

PROPOSAL

Insentif Riset SINas 2014

Pembuatan *Membrane Electrode Assembly (MEA) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodeposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi *Base Transceiver Station (BTS)*

Bidang Prioritas Iptek:

30. Teknologi Energi
30.02 Riset Pengembangan Pembangkit Listrik dari Energi Baru dan Terbarukan

Jenis Insentif Riset:

Riset Terapan (RT)

RT 2014 - 1136

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

**JL. Palembang – Prabumulih Km. 32 Inderalaya Ogan Ilir
Sumatera Selatan 30062 telp (0711) 580169 fax (0711) 580644
e-mail: rohendi19@gmail.com**

27 Juni 2013

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian : Pembuatan Membrane Electrode Assembly (MEA) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodeposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi Base Transceiver Station (BTS)

Bidang Prioritas IPTEK : Teknologi Energi - Riset Pengembangan Pembangkit Listrik dari Energi Baru dan Terbarukan

Jenis Insentif Ristek : Riset Terapan

Lokasi Penelitian : Universitas Sriwijaya, Inderalaya Ogan Ilir-Sumsel


Keterangan Lembaga Pelaksana/ Pengelola Penelitian	
A. Lembaga Pelaksana Penelitian	
Nama Peneliti Utama	Drs. Dedi Rohendi, M.T
Nama Lembaga/ Institusi	Universitas Sriwijaya
Unit Organisasi	Lembaga Penelitian
Alamat	Jl. Palembang-Prabumulih Km.32 Inderalaya - OI
Telepon/ HP/ Faksimil/ Email	0711-580169/ 0816-383220/ rohendi19@gmail.com

Rekapitulasi Biaya:

No.	Uraian	Jumlah (Rp.)
1.	Gaji dan Upah	154,460,000
2.	Bahan Habis Pakai	269,625,000
3.	Perjalanan	27,500,000
4.	Lain-lain	20,500,000
	Jumlah biaya tahun yang diusulkan	472,085,000

Setuju diusulkan,

Ketua
Lembaga Penelitian UNSRI


Prof. Dr. Ir. M. Said, M.Sc
NIP 196108121987031003

Koordinator Kegiatan


Drs. Dedi Rohendi, MT
NIP.196704191993031001

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	2
DAFTAR ISI	3
ABSTRAK	4
PENDAHULUAN.....	5
1. Latar Belakang	5
2. Tujuan dan Sasaran	6
METODE	7
PROSPEK DAN DAMPAK MANFAAT	8
1. State of the Art	8
2. Status Penelitian dan Teknologi Saat Ini	8
KELUARAN YANG DIHARAPKAN	10
PERSONIL PELAKSANA KEGIATAN RISET	12
JADWAL KEGIATAN	27
PROFIL LEMBAGA PENGUSUL	27
DAFTAR PUSTAKA	29
LAMPIRAN	31

ABSTRAK

Fuel cell (sel bahan bakar) dengan keunggulan pada tingkat konversi yang tinggi, tingkat polusi yang rendah, modular dan beragam sumber bahan bakarnya diharapkan dapat menggantikan sumber energi konvensional yang ada. Teknologi Fuel Cell pasti akan hadir di Indonesia karena desakan yang makin kuat untuk menghadirkan sumber energi yang bersih. Saat ini, penggunaan fuel cell di dunia sudah memasuki tahap komersialisasi untuk kendaraan, sementara di Indonesia, fuel cell sudah mulai digunakan sebagai sumber energi pada *Base Transceiver Station* (BTS) tanpa dukungan kemandirian dalam penguasaan teknologinya. Salah satu jenis fuel cell dengan keunggulan suhu operasi yang relatif rendah, tingkat konversi tinggi dan aplikasi yang beragam (keperluan energi mudah alih, kendaraan bermotor dan sumber energi untuk perumahan) adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC). Salah satu faktor terpenting dalam PEMFC adalah *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang merupakan pusat reaksi elektrokimia pengubahan gas hidrogen (bahan bakar) dan oksigen (oksidan) menjadi energi listrik dan air sebagai buangan. MEA terdiri atas katoda dan anoda yang ditempelkan pada kedua sisi membrane elektrolit. Karena mempunyai fungsi sangat penting, maka MEA harus mendapat perhatian khusus dalam upaya pencapaian kinerja tinggi terutama kerapatan arus (*current density*) dan daya tahannya. Hal yang perlu dikaji untuk menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi adalah kandungan dan jenis katalis serta metode pembuatannya. Pada penelitian ini, akan dikaji dua metode pembuatan elektroda yaitu metode elektrodposisi dan penyemprotan (*spraying*). Sementara itu, katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah paduan katalis Pt dengan logam transisi Co, Ni dan V dalam bentuk Pt-M/C dan akan dibandingkan dengan katalis Pt/C. Penggunaan logam golongan transisi lain selain platina sebagai katalis pendukung platina dimaksudkan untuk meningkatkan fungsi katalitik elektroda dan mengurangi kandungan platina yang relatif mahal dan mudah teracuni. Penelitian pembuatan MEA diharapkan dapat menjadi landasan bagi peningkatan kemandirian Indonesia dalam penguasaan teknologi fuel cell (khususnya PEMFC), sehingga Indonesia tidak hanya sekedar menjadi pasar bagi produsen fuel cell manca negara. Secara khusus, MEA yang dibuat diharapkan mempunyai kinerja tinggi dalam hal kerapatan arus (*current density*) dan daya tahan (*durability*) sehingga diproyeksikan untuk dapat digunakan pada BTS.

Kata Kunci: MEA, elektrodposisi, Pt-Ni/C, PEMFC, BTS

PENDAHULUAN

1) Latar Belakang

Fuel cell (sel bahan bakar) merupakan peralatan elektrokimia yang dapat mengubah energi bebas yang tersedia dalam bahan bakar (energi kimia) langsung menjadi kerja yang bermanfaat dalam bentuk energi listrik (Wang, Zuo et al. 2009; Wang, Chen et al. 2011). Fuel cell dengan keunggulan pada tingkat konversi yang tinggi, tingkat polusi yang rendah, modular dan beragam sumber bahan bakarnya diharapkan dapat menggantikan sumber energi konvensional yang ada (Daud, Mohamad et al. 2004 ; Andr'e D. Taylor 2007).

Teknologi Fuel Cell pasti akan hadir di Indonesia karena desakan yang makin kuat untuk menghadirkan sumber energi yang bersih. Saat ini, penggunaan fuel cell di dunia sudah memasuki tahap komersialisasi untuk kendaraan, sementara di Indonesia, fuel cell sudah mulai digunakan sebagai sumber energi pada *Base Transceiver Station* (BTS) tanpa dukungan kemandirian dalam penguasaan teknologinya.

Universitas Sriwijaya (UNSRI) sebagai perguruan tinggi yang dipercaya untuk mengelola RUSNAS PEBT (Riset Unggulan Strategis Nasional Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan) sepatutnya mengambil bagian dalam menopang penguatan riset dan jaringan penelitian di bidang Fuel Cell di Indonesia. Hal ini karena Fuel Cell merupakan sumber energi baru yang bersih dan mempunyai tingkat efisiensi yang tinggi. Dengan dukungan ketersediaan sumber bahan baku penghasil hidrogen yang melimpah, jajaran peneliti yang mempunyai kompetensi dan keahlian di bidang elektrokimia dan energi, serta jaringan kerjasama dan dukungan kebijakan yang sudah ada, UNSRI akan mampu menjadi pusat pengembangan Fuel Cell di Sumatera khususnya dan Indonesia pada umumnya.

Salah satu jenis fuel cell dengan keunggulan suhu operasi yang relatif rendah, tingkat konversi tinggi dan aplikasi yang beragam (keperluan energi mudah alih, kendaraan bermotor dan sumber energi untuk perumahan) adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) (Wang, Zuo et al. 2009; Su, Zeng et al. 2010).

Komponen terpenting dalam PEMFC adalah *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang merupakan pusat reaksi elektrokimia perubahan gas hidrogen (bahan bakar) dan oksigen (oksidan) menjadi energi listrik dan air sebagai buangan. MEA merupakan gabungan antara katoda dan anoda yang mengapit membran elektrolit pada kedua sisi (Starz, Zuber et al. 2002). Karena mempunyai fungsi sangat penting, maka MEA harus mendapat perhatian khusus dalam hal upaya pencapaian kerapatan arus (*current density*) yang tinggi dan daya tahannya. Hal yang perlu dikaji untuk menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi adalah kandungan dan jenis katalis serta metode pembuatannya.

Ada beberapa metode pembuatan elektroda fuel cell yang telah dikembangkan, diantaranya metode *casting* (Xiong and Manthiram 2005), *spraying* (Su, Zeng et al. 2010) dan metode elektrodeposisi (Kim, Subramanian et al. 2004; Saha, Gullá et al. 2006). Metode elektrodeposisi merupakan metode penempatan katalis pada substrat secara elektrokimia. Diantara keunggulan dari metode elektrodeposisi adalah penempatan katalis berukuran nanometer dan distribusi lebih merata sehingga dapat mereduksi jumlah katalis yang ditempatkan tapi meningkatkan utilitas dari katalis. Hal ini pada akhirnya dapat meningkatkan kinerja dan menekan biaya produksi fuel cell. Sementara itu, metode *spraying* adalah metode yang mudah dan cukup murah. Pada penelitian ini, akan dikaji dan dibandingkan dua buah metode pembuatan elektroda yaitu metode elektrodeposisi dan metode penyemprotan (*spraying*) dengan katalis. Metode penyemprotan dengan katalis tunggal Pt/C telah dilakukan oleh penulis dan mendapatkan kandungan terbaik Pt dalam elektrod adalah 0.5 mg.cm^{-2} (Rohendi, Majlan et al. 2013).

Katalis yang digunakan dalam elektroda fuel cell umumnya katalis berbasis platina yang cukup mahal dan mudah teracuni. Selain katalis tunggal platina, pemakaian logam golongan transisi lain selain platina dilaporkan digunakan sebagai katalis pendukung platina. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan fungsi katalitik elektroda dan mengurangi kandungan platina. Pada penelitian ini juga akan dioptimasi penggunaan paduan katalis Pt dengan logam transisi lain yaitu Co, Ni dan V. Penggunaan paduan logam golongan transisi dengan platina telah dilakukan menggunakan metode *spraying* (Xiong, Kannan et al. 2002; Radhakrishnan and Haridoss 2011).

Penelitian pembuatan MEA diharapkan dapat menjadi landasan bagi peningkatan kemandirian Indonesia dalam penguasaan teknologi fuel cell, khususnya PEMFC, sehingga Indonesia tidak hanya sekedar menjadi pasar bagi produsen fuel cell manca negara. Secara khusus, MEA yang dibuat diharapkan mempunyai kinerja tinggi dalam hal current density dan durability sehingga diproyeksikan untuk dapat digunakan pada BTS. Sebuah BTS memerlukan daya listrik antara 2 – 4 kW. MEA dengan kerapatan arus yang tinggi dapat mereduksi ukuran stack PEMFC secara signifikan dan penurunan kandungan katalis Pt akan menurunkan harga fuel cell secara keseluruhan.

2) Tujuan dan Sasaran

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

Tahun pertama:

- 1) Membuat dan mengoptimasi elektroda PEMFC menggunakan katalis Pt dan gabungan Pt dengan beberapa logam transisi (Co, Ni dan V) menggunakan metoda elektrodeposisi dan *spraying*.

- 2) Melakukan karakterisasi elektroda yang meliputi karakterisasi morfologi dan struktur serta kandungan katalis menggunakan EDX-SEM, ukuran dan distribusi partikel dengan TEM, pengukuran konduktivitas elektrik serta pengukuran kinerja elektrokimia elektroda dengan menggunakan metode voltametri siklik.

Tahun kedua:

- 3) Mendesain dan membuat MEA untuk rancangan aplikasi pada BTS
- 4) Melakukan uji kinerja MEA menggunakan EIS dan fuel cell station

METODE

Seperti disebutkan di atas, penelitian tentang pembuatan MEA mempunyai nilai strategis dalam hal upaya penguasaan pembuatan MEA untuk PEMFC dengan kinerja tinggi yang dapat diaplikasikan untuk berbagai kepentingan, terutama untuk BTS yang saat ini sudah mulai digunakan di Indonesia.

Metode dan ruang lingkup penelitian dalam upaya menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi adalah:

- 1) Membandingkan dua metode pembuatan elektroda berdasarkan keuntungan masing-masing, yaitu metode elektrodeposisi dan metode penyemprotan (spraying). Kriteria pemilihan metode terbaik adalah kemampuan untuk menghasilkan elektroda dengan kandungan dan kinerja optimal dari katalis serta prosedur yang dapat diaplikasikan secara komersial. Metode spraying untuk katalis Pt-Co/C, Pt-Ni/C dan Pt-V/C didahului dengan membuat katalis dengan metode impregnasi, sementara metode elektrodeposisi langsung mendeposisikan campuran larutan katalis ke atas permukaan elektroda.
- 2) Elektroda dibuat tiga lapisan, yaitu
 - a. Lapisan pertama, backing layer yang dibuat dari carbon paper yang sudah disalut dengan Polytetrafluoroetylen (PTFE) untuk meningkatkan kehidrofobikan. Fungsi dari backing layer selain sebagai penahan elektroda, juga sebagai pengumpul arus.
 - b. Lapisan kedua, Gas Diffusion Layer (GDL) yang terdiri atas campuran carbon black Vulcan XC-72R, PTFE, Ammonium bicarbonat dan 2-propanol sebagai pelarut. Fungsi GDL adalah untuk penyebar gas, penyalur arus listrik, mengalirkan air dan antar muka antara backing layer dan catalyst layer.
 - c. Lapisan ketiga, Catalyst Layer (CL) yang mengandung katalis sebagai pusat reaksi elektrokimia.

Elektroda terdiri atas katoda (tempat terjadinya reduksi gas oksigen) dan anoda (tempat terjadinya oksidasi gas hidrogen).

- 3) Setelah mendapatkan metode terbaik, melakukan optimasi kandungan dan jenis katalis dalam elektroda. Katalis yang akan digunakan dan dibandingkan adalah katalis tunggal Pt sebagai pembanding dalam bentuk Pt/C dan gabungan katalis Pt dengan Ni, Co dan V dalam bentuk Pt-Ni/C, Pt-Co/C dan Pt-V/C. Tujuan utama penggunaan katalis gabungan adalah untuk mengurangi ketergantungan dan kandungan katalis Pt tanpa mengurangi kinerja katalis secara signifikan. Setiap formula dikarakterisasi struktur dan morfologi permukaan serta irisan melintang dengan menggunakan EDX-SEM, distribusi dan ukuran partikel katalis dengan TEM, konduktivitas elektrik dan cyclic voltammetry (CV) untuk menguji aktivitas katalitik.
- 4) Mendesain, membuat dan mengoptimasi MEA pada tekanan dan temperatur hot press bervariasi.
- 5) Melakukan uji kinerja MEA menggunakan EIS dan fuel cell station. Uji kinerja meliputi I-V performance test maupun durability test.
- 6) Setelah didapatkan MEA dengan kinerja tertinggi, melakukan pembuatan dan pengujian MEA untuk multi stack.

PROSPEK DAN DAMPAK MANFAAT

1) State of The Art

Rencana penelitian yang disusun diharapkan dapat mengoptimalkan penggunaan katalis, meningkatkan kinerja elektroda dan MEA secara khusus dan meningkatkan penguasaan teknologi pembuatan elektroda dan MEA secara umum. Upaya-upaya ini merupakan bagian integral dari upaya pengembangan fuel cell di Indonesia, sehingga fuel cell diharapkan mampu menjadi salah satu energi alternatif yang kompetitif baik dari sisi kuantitas, kualitas dan harga energi serta ramah lingkungan.

Prospek jangka pendek yang diharapkan dari penelitian ini adalah mempercepat proses penguasaan teknologi pembuatan MEA agar dapat mem-backup keperluan MEA untuk PEMFC sebagai sumber energi BTS dan kendaraan. Penguasaan teknologi pembuatan MEA dengan ongkos produksi lebih murah dan kinerja yang tinggi diharapkan dapat menaikkan posisi tawar Indonesia ketika ada investor dan vendor fuel cell yang menawarkan pemakaian fuel cell di Indonesia.

Prospek jangka panjang yang mendukung pentingnya penelitian fuel cell (khususnya MEA) adalah mengantisipasi era desentralisasi dan otonomi daerah, yang mana tiap-tiap daerah mempunyai kewenangan untuk mengupayakan penyediaan sumber energi yang memadai untuk daerah masing-masing.

2) Status Penelitian dan Teknologi Saat ini

Status penelitian tentang MEA dan PEMFC dewasa ini sudah berkembang sedemikian rupa, mulai dari penelitian elektroda, membran elektrolit, MEA, penyediaan dan penyimpanan bahan bakar serta PEMFC itu sendiri sebagai sistem fuel cell. Elektroda fuel cell sendiri terdiri atas backing layer, Gas diffusion layer (GDL) dan catalyst layer (CL) yang masing-masing mendapat perhatian dan kajian yang luas.

Penelitian tentang backing layer diantaranya fokus pada evaluasi penggunaan karbon paper atau carbon cloth dan penggunaan zat hidrofobik (Du, Wang et al. 2009; Park and Popov 2011). Sementara itu, penelitian tentang GDL terkait pengaruh komposisi zat hidrofobik, ketebalan dan ukuran pori dari GDL, permeabilitas gas dan konduktivitas GDL (Park, Lee et al. ; Ismail, Damjanovic et al. 2010; Park and Popov 2011). Pembuatan CL fokus pada jenis katalis dan proses pembuatannya (Park, Kim et al. 2004; Song, Yu et al. 2010; Andr'e D. Taylor 2007). Sementara itu, penelitian MEA banyak mengkaji penggunaan membran elektrolit dan proses penempelan elektroda. Untuk ketahanan MEA, standar uji *Department of Energy* (DOE) Amerika Serikat dan *Fuel Cell Testing and Standardisation Thematic Network* (FCTESTNET) menjadi acuan (Yu, Li et al. 2012). Penelitian mengenai karakterisasi dan penggunaan berbagai jenis membran elektrolit telah banyak dilakukan (Yuan, Zhang et al. 2011).

Pembuatan elektroda dengan metode *casting* pernah dilakukan dengan menggunakan elektroda platina (Ismail, S., Rohendi, D., 2003). Kesimpulan dari hasil penelitian antara lain:

- 1) Konsentrasi PTFE (Polytetrafluoroetylen)/teflon paling baik dalam gas diffusion layer berdasarkan hasil analisa SEM dan XRD adalah 20 wt%.
- 2) Konsentrasi teflonized carbon (TFC) paling baik dalam reaction layer berdasarkan hasil analisa SEM, XRD, analisa four point probe dan analisa voltametri siklik adalah 40 wt%.
- 3) Konsentrasi platina paling baik dalam reaction layer berdasarkan analisa konduktivitas adalah 0,6 mg/cm².

Sementara itu, pembuatan elektroda PEMFC dengan metode casting menggunakan Katalis Pt-Co/C telah dilakukan koordinator peneliti dan anggota peneliti yang dibiayai oleh Dikti melalui Program Hibah Bersaing XIII selama dua tahun. Hasil/kesimpulan dari penelitian adalah:

1. Berdasarkan pengamatan harga konduktivitas, kehidrofobikan dan SEM, maka *backing layer* yang digunakan adalah *backing layer* dengan konsentrasi PTFE 50%.
2. Masing-masing Co dan Pt memberikan kontribusi pada peningkatan konduktivitas elektrik baik permukaan maupun penampang elektroda dengan makin meningkatnya kadar katalis.

3. Hasil analisa potensial sel MEA pada konsentrasi Pt tetap dan Co bervariasi menunjukkan potensial sel terbaik dari sampel MEA adalah MEA dengan konsentrasi Pt/Co 0,6/0,6 mg/cm² yaitu 0,871 volt.
4. Hasil analisa potensial sel MEA pada konsentrasi Co tetap dan Pt bervariasi menunjukkan bahwa penurunan konsentrasi Pt tidak cukup signifikan menurunkan potensial sel. Hal ini menunjukkan peranan Co cukup penting dalam paduan katalis Pt-Co/C.
5. Walaupun terbukti mendukung peranan sebagai katalis fuel cell dalam paduan dengan Pt, akan tetapi Co tidak cocok digunakan sebagai katalis tunggal.

Selain itu, pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi juga pernah dilakukan oleh koordinator peneliti dengan bantuan pendanaan Hibah Bersaing tahun 2008 dan sebagaimana hasilnya telah dipublikasikan pada Jurnal Penelitian Sains dengan beberapa kesimpulan:

- a. Nilai konduktivitas elektrik dari permukaan elektroda setelah elektrodeposisi naik secara signifikan dibandingkan sebelum proses elektrodeposisi, sementara konduktivitas penampang elektroda tidak menunjukkan peningkatan.
- b. Berdasarkan analisa voltametri siklik untuk elektroda Pt/C menunjukkan hanya dua voltamogram yang baik yaitu variasi perbandingan konsentrasi 100 : 0 dan 80 : 20, sementara untuk elektroda Pt-Cr/C voltamogram yang baik adalah pada variasi massa Pt:Cr = 0,6:0,4 mg/cm².
- c. Berdasarkan data EDX-SEM, komposisi Pt paling banyak terdapat pada Pt/C = 80 : 20 dengan persentase massa sebesar 66,83% dan Pt/C = 100 : 0 dengan persentase massa sebesar 32,76%.

Penelitian pembuatan MEA dengan kerapatan arus tinggi melalui optimasi *Gas Diffusion Layer* (GDL) dan *Catalyst Layer* (CL) untuk keperluan PEMFC mudah alih sedang dilakukan oleh ketua peneliti sebagai penelitian S3.

KELUARAN YANG DIHARAPKAN

Keluaran yang diharapkan dari penelitian ini adalah:

- a. MEA dengan kinerja tinggi (current density dan durability) yang dapat dimanfaatkan oleh pihak ketiga untuk aplikasi BTS atau keperluan lain.
- b. Memberikan kontribusi mengenai metode pembuatan elektroda dan MEA, serta penerapan katalis yang beragam sebagai bagian dari upaya penguasaan teknologi fuel cell.

- c. Mendukung program pemerintah dalam upaya pengembangan sumber energi alternatif, khususnya fuel cell.
- d. Menjadikan Unsri sebagai salah satu cluster pengembangan fuel cell di wilayah Sumatera dengan melihat potensi sumber daya hidrogen yang melimpah dalam bentuk gas alam dan batubara.

PERSONIL PELAKSANA KEGIATAN RISET

- 1) Nama dan gelar : Drs. Dedi Rohendi, M.T
Jenis kelamin : Laki-laki
Bidang keahlian : Kimia Fisika (elektrokimia dan termodinamika), Energi, MEA
Tugas dalam kegiatan : Koordinator kegiatan penelitian, membuat elektroda dan uji kinerja
Unit Kerja : Jurusan Kimia FMIPA UNSRI
Pendidikan terakhir : S-2 Teknik Kimia UNSRI BKU Teknologi Energi
Tesis: *Modifikasi Sistem Elektroda untuk Meningkatkan Kinerja Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)*
Alokasi jam/minggu : 20 jam/minggu

CURRICULUM VITAE

INFORMASI PRIBADI

1. Nama : **Dedi Rohendi**
2. Tempat/Tanggal lahir : **Garut / 19 April 1967**
3. Jenis Kelamin / Satus : **Laki-laki / Menikah**
4. Agama : **Islam**
5. Alamat : **Jl. Parameswara
Lr. Macan Kumbang, no. 55
RT 03/01**
6. Kota / Kode Pos : **Palembang / 30139**
7. Provinsi : **Sumatera Selatan**
8. Telepon/ HP : **+62711 445510 / 0816383220**
9. e-mail : **rohendi_dedi@yahoo.co.id; rohendi19@gmail.com**



PENDIDIKAN FORMAL

- 1980 – 1983** : SMPN Kurnia Garut
1983 – 1986 : SMA N XI Bandung
1986 – 1991: Institut Teknologi Bandung (ITB),
Jurusan Kimia, (S1), Bandung
1999 – 2002 : Universitas Sriwijaya (UNSRI),
Teknik Kimia, Konsentrasi Energi (S2) Palembang
Tesis: *Modifikasi Sistem Elektroda untuk Meningkatkan Kinerja
Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)*
2010 - : Fuel Cell Institute
Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) (S3) Malaysia

PENGALAMAN KERJA

- 1993 – sekarang** : Staf pengajar jurusan Kimia FMIPA UNSRI,

Mata kuliah: Kimia Dasar, Kimia Fisika, Elektrokimia, Termodinamika Kimia, Pengantar Energi

- 2008 – 2009 : PIC Program Hibah Kompetisi UNSRI
2008 – 2010 : Koordinator Pengembangan dan Penerapan UPT Penjaminan Mutu UNSRI
2009 – 2010 : Koordinator Outreach Program I-MHERE UNSRI

BIDANG / PENGALAMAN PENELITIAN

1. Penelitian Kecepatan degradasi Pestisida
2. Produksi Hidrogen melalui Proses Elektrolisis
3. Electroplating dan Anodizing
4. Modifikasi pada Sistem Elektroda Dalam Upaya Meningkatkan Kinerja Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC), Tesis, 2002
5. Pembuatan Elektroda Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) dengan Metode Casting Menggunakan Katalis Pt-Co/C, Hibah Bersaing XIII, 2005
6. Pembuatan MEA dengan Current Density tinggi untuk keperluan Fuel Cell portable melalui optimasi GDL dan catalyst layer (CL), tesis S3.

