2018. "Electrochemical Reduction of CO₂ Using Pb Catalysts Synthesized in Supercritical Medium." *Journal of Catalysis* 367: 72–80. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2018.08.017>.
- Goeppert, Alain, Miklos Czaun, John-paul Jones, G K Surya Prakash, and George A Olah. 2014. "Chem Soc Rev Recycling of Carbon Dioxide to Methanol and Derived Products – Closing the Loop." <https://doi.org/10.1039/c4cs00122b>.
- Gutiérrez-Guerra, N., L. Moreno-López, J. C. Serrano-Ruiz, J. L. Valverde, and A. de Lucas- Consuegra. 2016. "Gas Phase Electrocatalytic Conversion of CO₂ to Syn-Fuels on Cu Based Catalysts-Electrodes." *Applied Catalysis B: Environmental* 188: 272–82. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.02.010>.
- Hazarika, Jenasree, and Mriganka Sekhar Manna. 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>.

- Huy, Hoang Anh, Tran Van Man, Huynh Thien Tai, and Ho Thi Thanh Van. 2016. "Preparation and Characterization of High-Dispersed Pt/c Nano-Electrocatalysts for Fuel Cell Applications." *Journal of Science and Technology* 54 (4). <https://doi.org/10.15625/0866-708x/54/4/7308>.
- Kumar, S Shiva, S U B Ramakrishna, B Rama Devi, and V Himabindu. 2018. "Phosphorus- Doped Graphene Supported Palladium (Pd / PG) Electrocatalyst for the Hydrogen Evolution Reaction in PEM Water Electrolysis." *International Journal of Green Energy* 1 (1): 1–10. <https://doi.org/10.1080/15435075.2018.1508468>.
- Le, M., M. Ren, Z. Zhang, P. T. Sprunger, R. L. Kurtz, and J. C. Flake. 2011a. "Electrochemical Reduction of CO₂ to CH₃OH at Copper Oxide Surfaces." *Journal of The Electrochemical Society* 158 (5): E45. <https://doi.org/10.1149/1.3561636>.
- Le, M, M Ren, Z Zhang, P T Sprunger, R L Kurtz, and J C Flake. 2011b. "Electrochemical Reduction of CO₂ to CH₃OH at Copper Oxide Surfaces" 158 (5): 45–49. <https://doi.org/10.1149/1.3561636>.
- Lestariningsih, T., Q. Sabina, and N. Majid. 2017. "PENAMBAHAN TIO₂ DALAM PEMBUATAN LEMBARAN POLIMER ELEKTROLIT BERPENGARUH TERHADAP KONDUKTIVITAS DAN KINERJA BATERAI LITHIUM." *Jurnal Material Dan Energi Indonesia* 07 (01): 31–37.
- Liu, Hongdong, Zhongli Hu, Rong Hu, Bitao Liu, Haibo Ruan, Lei Zhang, and Wei Xiao. 2016. "Large-Scale Synthesis of Cu₂O Nanocubes and Their Electrochemical Properties." *International Journal of Electrochemical Science* 11 (4): 2756–61. <https://doi.org/10.20964/110402756>.
- Lu, Qi, and Feng Jiao. 2016. "Electrochemical CO₂ Reduction: Electrocatalyst, Reaction Mechanism, and Process Engineering." <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.04.009>.
- Ma, Jun, Nannan Sun, Xuelan Zhang, Ning Zhao, Fukui Xiao, Wei Wei, and Yuhan Sun. 2009. "A Short Review of Catalysis for CO₂ Conversion." *Catalysis Today* 148 (3–4): 221–31. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.08.015>.
- Merck. 2018. "Lembaran Data Keselamatan Bahan Metanol" 1253 (1907): 1–21.
- Merino-Garcia, Ivan, Jonathan Albo, and Angel Irabien. 2017. "Productivity and Selectivity of Gas-Phase CO₂ Electroreduction to Methane at Copper Nanoparticle-Based Electrodes." *Energy Technology* 5 (6): 922–28. <https://doi.org/10.1002/ente.201600616>.
- Park, Nonam, Myung-june Park, Kyoung-su Ha, Yun-jo Lee, and Ki-won Jun. 2014. "Modeling and Analysis of a Methanol Synthesis Process Using a Mixed Reforming Reactor : Perspective on Methanol Production and CO₂ Utilization." *FUEL* 129: 163–72. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.068>.
- Peng, Xiong, Travis Omasta, William Rigdon, and William E. Mustain. 2016. "Fabrication of High Performing PEMFC Catalyst-Coated Membranes with a Low Cost Air-Assisted Cylindrical Liquid Jets Spraying System." *Journal*

of *The Electrochemical Society* 163 (14): E407–13.
<https://doi.org/10.1149/2.0981614jes>.

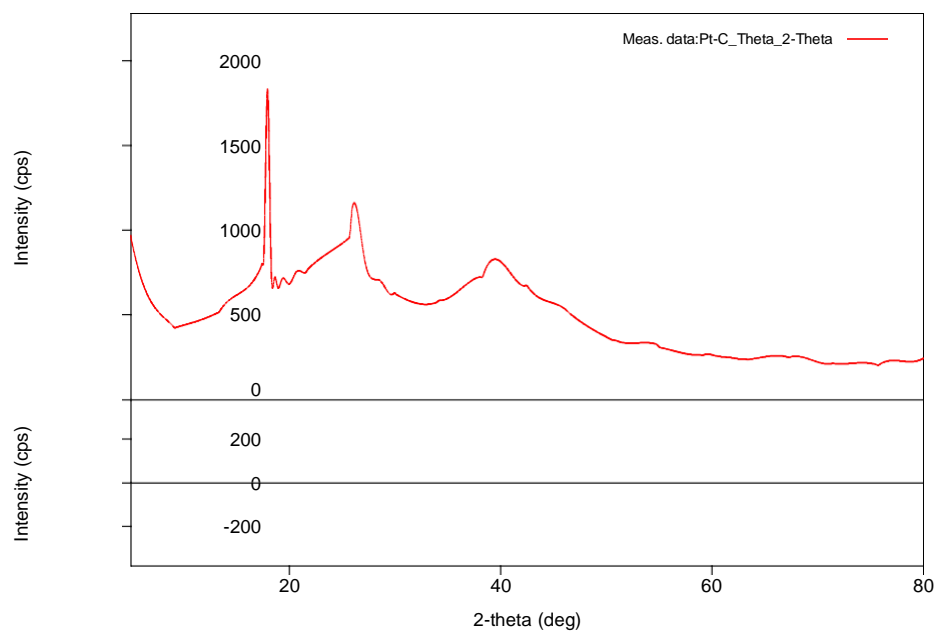
- Porstmann, S., Wannemacher, T. and Drossel, W. G. (2020) 'A comprehensive comparison of state-of-the-art manufacturing methods for fuel cell bipolar plates including anticipated future industry trends', *Journal of Manufacturing Processes*. Elsevier Ltd, 60(November), pp. 366–383. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.10.041.
- Qiao, J, Y Liu, and J Zhang. 2016. *Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide: Fundamentals and Technologies*. Boca Raton: CRC Press.
- Saito, Masahiro. 2000. "R & D Activities in Japan on Methanol Synthesis from CO₂ and H₂" 2(1998): 175–84.
- Sakellis, I., S. Giamini, I. Moschos, C. Chandrinou, A. Travlos, C. Y. Kim, J. H. Lee, J. G. Kim, and N. Boukos. 2014. "A Novel Method for the Growth of Cu₂O/ZnO heterojunctions." *Energy Procedia* 60 (C): 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.12.339>.
- Salimy, Djati Hoesen, and Siti Alimah. 2016. "HTGR Kogenerasi Produksi Hidrogen Untuk Konversi CO₂ Menjadi Metanol." *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 17 (2): 109. <https://doi.org/10.17146/jpen.2015.17.2.2556>.
- Sansonetti, J. E. (2007) *Spectroscopic data for neutral francium (Fr I)*, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*. doi: 10.1063/1.2719251.
- Sassenburg, M. 2018. "Conducting CO₂ Reduction at a Bipolar Membrane Electrode Assembly."
- Shironita, Sayoko, Ko Karasuda, Kazutaka Sato, and Minoru Umeda. 2013a. "Methanol Generation by CO₂ Reduction at a Pt e Ru / C Electrocatalyst Using a Membrane Electrode Assembly." *Journal of Power Sources* 240: 404–10. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.04.034>.
- Shironita, Sayoko, Ko Karasuda, Masatoshi Sato, and Minoru Umeda. 2013b. "Feasibility Investigation of Methanol Generation by CO₂ Reduction Using Pt/C-Based Membrane Electrode Assembly for a Reversible Fuel Cell." *Journal of Power Sources* 228: 68–74. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.11.097>.
- Tang, Hongjie, Jiangyan Wang, Huajie Yin, Huijun Zhao, Dan Wang, and Zhiyong Tang. 2014. "Growth of Polypyrrole Ultrathin Films on MoS₂ Monolayers as High- Performance Supercapacitor Electrodes." *Advanced Material* 1 (1): 1–7. <https://doi.org/10.1002/adma.201404622>.
- Wahyudi, N. T. *et al.* (2018) 'Rancangan Alat Distilasi untuk Menghasilkan Kondensat dengan Metode Distilasi Satu Tingkat', *Jurnal Chemurgy*, 1(2), p. 30. doi: 10.30872/cmg.v1i2.1142.
- Young, A. *et al.* (2013) 'Short review: Mitigation of current environmental concerns from methanol synthesis', *Bulletin of Chemical Reaction Engineering and Catalysis*, 8(1), pp. 1–13. doi: 10.9767/bcrec.8.1.4055.1-13.

- Zhang, S., Kang, P. and Meyer, T. J. (2014) 'Nanostructured tin catalysts for selective electrochemical reduction of carbon dioxide to formate', *Journal of the American Chemical Society*, 136(5), pp. 1734–1737. doi: 10.1021/ja4113885.
- Thanasilp, Sarawalee, and Mali Hunsom. 2010. "Effect of MEA Fabrication Techniques on the Cell Performance of Pt-Pd/C Electrocatalyst for Oxygen Reduction in PEM Fuel Cell." *Fuel* 89 (12): 3847–52. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.07.008>.
- Turner, John, George Sverdrup, Margaret K Mann, Pin-ching Maness, Ben Kroposki, Maria Ghirardi, Robert J Evans, and Dan Blake. 2008. "Renewable Hydrogen Production," no. March 2007: 379–407. <https://doi.org/10.1002/er>.
- Vanhove, Arthur. 2015. "Improvements on the Design of Carbon Dioxide Conversion to Methanol Process Using Aspen Plus® Interface," no. June.
- Venka, R. (2016). "Design and Development of Electrochemical Cell for Converting Carbon Dioxide to Useful Fuel". *Thesis*. Arizona State University.
- Verma, Sumit, Yuki Hamasaki, Chaerin Kim, Wenxin Huang, Shawn Lu, Huei-ru Molly, Andrew A Gewirth, Tsuyohiko Fujigaya, Naotoshi Nakashima, and Paul J A Kenis. 2017. "Insights into the Low Overpotential Electroreduction of CO₂ to CO on a Supported Gold Catalyst in an Alkaline Flow Electrolyzer." <https://doi.org/10.1021/acscenergylett.7b01096>.
- Vielstich, W, H Yokokawaa, and H.A Gasteiger. 2009. *Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology and Applications*. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- Yang, Dexin, Qinggong Zhu, Chunjun Chen, Huizhen Liu, Zhimin Liu, Zhijuan Zhao, Xiaoyu Zhang, Shoujie Liu, and Buxing Han. 2019. "Selective Electroreduction of Carbon Dioxide to Methanol on Copper Selenide Nanocatalysts." *Nature Communications* 10 (1): 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08653-9>.
- Zhang, Wuyong, Qing Qin, Lei Dai, Ruixuan Qin, Xiaojing Zhao, Xumao Chen, Daohui Ou, et al. 2018. "Electrochemical Reduction of Carbon Dioxide to Methanol on Hierarchical Pd/SnO₂ Nanosheets with Abundant Pd–O–Sn Interfaces." *Angewandte Chemie - International Edition* 57 (30): 9475–79. <https://doi.org/10.1002/anie.201804142>.

LAMPIRAN

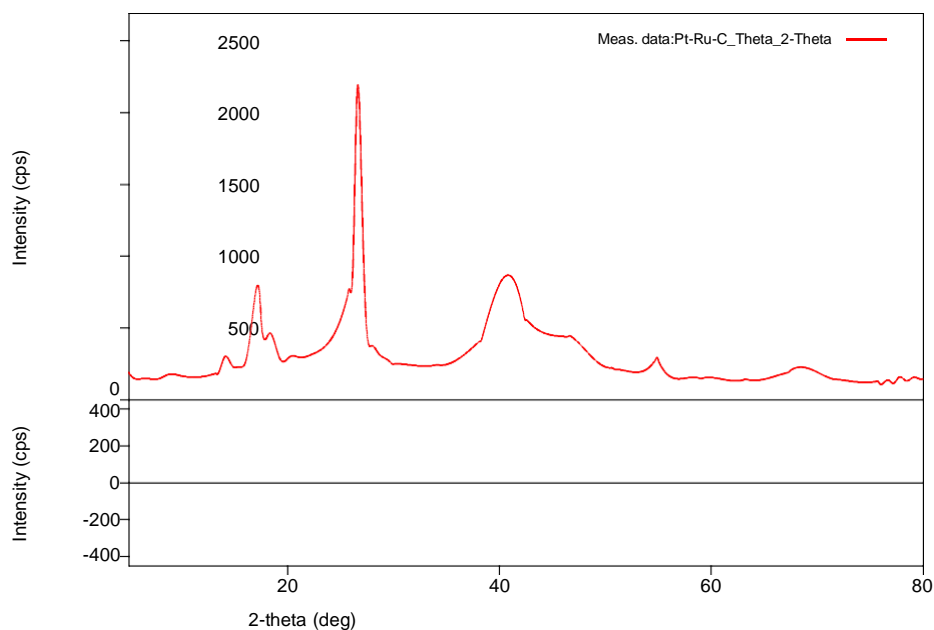
Lampiran 1. Data Pengukuran X-Ray Diffraction (XRD)

A. Difraktogram Pt/C



No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	17.973(13)	4.932(4)	878(86)	0.351(14)	428(10)	0.49(6)	1.4(2)
2	26.34(4)	3.381(5)	380(56)	1.68(8)	1358(28)	3.6(6)	2.9(5)
3	39.7(2)	2.269(12)	141(34)	6.4(2)	970(40)	6.9(19)	0.52(8)

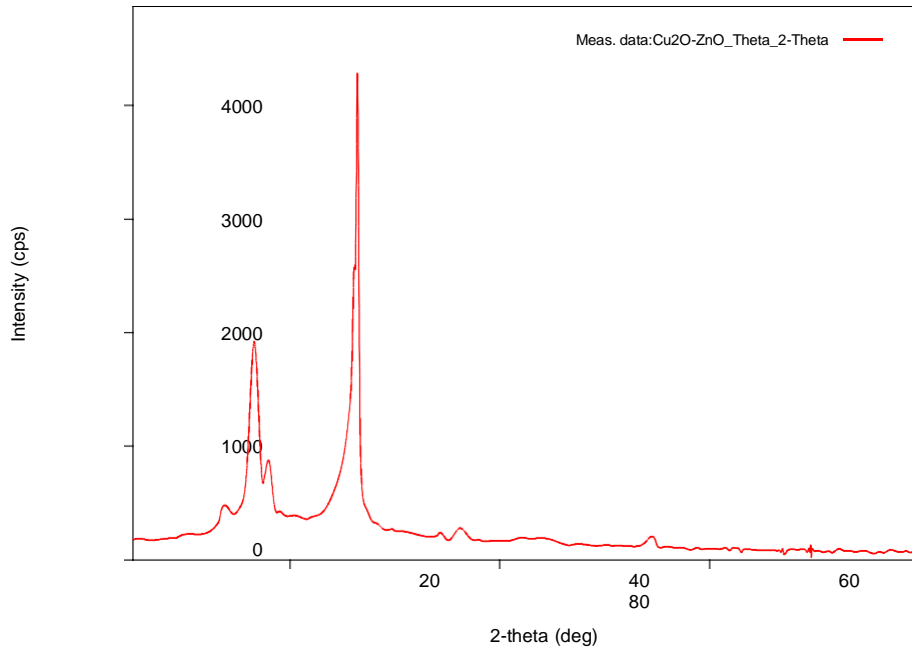
B. Difraktogram Pt-Ru/C



List Puncak

No.	2-theta(deg)	d(ang.)	Height(cps)	FWHM(deg)	Int. I(cps deg)	Int. W(deg)	Asym. factor
1	14.47(9)	6.12(4)	76(25)	0.68(9)	60(8)	0.8(4)	4(4)
2	17.11(3)	5.179(9)	381(56)	1.03(4)	646(15)	1.7(3)	0.99(13)
3	26.734(19)	3.332(2)	1255(102)	0.84(3)	1777(21)	1.42(13)	1.53(17)
4	40.74(6)	2.213(3)	373(56)	3.07(7)	1384(55)	3.7(7)	1.34(12)
5	47.02(8)	1.931(3)	122(32)	6.8(4)	923(57)	8(2)	4.9(11)
6	54.79(2)	1.6742(6)	139(34)	0.35(5)	93(5)	0.7(2)	1.2(3)
7	68.8(2)	1.364(4)	51(21)	3.3(2)	179(15)	3.5(17)	1.4(4)

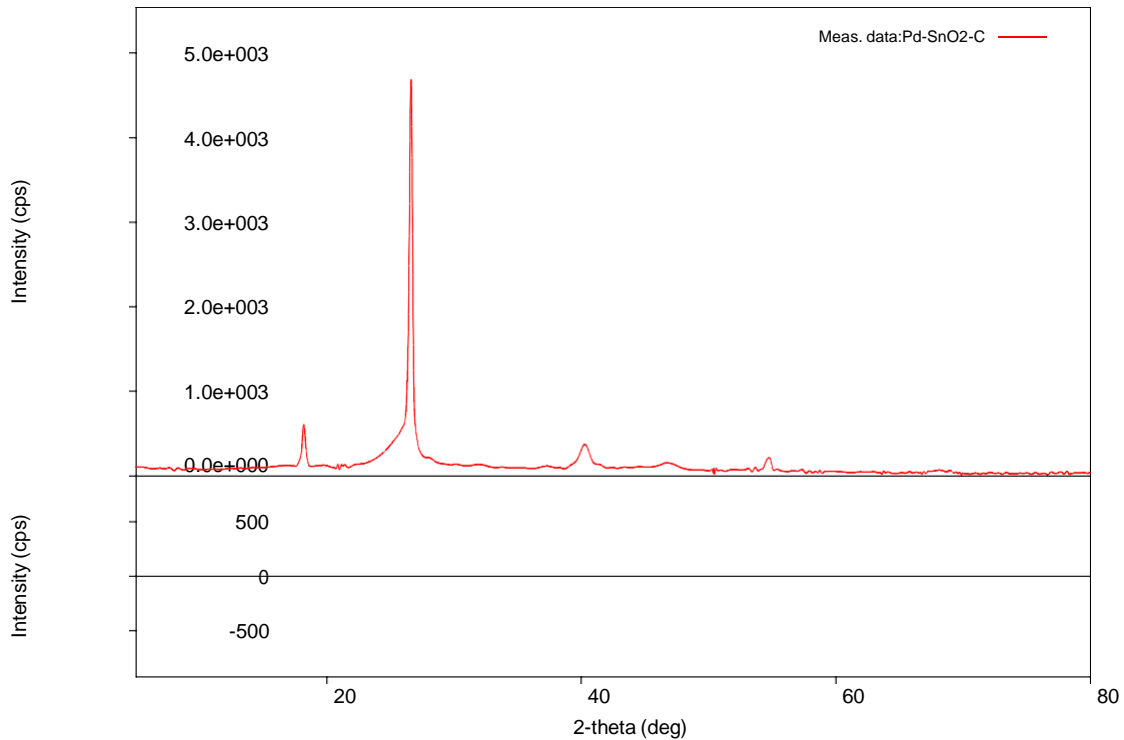
C. Difraktogram Cu₂O-ZnO/C



List Puncak

No.	2-theta (deg)	d (ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)	Int. I (cps deg)	Int. W (deg)	Asym. Factor
1	13.76(1)	6.43(8)	128(33)	4.2(3)	993(68)	8(3)	0.24(5)
2	16.55(2)	5.352(	1074(9)	0.98(3)	1791(51)	1.67(19)	0.84(6)
3	25.67(1)	3.47(2)	378(56)	2.37(15)	1360(110)	3.6(8)	1.5(4)
4	26.492(	3.361	2307(1)	0.46(2)	1562(120)	0.68(9)	4.8(7)
5	36.12(3)	2.484	115(31)	0.46(10)	88(8)	0.8(3)	0.3(3)
6	44.47(1)	2.035(	28(15)	2.6(4)	78(11)	2.8(19)	5(5)
7	54.63(3)	1.678	81(26)	0.71(11)	78(8)	1.0(4)	5(6)
8	68.2(6)	1.374(	12(10)	1.1(5)	13(8)	1.1(17)	0.7(16)