PRESENTASI DAN PUBLIKASI

1. **Studi Pemanfaatan Sel Bahan Bakar (SBB) sebagai Sumber Daya Energi Alternatif yang Ramah Lingkungan**, seminar regular di Jurusan Kimia, UNSRI, 2000.
2. **“Modification on Electrode System to Increase Performance of Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC)”**, Regional Symposium on Chemical Engineering 2003, Manila, Philippines.
3. **“Analisa Konduktivitas Elektroda Fuel Cell dengan Metode Impedance Bridge dan Four Point Probe”**, Jurnal Forum MIPA, ISSN 1410-1262, Volume 8, 2003.
4. **“Studi Penyimpanan Gas Hidrogen sebagai Bahan Bakar Fuel Cell”**, Seminar Regular di Jurusan Kimia UNSRI, 2004.
5. **“Kinetika Reaksi Oksidasi Asam Miristat, Asam Oleat dan Asam Stearat”**, Seminar Nasional Kimia, UNILA, Lampung, 2004.
6. **“Kinetika Reaksi Pelarutan Kalsium Oksida dalam Abu Terbang PLTU Tanjung Enim dengan Pelarut Asam Nitrat”**, Seminar Forum HEDS, UNJA, 2005.
7. **“Kinetika Reaksi Dekomposisi Peroksida dalam Minyak Kelapa dan Minyak Sawit”**, Laporan Penelitian, DIK-UNSRI, 2004.
8. **“Studi Pemanfaatan Fuel Cell Suhu Rendah sebagai Sumber Energi Portable dan Otomotif; Kajian Berdasarkan Keunggulan dan Kendala”**, Seminar Nasional Energi dan Lingkungan, UNSRI, 2005.
9. **“Prospek dan Kendala Pengembangan Fuel Cell di Indonesia”**, Seminar Regular di Jurusan Kimia UNSRI, 2005,
10. **Fuel Cell, Sumber Energi Masa Depan (Harian Sumeks), 2005**
11. **Biodiesel, BBM Ramah Lingkungan (Harian Sumeks), 2005**
12. **“Pembuatan Elektroda Fuel Cell Menggunakan Katalis Pt/C Hasil Elektrodeposisi Pt pada Backing Layer Karbon dengan Pengikat PTFE”** Seminar BKS-PTN MIPA, Bengkulu, 2008.
13. **“Elektrodeposisi Co Pada Backing Layer Pt/C Dengan Pengikat PTFE Sebagai Paduan Katalis Dalam Elektroda Fuel Cell”**, Seminar BKS-PTN MIPA *Riau*, 10-11 Mei 2010
14. **“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

15. **"Catalyst Effect of Pt and Co to Conductivity, Morphological and OCV of Membrane Electrode Assembly (MEA) for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)"**, Sriwijaya International Seminar On Energy Science And Technology 2010 (Sisest-2010), Palembang, 3-4 November 2010
16. **"Effect Of PTFE Content And Sintering Temperature On The Properties Of Backing Layer"**, International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology 2011, Kuala Lumpur, 22-23 November 2011
17. **"Characterization Of Electrodes And MEA Performance Test With Varies Platinum Content"**, International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology 2011, Kuala Lumpur, 22-23 November 2011
18. **"Prinsip, Aplikasi dan Perkembangan Fuel Cell Sebagai Penghasil Energi Bersih"** Seminar Nasional Green Energy, Palembang, 30 April 2012.
19. **"Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions"** International Journal of Hydrogen Energy xxx, (2013), 1 - 7

HIBAH/GRANT

1. Hibah Bersaing XIII, DIKTI, 2005-2006; **Pembuatan Elektroda Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEFC) dengan Metode Casting Menggunakan Katalis Pt-Co/C.**
2. Hibah Bersaing, DIKTI, 2008-2010; **Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodeposisi menggunakan Katalis Pt-Cr/C and Pt/C serta Uji Kinerja pada Alkaline Fuel Cell (AFC)**

WORKSHOP/SEMINAR

1. **Workshop Pengembangan Kurikulum Inti Kimia**, 1996, Palembang, UNSRI, DGHE & JICA
2. **Workshop Evaluasi dan Tindak Lanjut Peningkatan Kurikulum Inti Kimia**, 1998, UNAND, Padang.
3. **Workshop Membrane Technology and its Application**, 1997, Palembang, UNSRI dan Yokohama National University, Japan
4. **Pameran, Seminar Rusnas&SUCP serta Open House Puspitek dan Peresmian Pemekaran Kebun Propinsi**, 2004, Serpong Tangerang
5. **Seminar dan kongres Nasional - I Konsorsium Fuel Cell Indonesia**, 2005, Jakarta
6. **Seminar Energi dan Lingkungan**, 2005, Palembang, Indonesia
7. **Workshop Laboratory Management**, 2006, Palembang, Indonesia
8. **Workshop Penelitian Berorientasi Paten**, 2006, Dikti
9. **Lokakarya Pelatihan Pelatih Penulisan Proposal Penelitian Hibah Kompetitif**, 2006, Lemlit Unsri
10. **Semirata BKS-PTN**, 2008, Bengkulu, UNIB.
11. **Sosialisasi Standardisasi**, 2009, Palembang, UNSRI & BSN
12. **Semirata BKS-PTN Wilayah Barat**, 2010, Riau
13. **International Conference on Fuel Cell & Hydrogen Technology 2011**, Kuala Lumpur, 22-23 November 2011

TRAINING

- | | | |
|---|------|--------------------------|
| 1. Science Laboratory Management | 1994 | Bandung, (ITB) |
| 2. Instrumental Analysis | 1994 | Padang, WUTC & UNAND |
| 3. Laboratory Management & Equipment | 1995 | Inderalaya, WUTC & UNSRI |
| 4. TOR and SOP Development of Competition Grant Program | 2006 | Inderalaya, MONEV UNSRI |
| 5. Writing of Teaching Module in HE | 2008 | Inderalaya, UNSR |

6. Audit of Internal Academic Quality (AMAI) 2009 Inderalaya, UNSRI
 7. Internal Audits Laboratories ISO/IEC 17025:2005 2009 Jakarta, AN Training

Palembang, 20 Juni 2013



Drs. Dedi Rohendi, M.T

- 2) **Nama dan gelar** : Dr. Ir. Jarot Raharjo
Jenis kelamin : Laki-laki
Bidang keahlian : Material Science
Tugas dalam kegiatan : pembuatan MEA
Unit Kerja : Pusat Teknologi Mineral BPPT
Pendidikan Terakhir : S3 Teknik Kimia dan Proses (Teknologi Fuel Cell)
Alokasi jam/minggu : 10 jam/minggu
Curriculum Vitae :

1. **Data Pribadi :**

- Nama : Dr. Ir. Jarot Raharjo, MSc
 Institusi : Pusat Teknologi Material – BPPT
 NIP : 680003575
 Tempat/ Tanggal lahir : Yogyakarta, 15 Maret 1971
 Jenis Kelamin : Pria
 Alamat Rumah : Jl. Pesona Amerika A12/2, Kotawisata, Cibubur
 Telp. : (021) 84934613
 HP : 0818935762
 Fax. : (021) 84934613
 RT/RW : 05/10
 Kota : Kab. Bogor
 Kode Pos : 16968
 Alamat Kantor : Gd II BPPT Lantai 22, Jl MH Thamrin 8, Jakarta Pusat
 Telp. : (021) 3169876
 Fax. : c
 Pekerjaan Terakhir : Peneliti di Pusat Teknologi Material – BPPT
 Pendidikan Terakhir : S3 Teknik Kimia dan Proses (Teknologi Fuel Cell)
 Email : jarot.raharjo@bppt.go.id / jarotr@yahoo.com



2. Riwayat Pendidikan Tinggi :

Identitas PT	Strata (S1)	Strata (S2)	Strata (S3)
Nama PT	Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta	Universitas Indonesia	Universiti Kebangsaan Malaysia
Kota	Yogyakarta	Jakarta	Bangi, Selangor, Malaysia
Tamat Tahun	1994	2001	2012
Bidang Studi	Teknik Kimia	Materials Science	Teknik Kimia dan Proses (Fuel Cell)

3. Riwayat Pekerjaan :

No	Tempat/ Unit	Jabatan	Tahun
1	Direktorat Pengkajian Sarana Industri, Kedeputian Bidang Pengkajian Industri – BPPT	Staf Peneliti, III/a	1995
2	UPT-PSTKP Bali, Kedeputian Bidang Pengkajian Industri – BPPT	Kepala Kelompok Pengkajian Tekno Ekonomi & Proses, III/a	1996-1998
3	Pusat Pengkajian dan Penerapan Teknologi Material, Deputi Bidang TIEMML – BPPT	Ajun Peneliti Madya, III/c	1998-2005
4	Pusat Teknologi Material – BPPT	Peneliti Muda, IV/a	2005 - sekarang

4. Karya Akademik :

Penelitian : (5 tahun terakhir)

No	Judul	Lembaga Penyelenggara	Tahun
1	a. Pengembangan teknologi material fuel cell b. Pemanfaatan logam paduan stainless steel tipe SS316 berbasis bahan baku lokal untuk aplikasikesehatan pada pembuatan tulang buatan c. Pemanfaatan slag/ terak hasil peleburan Fe-Ni untuk pembuatan batu tahan api d. Perbaikan kualitas material aluminium paduan untuk engine rusnas	a. PTM-BPPT b. s/d d. Ristek	2007
2	a. Solid oxide fuel cells	a. Universiti Kebangsaan Malaysia	2008 - 2012
3	Pengembangan Engine 640cc dan Transmisinya	BPPT	2012

4	Program Rekomendasi Pembuatan MEA Fuel Cell	BPPT	2012
---	---	------	------

Makalah/ Proceeding/ Jurnal : (yang diterbitkan 5 tahun terakhir)

No	Judul	Diterbitkan oleh
1	2	3
1	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "LSCF composite cathode for SDC-(Li/Na) ₂ CO ₃ composite electrolyte LT-SOFC", <i>Hydrogen Energy (Submitted March 2012)</i> .	Elsivier
2	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Fabrication of Dense Composite Ceramic Electrolyte SDC-(Li/Na) ₂ CO ₃ ", <i>Key Engineering Materials</i> , ISSN 1013-9826, vol. 447-448 (2010), pp 666-670.	Trans Tech Publication, Germany
3	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Porous NiO-SDC Carbonates Composite Anode for LT-SOFC Applications Produced by Pressureless Sintering", <i>Applied Mechanics and Materials</i> , ISSN 1660-9336, vol. 52-54 (2011), pp 488-493.	Trans Tech Publication, Germany
4	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Fabrication of Porous LSCF-SDC Carbonates Composite Cathode for Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) Applications", <i>Key Engineering Materials</i> , ISSN 1013-9826, vol. 471-472 (2011), pp 179-184.	Trans Tech Publication, Germany
5	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Physical and Thermal Characterisations of SDC-(Li/Na) ₂ CO ₃ Electrolyte Ceramic Composites", <i>Sains Malaysiana</i> , vol. 41 no. 1 (Januari 2012), pp 95-102.	National University of Malaysia
6	Jarot Raharjo , Dedikarni dan Wan Ramli Wan Daud, "Perkembangan Teknologi Material pada Sel Bahan Bakar Padat Suhu Operasi Menengah", <i>Jurnal Sains Materi Indonesia</i> , vol. 10 no. 1 (Oktober 2008), pp 28-34.	Pusat Teknologi Bahan Industri Nuklir, Badan Tenaga Atom Nasional, Indonesia
7	Jarot Raharjo , "Pengaruh Temperatur Sintering Terhadap Sifat Mekanik Bronze Bearing Cu-Sn-Zn-C Grafit Produk Metalurgi Serbuk", <i>Jurnal Gema Teknik</i> , vol. II (Maret 2006), pp 50-58. ISSN: 0854-2279, Nomor Akreditasi: 39/DIKTI/Kep/2006.	Universitas Sebelas Maret, Surakarta
8	Anne Zulfia, Ratna Juwita, Ari Uliana, I Nyoman Jujur & Jarot Raharjo , "Proses Penuaan (Aging) pada Paduan Aluminium AA 333 Hasil Proses Sand Casting", <i>Jurnal Teknik Mesin</i> , vol. 12, No. 1 (April 2010), pp 13-20. ISSN: 1410-9867,	Universitas Petra Surabaya

	Nomor Akreditasi:43/DIKTI/Kep/2008.	
9	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Microstructure Characterisation of SDC-Carbonate Composite Electrolytes Produced by Solid State Method for Solid Oxide Fuel Cells", <i>Prosiding 4th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals & Environment and 2nd Asian Symposium on Materials & Processing</i> , 1-3 Juni 2009, Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia.	Universiti Sains Malaysia, Penang, Malaysia
10	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "Synthesis and Characterisation of SDC-Carbonate Composite Electrolytes for Low Temperature Solid Oxide Fuel Cells (LT-SOFC) Applications", <i>Prosiding International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology</i> , 28-29 Oktober 2009, BPPT, Jakarta, Indonesia. ISBN 978-602-95555-1-6.	Pusat Teknologi Material, BPPT
11	Jarot Raharjo , Andanastuti Muchtar, Wan Ramli Wan Daud, Norhamidi Muhamad & Edy Heryanto Majlan, "La _{0.6} Sr _{0.4} Co _{0.2} Fe _{0.8} O _{3-δ} Based Cathodes for SDC-Carbonate Composite Electrolyte SOFCs", <i>Prosiding The 3rd International Conference on Fuel Cell and Hydrogen Technology</i> , 22-23 November 2011, Kuala Lumpur, Malaysia.	Institut Fuel Cell, Universiti Kebangsaan Malaysia, Malaysia
12	Agus Pramono, Anne Zulfia & Jarot Raharjo , "Karakterisasi Komposit Matrik Polimer Graphite Bipolar Plate Fuel Cell Hasil Metalurgi Serbuk", <i>Prosiding Seminar Nasional Metalurgi & Material 2007</i> , 7-9 Agustus 2007, UI Depok, Jawa Barat.	Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
13	Anne Z., Ibnu, Z.A., I.Nyoman, J. & Jarot, R. , "Pengaruh Beban Kompaksi Terhadap Karakteristik Material Bantalan Perunggu (Cu-Sn-Zn-Grafit) Produk Metalurgi Serbuk", <i>Prosiding Seminar Nasional Metalurgi & Material 2007</i> , 7-9 Agustus 2007, UI Depok, Jawa Barat.	Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

- 3) Nama dan gelar : Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA
 Jenis kelamin : Laki-laki
 Bidang keahlian : Teknik Kimia (Energi dan Lingkungan)
 Tugas dalam kegiatan : Pembuatan elektroda dan karakterisasi
 Unit Kerja : Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNSRI
 Alokasi jam/minggu : 10 jam/minggu
 Curriculum Vitae :

1. Personal Data :

- a. Nama : **Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA**
b. NIP : 19580514 198403 1 001 (Lama : 131407286)
c. Tempat Tanggal Lahir : Palembang, 14 Mei 1958
d. Pangkat/Jabatan : Pembina(IVa)/ Lektor Kepala
e. Kartu PNS : E.447635
f. Bidang Keahlian : Teknik Kimia (Energi dan Lingkungan)
g. Alamat Rumah
1. Komplek Perumahan Dosen Unsri, Jalan Seruni RW RT 063, Blok A. No. 4111/48, Bukit Lama, Ilir Barat I, Palembang 30139, Sumsel, Telepon : 0711-442747.
2. Perumahan Mitra Permai Blok D12, Jalan Lettu Karim Kadir, RW 03, RT 10B, Kelurahan Karang Jaya, Kec.Gandus, Palembang , Sumsel, Telepon : 0711-7072594
h. Alamat Kantor : Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya, Jalan Raya Palembang-Prabumulih, Km. 32 Inderalaya, Kab. Ogan Ilir, Kode Pos : 30662
i. Telepon/Faks : 0711-580303
j. Email : faizal_ga@yahoo.co.id
k. Handphone : 0811712582;

2. Riwayat Pendidikan :

No	Program	Departemen	Bidang Studi	Tahun Tamat
1	S-3 (Doktor)	ENSCT INPT Toulouse, France	Teknik Kimia	1991
2	S-2 (DEA)	ENSCT INPT Toulouse, France	Teknik Kimia	1988
3	Expert in Chem Eng	CRIFIC ENSIC, Nancy, France	Teknik Kimia	1986
4	S-1 (Sarjana)	Teknik Kimia, FT Unsri	Teknik Kimia	1983

3. Riwayat Pekerjaan :

1. Dosen Tetap Jurusan Teknik Kimia FT Unsri, 1983-sekarang.
2. Dosen Pascasarjana Unsri (S-2 Teknik Kimia, S-2 Manajemen Lingkungan, S-2 Double Degree Lingkungan, S-3 Manajemen Lingkungan), 1991-sekarang.
3. Anggota Dewan Riset Nasional (DRN) 2009-2011 (20 Jan 2009 - sekarang)
4. Direktur Lembaga Pengelola, Rusnas PEBT (Riset Unggulan Strategis Nasional Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan), 2008-sekarang
5. Tenaga Peneliti Rusnas PEBT (Riset Unggulan Strategis Nasional Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan), Bidang Pencairian Batubara, 2007
6. Mitra Bestari Jurnal "Reaktor" Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, 2005 s.d sekarang.
7. Kepala Laboratorium Kimia Analisa, FT Unsri, 1984-1985
8. Kepala Laboratorium Dasar Bersama (LDB) Unsri, Feb 1992- 2007
9. Sekretaris Lembaga Penelitian Unsri, 1996-1998
10. Pembantu Dekan I FT Unsri, 1998-2007.
11. Tenaga Peneliti PPLH Unsri, 1992-2007
12. Tenaga Pengajar Kursus AMDAL Unsri, 1992-sekarang
13. Tenaga Pengajar Kursus Pengelolaan Lingkungan Hidup Karyawan PT Stanvac Indonesia, Pendopo, 1993-1994
14. Penatar : Metode Penelitian pada Dosen Unive IBA Palembang, 1994

15. Tenaga Pengajar Pelatihan Pemodelan Pengelolaan Lingkungan Hidup, PPLH Unsri, 1995
16. Tenaga Pengajar Kursus Aulit Lingkungan, PPLH Unsri, 1996
17. Tenaga Pengajar Kursus ADUM Depkes Sumsel 1996-1997
18. Tenaga Pengajar Pelatihan Metode Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Unsri, 1997
19. Tenaga Pengajar Pelatihan Aplikasi Metode Numerik dan Optimasi Proses Industri, PT Pusri Palembang, 2001
20. Tim Analisis Kurikulum, pada Lokakarya Evaluasi dan Pengembangan Kurikulum BKU Teknologi Energi dan Lingkungan, Program Pascasarana Unsri, Palembang, 28 Februari 2008
21. Reviewer Proposal Penelitian Unsri, Poltek Unsri, Universitas Muhammadiyah, 2001-sekarang.
22. Reviewer/evaluator pada Seminar on Science and Technology, HEDS-JICA, 1999-2003.
23. Ketua Panitia Seminar Nasional Teknik Kimia, Palembang, 2006,
24. Chairman "Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology 2008 (SISEST 2008), Unsri, Palembang, 5-6 November, 2008.
25. Chairman "Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology 2009 (SISEST 2009, Unsri, Palembang, 14-15 Oktober, 2009.
26. Chairman "Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology 2010 (SISEST 2010, Unsri, Palembang, 4-5 November, 2010.
27. Chairman "Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology 2011 (SISEST 2011, Unsri, Palembang, 5-6 Oktober, 2011.

Mata Kuliah Yang Sedang/Pernah Diajarkan

1. Ekstraksi dan Leaching, S1 Teknik Kimia
2. Kimia Fisika I dan II, S1 Teknik Kimia
3. Teknik dan Reaktor Kimia, S1 Teknik Kimia
4. Distilasi dan Absorpsi, S1 Teknik Kimia
5. Teknologi Pengolahan Limbah, S1 Teknik Kimia
6. Metodologi Penelitian, S1 Teknik Kimia
7. Fenomena Perpindahan dalam Lingkungan, S2 Teknik Kimia
8. Teknologi Pengolahan Limbah Cair, S2 Teknik Kimia
9. Teknologi Pengolahan Limbah Padat dan Gas, S2 Teknik Kimia
10. Teknologi Pemisahan, S2 Teknik Kimia
11. Optimisasi, S2 Teknik Kimia
12. Energy Production, Double Degree, S2 Teknik Kimia
13. Source and Production of Energy, Double Degree, S2 Teknik Kimia.
14. Pupuk, S2 Petrokimia.
15. Pengolahan Gas Alam, S2 Petrokimia
16. Sistem Manajemen Lingkungan, S2 Manajemen Lingkungan
17. Metodologi Penelitian, S2 Manajemen Lingkungan PPS Unsri.
18. Environmental Management System, S2 Double Degree, Manajemen Lingkungan.
19. Etika Lingkungan, S3 Manajemen Lingkungan PPS Unsri.
20. Principles of Cleaner Production, S2 Double Degree Teknik Kimia, PPs Unsri
21. Workshop and Energy Issues, S2 Double Degree Teknik Kimia, PPs Unsri
22. Unit Operasi, S2 Petrokimia Teknik Kimia, PPS Unsri.
23. Energy Management in Building, S2 Double degree, Teknik Kimia, PPs Unsri
24. Konservasi Energi, D4 Teknik Kimia, Politeknik Sriwijaya
25. Menejemen Energi, D4 Teknik Kimia, Politeknik Sriwijaya

4. Projek Riset dan Non Projek (5 tahun terakhir):

1. Studi Analisa Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), PT. Indralaya Agro Lestari (IAL), Muara Enim, Sumsel, 2009, *Tim Fisiki-Kimia*
2. Studi Analisa Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), PT. Adimas Puspita Serasi (APS), OKUT Sumsel, 2009, *Tim Fisiki-Kimia*.
3. *Peneliti Utama*” Studi Penggunaan Asap Cair, Sinar Matahari dan Rancangbangun Kamar Pengering dengan Energi Batubara untuk Pengeringan Bahan Olah Karet Rakyat” Kerjasama Kemitraan Penelitian Pertanian dengan Perguruan Tinggi, KKP3T) 2009S
4. Upaya Pengelolaan Lingkungan dan Upaya Pemantauan Lingkungan, PLTU PT. Gumay Prima Energi, Prabumulih, (2010).
5. Studi Analisa Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), Penambangan Batubara PT. Gumay Prima Energi, Prabumulih, (2010).