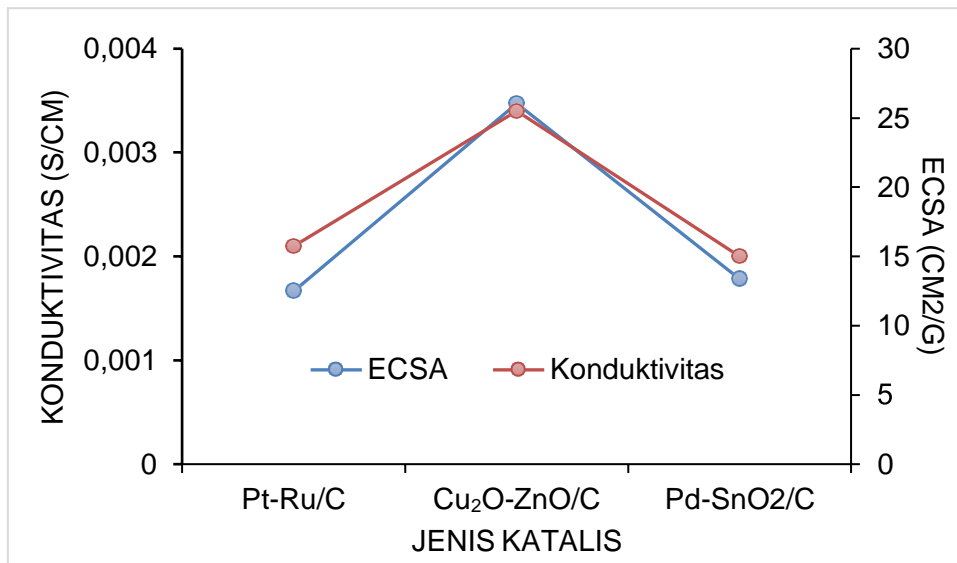
D. Difraktogram Pd-SnO₂/C



Peak List

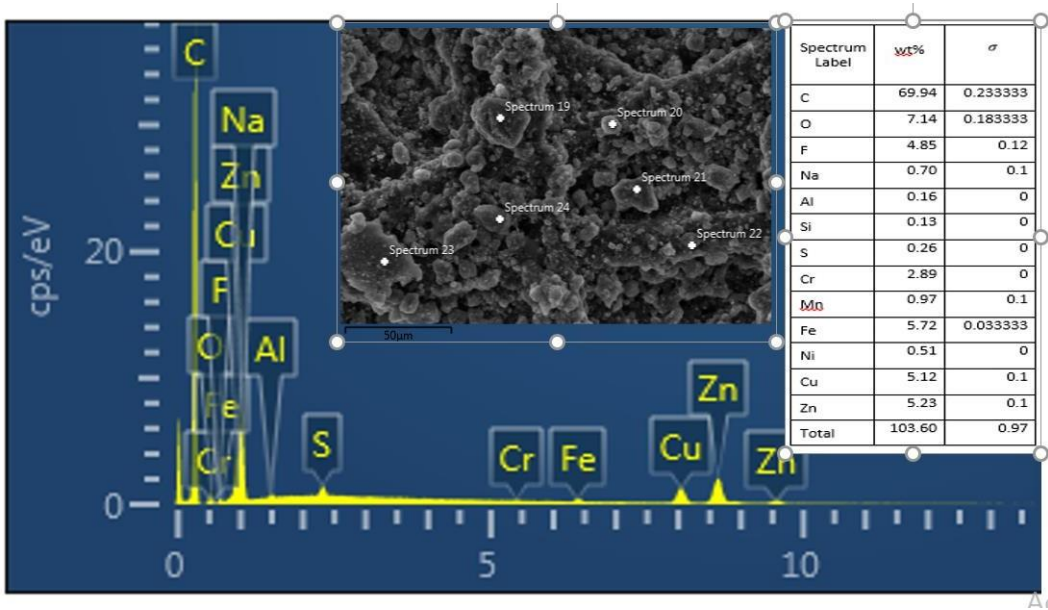
No.	2-theta (deg)	d(ang.)	Height (cps)	FWHM (deg)	Int. I (cps deg)	Int. W (deg)	Asym. factor
1	18.25(2)	4.858(	351(54)	0.29(2)	141(6)	0.40(8)	1.8(7)
2	26.16(18)	3.40(2)	238(45)	2.47(9)	766(21)	3.2(7)	1.64(1)
3	26.650(7)	3.3422	3038(15)	0.267(	1051(22)	0.35(3)	2.0(3)
4	40.28(6)	2.237(	181(39)	0.91(5)	205(10)	1.1(3)	1.3(4)
5	47.04(7)	1.930(	43(19)	1.80(1)	85(12)	2.0(11)	2.1(11)
6	54.799(17)	1.6739	133(33)	0.37(6)	69(6)	0.52(17)	4(4)
7	68.12(9)	1.3754	20(13)	1.4(2)	30(6)	1.5(13)	0.9(7)

Lampiran 2. Karakterisasi Elektroda (ECSA dan Konduktivitas Elektrik)

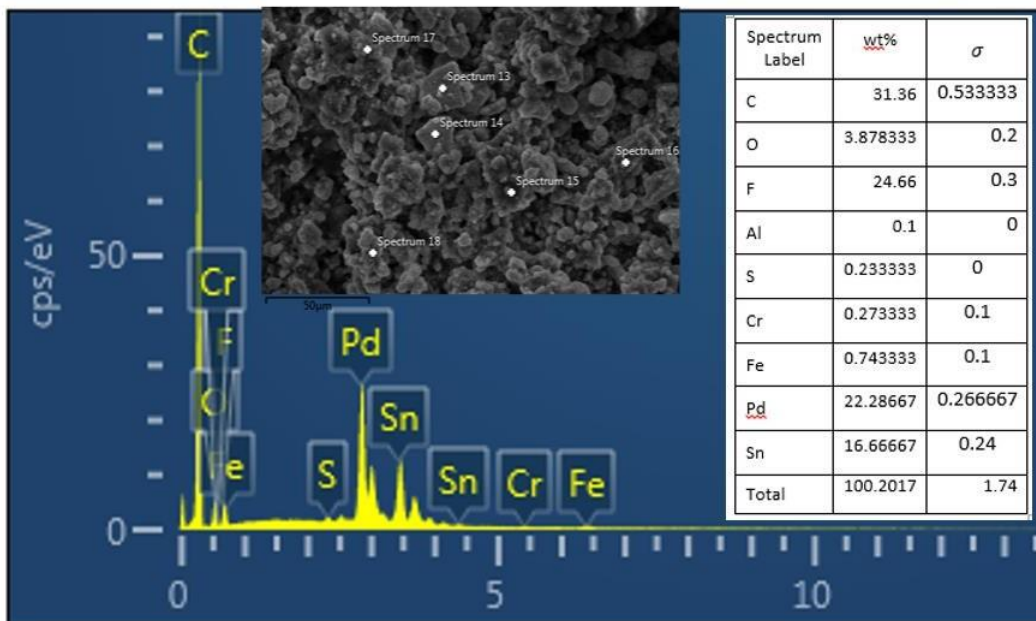


Lampiran 3. Hasil Analisis SEM-EDX

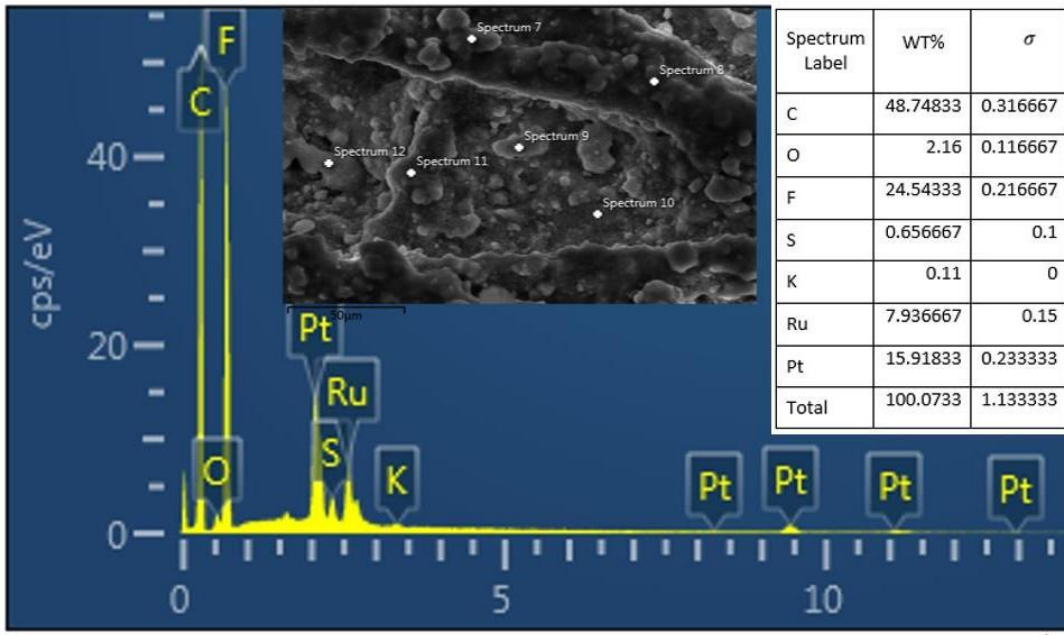
1) Elektroda $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$



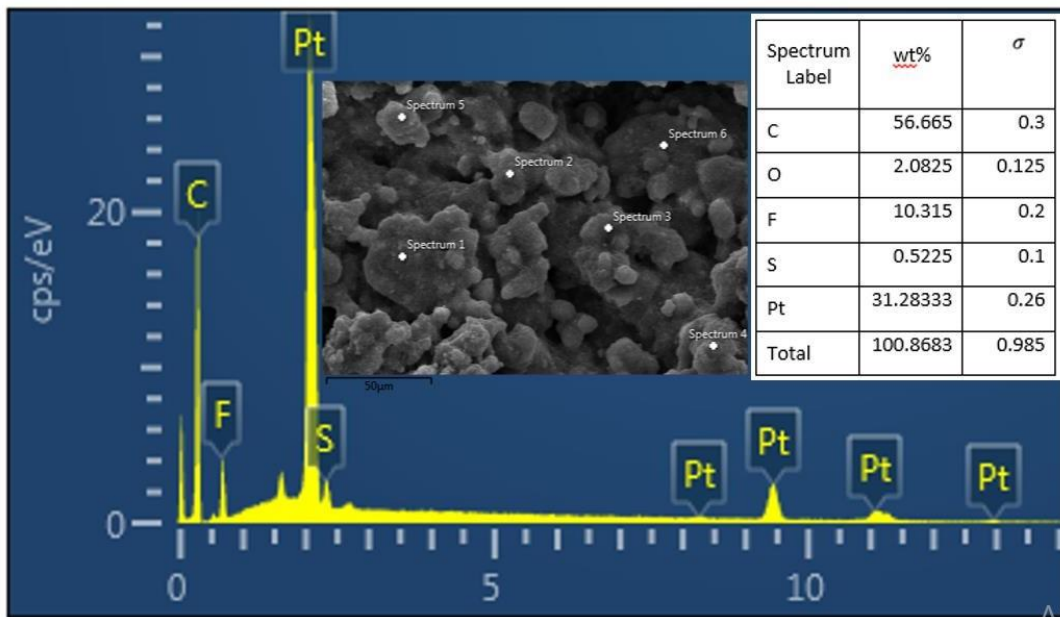
2) Elektroda $\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$