5. Publikasi Ilmiah (Nasional dan Internasional) 5 tahun terakhir:

1. *Pencairan Brown Coal dalam Upaya Mengatasi Krisis Sumber Energi*”, (Seminar Nasional Energi, Universitas Diponegoro, Semarang. April 2008), Author
2. Pembuatan Crude Synthetic Oil (CSO) dari Batubara Melalui Proses Pencairan Batubara Peringkat Rendah (Seminar Nasional "Added Value of Energy, AVoER" , Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya, Palembang, Mei 2008), Author
3. Blending Coals to Meet the Fuel Specification (*Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology, Palembang, Nov5-6, 2008*) Co-Author
4. Preliminary Study: Blending Coals Simulation to Predicting Coal Quality for Coal Fired Power Stations (*Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology, Palembang, Nov5-6, 2008*) Co-Author
5. Pengaruh Jenis Pelarut, Massa Biji, Ukuran Partikel dan Jumlah Siklus terhadap Yield Ekstraksi Minyak Biji Ketapang, Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya No.2 Vol. 16, 28-34, April 2009
6. CFD Modeling of Brown Coal Liquefaction Reactor, CHEMECA Conference, Pert, Australia. October 2009, (Co-Author)
7. Liquefaction Test of MUBA Coal by Direct Coal Liquefaction and Upgrading of Coal Oil, (*Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology SISEST, Palembang, Oct, 14-15, 2009*) Co-Author
8. Development of Coal Blending Method for Better Characteristics, (*Sriwijaya International Seminar on Energy Science and Technology SISEST, Palembang, Oct, 14-15, 2009*) Co-Author
9. Pemodelan Proses Pencairan Batubara Menggunakan CFD (*Software FLUENT 6.;* Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia (SNTKI) Bandung, 19-20 Oktober 2009 (Co.Author).
10. Pengaruh Rasio (ethanol/mengkudu) dan Jumlah Siklus Ekstraksi Terhadap Yield Minyak Biji Mengkudu. Jurnal Teknik Kimia Universitas Sriwijaya No.3, Vol. 17, 59-68, Agustus 2010.
11. Biomass Potential and Its Utilization in Indonesia, The 8th Biomass Asian Workshop, Hanoi Vietnam, November, 29 Nov-1 Dec, 2011 (Author)
12. The Study on Utilization Deorub as latex Coagulant and Rubber Sheet Drying Using Coal as Heat Source, Middle East Drying Conference, Mahshahr, Iran, 19-20 February, 2012 (Author)
13. Drying of Low Range Coal Using Di-Methyl Ether (DME), Middle East Drying Conference, Mahshahr, Iran, 19-20 February, 2012 (Keynote Lecture, Author)

6. Kursus, Pelatihan dan Lokakarya (5 tahun terakhir):

1. The Training Program for East Asia Biomass Town Concept, 28 Februari s/d 4 Maret 2011, Tokyo, Japan.

2. The Active Learning Training, Delf Holland April 2011, and continued at Palembang
3. Workshop “ Drying Technology” M3TC-National University of Singapore (NUS), 1 October 2011

7. Pengalaman dalam Mengelola Majalah

- a. Jurnal Reaktor, Universitas Diponegoro (mitra bestari)
- b. Jurnal Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya (mitra bestari)
- c. Jurnal Dinamika Penelitian Industri, Baristand Industri Sumsel (mitra bestari)

Palembang, 21 Juni 2013



Dr. Ir. Muhammad Faizal, DEA

- 4) Nama dan gelar : Assa'idah, M.Si
 Jenis kelamin : Perempuan
 Bidang keahlian : Fisika (katalis)
 Tugas dalam kegiatan : elektrodeposisi, analisa konduktivitas
 Unit Kerja : Jurusan Fisika FMIPA UNSRI
 Alokasi jam/minggu : 10 jam/minggu



Curriculum Vitae :

1	Nama Lengkap	Assa'idah, M.Si
2	Jabatan Fungsional	Asisten Ahli
3	Jabatan Struktural	-
4	NIP/NIK/Identitas lainnya	198205222006042001
5	NIDN	0022058202
6	Tempat dan Tanggal Lahir	Pekanbaru, 22 Mei 1982
7	Alamat Rumah	Jl. Lunjuk Jaya 5408A Lorok Pakjo PLG 30137
8	Nomor Telepon/Faks/ HP	0711-378848/ 0821-1844-5580
9	Alamat Kantor	JL. Raya Palembang-Prabumulih KM.32 Inderalaya Ogan Ilir – 30662
10	Nomor Telepon/Faks	0711-580743/ 0711-580056
11	Alamat e-mail	ias_aca@yahoo.com
12	Lulusan yang telah dihasilkan	S1 = 3 orang
13	Mata kuliah yg diampu	1. Pengantar Pemograman 3. Fisika Komputasi 2. Elektronika Digital 4. Mikroprosesor

B. Riwayat Pendidikan

	S1	S2
Nama Perguruan Tinggi	Institut Pertanian Bogor	Institut Teknologi Bandung
Bidang Ilmu	Instrumentasi	Digital Signal Processing
Tahun Masuk-Lulus	2000 – 2004	2009 – 2011
JudulSkripsi/Thesis/Disertasi	Studi Laju Lepas Radon dari Kerak Air Industri Minyak	Desain dan Implementasi <i>Symbol Timing Recovery</i> pada Modem OFDM dalam Rentang Frekuensi Audio
Nama Pembimbing	Dr. Irmansyah	Dr. Maman Budiman

C. Pengalaman penelitian 5 tahun terakhir

No	Tahun	Judul Penelitian	Pendanaan	
			Sumber	Jml (Juta Rp)
1	2008	Investigasi terhadap Tiga tipe ADC (<i>Analog to Digital Converter</i>)	DIPA UNSRI	10
2	2009	Simulasi, Desain dan Pembuatan PCB 2 Tipe Osilator dengan Performa Terbaik	DIPA UNSRI	8
3	2012	Desain Sistem Absensi Mahasiswa Berbasis Teknologi RFID (<i>Radio Frequency Identification</i>)	DIPA UNSRI	8

D. Pengalaman pengabdian kepada masyarakat 5 tahun terakhir

No	Tahun	Judul Pengabdian	Pendanaan	
			Sumber	Jml (Juta Rp)
1	2012	Memperkenalkan Pembelajaran Online kepada Guru-Guru SMA Negeri Indralaya Utara Ogan Ilir	Mandiri	3 Juta

E. Pengalaman penulisan artikel ilmiah dalam jurnal 5 tahun terakhir

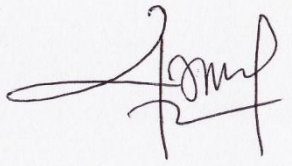
No	Judul artikel	Volume/ No/ Th	Nama Jurnal
1	Investigasi terhadap Tiga tipe ADC (<i>Analog to Digital Converter</i>)	Vol.12/No.2/ 2009	JPS MIPA Unsri
2	<i>Bondgraph Model of A Current Amplifier</i>	Vol. 1 / No.1 / 2012	SIMETRI (Jurnal Ilmu Fisika Indonesia)

F. Pengalaman penyampaian makalah secara oral pada seminar ilmiah 5 tahun terakhir

No	Nama pertemuan ilmiah	Judul artikel	Waktu & Tempat
1	Seminar Hasil Penelitian Tahun 2012 Universitas Sriwijaya	Desain Sistem Absensi Mahasiswa berbasis Teknologi RFID (<i>Radio Frequency Identification</i>)	13 Desember 2012, Palembang

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 resikoanya.

Indralaya, 20 Juni 2013



(Assa'idah, S.Si, M.Si)

5) Nama lengkap : Addy Rachmat, S.Si., M.Si
 Gender : Male
 Occupation/Grup : Lektor/IIIc
 Position : Penata
 Place/Date of Birth : Jayapura, September 28, 1974
 Address : Jalan Mayor Zen Lr. Harapan Jaya I, No. 28a RT/RW. 30/08 Sungai
 Selayur Palembang South Sumatera Indonesia Telp. 0711-
 8402196 Cell phone 081373102670
 Email : addy_rachmat@unsri.ac.id
 Research Topic : Catalyst

Education Background :

No	Tempat Pendidikan	Gelar	Tahun Lulus	Bidang Studi
1	Sriwijaya University Palembang	S1	1998	Chemistry
2	Gadjah Mada University Yogyakarta	S2	2001	Physical Chemistry

Job Experiences

Institusi	Jabatan	Periode Kerja
UNSRI Inderalaya	Senior Assistant	2001-2009
UNSRI Inderalaya	Lecturer	2009-now

Research Experiences

No.	Judul Penelitian	Tahun
1.	The effect of Pyrolysis temperature and solvent on extraction to liquid product of coal	2001
2.	Kinetic of Fe and Al Solvation in coal fly ash	HEDS Project 2002
3.	The effect of temperature to physical properties of product of used tire pyrolysis using zeolyte catalyst	DIKS UNSRI 2003
4.	The effect of temperature to physical properties of product of used tire pyrolysis using MnO ₂ -zeolyte catalyst	HEDS Project 2003
5.	Hydrocracking mixture of coal tar with pyrolysis product of used tire using Ni-zeolyte catalyst	Peneliti Muda 2004
6.	Hydrocracking coal tar using Co-Mo/Zeolite catalyst	Grant Research A2 2006
7	Design of photocatalyst Ag/TiO ₂ Pillared monmorilonite and its application to hospital liquid waste photodegradation and disinfection	Hibah Bersaing 2007
8	Chromium Hexavalent reduction using bituminous from Tanjung Enim	DIPA Unsri 2009
9	Biodiesel production from CPO waste sludge using	Unggulan Kompetitif

	Tungsten and Zirconium oxide composite catalyst	2011
--	---	------

Seminars and Publications

No.	Titles and Event
1.	Hydrogen Bond Ethanol Water Based On Molecular Mechanic Method, National Seminar on Physical Chemistry, Yogyakarta, Indonesia, 2000
2.	Kinetics of Fe & Al solvation in coal fly ash, Seminar Forum HEDS, Bengkulu 2002
3.	The effect of pyrolysis temperature to coal liquid products, Majalah Sriwijaya, 2003
4	Distribution and Physical Properties of Pyrolysis Liquid Product of Used Tire Using MnO ₂ -Zeolyte Catalyst, Forum HEDS Seminar, Jambi 2005.
5	Zn (II) ion adsorption using low rank coal from Tanjung Enim South Sumatera, Jurnal Penelitian Sains, FMIPA, 2007.
6	The effect of temperature to product distribution and physical properties of used tire pyrolysis in vacuum and N ₂ atmosphere. Jurnal Penelitian Sains FMIPA, 2007.
7	The effect of operation condition and Cr/Mo Zeolyt sulphided catalyst weight to heat of combustion and density of hydrocracking product of coal tar, National Seminar on Energy AVoER, FT Unsri, 2008.
8	Adsorption-desorption isotherm and porosity of Ag-TiO ₂ /Zeolite catalyst, Sainmatika Journal, FMIPA University of PGRI Palembang, 2010

Inderalaya, June 11, 2013

Addy Rachmat, S.Si., M.Si
NIP. 19740928 200012 1 001

JADUAL KEGIATAN RISET

a. Tahun Pertama

No	Kegiatan	Bulan ke-									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Pembelian Bahan penelitian dan penyiapan alat	■	■								
2	Pembuatan GDL			■	■						
3	Pembuatan CL					■	■	■			
4	Karakterisasi elektroda							■	■	■	
5	Seminar dan Penyiapan laporan									■	■

b. Tahun kedua

No	Kegiatan	Bulan ke-									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Pembelian Bahan penelitian dan penyiapan alat	■									
2	Desain dan pembuatan MEA		■	■	■						
5	Optimasi MEA				■	■	■				
6	Pengukuran kinerja MEA						■	■	■		
7	Penyiapan MEA untuk multi stack								■	■	
8	Seminar dan Penyiapan laporan									■	■

PROFIL LEMBAGA PENGUSUL

1) Sejarah Universitas Sriwijaya

Unsri berdiri dan diresmikan pertama kali 3 November 1960 dengan Presiden Universitas pertama Drg. M. Isa.

Untuk memenuhi tuntutan perkembangan, Unsri kemudian melakukan penambahan kampus di luar Bukit Besar yang sudah ada, dengan membebaskan tanah seluas 712 hektar, di Inderalaya, Kabupaten Ogan Komering Ilir (Sekarang Ogan Ilir-OI), pada tahun 1982. Pembangunan kampus baru ini dimulai pada tahun 1983 dengan bantuan dana Asian Development Bank (ADB), yang secara fisik baru dimulai pada tahun 1989 dan berakhir pada tanggal 31 Desember 1993. Gubernur Sumatera Selatan H Ramli Hasan Basri memberikan kuliah perdana menandai awal kegiatan akademik di kampus baru Inderalaya ini pada tanggal 1 September 1993. Pemanfaatan sepenuhnya fasilitas di Kampus Inderalaya dilaksanakan dengan Keputusan Rektor pada bulan Januari 1995 dimana ditetapkan bahwa terhitung sejak tanggal 1 Februari 1995 semua kegiatan administrasi dan sebagian besar kegiatan akademik diselenggarakan di Kampus Inderalaya. Peresmian Kampus Unsri Inderalaya yang sesungguhnya baru dilaksanakan pada tanggal 6 Maret 1997 oleh Presiden Soeharto.

Saat ini UNSRI dipercaya untuk mengelola Riset Unggulan Nasional Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (RUSNAS PEBT).

VISI UNSRI

Visi Universitas Sriwijaya pada tahun 2020 adalah "Universitas Sriwijaya pada dasawarsa kedua abad ke-21 merupakan perguruan tinggi termuka di Indonesia yang berbasis riset,

memiliki keunggulan di berbagai cabang ilmu, khususnya di bidang pengembangan sumber daya alam, untuk menghasilkan manusia yang bertaqwa kepada Tuhan Yang Maha Esa, berkualitas, berakhlak tinggi, berbudaya, bersemangat ilmiah, dan menguasai serta mampu mempergunakan ilmu pengetahuan, teknologi, informasi, dan kesenian untuk meningkatkan kesejahteraan umat manusia".

MISI UNSRI

Untuk mewujudkan visinya, Unsri menyusun misi sebagai berikut:

1. Menyelenggarakan, membina dan mengembangkan pendidikan tinggi dalam upaya menghasilkan manusia terdidik yang dapat menerapkan, mengembangkan dan/atau menciptakan iptek dan/atau kesenian;
2. menyelenggarakan, membina dan mengembangkan pendidikan tinggi dalam rangka menghasilkan pengetahuan empirik, teori, konsep, metodologi, model, informasi baru atas cara kerja baru, yang memperkaya ilmu pengetahuan dan teknologi dan/atau kesenian;
3. menyelenggarakan, membina dan mengembangkan pengabdian kepada masyarakat dengan menerapkan ilmu pengetahuan sebagai upaya memberikan sumbangsih demi kemajuan masyarakat; dan
4. menyelenggarakan pendidikan tinggi yang modern dan efisien.

TUJUAN UNSRI

1. Menghasilkan lulusan yang berkualitas dan mandiri sesuai dengan kebutuhan masyarakat;
2. menghasilkan tenaga terdidik dan terlatih yang terampil dan andal untuk menopang pembangunan bangsa;
3. menghasilkan pengetahuan empirik, teori, konsep, metodologi, model, atau cara kerja baru yang akan memperkaya ilmu pengetahuan, teknologi dan kesenian;
4. menghasilkan teknologi unggulan yang handal, serta teknik produksi teruji dan tepat guna untuk dimanfaatkan masyarakat;
5. menghasilkan kajian kesenian, karya seni serta menyelenggarakan kegiatan kesenian untuk meningkatkan estetika bangsa;
6. meningkatkan peran sebagai pusat pengembangan dan penafsiran ilmu pengetahuan, teknologi, informasi, kesenian dan olahraga;
7. meningkatkan peran aktif dalam membantu pemerintah dan masyarakat melalui lembaga-lembaga terkait di Unsri; dan
8. meningkatkan kinerja yang relevan, bertanggung jawab, terpadu, berkelanjutan dan efisien dalam melaksanakan otonomi perguruan tinggi.

STRATEGI DAN PENGEMBANGAN UNSRI MENUJU 2020

Dengan memperhatikan isu strategik utama secara nasional dan dikaitkan dengan hasil kajian lingkungan internal dan eksternal, didapatkan strategi pengembangan yang dilaksanakan Unsri menuju Visi 2020, sebagai berikut:

1. Pengembangan Unsri sebagai pusat pendidikan;
2. pengembangan Unsri sebagai pusat penghasilan, penyimpan dan penyebarluas ilmu pengetahuan, teknologi, seni dan informasi bagi masyarakat;
3. pengembangan kelembagaan dan organisasi;
4. pengembangan SDM;
5. pengembangan kemahasiswaan;

6. pengembangan kerjasama dengan dunia bisnis, industri, instansi dan perguruan tinggi dalam dan luar negeri;
7. pengembangan kampus.

Strategi pengembangan di atas dituangkan ke dalam berbagai program pengembangan yang pada dasarnya terdiri dari tiga program induk pengembangan, sbb:

1. Program Induk pemetaan sistem pendidikan tinggi.
2. Program induk peningkatan relevansi dan mutu.

DAFTAR PUSTAKA

- André D. Taylor, E. Y. K., Virgil P. Humes, Jeremy Kizuka, Levi T. Thompson (2007). "Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells." Journal of Power Sources **171**: 101–106.
- Daud, W. R. W., A. B. Mohamad, et al. (2004). "Performance optimisation of PEM fuel cell during MEA fabrication." Energy Conversion and Management **45**: 3239–3249.
- Du, C., B. Wang, et al. (2009). "Hierarchy carbon paper for the gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells." Journal of Power Sources **187**(2): 505-508.
- Ismail, M. S., T. Damjanovic, et al. (2010). "Effect of polytetrafluoroethylene-treatment and microporous layer-coating on the electrical conductivity of gas diffusion layers used in proton exchange membrane fuel cells." Journal of Power Sources **195**(9): 2700-2708.
- Kim, H., N. P. Subramanian, et al. (2004). "Preparation of PEM fuel cell electrodes using pulse electrodeposition." Journal of Power Sources **138**(1-2): 14-24.
- Park, J.-H., J.-H. Kim, et al. (2004). "A novel direct deposition of Pt catalysts on Nafion impregnated with polypyrrole for PEMFC." Electrochimica Acta **50**(2-3): 769-775.
- Park, S., J.-W. Lee, et al. "A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs." International Journal of Hydrogen Energy(0).
- Park, S. and B. N. Popov (2011). "Effect of a GDL based on carbon paper or carbon cloth on PEM fuel cell performance." Fuel **90**(1): 436-440.
- Radhakrishnan, V. and P. Haridoss (2011). "Effect of GDL compression on pressure drop and pressure distribution in PEMFC flow field." International Journal of Hydrogen Energy **36**(22): 14823-14828.
- Rohendi, D., E. H. Majlan, et al. (2013). "Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions." International Journal of Hydrogen Energy(0).
- Saha, M. S., A. F. Gullá, et al. (2006). "High performance polymer electrolyte fuel cells with ultra-low Pt loading electrodes prepared by dual ion-beam assisted deposition." Electrochimica Acta **51**(22): 4680-4692.
- Song, W., H. Yu, et al. (2010). "A new hydrophobic thin film catalyst layer for PEMFC." Solid State Ionics **181**(8-10): 453-458.
- Starz, K.-A., R. Zuber, et al. (2002). Ink for producing membrane electrode assemblies for fuel cells. U. S. P. Application. US.
- Su, H.-N., Q. Zeng, et al. (2010). "High performance membrane electrode assembly with ultra-low platinum loading prepared by a novel multi catalyst layer technique." International Journal of Hydrogen Energy **35**(19): 10430-10436.
- Wang, Y., K. S. Chen, et al. (2011). "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research." Applied Energy **88**(4): 981-1007.

- Wang, Z.-B., P.-J. Zuo, et al. (2009). "Durability studies on performance degradation of Pt/C catalysts of proton exchange membrane fuel cell." International Journal of Hydrogen Energy **34**(10): 4387-4394.
- Xiong, L., A. M. Kannan, et al. (2002). "Pt-M (M=Fe, Co, Ni and Cu) electrocatalysts synthesized by an aqueous route for proton exchange membrane fuel cells." Electrochemistry Communications **4**(11): 898-903.
- Xiong, L. and A. Manthiram (2005). "High performance membrane-electrode assemblies with ultra-low Pt loading for proton exchange membrane fuel cells." Electrochimica Acta **50**(2005): 3200-3204.
- Yu, Y., H. Li, et al. (2012). "A review on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes: Causes, consequences, and mitigation strategies." Journal of Power Sources **205**(0): 10-23.
- Yuan, X.-Z., S. Zhang, et al. (2011). "A review of accelerated conditioning for a polymer electrolyte membrane fuel cell." Journal of Power Sources **196**(22): 9097-9106.

LAMPIRAN:**RINCIAN BIAYA PENELITIAN
TAHUN 2014**

Judul : Pembuatan *Membrane Electrode Assembly (MEA) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodeposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi *Base Transceiver Station (BTS)*

Peneliti Utama : Drs. Dedi Rohendi, M.T

I. Gaji dan Upah

No	Pelaksana Kegiatan	Volume	Satuan	Honor/Jam (Rp)	Total (Rp)
1	Peneliti Utama (1 orang) 20 jam/minggu	880	jam	50,000	44,000,000
2	Peneliti (4 orang) (10 dan 15 jam/minggu)	1980	jam	45,000	89,100,000
4	Teknisi (2 orang)	280	OH	67,000	18,760,000
5	Tenaga Administrasi (1 orang)	10	OB	260,000	2,600,000
Sub Total I					154,460,000

Keterangan: penelitian berlangsung selama 44 minggu (10 bulan)

II. Bahan Habis Pakai, Perancangan dan Pembuatan Alat, dan Analisis

No	Bahan	Volume	Satuan	Biaya/satuan (Rp)	Total (Rp.)
Bahan Habis Pakai					
1	katalis Pt/C 20 wt% (5 gram)	3	botol	7,750,000	23,250,000
2	PTFE 60 wt% (150 mL)	3	botol	1,625,000	4,875,000
3	Membran nafion NR 212 (0.3 x 5 m)	1	gulung	15,000,000	15,000,000
4	karbon vulcan XC-72R (@250 gram)	10	botol	250,000	2,500,000
5	Nafion solution 5 %wt (@ 250 mL)	3	botol	9,250,000	27,750,000
6	Carbon paper Avcarb P750T (40 cm x 1 m)	1	gulung	26,000,000	26,000,000
7	Isopropanol (1 L)	3	botol	1,500,000	4,500,000
8	Ammonium hidrogen karbonat (500 gram)	1	botol	1,625,000	1,625,000
9	silicon gasket (12" x 12")	1	sheet	3,625,000	3,625,000
10	H ₂ PtCl ₆ 8 wt% dalam air (50 mL)	1	botol	7,500,000	7,500,000
11	CoCl ₂ (50 gram)	1	botol	4,000,000	4,000,000
12	NiCl ₂ (25 gram)	1	botol	16,250,000	16,250,000
13	V ₂ O ₅ (5 gram)	2	botol	2,625,000	5,250,000
14	gas hidrogen	2	tabung	1,500,000	3,000,000
15	gas Oksigen	2	tabung	1,000,000	2,000,000
Perancangan dan Pembuatan Alat					
1	Spraying	1	unit	15,000,000	15,000,000
2	impregnasi katalis	1	buah	15,000,000	15,000,000
3	Elektrodeposisi	1	buah	25,000,000	25,000,000
Analisis					
1	EDX-SEM	25	sampel	500,000	12,500,000
2	TEM	25	sampel	1,000,000	25,000,000
3	CV	25	sampel	350,000	8,750,000
4	EIS	25	sampel	350,000	8,750,000

5	Fuel cell test station	25	sampel	250,000	6,250,000
6	Konduktivitas elektrik	25	sampel	250,000	6,250,000

Sub Total II 269,625,000

III. Perjalanan

No	Tujuan	Volume	Satuan	Biaya/satuan (Rp)	Total (Rp)
1	Palembang-Jakarta (pp)	5	pp	1,800,000	9,000,000
2	Lumpsum	10	HOK	450,000	4,500,000
3	Transpor local	70	orang-bulan	200,000	14,000,000
4	Pengiriman sampel	30	paket	250,000	7,500,000
				Sub Total III	27,500,000

IV. Lain-lain

No	Komponen	Volume	Satuan	Biaya/satuan (Rp)	Total (Rp)
1	Komunikasi	70	orang-bulan	100,000	7,000,000
2	Pengolahan data	1	paket	2,500,000	2,500,000
3	Publikasi Ilmiah	2	paket	2,500,000	5,000,000
4	Pengusulan Paten	1	paket	6,000,000	6,000,000
				Sub Total IV	20,500,000

TOTAL I + II + III + IV 472,085,000



PETIKAN

**MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA**

**KEPUTUSAN MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA**

NOMOR 288 /M/Kp/XII/2013

TENTANG

**PENETAPAN JUDUL PROPOSAL PROGRAM INSENTIF RISET SISTEM INOVASI NASIONAL
YANG DIAJUKAN UNTUK DIBIYAI OLEH ANGGARAN PENDAPATAN DAN BELANJA NEGARA
TAHUN ANGGARAN 2014**

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI REPUBLIK INDONESIA,

Menimbang : dst.
Mengingat : dst.
Memperhatikan : dst.

MEMUTUSKAN:

Menetapkan : KEPUTUSAN MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI TENTANG PENETAPAN
JUDUL PROPOSAL PROGRAM INSENTIF RISET SISTEM INOVASI
NASIONAL YANG DIAJUKAN UNTUK DIBIYAI OLEH ANGGARAN DAN
PENDAPATAN BELANJA NEGARA TAHUN ANGGARAN 2014.

KESATU : Menetapkan Judul Proposal sebagaimana tercantum dalam Lajur 4
(empat) Lampiran Keputusan ini sebagai Penerima Pembiayaan
Program Insentif Riset SINas yang diajukan untuk dibiayai oleh
Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara Tahun Anggaran 2014,
masing-masing sebesar sebagaimana tercantum dalam Lajur 7
(tujuh) Lampiran Keputusan ini.

KEDUA : Judul Proposal sebagaimana dimaksud pada Diktum KESATU adalah
hasil seleksi dari Tim Penilai dan telah didiskusikan dengan Tim
Pengaruh, serta pengambilan kebijakan oleh Rapat Pimpinan
(Rapim) terhadap proposal kegiatan riset yang dinyatakan layak
untuk ditetapkan sebagai Penerima Pembiayaan Program Insentif
Riset SINas yang diajukan untuk dibiayai oleh Anggaran Pendapatan
dan Belanja Negara Tahun Anggaran 2014.

KETIGA : Judul Proposal sebagaimana dimaksud pada Diktum KEDUA Keputusan ini apabila anggarannya tidak disetujui dalam Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara Tahun Anggaran 2014, maka pembiayaannya dalam Tahun Anggaran 2014 dibatalkan dan akan diupayakan untuk diajukan kembali untuk dibiayai oleh Anggaran Pendapatan dan Belanja Negara tahun berikutnya.

KEEMPAT : Keputusan ini berlaku sejak tanggal ditetapkan, dengan ketentuan apabila di kemudian hari ternyata terdapat kekeliruan dalam keputusan ini, akan ditinjau kembali dan diperbaiki sebagaimana mestinya.

SALINAN Keputusan ini disampaikan kepada Yth. :

1. Ketua Badan Pemeriksa Keuangan Republik Indonesia;
2. Menteri Keuangan;
3. Menteri Perencanaan Pembangunan Nasional/
Kepala Bappenas;
4. Direktur Jenderal Anggaran Kementerian Keuangan;
5. Para Deputy di Kementerian Riset dan Teknologi;
6. Para Staf Ahli Menteri Riset dan Teknologi; dan
7. Sekretaris Kementerian Riset dan Teknologi.

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 17 Desember 2013

MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA,

TTD.

GUSTI MUHAMMAD HATTA

Petikan yang sah sesuai dengan aslinya
Kementerian Riset dan Teknologi
Kepala Biro Hukum dan Humas,



Dadit Herdikiagung



LAMPIRAN

PETIKAN

Keputusan Menteri Riset dan Teknologi

Nomor : 288 /M/Kp/XII/2013

Tanggal : 17 Desember 2013

Penetapan Judul Proposal Insentif Riset SINas yang Diajukan untuk Dibiayai oleh APBN Tahun Anggaran 2014

64. LEMBAGA PENELITIAN, UNIVERSITAS SRIWIJAYA

No Urut	No. Identitas	Kode Keg	Judul	Jenis Pelaksanaan	Tahun Riset ke-	Dukungan Biaya 2014 (Rp.)	Peneliti Utama
1	2	3	4	5	6	7	8
143	RD-2014-0640	16	Nanostruktur Polioksometalat-Oksida Logam sebagai Nanokatalis Desulfurisasi untuk Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Minyak	Non Konsorsium	1	200.000.000	Aldes Lesbani, S.Si.,M.Si.,Ph.D
228	RT-2014-1136	11	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 (BTS)</i>	Non Konsorsium	1	200.000.000	Drs. Dedi Rohendi, M.T
JUMLAH						400.000.000	

Petikan yang sah sesuai dengan aslinya
Kementerian Riset dan Teknologi
Kepala Biro Hukum dan Humas,



Dadit Herdikiagung

Ditetapkan di Jakarta

MENTERI RISET DAN TEKNOLOGI
REPUBLIK INDONESIA,

TTD.

GUSTI MUHAMMAD HATTA

LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN

Judul Penelitian : Pembuatan *Membrane Electrode Assembly* (MEA) *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi *Base Transceiver Station* (BTS)

Bidang Prioritas IPTEK : Teknologi Energi - Riset pengembangan Pembangkit Listrik dari Energi Baru dan Terbarukan

Jenis Insentif Riset : Riset Terapan

Lokasi Penelitian : Universitas Sriwijaya, Inderalaya, Ogan Ilir- Sumsel

Keterangan Lembaga Pelaksana / Pengelola Penelitian

A. Lembaga Pelaksana Penelitian

Nama Peneliti Utama : Dedi Rohendi, Drs., M.T
Nama Lembaga / Institusi : Universitas Sriwijaya
Unit Organisasi : Lembaga Penelitian
Alamat : Jl. Palembang-Prabumulih Km. 32 Inderalaya - OI
Telepon/HP/Faksimil/ e-mail : 0711-580269 / 0816-383220 / rohendi19@gmail.com

Rekapitulasi Biaya

No.	Uraian	Jumlah (Rp.)
1.	Gaji dan Upah	50.000.000
2.	Bahan habis pakai dan analisis	113.100.000
3.	Perjalanan	19.500.000
4.	Lain-lain	17.400.000
	Jumlah biaya tahun diusulkan	200.000.000

Setuju diusulkan,

Ketua



Prof. Dr. Ir. M. Said, M.Sc

NIP 196108121987031003

Koordinator kegiatan

Drs. Dedi Rohendi, M.T

NIP 196704191993031001

Executive Summary

Penelitian dengan judul "Pembuatan *Membrane Electrode Assembly (MEA) Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)* Kinerja Tinggi dengan Metode Elektrodeposisi dan Penyemprotan untuk Aplikasi Sumber Energi *Base Transceiver Station (BTS)*" tahun pertama telah dilaksanakan dengan hasil sesuai target berupa elektroda dengan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C. Elektroda dibuat dengan dua metode yaitu metode reduksi dan metode elektrodeposisi serta pada berbagai perbandingan kandungan Pt:Co dan Pt:Ni. Pembuatan elektroda dengan metode semburan/penyemprotan dilakukan dengan terlebih dahulu membuat katalis Pt-Co/C dari proses reduksi $\text{H}_2\text{PtC}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam matriks serbuk karbon dengan menggunakan NaBH_4 sebagai reduktor, sementara katalis Pt-Ni/C dibuat dari reduksi larutan $\text{H}_2\text{PtC}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam medium dan proses yang sama. Berdasarkan hasil analisis XRD, proses reduksi berhasil membentuk katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dan berdasarkan analisis CV, katalis yang dibuat menunjukkan aktivitas katalitik yang cukup baik (ditunjukkan dengan ECSA yang cukup tinggi). Katalis berupa serbuk selanjutnya dicampurkan dengan pelarut isopropanol dan larutan nafion kemudian disemurkan ke atas *gas diffusion layer (GDL)*.

Pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi dilakukan dengan elektrodeposisi langsung larutan $\text{H}_2\text{PtC}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ / $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ke atas GDL. Hasil analisis CV, XRD dan EIS menunjukkan bahwa kedua gabungan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C berhasil terbentuk dan menunjukkan aktivitas katalitik yang baik.

Berdasarkan hasil analisa CV dan EIS, maka elektroda Pt-Co/C yang dapat digunakan sebagai elektroda PEMFC adalah elektroda dengan perbandingan Pt:Co=2:8. Hal ini berlaku untuk dua metode pembuatan yang digunakan. Sementara itu, elektroda Pt-Ni/C yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan sebagai elektroda PEMFC adalah elektroda dengan perbandingan Pt:Ni=4:6.

Pembuatan elektroda dengan metode reduksi mempunyai keunggulan dalam hal kemudahan penyediaan katalis dan pengendalian komposisi katalis dalam elektroda, sementara kelemahannya adalah proses preparasi dan pembuatannya relatif lama dibandingkan metode elektrodeposisi. Metode elektrodeposisi mempunyai keunggulan dalam hal kecepatan pembuatan, akan tetapi kesulitan dalam penempatan katalis secara bersamaan dan penyediaan katalis untuk penggunaan lain.

Berdasarkan hasil penelitian tahun pertama, maka elektroda Pt-Co/C dan Pt-Ni/C yang dihasilkan selanjutnya dapat diuji kinerjanya dalam *membrane electrode assembly (MEA)* seperti yang diusulkan dalam proposal tahun kedua. MEA hasil optimasi diharapkan mempunyai kerapatan arus dan ketahanan yang tinggi untuk keperluan PEMFC pada BTS.

KATA PENGANTAR

Syukur alhamdulillah penyusun panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena telah menyelesaikan seluruh rangkaian penelitian SINAS Ristek 2014 ini.

Laporan akhir penelitian ini disusun sebagai bentuk pertanggungjawaban penyusun sebagai koordinator peneliti sesuai dengan persyaratan yang diminta oleh panitia.

Penyusun menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Kementerian Riset dan Teknologi melalui panitia penyelenggara Insentif SiNas 2014 yang telah memberikan kesempatan kepada kami untuk melaksanakan penelitian Insentif SiNas tahun pertama ini.
2. Tim anggota peneliti dan staf teknis yang telah membantu kelancaran penelitian ini.
3. Jurusan Kimia FMIPA UNSRI dan laboratorium Kimia Analisa UGM yang telah menyediakan fasilitas penelitian.

Besar harapan, laporan akhir ini dapat memenuhi syarat sebagai pertanggungjawaban pelaksanaan penelitian. Atas perhatian dan kepercayaannya, penyusun sampaikan terima kasih.

Palembang, 25 Nopember 2014

Penyusun

DAFTAR ISI

Lembar Identitas dan Penegasan	i
Executive Summary	ii
Kata pengantar	iii
Daftar Isi	iv
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Permasalahan Kajian	2
1.3. Subjek Penelitian	3
1.4. Lokasi Penelitian	3
1.5. Hasil yang Ditargetkan	3

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Prinsip Operasi <i>Fuel cell</i>	4
2.2. Prinsip Elektrokimia Fuel Cell	4
2.3. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)	12
2.4. Elektroda Fuel Cell	15
2.5. Metode Elektrodeposisi	17

BAB 3. TUJUAN DAN MANFAAT

3.1. Tujuan dan Sasaran	20
3.2. Prospek dan Manfaat	20

BAB 4. METODE

4.1. Ruang Lingkup	21
4.2. Diagram Alir Penelitian	22

BAB 5. RENCANA CAPAIAN, HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. Rencana Capaian	27
5.2. Hasil	29
5.3. Hambatan	45

5.4. Pembahasan	45
BAB 6. KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1. Kesimpulan	49
5.2. Saran	49
DAFTAR PUSTAKA	50

DAFTAR TABEL

Tabel 5.1	Gant Chart Penelitian Insentif Sinas 2014
Tabel 5.2	Komposisi percobaan pembuatan elektroda Pt-Co/C
Tabel 5.3	Komposisi percobaan pembuatan elektroda Pt-Ni/C
Tabel 5.4	Data ECSA untuk katalis Pt/C dan Pt-Co/C pada berbagai komposisi
Tabel 5.5.	Data ECSA untuk katalis Pt-Ni/C pada berbagai komposisi

DAFTAR GAMBAR

- Gambar 2.1 Gambar 2.1 Lengkungan polarisasi fuel cell
- Gambar 2.2 Uraian polarisasi pada PEMFC
- Gambar 2.3 Gambar Plat dwikutub dan plat akhir untuk stek PEMFC tunggal
- Gambar 2.4 Gambar MEA untuk PEMFC
- Gambar 2.5 Alat dan komponen elektrodeposisi
- Gambar 5.1 Gambar-gambar penelitian pembuatan elektroda
- Gambar 5.2 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 80:20)
- Gambar 5.3 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 60:40)
- Gambar 5.4 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 40:60)
- Gambar 5.5 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 20:80)
- Gambar 5.6 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 0:100)
- Gambar 5.7 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt/C dan Pt-Co/C
- Gambar 5.8 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 80:20)
- Gambar 5.9 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 60:40)
- Gambar 5.10 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 40:60)
- Gambar 5.11 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 20:80)
- Gambar 5.12 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 0:100)
- Gambar 5.13 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt-Ni/C
- Gambar 5.14 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 80:20)
- Gambar 5.15 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 60:40)
- Gambar 5.16 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 40:60)
- Gambar 5.17 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 20:80)
- Gambar 5.18 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 0:100)
- Gambar 5.19 Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 80:20)
- Gambar 5.20 Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 60:40)
- Gambar 5.21 Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 40:60)
- Gambar 5.22 Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 0:100)
- Gambar 5.23 Pola CV untuk katalis Pt /C
- Gambar 5.24 Pola EIS gabungan untuk katalis Pt-Co/C
- Gambar 5.25 Elektrodeposisi Pt untuk pembuatan elektroda Pt-Co/C pada GDL
- Gambar 5.26 Elektrodeposisi Co dengan berbagai perbandingan pada elektroda Pt/C untuk membuat elektroda Pt-Co/C
- Gambar 5.27 Elektrodeposisi Pt untuk pembuatan elektroda Pt-Ni/C pada GDL
- Gambar 5.28 Elektrodeposisi Ni dengan berbagai perbandingan pada Pt/C
- Gambar 5.29 Gabungan hasil analisa CV untuk elektroda Pt-Co/C

Gambar 5.30 Gabungan hasil analisa CV untuk elektroda Pt-Ni/C

Gambar 5.31 Perbandingan hasil analisa CV untuk Pt:Co/C = 0:1, Pt:Ni=1:0 dan Pt:Ni=0:1

Gambar 5.32 Hasil analisa EIS untuk elektroda Pt-Ni/C (Inset perbandingan antara hasil analisa EIS untuk Pt:Ni=0:1 dengan perbandingan Pt:Ni lainnya)

Gambar 5.33 Hasil analisa EIS untuk elektroda Pt-Co/C (Inset perbandingan antara hasil analisa EIS untuk Pt:Co=0:1 dengan perbandingan Pt:Co lainnya)

Gambar 5.34 Kumpulan gambar penelitian

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Fuel cell (sel bahan bakar) merupakan peralatan elektrokimia yang dapat mengubah energi bebas yang tersedia dalam bahan bakar (energi kimia) langsung menjadi kerja yang bermanfaat dalam bentuk energi listrik (Wang et al. 2009; Wang et al. 2011). Fuel cell dengan keunggulan pada tingkat konversi yang tinggi, tingkat polusi yang rendah, modular dan beragam sumber bahan bakarnya diharapkan dapat menggantikan sumber energi konvensional yang ada (Daud et al. 2004 ; Andr'e D. Taylor 2007).

Teknologi Fuel Cell pasti akan hadir di Indonesia karena desakan yang makin kuat untuk menghadirkan sumber energi yang bersih. Saat ini, penggunaan fuel cell di dunia sudah memasuki tahap komersialisasi untuk kendaraan, sementara di Indonesia, fuel cell sudah mulai digunakan sebagai sumber energi pada *Base Transceiver Station* (BTS) tanpa dukungan kemandirian dalam penguasaan teknologinya.

Universitas Sriwijaya (UNSRI) sebagai perguruan tinggi yang pernah dipercaya untuk mengelola RUSNAS PEBT (Riset Unggulan Strategis Nasional Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan) sepatutnya mengambil bagian dalam menopang penguatan riset dan jaringan penelitian di bidang Fuel Cell di Indonesia. Hal ini karena Fuel Cell merupakan sumber energi baru yang bersih dan mempunyai tingkat efisiensi yang tinggi. Dengan dukungan ketersediaan sumber bahan baku penghasil hidrogen yang melimpah, jajaran peneliti yang mempunyai kompetensi dan keahlian di bidang elektrokimia dan energi, serta jaringan kerjasama dan dukungan kebijakan yang sudah ada, UNSRI akan mampu menjadi pusat pengembangan Fuel Cell di Sumatera khususnya dan Indonesia pada umumnya.

Salah satu jenis fuel cell dengan keunggulan suhu operasi yang relatif rendah, tingkat konversi tinggi dan aplikasi yang beragam (keperluan energi mudah alih, kendaraan bermotor dan sumber energi untuk perumahan) adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) (Wang et al. 2009; Su et al. 2010).

Komponen terpenting dalam PEMFC adalah *Membrane Electrode Assembly* (MEA) yang merupakan pusat reaksi elektrokimia perubahan gas hidrogen (bahan bakar) dan oksigen (oksidan) menjadi energi listrik dan air sebagai buangan. MEA merupakan gabungan antara katoda dan anoda yang mengapit membran elektrolit pada kedua sisi (Starz et al. 2002). Karena mempunyai fungsi sangat penting, maka MEA harus mendapat perhatian khusus dalam hal upaya pencapaian kerapatan arus (*current density*) yang tinggi dan daya tahannya.

Hal yang perlu dikaji untuk menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi adalah kandungan dan jenis katalis serta metode pembuatannya.

Ada beberapa metode pembuatan elektroda fuel cell yang telah dikembangkan, diantaranya metode *muatanting* (Xiong & Manthiram 2005), *spraying* (Su et al. 2010) dan metode elektrodeposisi (Kim et al. 2004; Saha et al. 2006). Metode elektrodeposisi merupakan metode penempatan katalis pada substrat secara elektrokimia. Diantara keunggulan dari metode elektrodeposisi adalah penempatan katalis berukuran nanometer dan distribusi lebih merata sehingga dapat mereduksi jumlah katalis yang ditempatkan tapi meningkatkan utilitas dari katalis. Hal ini pada akhirnya dapat meningkatkan kinerja dan menekan biaya produksi fuel cell. Sementara itu, metode *spraying* adalah metode yang mudah dan cukup murah. Pada penelitian ini, akan dikaji dan dibandingkan dua buah metode pembuatan elektroda yaitu metode elektrodeposisi dan metode penyemprotan (*spraying*) dengan katalis. Metode penyemprotan dengan katalis tunggal Pt/C telah dilakukan oleh penulis dan mendapatkan kandungan terbaik Pt dalam elektrod adalah 0.5 mg.cm^{-2} (Rohendi et al. 2013).

Katalis yang digunakan dalam elektroda fuel cell umumnya katalis berbasis platina yang cukup mahal dan mudah teracuni. Selain katalis tunggal platina, pemakaian logam golongan transisi lain selain platina dilaporkan digunakan sebagai katalis pendukung platina. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan fungsi katalitik elektroda dan mengurangi kandungan platina. Pada penelitian ini juga akan dioptimasi penggunaan paduan katalis Pt dengan logam transisi lain yaitu Co, Ni dan V. Penggunaan paduan logam golongan transisi dengan platina telah dilakukan menggunakan metode *spraying* (Xiong et al. 2002; Radhakrishnan & Haridoss 2011).

Penelitian pembuatan MEA diharapkan dapat menjadi landasan bagi peningkatan kemandirian Indonesia dalam penguasaan teknologi fuel cell, khususnya PEMFC, sehingga Indonesia tidak hanya sekedar menjadi pasar bagi produsen fuel cell manca negara. Secara khusus, MEA yang dibuat diharapkan mempunyai kinerja tinggi dalam hal current density dan durability sehingga diproyeksikan untuk dapat digunakan pada BTS. Sebuah BTS memerlukan daya listrik antara 2 – 4 kW. MEA dengan kerapatan arus yang tinggi dapat mereduksi ukuran stack PEMFC secara signifikan dan penurunan kandungan katalis Pt akan menurunkan harga fuel cell secara keseluruhan.

1.2. Permasalahan Kajian

Permasalahan kajian pada penelitian pada tahun pertama ini adalah bagaimana dapat menghasilkan elektroda dan MEA yang lebih murah tapi mempunyai prestasi yang baik yang dilakukan dengan memodifikasi katalis dan menentukan metode pembuatan katalis yang sederhana dan efisien. Upaya yang dilakukan adalah membuat paduan katalis Pt-Co/C dan Pt-

Ni/C yang diharapkan dapat mengurangi pemakaian katalis Pt yang selain mahal juga mudah teracuni. Metode pembuatan yang dicoba dikaji adalah metode elektrodposisi dan spraying (semburan).

1.3. Subjek Penelitian

Subyek penelitian tahun pertama adalah pembuatan elektroda PEMFC dengan metode elektrodposisi dan metode semburan menggunakan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C pada berbagai perbandingan dan karakterisasi serta pengujian kinerja elektroda.

1.4. Lokasi Penelitian

Sebagian besar penelitian dilakukan di Laboratorium Kimia Fisika Jurusan Kimia Fakultas MIPA Unsri dan Laboratorium MEA di Fuel Cell Institute UKM, kecuali karakterisasi XRD dilakukan di Laboratorium Kimia Analisa FMIPA UGM.

1.5. Hasil yang Ditargetkan

Target penelitian tahun pertama adalah didapatkannya elektroda PEMFC dengan menggunakan paduan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C yang mempunyai prestasi tinggi untuk penggunaan dalam BTS.

BAB 2

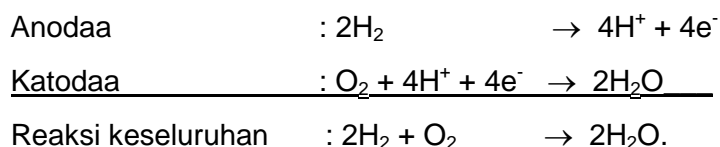
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Prinsip Operasi *Fuel cell*

Fuel cell merupakan peralatan elektrokimia yang dapat mengubah energi bebas yang tersedia dalam bahan bakar (energi kimia) langsung menjadi kerja yang bermanfaat dalam bentuk energi listrik pada temperatur yang cukup rendah. Karena sifat konversinya, maka *fuel cell* tidak tergantung pada siklus Carnot sehingga efisiensinya dapat lebih besar dari mesin kalor (Wang et al. 2011).

Pada prinsipnya sistem *fuel cell* mirip dengan proses elektrokimia lainnya, misalnya aki (*accu*) dan baterai. Hal utama yang membedakan *fuel cell* dengan baterai adalah penyediaan bahan bakar dan oksidannya. Pada baterai, bahan bakar dan oksidannya merupakan bagian dari baterai itu sendiri sehingga listrik yang dihasilkan oleh baterai dapat berkurang dengan lamanya waktu pemakaian, sedangkan pada *fuel cell*, bahan bakar yang dialirkan melalui anodaa dan oksidan yang dialirkan melalui katodaa disuplai secara kontinyu. Hal ini dimungkinkan karena reaksi yang terjadi hanya berlangsung searah (*irreversible*), berbeda dengan baterai ataupun *accu* yang mengalami reaksi reversible (Fickett, A.P, 1984).

Fuel cell terdiri atas dua buah elektroda yaitu anodaa, tempat bahan bakar (umumnya hidrogen, amonia atau hidrazin) disuplai dan katodaa tempat oksidan (umumnya udara atau oksigen) disuplai. Kedua elektroda dipisahkan oleh suatu larutan elektrolit. Reaksi yang terjadi pada *fuel cell* berbahan bakar hidrogen dengafn larutan elektrolit asam adalah:

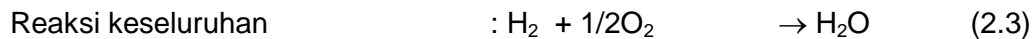
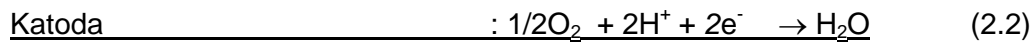
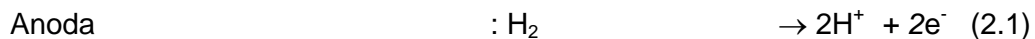


Elektron yang dilepaskan pada anodaa akan mengalir melalui sirkuit eksternal yang mengandung beban dan sampai di katodaa. Ion hidrogen (H^+) yang dilepaskan di anoda dihantarkan ke katoda dan bereaksi dengan O_2 menghasilkan air. Beda potensial pada kasus ini sekitar 1,23 V. Air yang dihasilkan di katodaa harus dihilangkan secara kontinyu untuk menghindari terjadinya flooding sel.