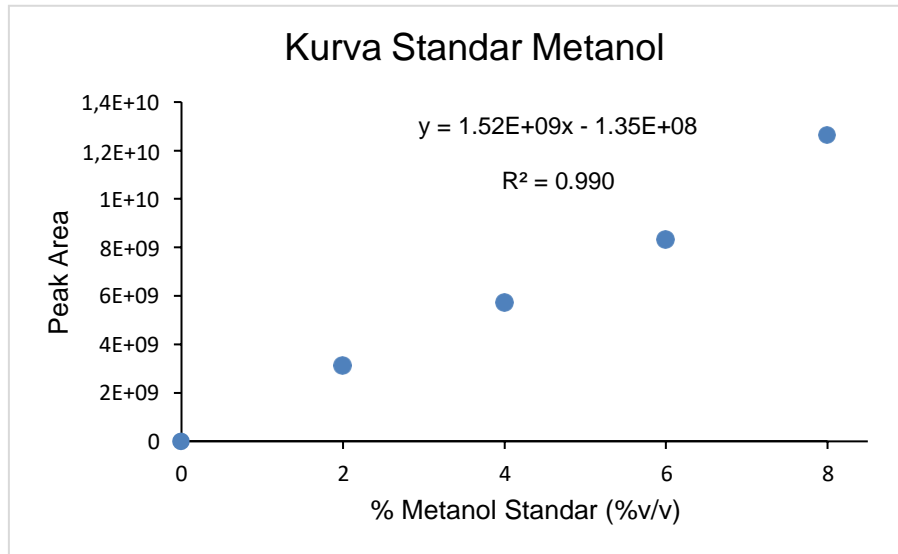
3) Elektroda Pt-Ru/C



4) Elektroda Pt/C

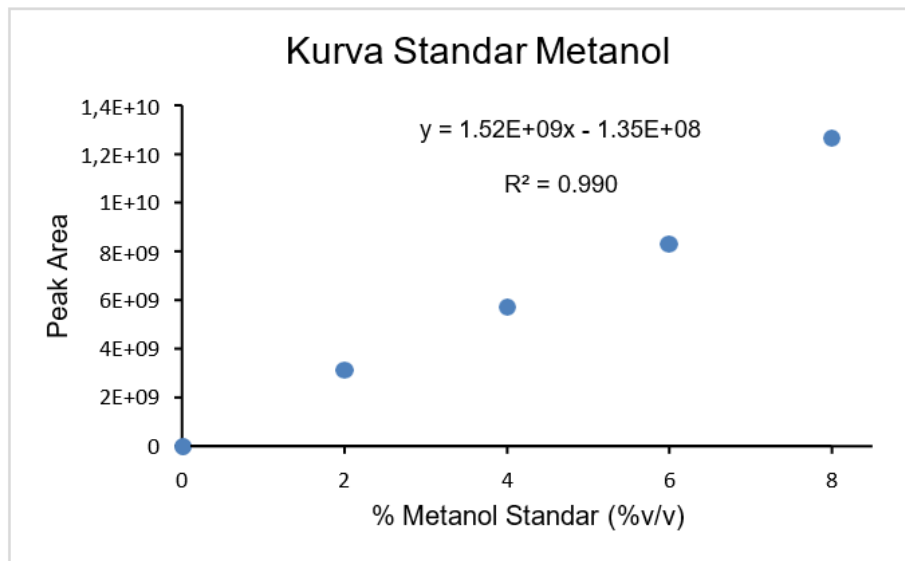


Lampiran 4. Kurva Standar Metanol GC-MS



Filename	Sample Type	Sample Name	Integ. Type	Area	ISTD Area	Area	Specified Amount	Calculated Amount
Metanol2%	Std Bracket Sample		Manual Integration	3116219994	NA	NA	2.000	2.098
Metanol4%	Std Bracket Sample		Manual Integration	5725651010	NA	NA	4.000	3.846
Metanol6%	Std Bracket Sample		Manual Integration	8316574878	NA	NA	6.000	5.582
Metanol8%	Std Bracket Sample		Manual Integration	1263285005	NA	NA	8.000	8.474

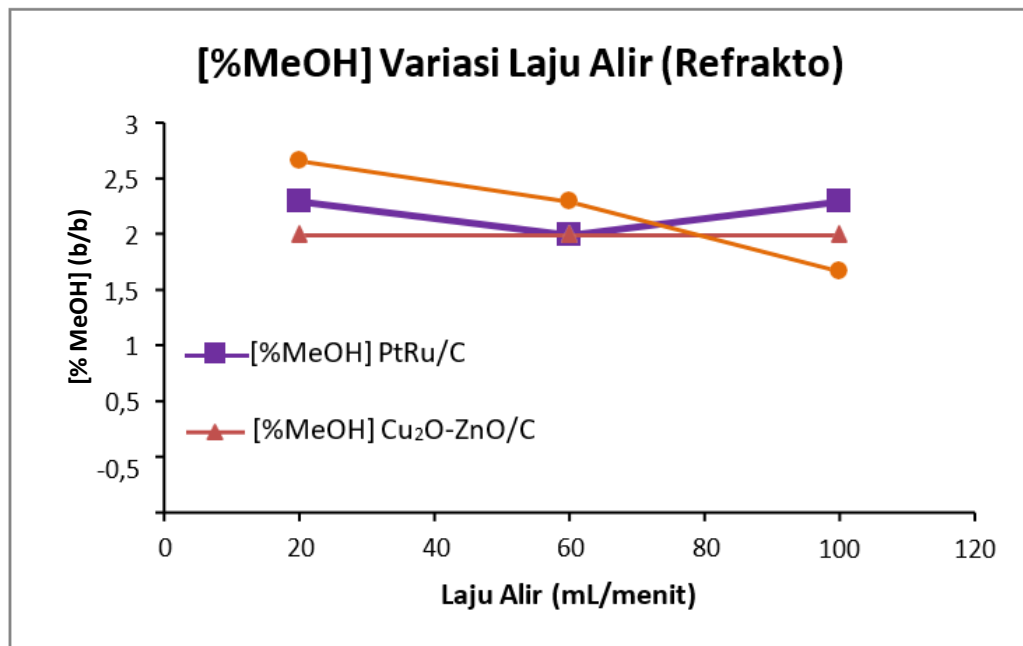
Lampiran 5. Data Pengukuran Metanol menggunakan Refraktometer



Grafik Kurva Metanol Standar Refraktometer

Tabel Penentuan Konsentrasi Metanol dalam Molar Berdasarkan Pengukuran.

No.	Konsentrasi Metanol (% b/b)	Pengulangan Pengukuran			Rata-Rata Konsentrasi Methanol Pengukuran (% b/b)
		I	II	III	
1	0	0	0	0	0
2	5	4	4	3	3.67
3	10	9	8	8	8.33
4	15	13	13	13	13
5	20	19	18	18	18.33



Grafik Pengukuran Konsentrasi Metanol menggunakan Refraktometer dengan Variasi Laju Alir CO₂

Data Pengukuran Konsentrasi Metanol menggunakan Refraktometer dengan Variasi Laju Alir CO₂

a. Katalis Cu₂O-ZnO/C

No.	Laju Alir (L/menit)	Refraktometer	Rata-rata
1	0,02	2/2/2	2
3	0,06	2/2/2	2
5	0,1	2/2/2	2

b. Katalis Pt-Ru/C

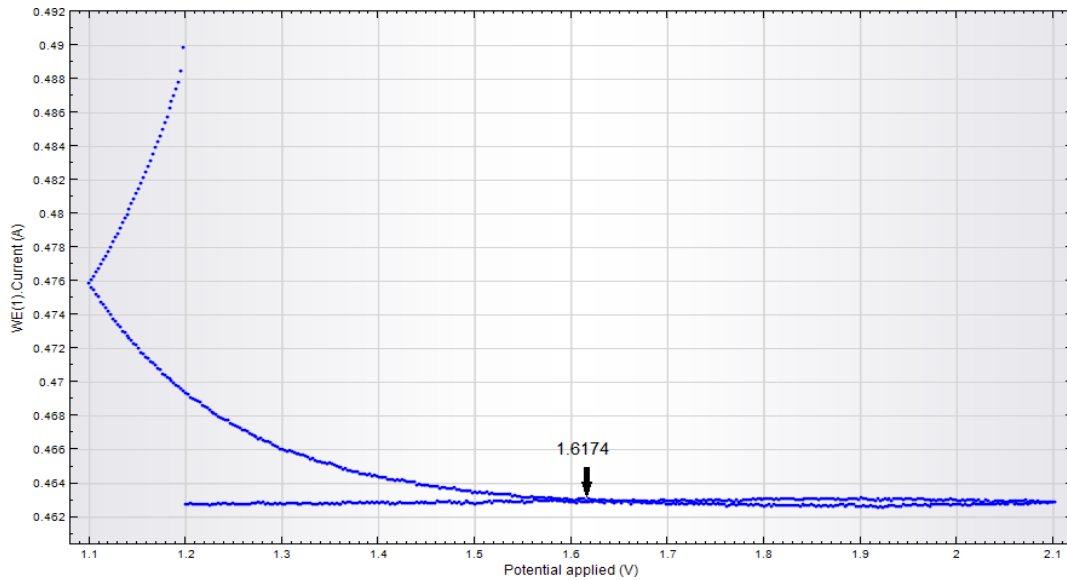
No.	Laju Alir (L/menit)	Refraktometer	Rata-rata
1	0,02	3/2/2	2,33
3	0,06	2/2/2	2
5	0,1	3/2/2	2,33

c. Katalis Pd-SnO₂/C

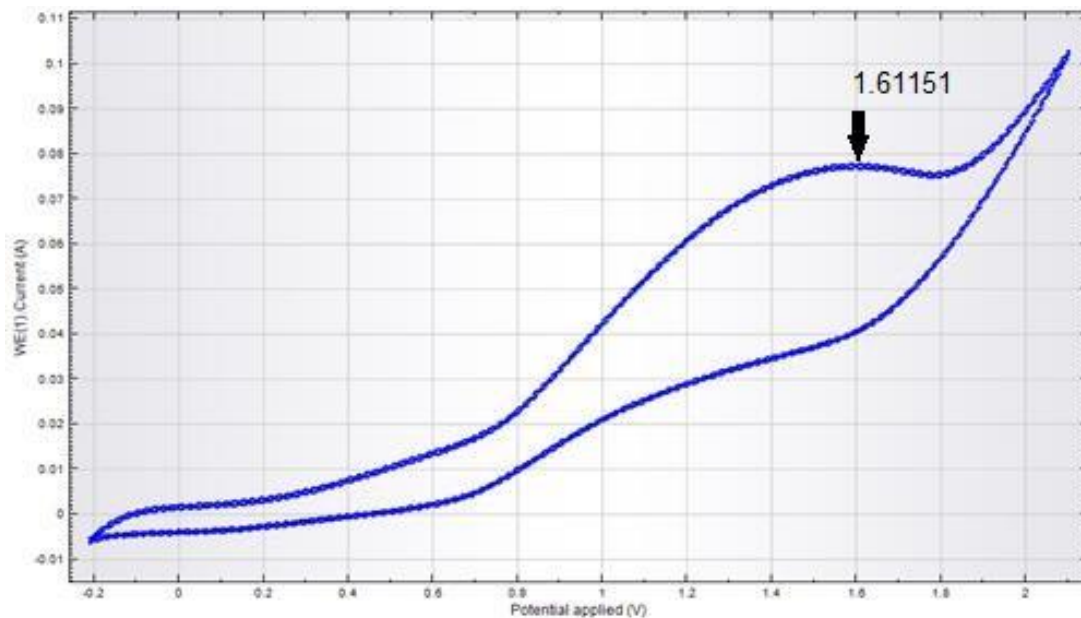
No.	Laju Alir (L/menit)	Refraktometer	Rata-rata
1	0,02	3/2/3	2,67
3	0,06	3/2/2	2,33
5	0,1	2/2/1	1,67