2.2. Prinsip Elektrokimia *Fuel cell*

Reaksi dalam sebuah *fuel sel* adalah suatu reaksi elektrokimia yang dipisahkan ke dalam dua reaksi setengah sel elektrokimia yang masing-masingnya terjadi pada katoda dan

anoda. Reaksi di anoda (tempat terjadi reaksi oksidasi) dan di katoda (tempat terjadi reaksi reduksi) untuk fuel cell dengan bahan bakar hidrogen dapat digambarkan sebagai berikut:



Reaksi keseluruhan (2.3) adalah sama dengan reaksi pembakaran gas hidrogen yang melepaskan energi dalam bentuk entalpi. Entalpi dari reaksi pembakaran hidrogen dapat dihitung melalui persamaan:

$$\Delta H = (H_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (H_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(H_f)_{\text{O}_2} \quad (2.4)$$

Karena entalpi pembentukan air $(H_f)_{\text{H}_2\text{O}}$ adalah $-286,02 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ (25°C) serta entalpi pembentukan untuk gas hidrogen dan oksigen adalah 0 (pada suhu 25°C), maka entalpi pembakaran gas hidrogen adalah $-286,02 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ dan selanjutnya dinamakan nilai pemanasan hidrogen lebih tinggi (*hydrogen's higher heating value*). Nilai $286,02 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ akan diperoleh jika kita tepat mereaksikan 1 mol hidrogen dengan $\frac{1}{2}$ mol oksigen. Jika kita mereaksikan 1 mol hidrogen dengan oksigen berlebih, maka nilai entalpi nya berkurang menjadi $241 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ dan dinamakan nilai pemanasan hidrogen lebih rendah (*hydrogen's lower heating value*). Perbedaan antara nilai pemanasan hidrogen lebih tinggi dan lebih rendah dinamakan panas penguapan air (pada 25°C) (Barbir 2005).

2.2.1 Perhitungan Energi Secara Termodinamika

Karena reaksi fuel cell bukan merupakan reaksi pembakaran, maka nilai $286 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ bermakna sebagai energi maksimum yang dapat dikeluarkan dari reaksi hidrogen dengan oksigen. Apabila jumlah energi tersebut akan diubah menjadi energi listrik melalui peralatan fuel cell , maka tidak seluruhnya energi kimia dalam bentuk nilai pemanasan hidrogen dapat diubah menjadi energi listrik. Jumlah energi daripada reaksi fuel cell yang beroperasi pada suhu dan tekanan yang konstan, yang dapat diubah menjadi energi listrik secara termodinamik diberikan oleh perubahan energi bebas Gibbs:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.6)$$

di mana:

ΔG = Perubahan energi bebas Gibbs

ΔH = entalpi reaksi

T = suhu (K)

ΔS = Perubahan entropi

Berdasarkan persamaan 2.6, jumlah energi yang dapat diubah bergantung pada kehilangan energi dalam bentuk $T\Delta S$. Pada suhu 25°C (298 K), besarnya $T\Delta S$ adalah 48,68 kJ.mol⁻¹ sehingga jumlah energi maksimum yang dapat diubah menjadi energi listrik dari reaksi fuel cell adalah sebagai berikut:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S = (-286,02) - (-48,68) = -237,34 \text{ kJ.mol}^{-1} \quad (2.7)$$

Makna dari nilai energi pada persamaan 2.7 adalah, dari 286,02 kJ.mol⁻¹ energi maksimum yang tersedia, yang dapat diubah menjadi energi listrik sebesar 237,34 kJ.mol⁻¹ dan sisanya sebesar 48,68 kJ.mol⁻¹ diubah menjadi panas.

Bentuk selanjutnya dari perubahan energi bebas Gibbs dapat diuraikan dari persamaan asas termodinamika:

$$G = H - TS \quad (2.8)$$

Bentuk differensial dari G menjadi :

$$dG = dH - TdS - SdT \quad (2.9)$$

karena $dH = d(U + PV)$, maka:

$$dG = dU + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (2.10)$$

dengan $dU = dQ - dW =$ energi dalam dari Hukum I Termodinamika, maka ungkapan dG menjadi:

$$dG = dQ - dW + PdV + VdP - TdS - SdT \quad (2.11)$$

Untuk proses reversibel, $dQ = TdS$, dan jika kerja yang dihasilkan hanya kerja pengembangan sehingga $dW = PdV$, maka persamaan 2.11 menjadi

$$dG = VdP - SdT \quad (2.12)$$

Untuk gas ideal dan proses isothermal, maka $dT = 0$ dan $V = \frac{nRT}{P}$, sehingga persamaan 2.12 menjadi:

$$dG = nRT \frac{dP}{P} \quad (2.13)$$

$$\text{Selanjutnya: } \int_1^2 dG = nRT \int_1^2 \frac{dP}{P} \quad (2.14)$$

$$\Leftrightarrow G_2 - G_1 = nRT \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) \quad (2.15)$$

Secara umum, persamaan energi bebas Gibbs untuk reaksi sel pada persamaan 2.3. diberikan

$$\text{oleh persamaan: } \Delta G = \Delta G^0 + RT \ln \left(\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} \cdot f_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (2.16)$$

Jika reaksi berlangsung secara reversibel ($dQ = TdS$) pada suhu dan tekanan konstan ($dT = 0, dP = 0$), maka ungkapan persamaan 2.11 menjadi:

$$dG = -dW + PdV \quad (2.17)$$

Karena kerja pada fuel cell adalah kerja listrik dan bukan kerja pengembangan ($dV = 0$) (Chen 2003), maka persamaan 2.17 setelah integrasikan menjadi:

$$\int dG = - \int dW_e$$

$$\Leftrightarrow \Delta G = -W_e \quad (2.18)$$

Kerja listrik adalah perkalian antara muatan dan tegangan sehingga:

$$W_e = qE \quad (2.19)$$

di mana:

W_e = kerja listrik ($J.mol^{-1}$)

q = muatan ($Coulomb.mol^{-1}$)

E = tegangan (Volt) (Barbir 2005)

Jumlah muatan yang dipindahkan dalam persamaan fuel cell per mol H_2 yang digunakan dapat dinyatakan sebagai:

$$q = n.N_{avg}.q_{el} \quad (2.20)$$

di mana:

n = jumlah elektron per mol $H_2 = 2$ elektron per molekul H_2

N_{avg} = jumlah molekul per mol (bilangan avogadro) = 6.002×10^{23} molekul/mol

q_{el} = muatan 1 elektron = 1.602×10^{-19} Coulomb / elektron

Produk perkalian bilangan avogadro dengan muatan 1 elektron dikenali sebagai konstanta Faraday, $F = 6.002 \times 10^{23} \times 1.602 \times 10^{-19} = 96,485$ Coulomb / mol-elektron, sehingga persamaan 2.19 menjadi:

$$W_e = nFE \quad (2.21)$$

dan persamaan 2.18 menjadi:

$$\Delta G = -nFE \quad (2.22)$$

Besaran perubahan energi Gibbs dalam keadaan standar dinyatakan sebagai:

$$\Delta G^{\theta} = -nFE^{\theta} \quad (2.23)$$

dengan demikian, beda potensial secara teoritis dari fuel cell adalah:

$$E^{\theta} = \frac{\Delta G^{\theta}}{nF} = - \frac{237.34 J.mol^{-1}}{2 \times 96,485 coulomb.mol^{-1}} = 1.229 J/Coulomb = 1.23 Volt$$

Penggabungan persamaan 2.22 dan 2.23 ke dalam persamaan (2.16) akan diperoleh persamaan:

$$-nFE = -nFE^0 + nRT \ln \left(\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} \cdot f_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (2.24)$$

$$\Leftrightarrow E = E^0 - \frac{RT}{nF} \ln \left(\frac{f_{H_2O}}{f_{H_2} \cdot f_{O_2}^{1/2}} \right) \quad (2.25)$$

Persamaan 2.25 dinamakan persamaan Nernst dengan:

R = konstanta gas universal = 8,341 J/K.mol

T = suhu mutlak (K)

n = jumlah mol elektron yang terlibat

F = konstanta Faraday = arus listrik (F)

f = fugasitas

E^0 = potensial sel standar (Volt)

E = potensial sel (volt)

Persamaan 2.23 sesungguhnya menggambarkan hubungan antara energi kimia (yang diwakili oleh besaran ΔG^0) dengan energi listrik (yang diwakili oleh besaran E^0). Melalui persamaan 2.23, perubahan energi kimia menjadi energi listrik dan sebaliknya boleh terjadi.

Sementara itu, persamaan Nernst menyediakan hubungan antara potensial sel standar (E^0) dengan potensial sel keseimbangan (E) pada pelbagai tekanan parsial reaktan dan produk. Melalui persamaan 2.24. Untuk reaksi keseluruhan, potensial sel akan meningkat dengan meningkatnya tekanan separa bahan reaksi dan menurunnya tekanan separaparsial produk (EG&G Technical Services 2004).

2.2.2 Efisiensi Teoritik Fuel cell

Penukaran energi pada fuel cell berbeda dengan mesin Carnot. Pada mesin Carnot, energi kimia akan diubah menjadi energi panas kemudian diubah menjadi energi mekanik yang selanjutnya dapat diubah menjadi energi listrik. Karena mengalami perubahan menjadi energi panas, efisiensi mesin Carnot tergantung pada perbandingan suhu mutlak antara reservoir suhu tinggi (yang diserap) dengan suhu mutlak reservoir suhu rendah (yang dikeluarkan). Berbeda dengan mesin Carnot, fuel cell mengubah energi kimia menjadi energi listrik secara langsung. Dengan demikian, efisiensi energi fuel cell tidak bergantung pada efisiensi mesin Carnot. Hal ini merupakan salah satu keunggulan dari fuel cell. Akan tetapi, walaupun tidak bergantung pada efisiensi mesin Carnot,

fuel cell juga mempunyai batasan efisiensi. Efisiensi maksimum dari suatu fuel cell didefinisikan sebagai:

$$\eta_{\text{maks}} = \frac{\text{Tenaga elektrik}}{\text{Entalpi Hidrogen}} = \frac{W_{e,\text{maks}}}{\Delta H} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{237.34}{286.02} = 83\% \quad (2.26)$$

Karena $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, maka persamaan 2.26 menjadi:

$$\eta_{\text{maks}} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H} = 1 - \frac{T\Delta S}{\Delta H} \quad (2.27)$$

dengan ΔS merupakan perubahan entropi. Jika berlangsung secara reversibel, ungkapan $T\Delta S$ menyatakan perpindahan panas/kalor secara isothermal.

Walaupun fuel cell umumnya beroperasi dengan melepaskan kalor (bersifat eksotermal), akan tetapi hal ini tidak bermakna bahwa fuel cell termasuk mesin kalor. Pelepasan kalor menyebabkan harga ΔG secara angka lebih kecil dari ΔH .

2.2.3 Efisiensi Aktual Fuel cell

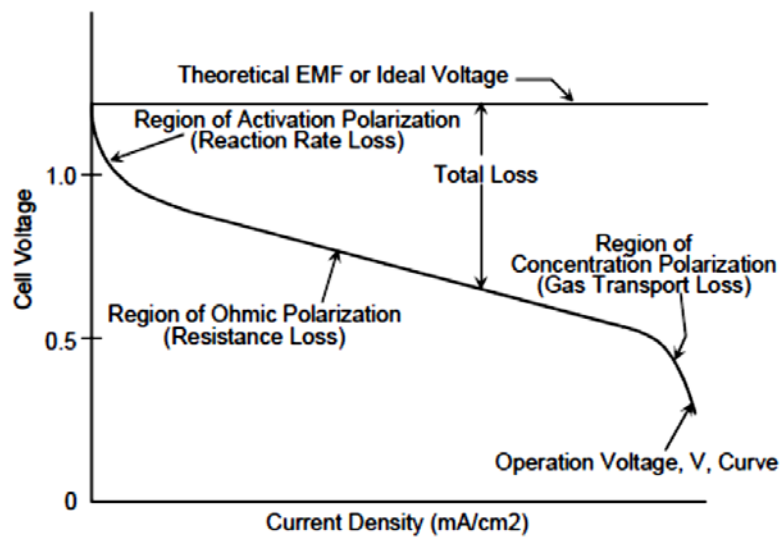
Efisiensi aktual dari fuel cell didefinisikan sebagai:

$$\eta_{\text{ac}} = \frac{W_{e,\text{ac}}}{\Delta H} = \frac{nFV_L}{\Delta H} \quad (2.28)$$

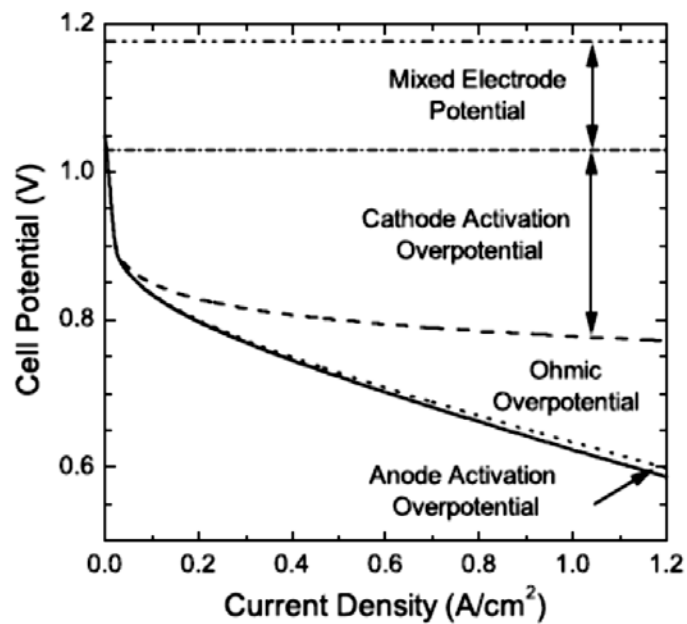
dengan V_L = tegangan output dari fuel cell .

Efisiensi aktual dari operasi fuel cell selalu lebih rendah dari efisiensi reversibel yang disebabkan oleh beberapa kehilangan irreversibel seperti *polarisasi aktivitas*, *polarisasi konsentrasi* dan *resistensi ohm*. Apabila rintangan ohm berpengaruh langsung secara berkadar terhadap arus, polarisasi aktivitas adalah fungsi logaritma dari arus dan kemudiannya menjadi faktor pembatas pada kerapatan arus tinggi.

Gambar 2.1 memperlihatkan lengkungan polarisasi fuel cell yang menyatakan bagian kehilangan irreversibel utama dan gambar 2.2 secara khas menunjukkan bahwa polarisasi terbesar terjadi di katoda yaitu polarisasi aktivitas dan polarisasi ohmic, sementara polarisasi pada anoda dapat diabaikan. Merujuk gambar 2.2, terdapat potensial elektroda campuran yang selalu ada pada fuel cell dan tidak dapat dihindari yang diakibatkan pindah silang (cross over) gas dan potensial reaksi kedua-dua elektroda (Das et al. 2007).



Gambar 2.1 Lengkungan polarisasi fuel cell
 Sumber : (EG&G Technical Services 2004)



Gambar 2.2 Uraian polarisasi pada PEMFC
 Sumber : (Das et al. 2007)

Prestasi dari suatu fuel cell dapat dilihat dari lengkungan polarisasi tersebut. Kehilangan voltan dari keadaan standar dinamakan sebagai polarisasi yang meliputi:

1. *Polarisasi aktivitas*

Polarisasi aktivitas menyatakan kehilangan energi yang disebabkan oleh kelembaman reaksi elektroda. Hal ini dapat terjadi karena reaksi kimia mengandung suatu energi penghalang yang harus diatasi agar dapat berlangsung. Pada kenyataannya, polarisasi aktivitas merupakan hasil daripada tahapan reaksi elektrokimia pada permukaan yang rumit, yang mana masing-masingnya mempunyai tahapan dengan laju reaksi dan energi aktivitas yang berbeda. Untuk reaksi elektrokimia, kehilangan energi aktivitas dinyatakan sebagai:

$$\eta_{\text{act}} = \frac{RT}{\alpha n F} \ln \frac{i}{i_0} \quad (2.29)$$

di mana: η_{act} = polarisasi aktivitas, mV
 α = konstanta pemindahan elektron
 i_0 = pertukaran kerapatan arus, mA/cm²

Polarisasi aktivitas dapat dinyatakan sebagai sebuah persamaan garis lurus yang biasanya disebut sebagai persamaan Tafel sebagai berikut:

$$\eta = a \pm b \log i \quad (2.30)$$

di mana:

$$a = (-RT/\alpha n F) \ln i_0$$

$$b = RT/\alpha n F$$

a ialah penyekat dengan sumbu Y dan menyatakan pertukaran kerapatan arus dan b merupakan slope dari persamaan Tafel, yang menyatakan konstanta pertukaran.

2. *Polarisasi Ohm*

Polarisasi ohm dapat terjadi karena rintangan untuk mengalirkan ion di dalam membran dan untuk mengalirkan elektron melalui elektroda. Polarisasi ohm merupakan penjumlahan dari semua kehilangan ohm di dalam sel yang mengandung impedans elektronik seputar elektroda dan pemungut arus serta impedans ionik yang melalui elektrolit. Polarisasi ohm dinyatakan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\eta_{\text{ohm}} = iR \quad (2.31)$$

Di mana η_{ohm} = polarisasi Ohm, mV
 i = arus yang mengalir melalui sel, mA
 R = rintangan total = $R_{\text{elektronik}} + R_{\text{ionik}} + R_{\text{sentuhan}}$

Rintangan ohm yang dipulihkan kembali oleh kawasan sel aktif ialah rintangan khas kawasan (area specific resistance / ASR). ASR ialah fungsi dari reka bentuk sel,

pemilihan bahan, kaedah pembuatan dan perubahan kondisi (EG&G Technical Services 2004).

3. *Polarisasi Konsentrasi* atau Perpindahan massa

Polarisasi konsentrasi menyatakan kehilangan energi yang dihubungkan dengan pengaruh perpindahan massa. Sebagai contoh, prestasi reaksi elektroda dapat dihambat oleh ketidakmampuan bahan reaksi untuk mengadakan pembauran. Polarisisasi konsentrasi dapat dinyatakan dengan:

$$\eta_{\text{conc}} = \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (2.32)$$

Di mana:

- η_{conc} = polarisasi konsentrasi mV
- R = konstanta gas
- n = jumlah elektron
- F = tetapan Faraday
- i = kerapatan arus, mA/cm²
- i_L = pembatas kerapatan arus, mA/cm²

2.3. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)

PEMFC adalah sel fuel yang menghasilkan energi listrik dari reaksi elektrokimia antara gas hidrogen sebagai bahan bakar dan oksigen sebagai oksidan melalui lapisan katalis yang terdapat pada kedua elektroda dan menggunakan membran penukar proton sebagai elektrolit (Wang et al. 2009; Bonifácio et al. 2011).

PEMFC atau disebut pula sebagai *Polymer Electrolyte Fuel Cell* (PEFC) menggunakan suatu membran polimer (seperti asam perfluoronasi polimer) sebagai elektrolit. Ketebalan membran sekitar 12 - 20 mikron dan merupakan pengalir proton yang sangat baik. Katalis yang digunakan umumnya platina dengan kadar mulai 0.1 sehingga 1 mg.cm⁻². Jika bahan bakar hidrogen mengandung sejumlah kecil CO, katalis aloi Pt-Ru biasanya digunakan. Suhu operasi PEMFC di bawah 100°C dan beberapa beroperasi di antara 60 - 80°C.

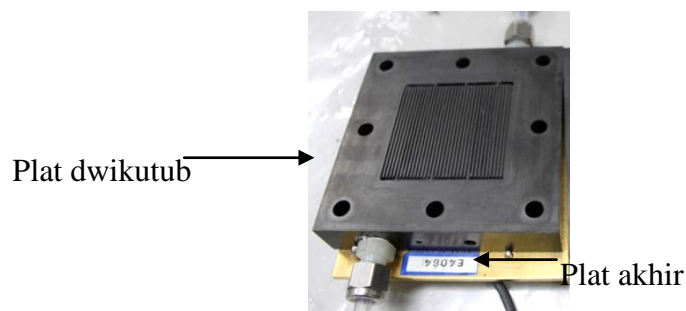
PEMFC digunakan secara meluas sebagai salah satu peralatan penukaran energi yang menjanjikan untuk kendaraan, power plant dan sistem mudah alih karena kerapatan daya yang tinggi, efisiensi energi, tidak ada pelepasan pencemar dan suhu operasi yang rendah (Daud et al. 2004 ; Chisaka & Daiguji 2006; Nam et al. 2009; Wang et al. 2009; Andr´e D. Taylor 2007). Keberhasilan pengkomersilan PEMFC terletak kepada kemampuannya untuk menunjukkan

prestasi yang optimum dalam menukar hidrogen menjadi energi listrik dengan kerapatan arus yang tinggi (Cindrella et al. 2009).

Komponen dari PEMFC adalah:

1) Plat Dwikutub (*Bipolar plate*) dan plat akhir (*End plate*)

Plat dwikutub mempunyai empat fungsi, yaitu; sebagai pengumpul dan pengalir arus, penyedia laluan bahan reaksi, pemisah antara sel dalam stek dan sebagai penyokong MEA. Plat dwikutub umumnya dibuat dari bahan komposit grafit dengan epoxy sebagai pengikat dan pengisinya. Plat dwikutub harus mempunyai sifat mempunyai kekonduksian listrik yang tinggi dan permeabilitas gas yang rendah. Sementara itu, plat akhir adalah berfungsi sebagai penahan PEMFC dan pengalir elektron.



Gambar 2.3 Gambar Plat dwikutub dan plat akhir untuk stek PEMFC tunggal

2) Membrane Electrode Assembly (MEA)

MEA merupakan pusat reaksi elektrokimia pengubahan hidrogen dan oksigen menjadi air dan arus listrik. MEA terdiri atas dua buah elektroda (anoda dan katoda) yang mengapit membran polimer. Elektroda sendiri terdiri atas beberapa lapisan, iatu lapisan penyokong, Microporous layer (MPL) dan lapisan katalis.

Anoda berfungsi sebagai tempat pengoksidasian gas hidrogen menjadi ion H^+ dan katoda tempat reduksi gas oksigen menjadi H_2O , sementara membran berfungsi untuk mengalirkan ion H^+ dari anoda ke katoda.

MEA merupakan komponen paling penting dalam sebuah PEMFC, karenanya menjadi tumpuan para penyelidik dalam usaha untuk membangun MEA dengan kerapatan arus dan ketahanan yang tinggi.

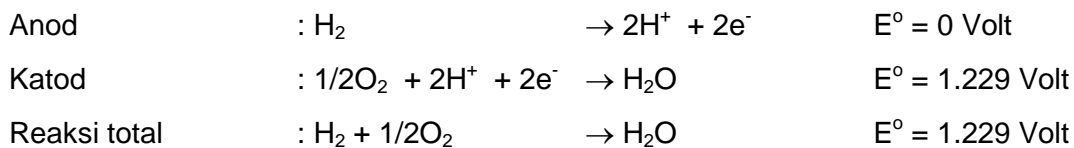


Gambar 2.4 Gambar MEA untuk PEMFC

3) Gasket

Gasket berfungsi sebagai penghalang arus, biasanya dibuat dari lapisan silikon atau teflon dan diletakkan antara MEA dengan plat dwikutub.

Reaksi yang terjadi pada MEA PEMFC adalah sebagai berikut:



Merujuk persamaan di atas, ion H^+ dari anod akan mengalir melalui membran elektrolit ke katoda dan elektron akan mengalir melalui anoda ke plat akhir, selanjutnya akan mengalir ke katoda melalui beban. Oksigen, ion H^+ dan elektron di katod kemudiannya akan bereaksi menghasilkan air (H_2O).

Pemanfaatan PEMFC mempunyai beberapa keuntungan, antara lain;

- a. Elektrolit berupa polimer padatan yang bersifat mantap, tidak bergerak, tipis, tidak menguap dan mempunyai kerintangan elektronik serta kekonduksian ionik yang tinggi,
- b. Suhu operasi yang rendah memudahkan pengurusan dan memulai operasi serta mengurangi biaya,
- c. Pencemaran minim karena hasil sampingannya hanyalah air dan sedikit kalor,
- d. Tidak ada bagian yang dapat terkikis.

Sementara itu, kelemahan dari PMEFC antaranya;

- a. Polimer elektrolit harus dalam bentuk hidrat sehingga harus dijaga kelembabannya. Oleh karena itu, suhu operasi tidak boleh terlampaui tinggi dan juga tidak boleh terlampaui rendah.
- b. PEMFC menghendaki penggunaan bahan bakar hidrogen murni. Kehadiran CO dalam campuran bahan bakar dapat menghalangi reaksi di anoda walaupun tingkat halangan akan menurun dengan naiknya suhu operasi (Barbir 2005).

Berdasarkan suhu operasi, fuel cell dibagi menjadi tiga jenis, yaitu fuel cell suhu rendah (10 - 80°C), sederhana (120 - 200°C) dan suhu tinggi (650 - 1000°C). Fuel cell yang termasuk suhu rendah diantaranya: PEMFC, DMFC dan AFC. Fuel cell suhu sederhana yaitu; PAFC dan PEMFC suhu sederhana, sementara fuel cell suhu tinggi yaitu; MCFC, SOFC dan gabungan MCFC dan SOFC (Srinivasan 2006).

2.4. Elektroda *Fuel cell*

Elektroda *fuel cell* merupakan media tempat terjadinya interaksi antara bahan bakar dan oksigen dengan elektrolit. Selain itu, elektroda berfungsi mengalirkan elektron dari anoda ke katoda. Sesuai fungsinya, elektroda harus memenuhi tiga hal. *Pertama*, elektroda harus berpori dengan ukuran yang sesuai sehingga bahan bakar dan elektrolit dapat menembusnya untuk mendapatkan kontak yang cukup. Jika ukuran pori terlampaui besar, maka gas bahan bakar akan menggelembung dan hilang keluar, sedang jika terlampaui kecil, kontak menjadi kurang sempurna. *Kedua*, elektroda harus mengandung katalisator kimia untuk memecah ikatan bahan bakar sehingga menjadi atom yang lebih reaktif. Hal *ketiga* yang harus dipenuhi oleh elektroda adalah harus dapat melewatkan elektron ke terminal.

Elektroda terdiri atas:

- 1) *Anoda (elektroda bahan bakar)*. Anoda merupakan antarmuka antara bahan bakar dengan elektrolit yang berfungsi mengkatalisis reaksi oksidasi bahan bakar dan mengalirkan elektron yang dihasilkan ke sirkuit eksternal;
- 2) *Katoda (elektroda oksigen)*. Katoda merupakan antarmuka antara oksigen/oksidan dengan elektrolit yang mengkatalisis reaksi reduksi oksigen dan menghantarkan elektron dari sirkuit eksternal ke reaksi di elektroda oksigen.

Struktur elektroda yang baik mempunyai batas tiga fase, yaitu fase gas reaktan, partikel katalis dan konduktor ionik. Partikel katalis harus kontak langsung dengan penghantar elektron. Konduktivitas elektron biasanya difasilitasi oleh karbon yang menjadi tempat terikatnya partikel

katalis. Batas tiga fase dibuat dengan meresapkan katalis/serbuk pendukung pada pengikat sebelum penekanan elektroda terhadap membran.

Katalis sebagai komponen utama CL harus memenuhi beberapa ciri, diantaranya: pengaktifan dalaman yang tinggi (terutama untuk katoda), mempunyai kekonduksian listrik yang tinggi, dan ramah lingkungan. Katalis dalam PEMFC dapat digolongkan kepada tiga kategori Yaitu: katalis berasaskan platinum, katalis yang dibuat dari paduan logam lain dengan platina (Pt) serta katalis yang tidak berasaskan platina misalnya katalis logam non nobel atau katalis organologam (Zhang et al. 2009). Pengembangan katalis yang merupakan paduan platinum dengan logam lain dimaksudkan untuk menurunkan kandungan katalis Pt tanpa kehilangan prestasi katalis secara kentara, bahkan dapat meningkatkan prestasi katalis (Yu & Ye 2007). Hal ini daat terjadi karena kehadiran paduan logam lain selain Pt dapat menambah tapak aktif katalis. Penggunaan katalis bukan platina menjadi salah satu tantangan para penyelidik karena salah satu hambatan pengembangan fuel cell dengan katalis Pt adalah biaya yang mahal dan mudahnya Pt untuk keracunan.

Ionomer polimer konduktif (biasanya menggunakan nafion) berperanan penting dalam meningkatkan prestasi dari elektroda. Ionomer nafion yang berada pada lapisan CL berfungsi membantu mengalirkan ion H^+ yang dihasilkan dari anoda ke membran polimer untuk selanjutnya dialirkan ke katoda (Zhang et al. 2011). Selain sebagai pengalir proton, ionomer polimer juga berfungsi sebagai pengikat CL dan penyedia gugus hidrofilik untuk mempertahankan kelembaban serta daya hantar ionik (Ahn et al. 2004; Kim et al. 2010). Peningkatan jumlah nafion dalam lapisan katalis mempunyai dua kesan pemanfaatan, yang pertama adalah untuk meningkatkan permukaan yang aktif secara elektrokimia dan untuk meningkatkan daya kekonduksian ion secara umum. Akan tetapi, ada batas optimum nafion yang boleh ditambahkan, karena jika terlampau sedikit, tidak cukup memberikan jalan masuk bagi pengaliran proton sampai ke bahagian membran dan jika terlampau banyak akan menyusahkan penyerapan serta pengaliran gas (Litster & McLean 2004; Passos et al. 2006).

Material yang biasa digunakan sebagai katalis pada permukaan elektroda adalah partikel kecil platina yang didispersikan di atas bubuk karbon pendukung dan meresap ke dalam pori kemudian ditekan di atas membran elektrolit.

Selain platina, beberapa logam dari golongan transisi juga dapat digunakan sebagai katalis pada elektroda *fuel cell*. Logam-logam tersebut diantaranya: Titanium (Ti), Vanadium (V), Cromium (Cr), Mangan (Mn), besi (Fe), kobal (Co) dll. (Xiong et al. 2002; Seo et al. 2006; Vinayan et al. 2012).

Walaupun logam-logam lain telah dicoba diteliti, akan tetapi katalis yang berbasis platina merupakan katalis yang paling banyak digunakan untuk reaksi redoks pada *fuel cell* (Sharma & Pollet 2012). Oleh karena itu, beberapa peneliti lebih memilih menggunakan gabungan logam platina dengan logam lain, terutama logam yang lebih toleran terhadap pengotor, misalnya Pt-Ru-Co (Moreno et al. 2009).

2.5. Metode Elektrodeposisi

Teknik preparasi katalis pada *fuel cell* secara umum dimulai dengan memaparkan katalis pada substrat karbon. Akan tetapi, dengan metode ini tingkat utilitas katalis tidak maksimal yang mana material katalis tidak efektif melakukan kontak langsung dengan batas tiga fase, elektrolit, elektroda dan bahan bakar. Salah satu cara yang diusulkan adalah metode elektrodeposisi platina pada substrat karbon-nafion untuk *fuel cell* dengan membran polimer sebagai elektrolit (Thompson et al. 2001).

Kehadiran nafion sebagai binder dalam tinta katalis menyebabkan sifat adhesi yang baik sebaik konduktivitas protonik, akan tetapi menghambat konduktivitas listrik dari matrik. Metode aplikasi katalis ini kemudian menghambat kegunaan katalis secara menyeluruh. Alternatifnya katalis Pt berbasis logam dapat diaplikasikan pada pendukung berbasis karbon dengan luas permukaan yang tinggi melalui metode elektrodeposisi.

Metode elektrodeposisi yang sering disebut sebagai metode elektroplating adalah suatu proses untuk membentuk suatu lapisan, biasanya logam, pada permukaan bahan yang konduktif. Deposisi atau pengendapan lapisan logam ke objek dicapai dengan cara memberikan muatan negatif pada objek yang akan dilapisi dan mencelupkannya pada larutan yang mengandung garam dari logam yang akan didepositkan. Dengan kata lain, elektrodeposisi adalah proses untuk memproduksi lapisan tipis logam pada permukaan bahan konduktif lain (Esmailifar et al. 2010).

Pemanfaatan metode elektrodeposisi pada pembuatan elektroda *fuel cell* ada beberapa jenis, antara lain: metode elektrodeposisi denyut (Rajalakshmi & Dhathathreyan 2008; Adilbish et al. 2013; Chaisubanan & Tantavichet 2013), elektrodeposisi sputter (Makino et al. 2007; Mougnot et al. 2011), metode rotating disk-slurry electrode (Grau et al. 2013) dan elektrodeposisi DC (Lertviriyapaisan & Tantavichet 2010).

Proses elektrodeposisi dapat menggunakan ion logam tunggal atau paduan ion logam dalam larutan. Dalam suatu sistem ideal arus deposisi untuk paduan logam AB adalah penjumlahan dari arus parsial dari masing-masing logam murni.

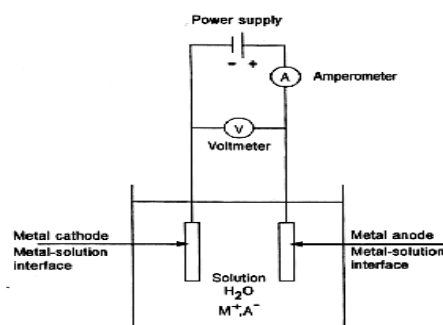
Terdapat empat komponen penting dalam elektrodeposisi, yaitu :

- a. Sirkuit luar, yang terdiri dari sumber arus dan peralatan terkait seperti Amperemeter, Voltmeter serta alat pengatur voltase serta arus.

- b. Katoda, yaitu elektroda negatif yang merupakan elektroda yang akan dilapisi.
- c. Larutan pelapis dimana terdapat ion – ion logam pelapis.
- d. Anoda, yaitu elektroda positif yang merupakan logam pelapis. Akan tetapi, anoda bisa saja hanya merupakan material penghubung untuk melengkapi sirkuit tempat terjadi reaksi reduksi, anoda tersebut merupakan logam inert atau anoda yang tak larut. Pada pelapisan semacam ini ion logam pelapis semuanya tersedia dalam elektrolit atau larutan pelapis.

Tangki atau bak penampung larutan pelapis (bath) harus terbuat dari material yang tahan dan tidak bereaksi dengan larutan di dalamnya. Untuk larutan alkali dapat terbuat dari bahan baja lunak dan untuk larutan asam dapat digunakan bak penampung yang terbuat dari baja yang dilapisi dengan karet, gelas, atau keramik.

Alat dan komponen elektrodeposisi dapat ditunjukkan dalam gambar 3 di bawah ini:



Gambar 2.5. Alat dan komponen elektrodeposisi

Anoda dan katoda dalam proses elektrodeposisi dihubungkan dengan sumber arus DC dan peralatan terkait seperti Amperemeter, Voltmeter serta alat pengatur tegangan serta arus. Anoda dihubungkan dengan kutub positif dari sumber arus dan katoda dihubungkan dengan kutub negatif dari sumber arus. Kedua-duanya, baik anoda dan katoda ini terbenam ke dalam suatu larutan pelapis yang berisi satu atau lebih garam logam seperti halnya ion lain yang akan dialiri arus. Ketika sumber arus DC dinyalakan, logam yang ada pada anoda akan dioksidasi untuk membentuk kation dengan muatan positif, yang mana ion logam positif dari larutan akan tertarik ke katoda yang bermuatan negatif dan terdeposisi ke katoda. Untuk mengganti ion yang telah terdeposit ke katoda, maka logam dari anoda akan terlarut ke dalam larutan elektrolit dan menyeimbangkan potensial ionik. Jumlah logam yang terdeposit pada elektroda yang bermuatan ini akan bervariasi tergantung substrat, ion yang terlarut dari anoda memiliki kemampuan untuk menggumpalkan partikel.

Dalam beberapa kasus (seperti pada pembuatan elektroda), anoda bukan merupakan logam pelapis. Proses pelapisan yang terjadi merupakan hasil dari reaksi oksidasi-reduksi. Material yang memberikan elektron akan teroksidasi, sedangkan material yang mendapat elektron akan tereduksi. Anoda adalah elektroda dimana terjadi oksidasi dan katoda adalah

elektroda dimana terjadi reduksi, sampai akhirnya ion logam berpindah dari larutan elektrolit dan terdeposit pada permukaan objek (katoda) sebagai suatu lapisan tipis..

Pelapisan dengan metode elektrodeposisi selalu melibatkan arus listrik dalam prosesnya. Arus listrik dihantarkan oleh media dengan dua cara, yaitu melalui kontak metalik (elektronik) dan kontak elektrolitik (konduksi). Pada elektrodeposisi, arus listrik dihantarkan dengan dua cara sekaligus, yang mana elektroda berfungsi untuk menghantarkan arus listrik dengan anoda pada kutub positif (+) dan katoda pada kutub negatif (-). Perbedaan antara keduanya adalah pada tahanan listrik yang besar, dimana tahanan listrik pada elektrolit sangat besar sedangkan tahanan listrik pada elektroda sangat kecil bahkan sering diabaikan.

BAB 3

TUJUAN DAN MANFAAT

3.1. Tujuan dan Sasaran

Tujuan yang akan dicapai dalam penelitian ini adalah:

Tahun pertama:

- 1) Membuat dan mengoptimasi elektroda PEMFC menggunakan katalis Pt dan gabungan Pt dengan beberapa logam transisi (Co dan Ni) menggunakan metoda elektrodposisi dan spraying (semburan).
- 2) Melakukan karakterisasi elektroda yang meliputi struktur kristal dan partikel dengan XRD, serta pengukuran kinerja elektrokimia elektroda dengan menggunakan metode voltametri siklik (Cv) dan EIS.

Tahun kedua:

- 1) Mendesain dan membuat MEA untuk rancangan aplikasi pada BTS
- 2) Melakukan uji kinerja MEA menggunakan EIS dan fuel cell station

3.2. Prospek dan Manfaat

Rencana penelitian yang disusun diharapkan dapat mengoptimalkan penggunaan katalis dan mengurangi penggunaan katalis Pt serta meningkatkan kinerja elektroda dan MEA. Upaya-upaya ini merupakan bagian integral dari upaya pengembangan fuel cell di Indonesia, sehingga fuel cell diharapkan mampu menjadi salah satu energi alternatif yang kompetitif baik dari sisi kuantitas, kualitas dan harga energi serta ramah lingkungan.

Prospek jangka pendek yang diharapkan dari penelitian ini adalah mempercepat proses penguasaan teknologi pembuatan MEA agar dapat mem-backup keperluan MEA untuk PEMFC sebagai sumber energi BTS dan kendaraan. Penguasaan teknologi pembuatan MEA dengan ongkos produksi lebih murah dan kinerja yang tinggi diharapkan dapat menaikkan posisi tawar Indonesia ketika ada investor dan vendor fuel cell yang menawarkan pemakaian fuel cell di Indonesia.

Prospek jangka panjang yang mendukung pentingnya penelitian fuel cell (khususnya MEA) adalah mengantisipasi era desentralisasi dan otonomi daerah, yang mana tiap-tiap daerah mempunyai kewenangan untuk mengupayakan penyediaan sumber energi yang memadai untuk daerah masing-masing.

BAB 4

METODE

4.1. Ruang Lingkup

Seperti disebutkan di atas, penelitian tentang pembuatan MEA mempunyai nilai strategis dalam upaya penguasaan pembuatan MEA untuk PEMFC dengan kinerja tinggi yang dapat diaplikasikan untuk berbagai kepentingan, terutama untuk BTS yang saat ini sudah mulai digunakan di Indonesia.

Metode dan ruang lingkup penelitian dalam upaya menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi adalah:

- 1) Membandingkan dua metode pembuatan elektroda berdasarkan keuntungan masing-masing, yaitu metode elektrodposisi dan metode semburan (*spraying*). Kriteria pemilihan metode terbaik adalah kemampuan untuk menghasilkan elektroda dengan kinerja optimal dari katalis serta prosedur yang dapat diaplikasikan secara komersial. Metode *spraying* untuk katalis Pt-Co/C, dan Pt-Ni/C didahului dengan membuat katalis dengan metode impregnasi kemudian reduksi, sementara metode elektrodposisi langsung mendeposisikan campuran larutan katalis ke atas permukaan GDL. Selain itu, penggunaan gabungan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dimaksudkan untuk mengurangi ketergantungan terhadap katalis tunggal Pt/C. Substitusi Pt dengan Co dan Ni diharapkan dapat mengurangi kandungan katalis Pt dan meningkatkan fungsionalisasi katalis.
- 2) Elektroda dibuat tiga lapisan, yaitu
 - a. Lapisan pertama, *backing layer* yang dibuat dari kertas karbon (*carbon paper*) yang sudah disalut dengan *Polytetrafluoroetylen* (PTFE) untuk meningkatkan kehidrofobikan. Fungsi dari *backing layer* selain sebagai penahan elektroda, juga sebagai pengalir reaktan, produk dan elektron.
 - b. Lapisan kedua, *Gas Diffusion Layer* (GDL) yang terdiri atas campuran serbuk karbon (*carbon black*) Vulcan XC-72, PTFE, Ammonium bicarbonat dan 2-propanol sebagai pelarut. Fungsi GDL adalah untuk penyebar gas, penyalur arus listrik, mengalirkan air dan antar muka antara *backing layer* dan *catalyst layer*.
 - c. Lapisan ketiga, *Catalyst Layer* (CL) yang mengandung katalis sebagai pusat reaksi elektrokimia.
- 3) Setelah mendapatkan metode terbaik, melakukan optimasi kandungan katalis dalam elektroda. Katalis yang akan digunakan dan dibandingkan adalah katalis tunggal Pt sebagai pembanding dalam bentuk Pt/C dan gabungan katalis Pt dengan Ni dan Co dalam bentuk Pt-Ni/C dan Pt-Co/C. Tujuan utama penggunaan katalis gabungan adalah untuk mengurangi ketergantungan dan kandungan katalis Pt tanpa mengurangi kinerja katalis

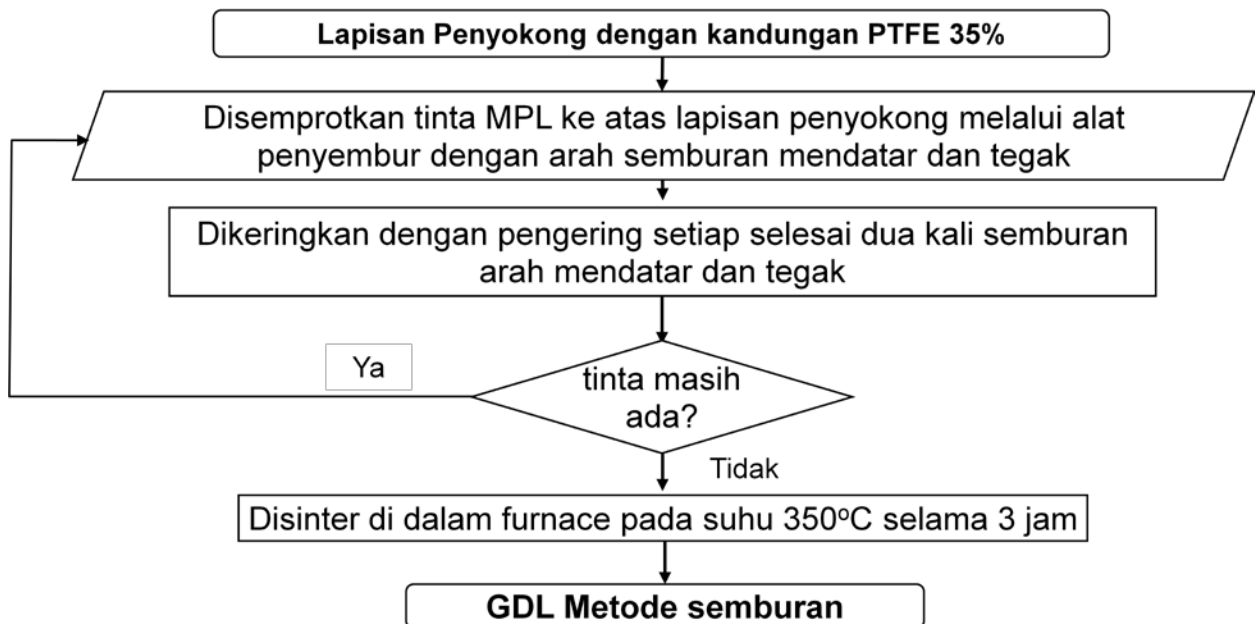
secara signifikan. Karakterisasi yang dilakukan meliputi struktur dan morfologi permukaan serta irisan melintang dengan menggunakan EDX-SEM, distribusi dan ukuran partikel katalis dengan XRD, konduktivitas listrik dan *cyclic voltammetry* (CV) serta EIS untuk menguji aktivitas katalitik.

- 4) Mendesain, membuat dan mengoptimasi MEA pada tekanan dan temperatur hot press bervariasi (tahun kedua).
- 5) Melakukan uji kinerja MEA menggunakan EIS dan fuel cell station. Uji kinerja meliputi I-V performance test maupun durability test (tahun kedua).
- 6) Setelah didapatkan MEA dengan kinerja tertinggi, melakukan pembuatan dan pengujian MEA untuk multi stack (tahun kedua).