Lampiran 6. Grafik *Stripping* Metanol Untuk Katalis Pt-Ru/C dan Katalis Pd-SnO₂/C

a. Katalis Pt-Ru/C



b. Katalis Pd-SnO₂/C



Lampiran 7. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO₂ pada Katalis Cu₂O-ZnO/C

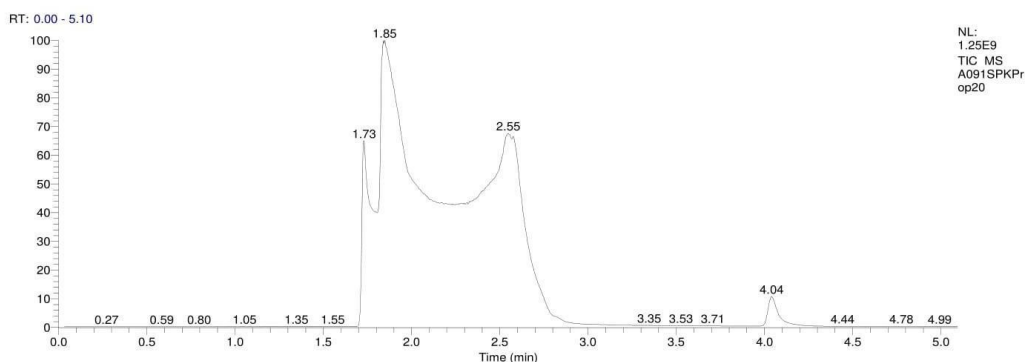
a. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 20 mL/menit

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA



Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPAN	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:15:25 PM
Run Time(min):	5.06	Vial:	9
Scans:	1489	Data File:	A091SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,51	186044,01	72917,03	0	5,06
1,62	169710,38	87707,72	0	6,08
1,73	2824379260	754864220,5	14,38	52370,41
1,84	9585338983	1075863449	48,79	74640,45
2,19	3201985,94	3056152,61	0,02	212,03
2,24	325758,62	671177,66	0	46,56
2,58	7225355672	579397680,7	36,78	40197,02
2,83	3873855,28	2245560,31	0,02	155,79
3,02	1379807,56	573755,63	0,01	39,81
3,08	95316,79	88913,07	0	6,17

% Metanol 5,9
 Metanol
 Propanol

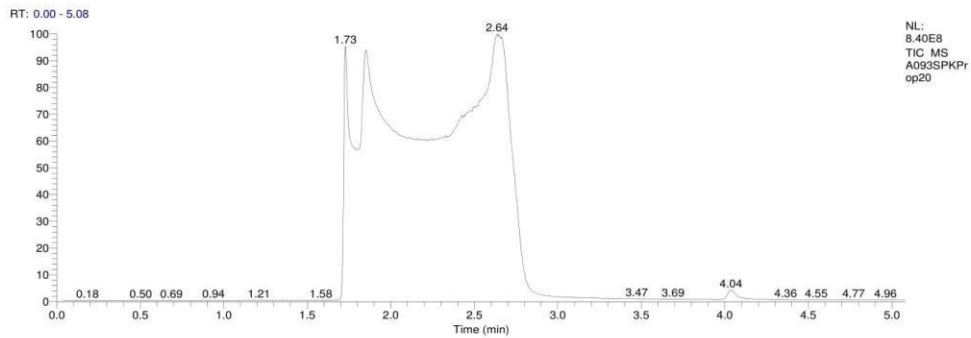
b. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 60 mL/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPAT	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:29:36 PM
Run Time(min):	5.05	Vial:	11
Scans:	1485	Data File:	A093SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,56	122207,36	75678,28	0	5,6
1,73	2828384295	747195000,7	16,96	55283,81
1,85	6187069464	632650515	37,1	46808,84
2,23	3923051,98	2798049,76	0,02	207,02
2,27	1383883,44	1973628,07	0,01	146,03
2,33	4901413,94	3651780,47	0,03	270,19
2,34	628183,32	1565437,94	0	115,82
2,66	7650774212	614590219,9	45,87	45472,59
2,93	64593,59	154939,23	0	11,46
2,96	125966,63	190426,96	0	14,09
3,02	89183,65	120064,84	0	8,88
3,09	80862,36	144301,19	0	10,68

% Metanol 9,142888

metanol
 Propanol

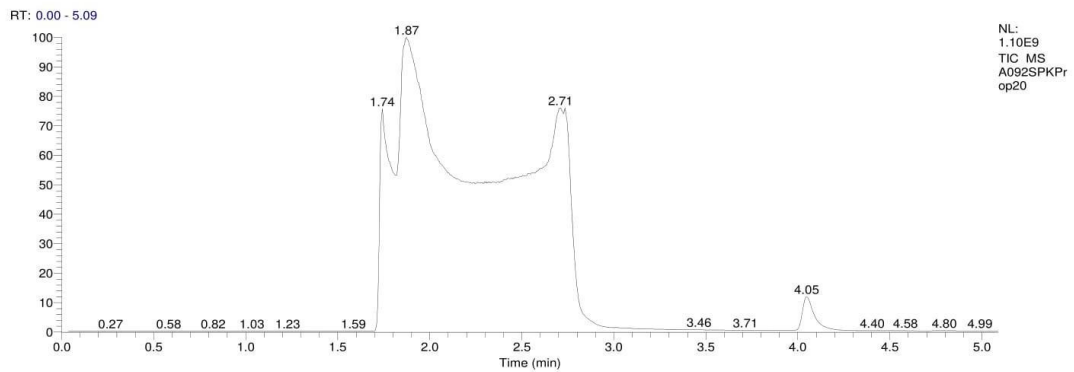
c. Katalis Cu₂O-ZnO/C Laju Alir 100 mL/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Metanol 30 Juni spk20% PROPANOL	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\Data\pak dedi	Acquisition Date:	06/30/20 03:22:31 PM
Run Time(min):	5.05	Vial:	10
Scans:	1487	Data File:	A092SPKProp20
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N
1,74	3369595524	766868714,7	17,44	55417,91
1,87	8711521071	892214635,3	45,08	64476,06
2,18	876676,29	1402123,82	0	101,32
2,2	2253385,43	1556926,3	0,01	112,51
2,24	1121568,49	2291857,68	0,01	165,62
2,26	11916717,47	4118578,98	0,06	297,63
2,37	1421987,07	2781706,89	0,01	201,02
2,73	7225135014	656871423,2	37,39	47468,94
2,87	306123,55	338190,4	0	24,44
3,02	1114518,58	592410,96	0,01	42,81
3,09	776437,95	299817,16	0	21,67

%Metanol 7,735952
 Metanol
 Propanol

Lampiran 8. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO₂ pada Katalis Pt-Ru/C

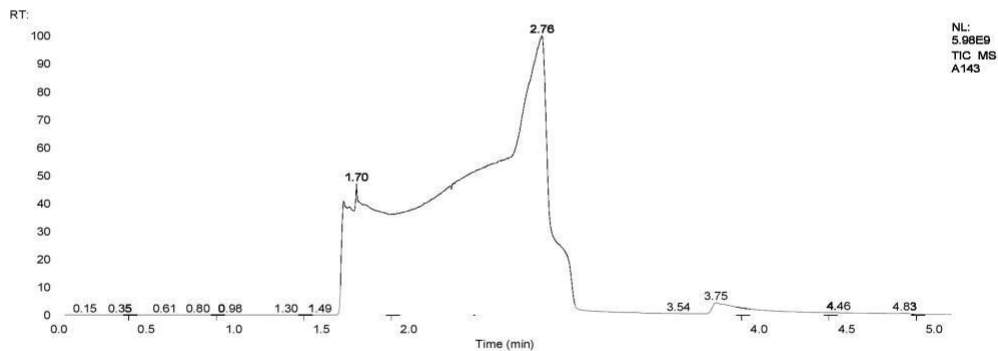
a. Katalis Pt-Ru/C pada laju alir CO₂ 20 mL/menit

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA



Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Pd(2) 0,06L/menit_spk prop20%	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 12:05:55 PM
Run Time(min):	5.06	Vial:	5
Scans:	1490	Data File:	A143
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N	% metanol
1.63	8739517176	2244268760	7.45	85291.63	1.60978186

1.7	15036207594	2179597832	12.82	82833.87	propanol
2.01	10528645.82	8255752.54	0.01	313.75	
2.04	6744205.84	10211907.65	0.01	388.1	
2.76	93526661942	5303859318	79.72	201568.9	
total	1.0858E+11				

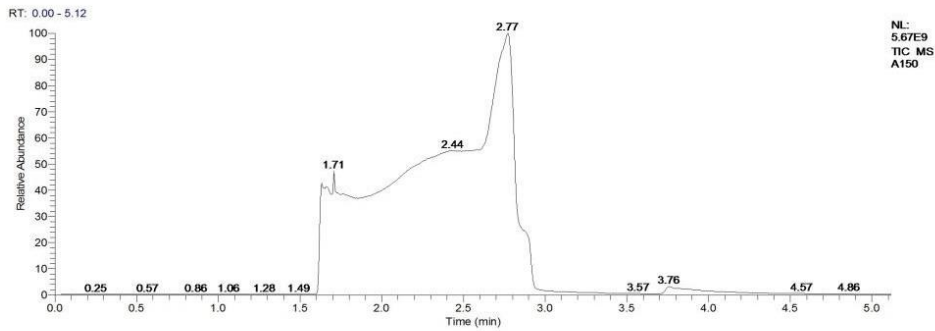
b. Katalis Pt-Ru/C pada laju alir CO₂ 60 mL/menit

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA



Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	PtRu/C 0,06L/menit+Spk Prop20%	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 12:20:04 PM
Run Time(min):	5.08	Vial:	7
Scans:	1496	Data File:	A150
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N		%metanol
1.63	9183563397	2213770422	7.6	67188.57	metanol	1.645622
1.71	1.2964E+10	2039024256	10.73	61884.98		
1.99	4905308.86	6043464.3	0	183.42		
2.01	7561183.49	11784735.74	0.01	357.67		
2.77	9.8635E+10	5113043132	81.65	155182.3		
total	1.1161E+11					