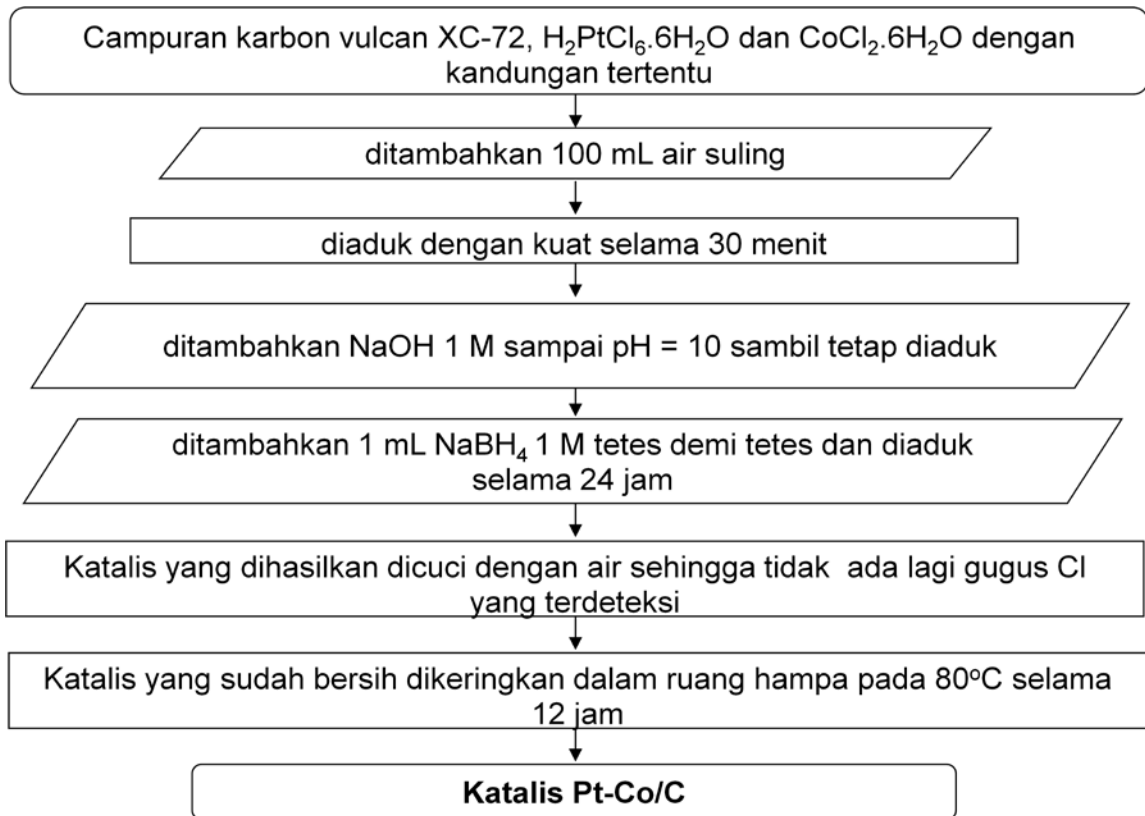
4.2. Diagram Alir Penelitian

4.2.1. Pembuatan Elektroda Metode Semburan (Spraying)

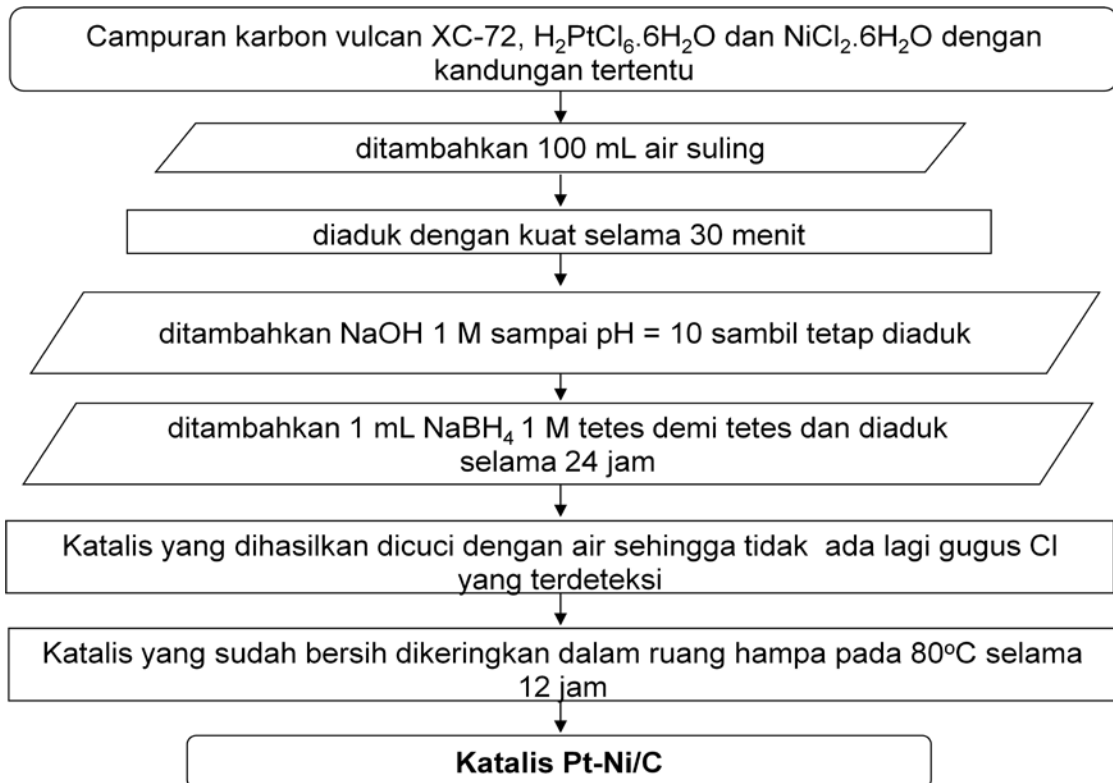
1) Pembuatan GDL (*Gas Diffusion Layer*)



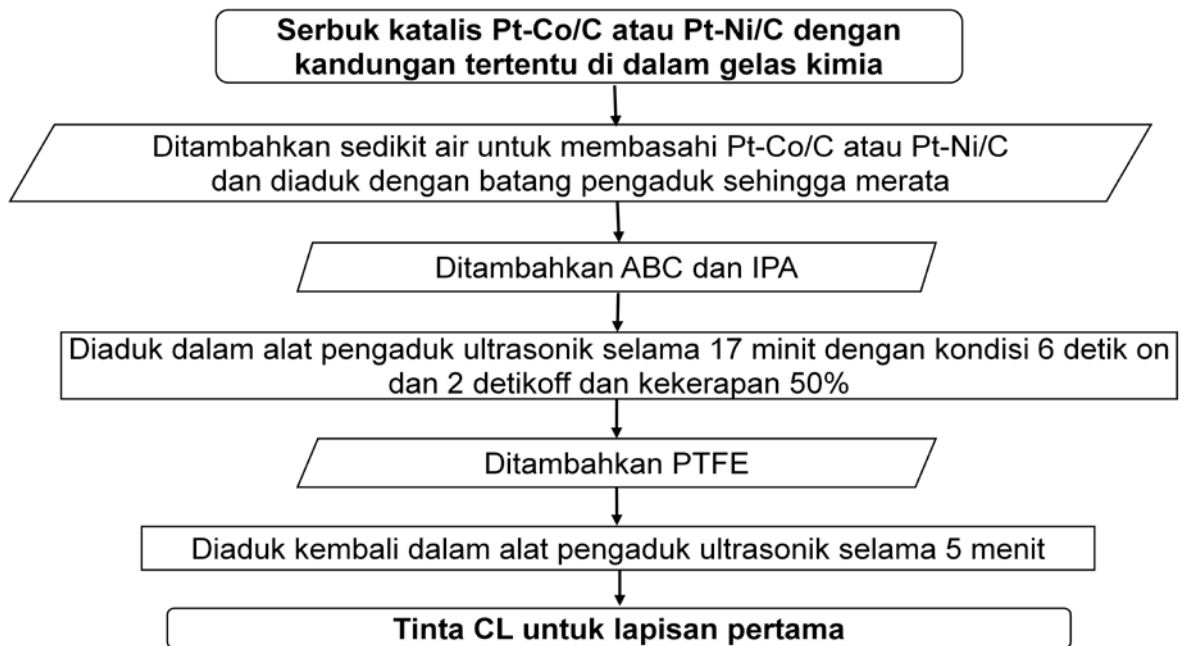
2) Pembuatan Katalis Pt-Co/C dengan Metode Reduksi (Metode (Yi et al. 2012))



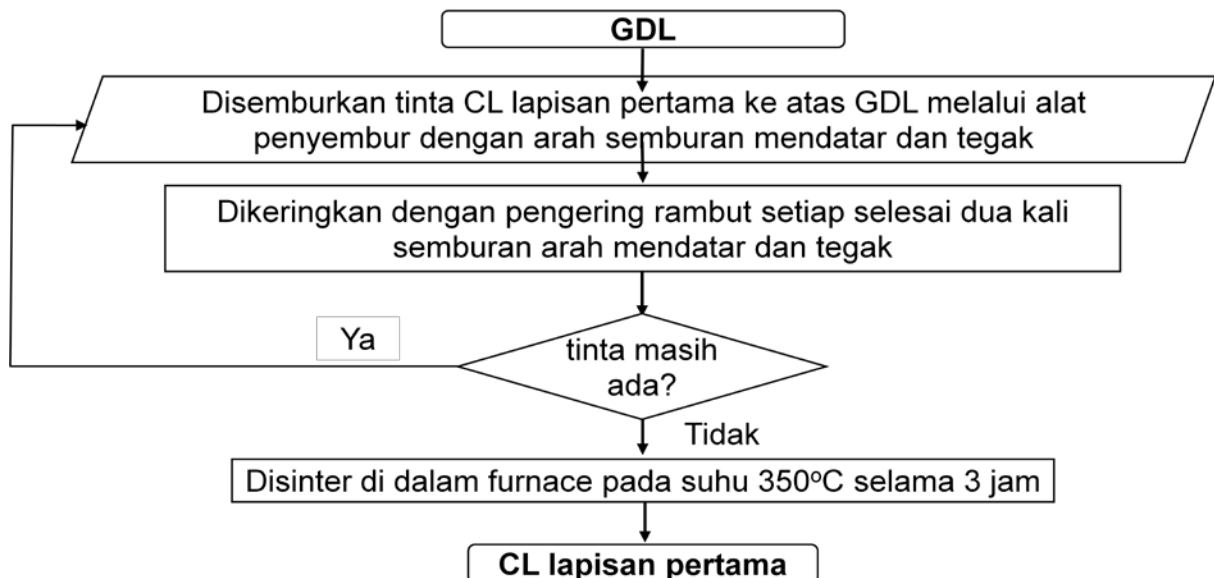
3) Pembuatan Katalis Pt-Ni/C dengan Metode Reduksi (Metode (Yi et al. 2012))



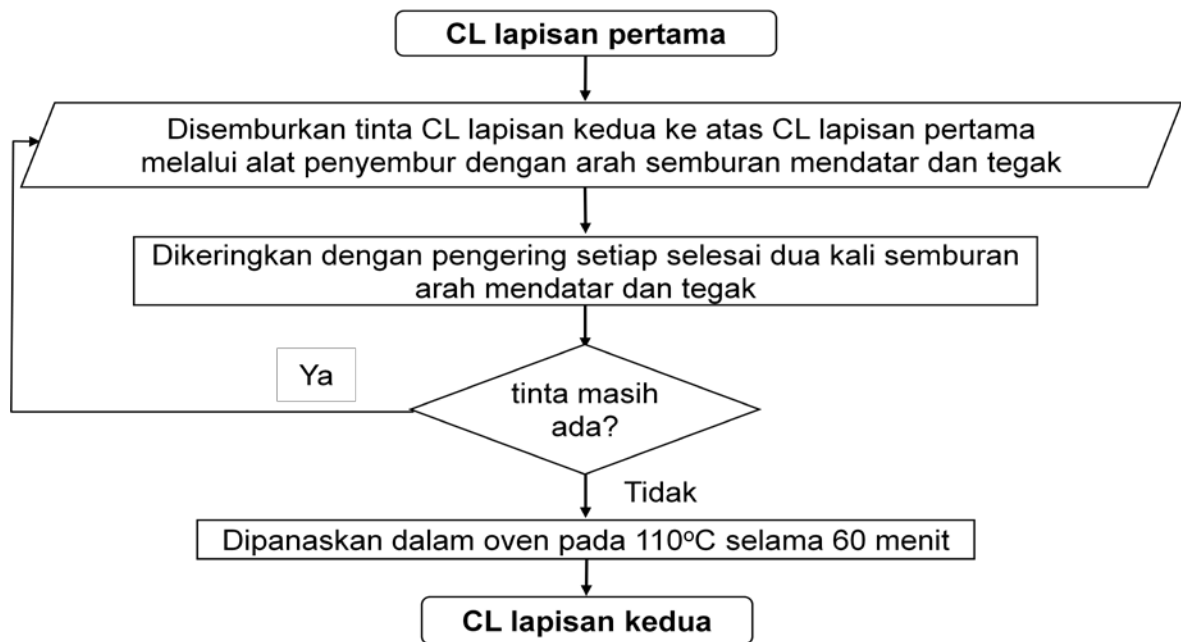
4) Pembuatan Tinta CL untuk lapisan pertama



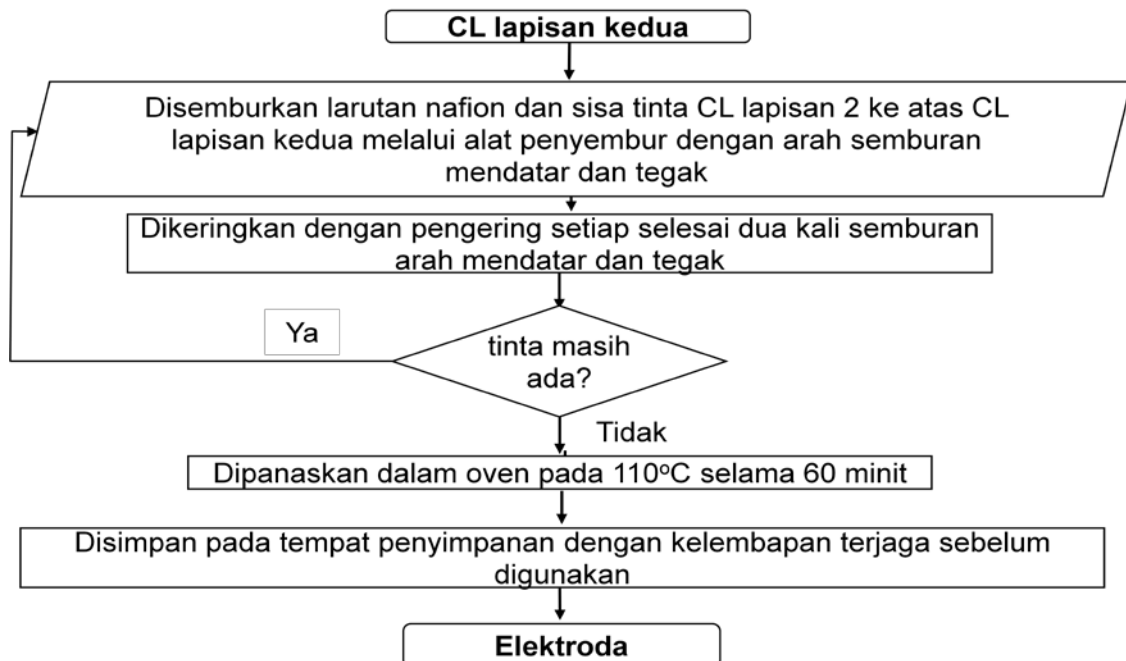
5) Pembuatan CL Lapisan pertama



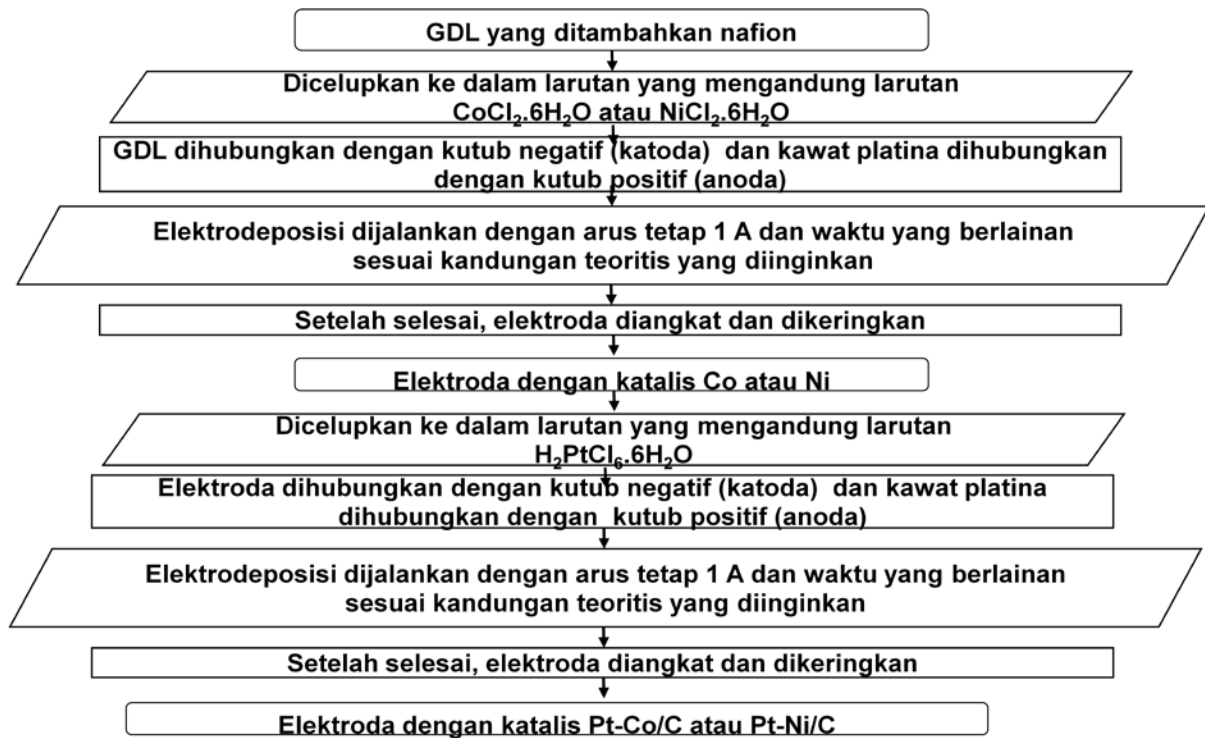
6) Pembuatan CL Lapisan Kedua



7) Pembuatan CL Lapisan Ketiga



4.2.2. Pembuatan Elektroda Metode Elektrodeposisi



BAB 5

RENCANA CAPAIAN, HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1. RENCANA CAPAIAN

5.1.1. Capaian Tahap I

Pelaksanaan penelitian tahap I mengalami penundaan karena keterlambatan pencairan dana tahap I. Dana tahap I sebagian besar digunakan untuk pembelian bahan. Rencana capaian dan capaian yang telah dilakukan sejauh ini adalah:

- a) Pembelian bahan penelitian.
Pembelian bahan dilakukan dua tahap dengan total nilai pembelian bahan adalah Rp. 31.539.000. Sampai saat ini tahap pembelian telah selesai dilakukan
- b) Pembuatan Gas Diffusion Layer (GDL).
Pembuatan GDL baik untuk metode elektrodeposisi maupun metode semburan telah dilakukan
- c) Pembuatan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C.
Pembuatan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dengan perbandingan yang bervariasi dengan menggunakan metode reduksi telah dilakukan sesuai rencana.
- d) Analisa katalis dengan menggunakan EIS, CV dan XRD.
Analisa katalis dengan metode CV dan XRD sudah selesai dilakukan.

Alokasi penggunaan dana 30% terserap untuk pembelian zat sebesar 52.6% (Rp.31.539.000), 11% (Rp.6.600.000) untuk biaya analisa zat, 20% (Rp.12.000.000) untuk honor peneliti dan sisanya untuk keperluan lain (ATK, komunikasi dll).

5.1.2. Rencana dan Capaian Tahap II dan tahap III

Berdasarkan skedul Insentif SiNas 2014, maka rencana kerja penelitian selanjutnya adalah:

- a) Pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi dan metode spraying
Pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi dan metode spraying telah dilakukan. Rincian elektroda yang dibuat adalah:

- 1) Elektroda Pt-Co/C dengan perbandingan Pt:Co adalah berturut-turut: Pt:Co = 1:0; Pt:Co = 8: 2; Pt:Co = 6:4; Pt:Co = 4:6; Pt:Co = 2:8 dan Pt:Co = 0:1.
- 2) Elektroda Pt-Ni/C dengan perbandingan Pt:Ni adalah berturut-turut: Pt:Ni = 1:0; Pt:Ni = 8: 2; Pt:Ni = 6:4; Pt:Ni = 4:6; Pt:Ni = 2:8 dan Pt:Ni = 0:1.

b) Analisa elektroda

Analisa elektroda yang telah dilakukan adalah analisa CV, EIS dan analisa elektrodeposisi itu sendiri.

c) Menyusun makalah, laporan dan draft publikasi

Makalah yang disusun adalah makalah untuk seminar SiNas 2004 tanggal 1 dan 2 Oktober 2014 dengan judul "**Pembuatan Dan Karakterisasi Katalis Pt-Co/C Dan Pt-Ni/C Untuk Elektroda Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)**" dan makalah untuk seminar The Indonesian-French Joint Seminar on Technical Chalanges in the Field of Renewable Energy 2014: Fuel Cell, Hydrogen Technology and Nuclear Energy, tanggal 14 dan 15 Oktober 2014 dengan judul "**Comparison of the performance of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) electrodes with different carbon powder content and methods of manufacture**".

Draft publikasi ilmiah yang sudah disusun adalah sebagai berikut:

- 1) "Electrode for PEMFC: A Review", paper disubmitkan di Journal of material Science, 12 Oktober 2014
- 2) "Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda PEMFC dengan Katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C Hasil Elektrodeposisi". Draft paper direncanakan untuk diterbitkan pada jurnal nasional terakreditasi.

Skedul lengkap mengikuti skedul yang ditetapkan SiNas 2014 dapat dilihat pada gant chart di bawah ini.

Tabel 5.1. Gant Chart Penelitian Insentif Sinas 2014

GANT CHART PENELITIAN RISTEK INSINAS 2014										
NO	KEGIATAN	MARET	APRIL	MEI	JUNI	JULI	AGUSTUS	SEPTEMBER	OKTOBER	NOPEMBER
1	Pemesanan bahan kimia	■	■	■	■	■				
2	Pembuatan GDL				■	■				
3	Pembuatan Katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C				■	■				
4	Karakterisasi katalis					■	■	■	■	■
5	Pembuatan Elektroda						■	■	■	■
6	Karakterisasi Elektroda						■	■	■	■
7	Pemantauan Internal tahap 1							■	■	■
8	Pencairan dana tahap 1	■	■	■	■	■				
9	Laporan Kemajuan Tahap 1		■							
10	Pencairan dana tahap 2		■	■	■	■	■	■	■	■
11	Laporan Kemajuan Tahap 2							■	■	■
12	Pemantauan Internal tahap 2							■	■	■
13	Evaluasi								■	■
14	Pencairan dana tahap 3								■	■
15	Pemantauan Eksternal				■	■	■	■	■	■
16	Evaluasi Eksternal								■	■
17	Pameran dan Workshop						■	■	■	■
18	Laporan akhir									■
19	Seminar hasil insinas									■

5.2. HASIL

5.2.1. Hasil Tahapan Pertama

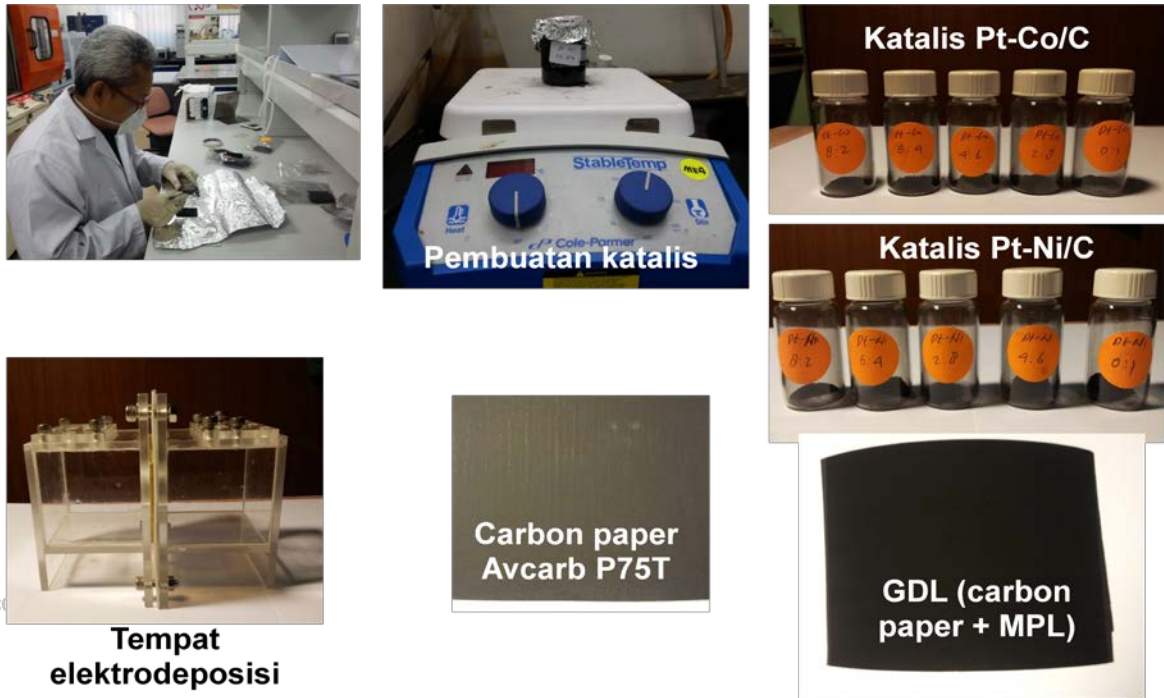
Kajian yang dibuat dalam penelitian ini adalah penggunaan dua jenis katalis yaitu Pt-Co/C dan Pt-Ni/C serta penggunaan dua metode, yaitu metode elektrodposisi dan metode semburan. Pembuatan elektroda yang menjadi fokus penelitian di tahun pertama diawali dengan pembuatan katalis, karakterisasi katalis dan pembuatan serta karakterisasi elektroda pada pelbagai kandungan dan jenis katalis serta metode pembuatan elektroda yang berbeda. Pembuatan katalis dan elektroda tahapan pertama adalah pembuatan katalis dengan metode impregnasi dan reduksi.

1) Pembuatan Katalis

Katalis yang dibuat dalam penelitian ini adalah gabungan katalis platina dan kobal dalam matriks karbon dalam bentuk Pt-Co/C dan gabungan katalis Pt-Ni/C.