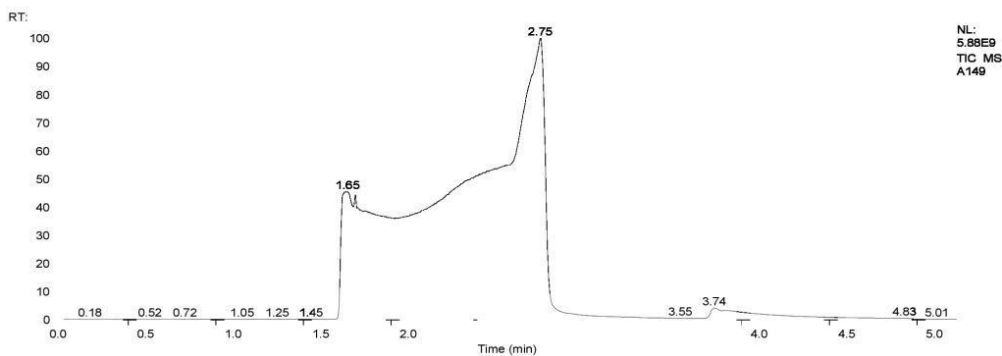
c. Katalis Pt-Ru/C pada laju alir CO₂ 100 mL/menit

LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA



Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	PtRu/C 0,1L/menit+spk prop 20%	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 12:13:01 PM
Run Time(min):	5.09	Vial:	6
Scans:	1498	Data File:	A149
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N	
1.63	26413627373	2417996064	25.52	67938.91	metanol
2.01	19715143.25	15588845.77	0.02	438	
2.07	11728392.97	15883110.67	0.01	446.27	
2.15	12420460.28	14171099.82	0.01	398.17	propanol
2.75	77046298888	5343965397	74.44	150150.5	
total	77090162885				

%metanol
6.852658

Lampiran 9. Data Pengukuran Metanol menggunakan GC-MS dengan Variasi Laju Alir CO₂ pada Katalis Pd-SnO₂/C

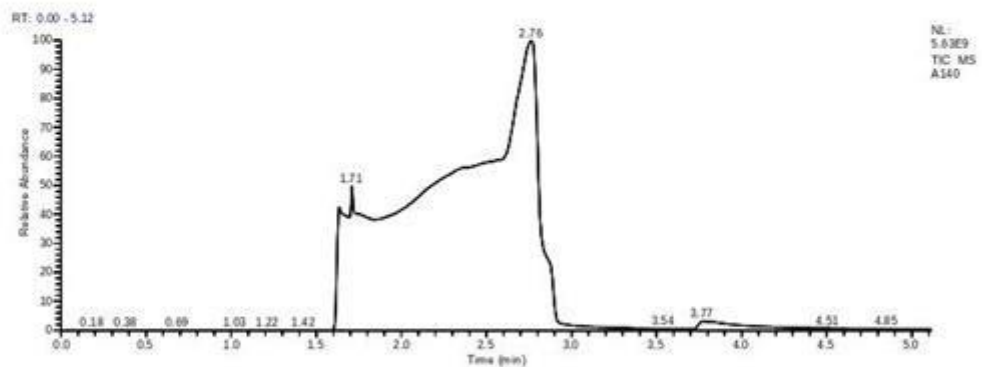
a. Katalis Pd-SnO₂/C pada laju alir CO₂ 20 mL/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Pd 0,02 L/mnt	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 02:05:41 PM
Run Time(min):	5,08	Vial:	8
Scans:	1495	Data File:	A140
Operator:	LAB_UNRSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N	% metanol
1.63	8846678548	2185226195	7.3	70685.64	metanol
					1.575894

1.71	13553306007	2129380097	11.19	68879.18	propanol
2	18702493.89	12046020.91	0.02	389.65	
2.77	98701531633	5054230460	81.49	163489	
3.09	1510092.98	1136058.19	0	36.75	
ttl	1.12275E+11				

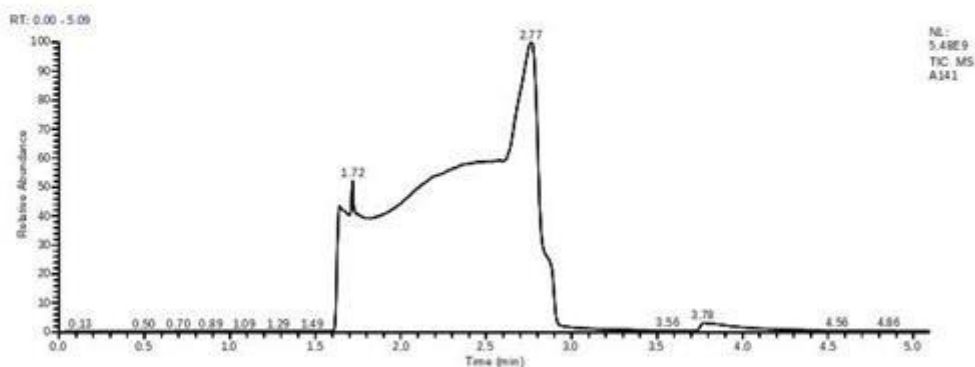
b. Katalis Pd-SnO₂/C pada laju alir CO₂ 60 L/menit



LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269


Sample ID:	Pd 0,06L/mnt	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 02:12:42 PM
Run Time(min):	5.06	Vial:	9
Scans:	1489	Data File:	A141
Operator:	LAB_UNSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



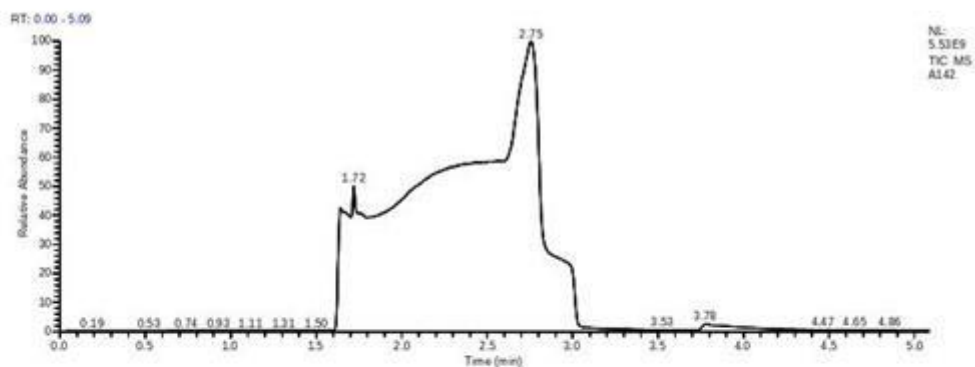
RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N	% metanol
1.51	1329444.47	442984.17	0	14.28	
1.64	10123261700	2351306052.52	4.74	75811.18	metanol 0.994211

1.72	14045347023	2809858446.44	6.57	90595.9	propanol
2.77	1.89596E+11	5325682051.2	88.69	171711	
3.08	2397673.4	1156578.56	0	37.29	
ttl	2.03644E+11				

c. Katalis Pd-SnO₂/C pada laju alir CO₂ 100 L/menit

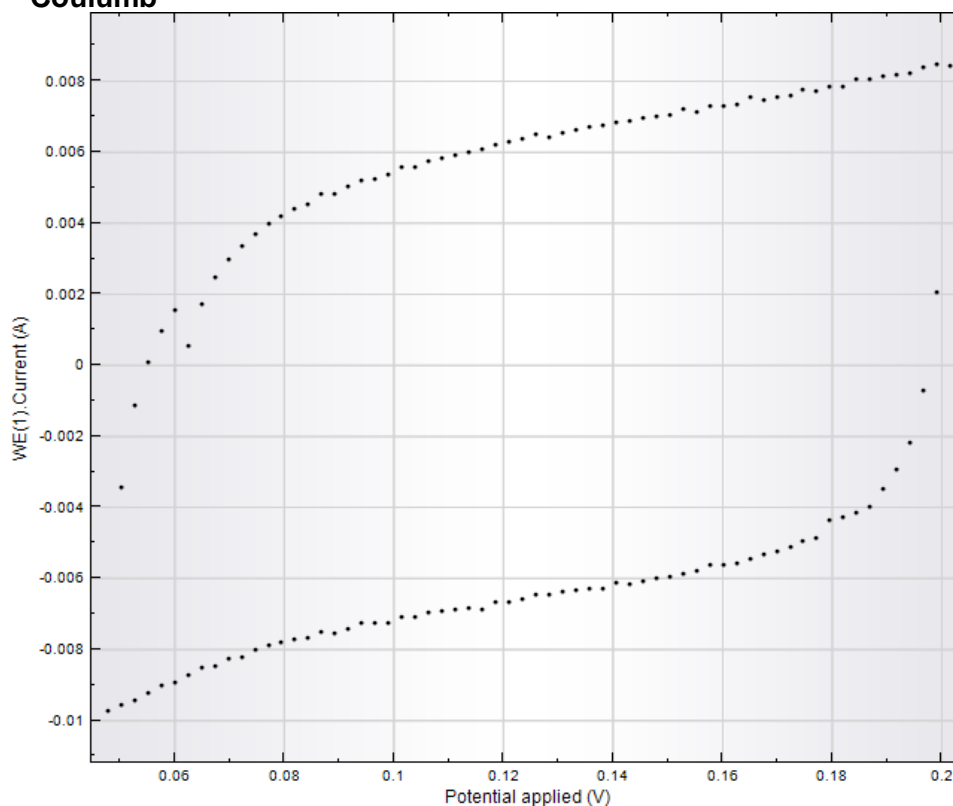

 LAPORAN HASIL PENGUJIAN
 LABORATORIUM PENGUJIAN TERPADU
 JURUSAN KIMIA FAKULTAS MIPA
 UNIVERSITAS SRIWIJAYA
 Jalan Raya Palembang Prabumulih KM. 32 Indralaya Telp. 0711-580269

Sample ID:	Pd 0,1 L/mnt	Sample Name:	
Current Data Path:	C:\Xcalibur\data\pak dedi	Acquisition Date:	09/07/20 02:19:47 PM
Run Time(min):	5.05	Vial:	10
Scans:	1487	Data File:	A142
Operator:	LAB_UNRSRI	High Mass(m/z):	100
ISTD Amount:	0.000	Instrument Model:	ISQ Series
Instrument Hardware Version:	210.0.84.19		



RT	Peak Area	Peak Height	Area %	S/N		% metanol
1.64	9951772584	2.328E+09	4.38	62024.35	metanol	0.915571
1.72	1.2891E+10	2.727E+09	5.67	72651.94	propanol	
2.44	1.0768E+11	3.135E+09	47.36	83519.89		
2.56	2.4304E+10	3.151E+09	10.69	83941.55		
2.75	7.2518E+10	5.413E+09	31.9	144222		
total	2.1739E+11					

Lampiran 10. Pengukuran Kadar Metanol dengan Perhitungan Efisiensi Coulumb



Gambar Kurva

Voltamogram CV Cu₂O-ZnO/CTabel Hasil

Pengukuran Muatan Listrik

	Tegangan		Arus	Coloumb
No.	(V)	Waktu (s)	(A)	(Q)
1.	0,150299	25,1424	0,00593445	0,14920632 (Q1)
2.	0,125885	12,4471	0,00649506	0,08084466 (Q3)

$$Ec = \frac{Q3}{Q1} \times 100\%$$

$$Ec = \frac{Q3}{Q1} \times 100\% = \frac{0,08084466}{0,14920632} \times 100\% = 54,1831363 \%$$

Lampiran 11. Perhitungan Kadar Metanol menggunakan GC-MS dengan Metode Internal Standar

Konsentrasi metanol yang terbentuk dari hasil reduksi elektrokimia (analisis kuantitatif) dapat dibuktikan dengan membandingkan antara luas *peak* sampel dengan luas *peak* propanol standar dengan persamaan:

konsentrasi metanol sampel (%)

$$= \frac{\text{luas } peak \text{ metanol sampel}}{\text{luas } peak \text{ propanol standar}} \times \text{konsentrasi propanol \% (20\%)}$$

Lampiran 12. Perhitungan Kerapatan Arus pada masing-masing MEA

$$\text{Kerapatan Arus (mA/cm}^2\text{)} = \frac{\text{Arus (mA)}}{\text{Luas Penampang (cm}^2\text{)}}$$

a. Katalis Cu₂O-ZnO/C

Katalis	20 mL/menit	60 mL/menit	100 mL/menit	120 mL/menit	140 mL/menit
Arus (A)	0,43	0,75	0,53	0,49	0,23
Kerapatan arus (mA/cm ²)	8,77	15,3	10,81	10,00	4,69




b. Katalis Pt-Ru/C




Katalis	20 mL/menit	60 mL/menit	100 mL/menit	120 mL/menit	140 mL/menit
Arus (A)	0,14	0,21	0,50	0,33	0,03
Kerapatan arus (mA/cm ²)	2,85	4,28	10,20	6,73	0,61









c. Katalis Pd-SnO₂/C

Katalis	20 mL/menit	60 mL/menit	100 mL/menit	120 mL/menit	140 mL/menit
Arus (A)	0,12	0,09	0,04	0,02	0,0
Kerapatan arus (mA/cm ²)	2,45	1,83	0,81	0,41	0

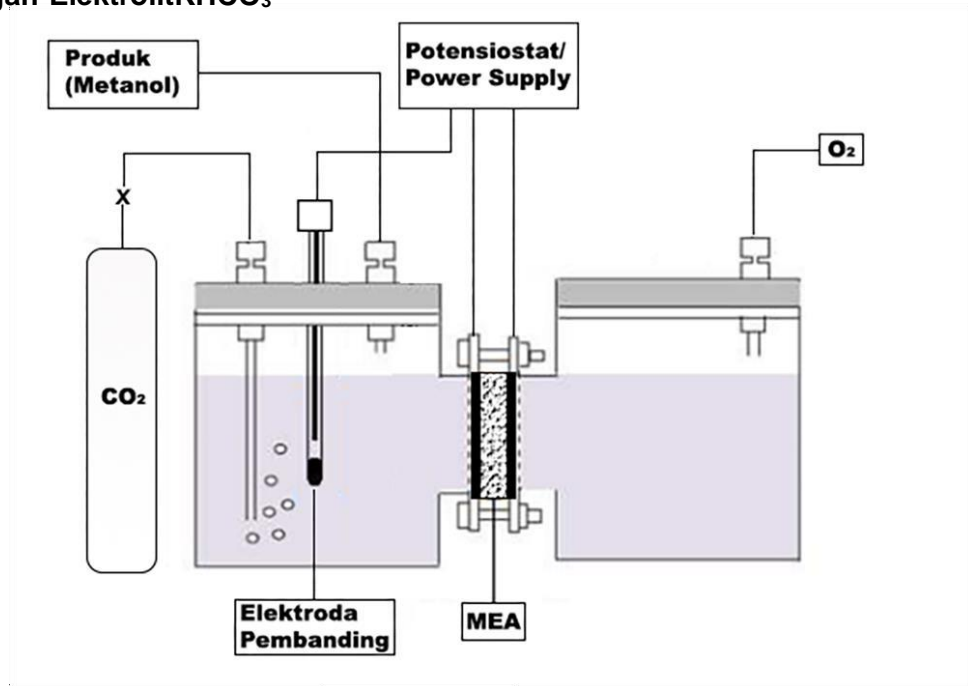
Lampiran 13. Dokumentasi Riset

No.	Gambar Kegiatan	Keterangan
1.		<p>Proses pencampuran katalis dengan cara dimilling menggunakan <i>HEM Shaker</i></p>
2.		<p>Proses aktivasi membran nafion 117 menggunakan <i>hot plate stirrer</i></p>
3.		<p>Proses penyemprotan katalis pada GDL menggunakan <i>spray gun</i></p>

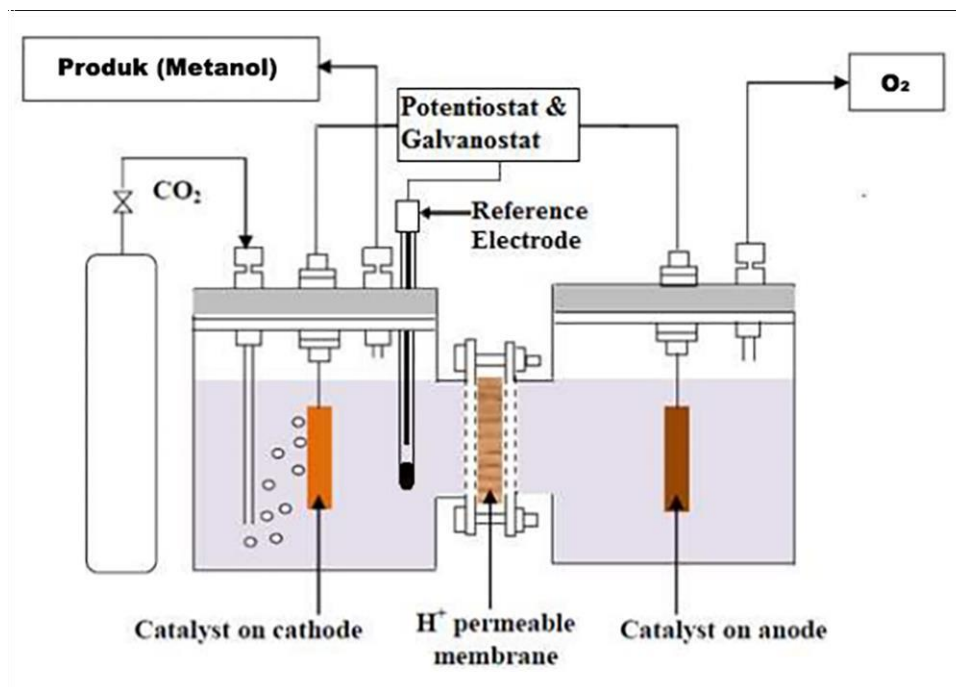
4.		<p>Proses sintering elektroda menggunakan <i>Muffle Furnace</i></p>
5.		<p>Proses penyusunan elektroda dan membrane untuk dijadikan MEA</p>
6.		<p>Alat <i>Hydraulic Hot Press</i> untuk menyatukan elektroda dan membran menjadi MEA</p>

7.		<p>Proses pemasangan MEA pada <i>electrolyzer</i></p>
8.		<p>Running konversi CO₂ menjadi metanol</p>
9	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Katalis SnO₂</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Katalis Pt-Ru/C</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Katalis ZnO</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">  <p>Katalis Pd/C</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Katalis Cu₂O</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>Pt/C</p> </div> </div>	<p>Penyediaan Bahan Penelitian</p>

Lampiran 14. Diagram Reaktor Konversi CO_2 menjadi Metanol dengan Elektrolit KHCO_3

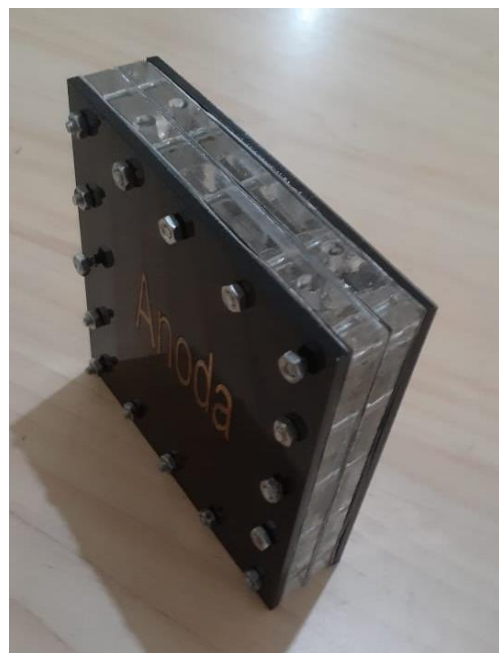


Gambar Reaktor Elektrolisis CO_2 Menggunakan Elektrolit KHCO_3 dengan MEA



Gambar Reaktor Elektrolisis CO_2 Menggunakan Elektrolit KHCO_3 dengan Elektroda Terpisah dari membran





Lampiran 15. Gambar Sel Elektrolisis dengan Stek Menggunakan Acrylic



Lampiran 16. Perhitungan Hasil Konversi CO₂ menjadi Metanol pada Berbagai Kondisi

Loading (mg/cm ²)	Elektroliser	Katoda	Anoda	Ukuran (cm ²)	Jenis Stek	Waktu (jam)	Tegangan (V)	Laju alir (mL/menit)	% Metanol (%b/v)	%Konversi
1	Komersial	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	8,84	34,09
2	Komersial	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	8,25	31,82
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	11,47	44,24
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	4	1,6	60	13	25,07
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	6	1,6	60	17	21,85
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Tunggal	8	1,6	60	21,9	21,12
1	Akrilik	CO ₂	H ₂	7x7	Tunggal	2	0,5	60	11,73	45,24
1	Akrilik	CO ₂	H ₂	7x7	Tunggal	2	1,6	60	7,18	27,69
1	Akrilik	CO ₂	H ₂	7x7	Tunggal	4	0,5	60	13,5	26,03
1	Akrilik	CO ₂	H ₂	7x7	Tunggal	6	0,5	60	17,15	22,05
1	Akrilik	CO ₂	H ₂	7x7	Tunggal	8	0,5	60	23,47	22,63
1	Akrilik	0,1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	5,58	21,44
1	Akrilik	0,4 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	6,045	23,31
1	Akrilik	0,7 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	7,44	28,69
1	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	9,765	37,66
1	Akrilik	1,3 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	4,495	17,34
1	Akrilik	0,1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	3,565	13,75
1	Akrilik	0,4 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	7,75	29,89
1	Akrilik	0,7 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	4,495	17,34
1	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	9,92	38,26
1	Akrilik	1,3 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	5,89	22,72
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	1,6	60	20	77,13
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	4	1,6	60	21,5	41,46
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	6	1,6	60	12	15,43
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	8	1,6	60	6,5	6,27
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	2	2,8	60	17,83	68,76
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	4	2,8	60	16,5	31,82
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	6	2,8	60	10,5	13,5
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂ O	7x7	Tunggal	8	2,8	60	8	7,71
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂	7x7	Tunggal	2	1,6	60	21,5	82,92
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂	7x7	Tunggal	4	1,6	60	24	46,28
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂	7x7	Tunggal	6	1,6	60	14	18
2	Akrilik	1 M KHCO ₃	H ₂	7x7	Tunggal	8	1,6	60	9	8,68
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Ganda	2	1,6	60	15,5	59,78
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Ganda	4	1,6	60	20,77	40,5
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Ganda	6	1,6	60	21,08	27,1
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	7x7	Ganda	8	1,6	60	37,51	36,17
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	10x10	Tunggal	2	1,6	60	12,75	49,17
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	10x10	Tunggal	4	1,6	60	21,75	41,94
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	10x10	Tunggal	6	1,6	60	22,25	28,6
1	Akrilik	CO ₂	H ₂ O	10x10	Tunggal	8	1,6	60	26,5	25,55

Lampiran 17. Daftar Peralatan Penunjang Penelitian

No	Peralatan	Deskripsi	Keterangan
1	Electrolyser		Dibeli melalui supplier
2	Power supply		Dibeli melalui supplier
3	Alat Refraktometer		Dibeli melalui supplier
4	Pengadaan bahan Peneitian		Dibeli melalui supplier

Lampiran 18 Perhitungan ECSA dan Konduktivitas

a. Elektroda Pt-Ru/C Loading 2 mg/cm²

Index	Peak position	Peak height	Peak area	Base start	Base end	Peak (1/2)	Peak sum of derivatives	Panjang alas	laju telusur	t	luas peak area	total luas peak area	Lrata-rata	Qh	ECSA
1	0,22629	0,000268	7,41E-05	-0,1218	-0,01434	0,052833	0,03249	107,43	50	1,3672	0,000184	0,00020800	0,0001	0,000002123	12,48
2	0,084686	-0,0001	2,63E-05	0,10529	0,12726	-0,03955	0,022844	21,97	50	0,4396	0,00245				

$$\text{Puncak Anodik} = 0,22629 \text{ V}$$

$$\text{Puncak Katodik} = -0,0001 \text{ V}$$

$$\text{Panjang alas} = (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)}$$

$$t \text{ (waktu)} = \frac{\text{panjang alas (mV)}}{\text{laju telusur } (\frac{\text{mV}}{\text{s}})}$$

$$\text{Luas peak area} = \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right|$$

$$\text{Lrata-rata} = \frac{\text{total luas peak area}}{N} \text{ (C)}$$

Dimana N : jumlah *peak area*

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_1 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [(-0,014343) - (-0,12177)] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 107,43 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_2 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [0,12726 - 0,10529] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 21,97 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{\text{panjang alas}_1}{\text{laju telusur}} = \frac{68,36}{50} = 1,3672 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{\text{panjang alas}_2}{\text{laju telusur}} = \frac{21,98}{50} = 0,4396 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_1 &= \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{1,3672 \times 0,000268}{2} \right| \\ &= 1,84 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_2 &= \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{0,4396 \times (-0,0001)}{2} \right| \\ &= 2,45 \times 10^{-3} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Luas Peak Area} &= \text{Luas peak area}_1 + \text{Luas peak area}_2 \\ &= 1,84 \times 10^{-4} \text{ (C)} + 2,45 \times 10^{-3} \text{ (C)} \\ &= 2,08 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lrata-rata} &= \frac{\text{Total Luas Peak Area}}{N} \\ &= \frac{2,08 \times 10^{-4} \text{ (C)}}{2} \\ &= 1,0403 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$Q_h = \frac{\text{Lrata-rata}}{\text{Luas sampel}} = \frac{1,0403 \times 10^{-4}}{49 \text{ cm}^2} = 2,123 \times 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)}$$

$$\text{ECSA} = \frac{Q_h}{210 \times \text{loading}} = \frac{2,0336 \times 10^{-5} \text{ (C/cm}^2\text{)}}{210 \cdot 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)} \times 2 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2} = 12,4841 \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

b. Elektroda Cu₂O-ZnO/C

Index	Peak position	Peak height	Peak area	Base start	Base end	Peak (1/2)	Peak sum of derivatives	Panjang alas	laju telusur	t	luas peak area	total luas peak area	Lrata-rata	Qh	ECSA
1	-0,19485	0,000748	5,53E-05	-0,2535	-0,13626	0,040156	0,072555	117,19	50	2,3438	0,000876581	0,00214194	0,001072	2,18776E-05	26,04
2	0,36423	-0,00071	7,83E-05	0,25681	0,43503	-0,05159	0,057316	178,22	50	3,5644	0,001265362				

$$\text{Puncak Anodik} = -0,19485 \text{ V}$$

$$\text{Puncak Katodik} = 0,36423 \text{ V}$$

$$\text{Panjang alas} = (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)}$$

$$t \text{ (waktu)} = \frac{\text{panjang alas (mV)}}{\text{laju telusur (}\frac{\text{mV}}{\text{s}}\text{)}}$$

$$\text{Luas peak area} = \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right|$$

$$\text{Lrata-rata} = \frac{\text{total luas peak area}}{N} \text{ (C)}$$

Dimana N : jumlah *peak area*

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_1 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [-0,13626 - (-0,25345)] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 117,19 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_2 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [0,43503 - (0,25681)] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 178,22 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{\text{panjang alas 1}}{\text{laju telusur}} = \frac{117,19}{50} = 2,3438 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{\text{panjang alas 2}}{\text{laju telusur}} = \frac{178,22}{50} = 3,5644 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_1 &= \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{2,3438 \times 0,000748}{2} \right| \\ &= 8,77 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_2 &= \left| \frac{t \text{ (s)} \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{3,5644 \times (-0,00071)}{2} \right| \\ &= 1,27 \times 10^{-3} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Luas Peak Area} &= \text{Luas peak area}_1 + \text{Luas peak area}_2 \\ &= 8,77 \times 10^{-4} \text{ (C)} + 1,27 \times 10^{-3} \text{ (C)} \\ &= 2,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lrata-rata} &= \frac{\text{Total Luas Peak Area}}{N} \\ &= \frac{7,0774 \times 10^{-3} \text{ (C)}}{2} \\ &= 2,144 \times 10^{-3} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$Q_h = \frac{\text{Lrata-rata}}{\text{Luas sampel}} = \frac{2,144 \cdot 10^{-3}}{49 \text{ cm}^2} = 2,188 \times 10^{-5} \text{ (C/cm}^2\text{)}$$

$$\text{ECSA} = \frac{Q_h}{420 \times \text{loading}} = \frac{2,188 \times 10^{-5} \text{ (C/cm}^2\text{)}}{420 \cdot 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)} \times 2 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2} = 26,044 \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

c. Elektroda Pd-SnO₂/C

Index	Peak position	Peak height	Peak area	Base start	Base end	Peak (1/2)	Peak sum of derivatives	Panjang alas	laju telusur	t	luas peak area	total luas peak area	Lrata-rata	Qh	ECSA
1	0,15915	0,001555	1,06E-05	0,1445	0,1616	0,0013544	0,38708	17,09	50	0,342	0,00026575	0,00055098	0,00028	5,62229E-06	13,386394
2	0,41794	-0,0012977	9,22E-06	0,4106	0,4326	-0,0009586	0,4216	21,98	50	0,44	0,00028523				

$$\text{Puncak Anodik} = 0,15915 \text{ V}$$

$$\text{Puncak Katodik} = 0,41794 \text{ V}$$

$$\text{Panjang alas} = (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)}$$

$$t \text{ (waktu)} = \frac{\text{panjang alas (mV)}}{\text{laju telusur } \left(\frac{\text{mV}}{\text{s}}\right)}$$

$$\text{Luas peak area} = \left| \frac{t (s) \times \text{peak height (A)}}{2} \right|$$

$$\text{Lrata-rata} = \frac{\text{total luas peak area}}{N} \text{ (C)}$$

Dimana N : jumlah *peak area*

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_1 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [0,1616 - 0,1445] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 17,09 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Panjang alas}_2 &= (\text{base end} - \text{base start}) \times 1000 \text{ (mV)} \\ &= [0,4326 - 0,4106] \text{ V} \times 1000 \text{ mV} \\ &= 21,98 \text{ mV} \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{\text{panjang alas 1}}{\text{laju telusur}} = \frac{17,09}{50} = 0,342 \text{ s}$$

$$t_2 = \frac{\text{panjang alas 2}}{\text{laju telusur}} = \frac{21,98}{50} = 0,44 \text{ s}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_1 &= \left| \frac{t (s) \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{0,342 \times 0,0015}{2} \right| \\ &= 2,65 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Luas peak area}_2 &= \left| \frac{t (s) \times \text{peak height (A)}}{2} \right| \\ &= \left| \frac{0,44 \times (-0,00129)}{2} \right| \\ &= 2,85 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Total Luas Peak Area} &= \text{Luas peak area}_1 + \text{Luas peak area}_2 \\ &= 2,65 \times 10^{-4} \text{ (C)} + 2,85 \times 10^{-4} \text{ (C)} \\ &= 5,51 \times 10^{-4} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lrata-rata} &= \frac{\text{Total Luas Peak Area}}{N} \\ &= \frac{5,51 \times 10^{-4} \text{ (C)}}{2} \\ &= 2,8 \times 10^{-3} \text{ (C)} \end{aligned}$$

$$Q_h = \frac{\text{Lrata-rata}}{\text{Luas sampel}} = \frac{2,8 \cdot 10^{-4}}{49 \text{ cm}^2} = 5,62 \times 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)}$$

$$\text{ECSA} = \frac{Q_h}{420 \times \text{loading}} = \frac{5,62 \times 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)}}{210 \cdot 10^{-6} \text{ (C/cm}^2\text{)} \times 2 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2} = 13,38 \text{ (cm}^2\text{/g)}$$

No.	Sampel	Parameter Impedansi		Z_R	Konduktivitas Elektrik (S/cm)
		R_p (Ω)	R_s (Ω)		
1.	Pt-Ru/C	6,8831	2,7585	9,6416	$2,1 \times 10^{-3}$
2.	$\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$	6,3649	-0,4224	5,9425	$3,4 \times 10^{-3}$
3.	$\text{Pd-SnO}_2/\text{C}$	3,1981	6,8883	10,0864	$2,04 \times 10^{-3}$

Rumus konduktivitas :

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A}$$

dimana:

$$Z_R = R_p + R_s$$

$$l = 1 \text{ cm}$$

$$A = 49 \text{ cm}^2$$

Nilai Z_R ditentukan dengan ($R_p + R_s$)

$$Z_R = R_p + R_s =$$

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} =$$

- Katalis Pt-Ru/C

$$Z_R = R_p + R_s = 6,8831 + 2,7585 = 9,6416$$

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} = \frac{1}{9,6416} \times \frac{1}{49} = 2,1 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$$

- Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$

$$Z_R = R_p + R_s = 6,3649 + (-0,4224) = 5,9425$$

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} = \frac{1}{5,9425} \times \frac{1}{49} = 3,4 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$$

- Katalis $\text{Cu}_2\text{O-ZnO/C}$

$$Z_R = R_p + R_s = 3,1981 + 6,8883 = 10,0864$$

$$\sigma = \frac{1}{Z_R} \times \frac{l}{A} = \frac{1}{10,0864} \times \frac{1}{49} = 2,04 \times 10^{-3} \text{ S/cm}$$