Pembuatan katalis Pt-Co/C untuk metode spraying dilakukan dengan metode reduksi larutan $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan larutan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ secara bersamaan dengan pereduksi larutan $NaBH_4$ 1 M pada matriks serbuk karbon vulcan XC-72. Sementara itu, katalis Pt-Ni/C dibuat dengan reduksi larutan $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan larutan $NiCl_2 \cdot 6H_2O$. Katalis yang dihasilkan selanjutnya digunakan untuk membuat elektroda dengan kaedah semburan.

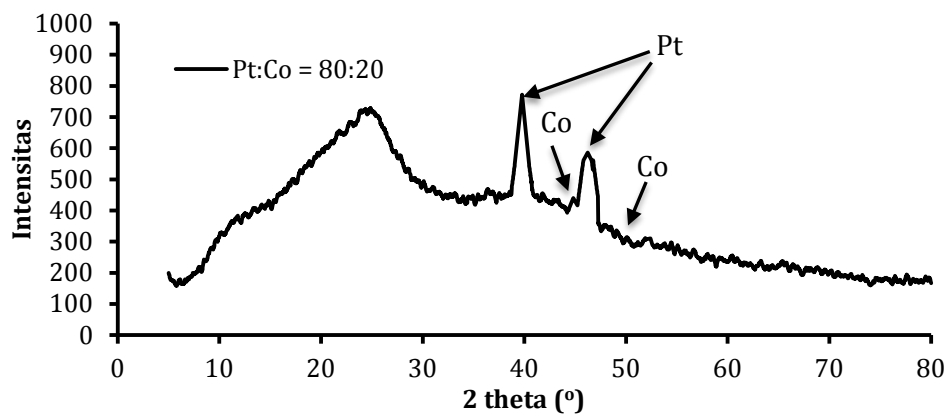
Gambar-gambar proses pembuatan katalis dapat dilihat pada gambar di bawah ini:



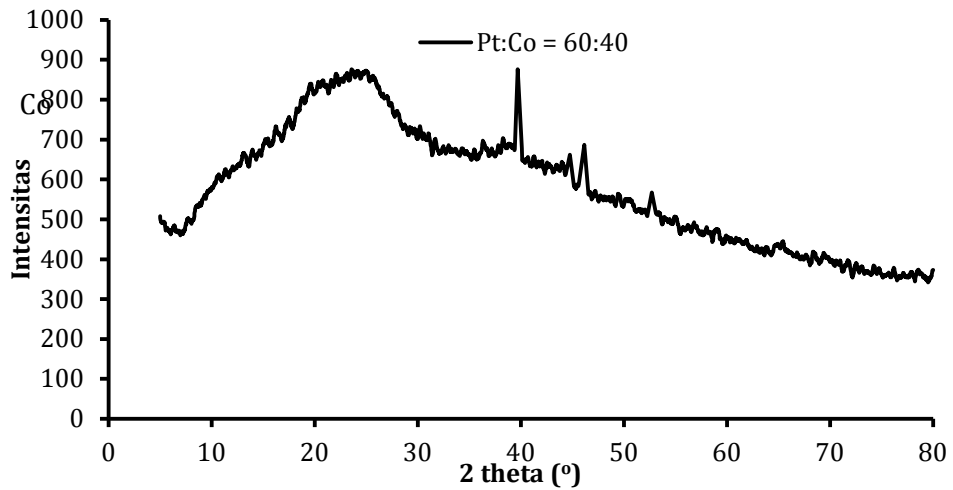
Gambar 5.1. Gambar-gambar penelitian pembuatan elektroda

2) Karakterisasi Katalis

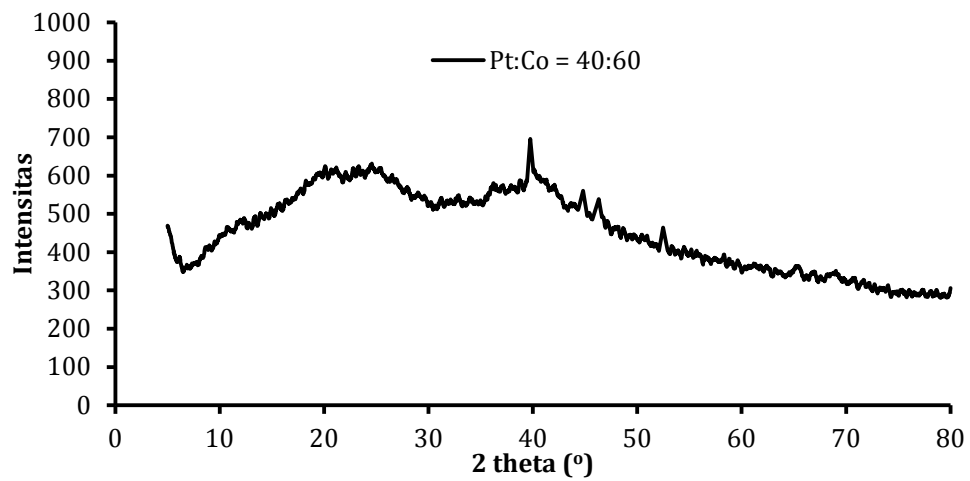
a. Analisis XRD Pt-Co/C



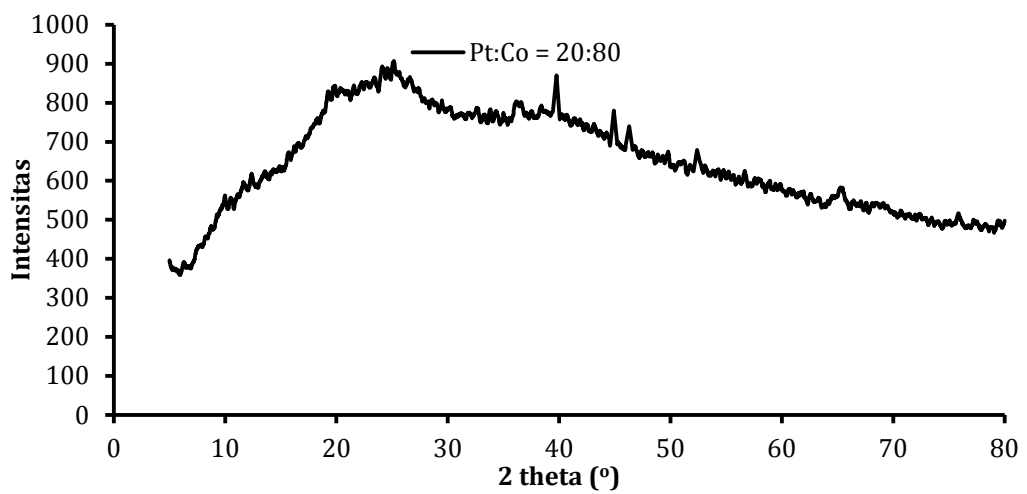
Gambar 5.2. Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 80:20)



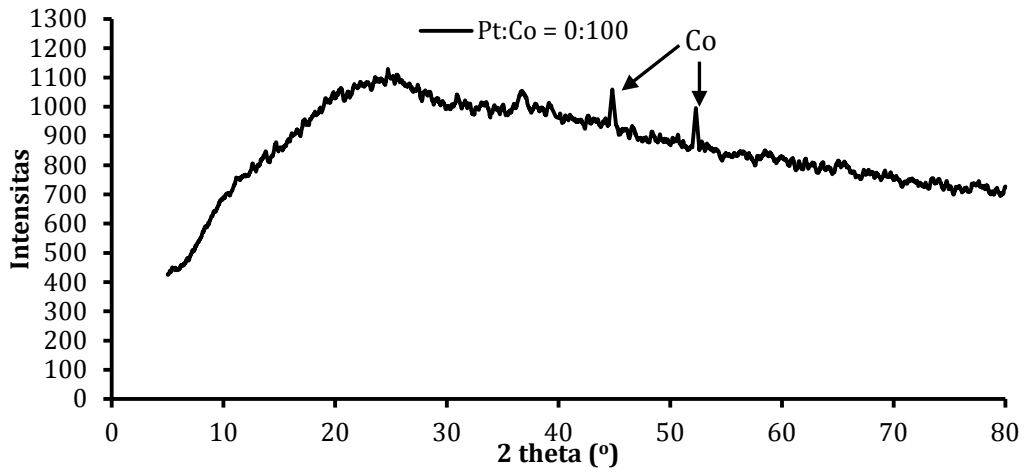
Gambar 5.3. Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 60:40)



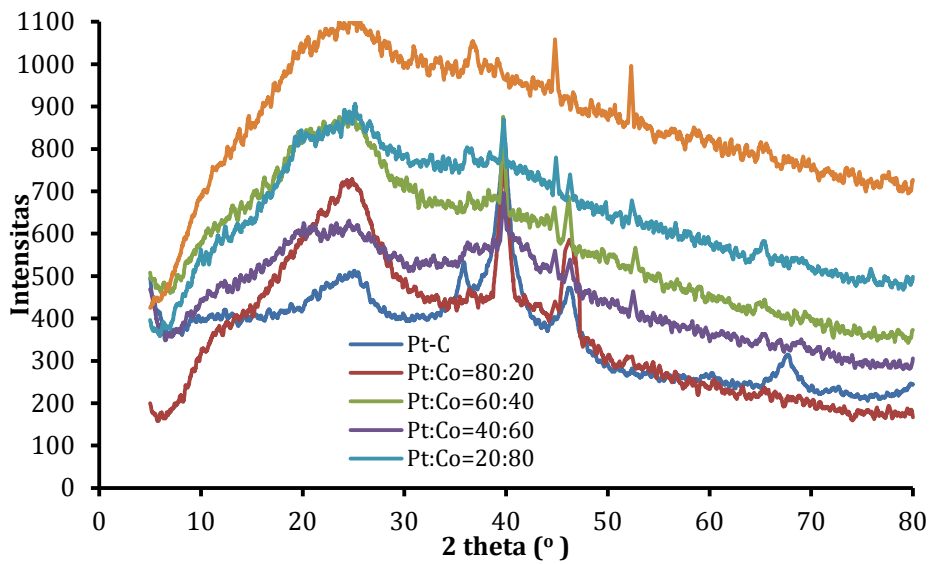
Gambar 5.4. Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 40:60)



Gambar 5.5 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 20:80)

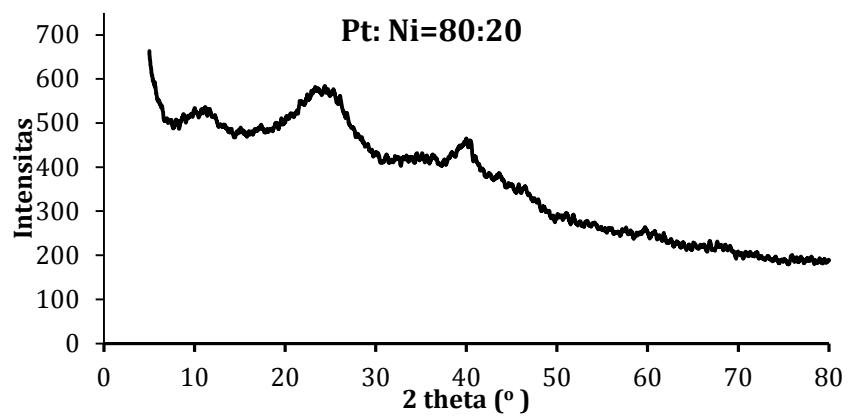


Gambar 5.6 Pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 0:100)

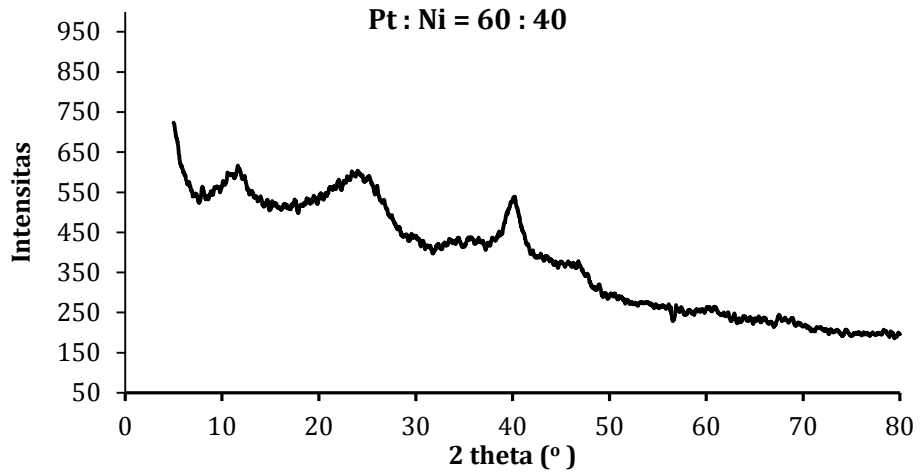


Gambar 5.7 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt/C dan Pt-Co/C

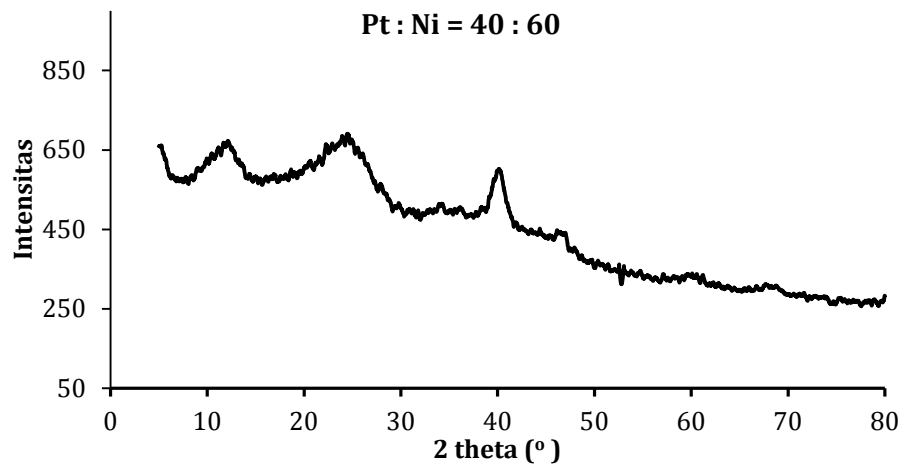
b. Analisis XRD Pt-Ni/C



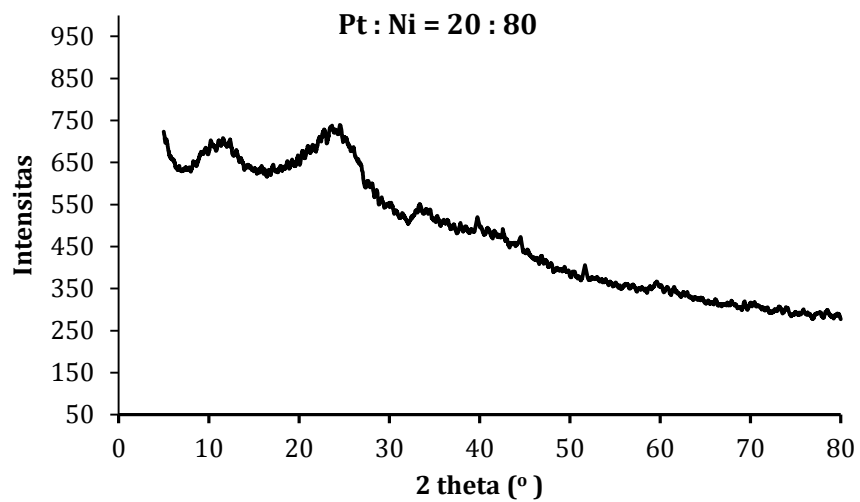
Gambar 5.8 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 80:20)



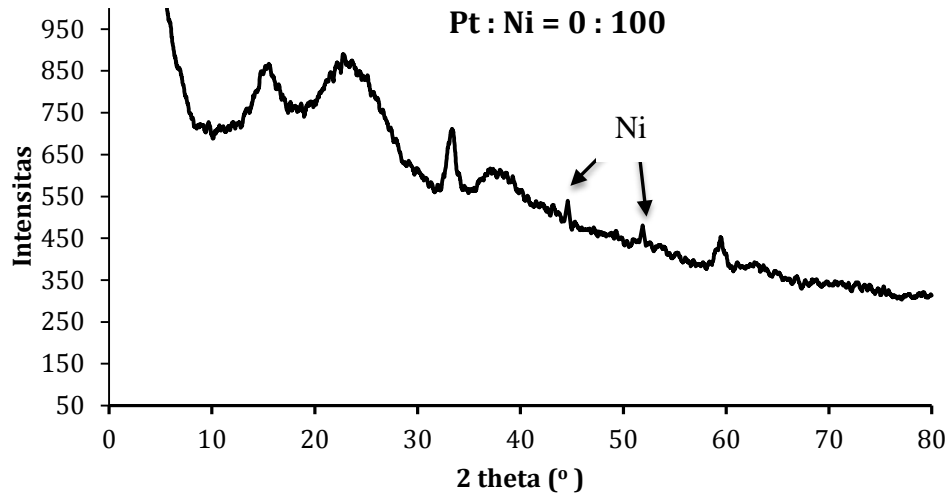
Gambar 5.9 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 60:40)



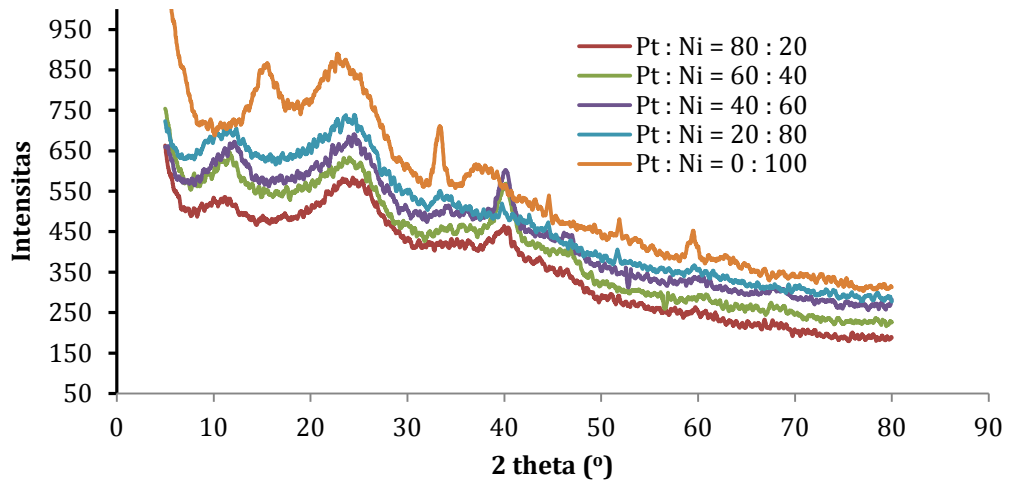
Gambar 5.10 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 40:60)



Gambar 5.11 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 20:80)

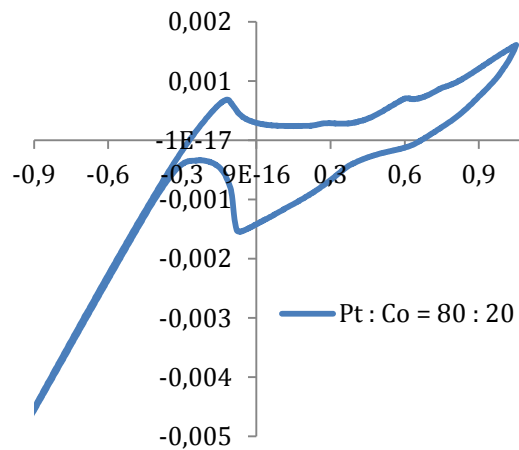


Gambar 5.12 Pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 0:100)

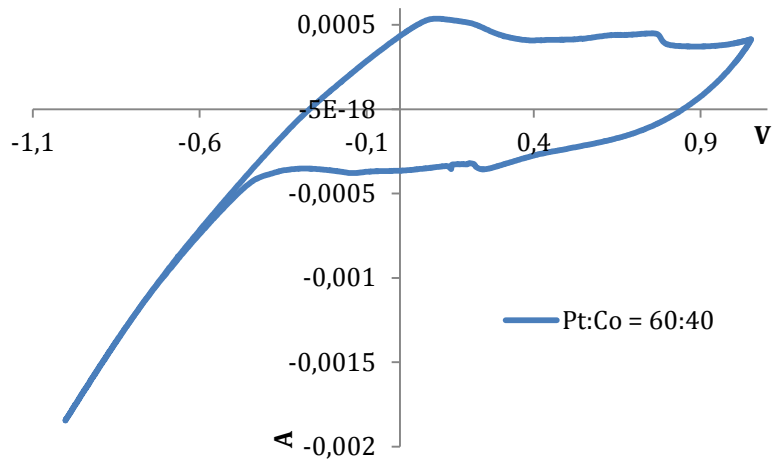


Gambar 5.13 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt-Ni/C

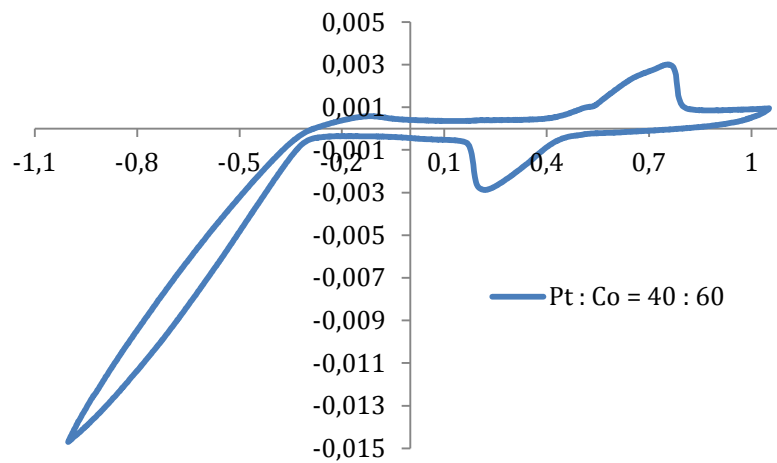
c. Analisa CV Pt-Co/C



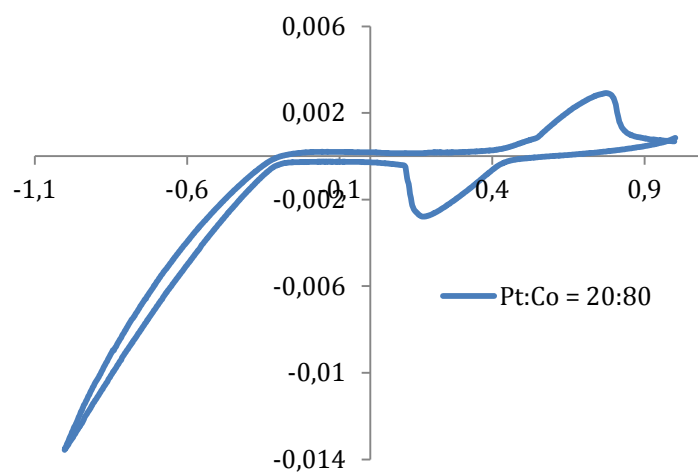
Gambar 5.14. Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 80:20)



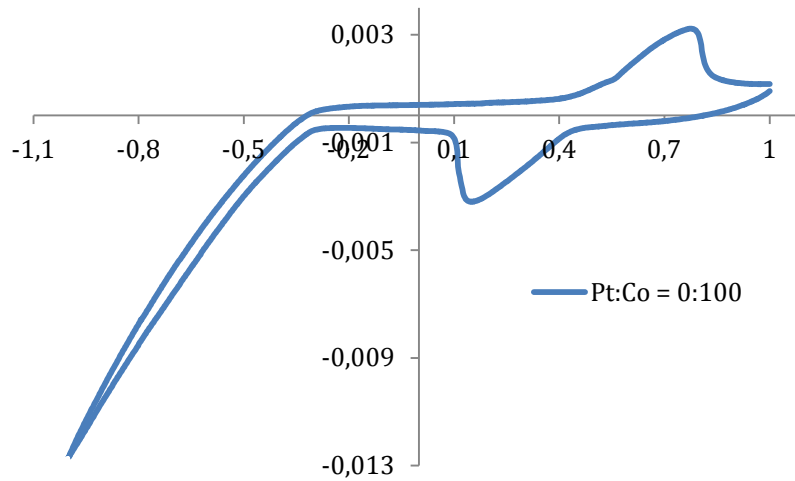
Gambar 5.15. Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 60:40)



Gambar 5.16. Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 40:60)

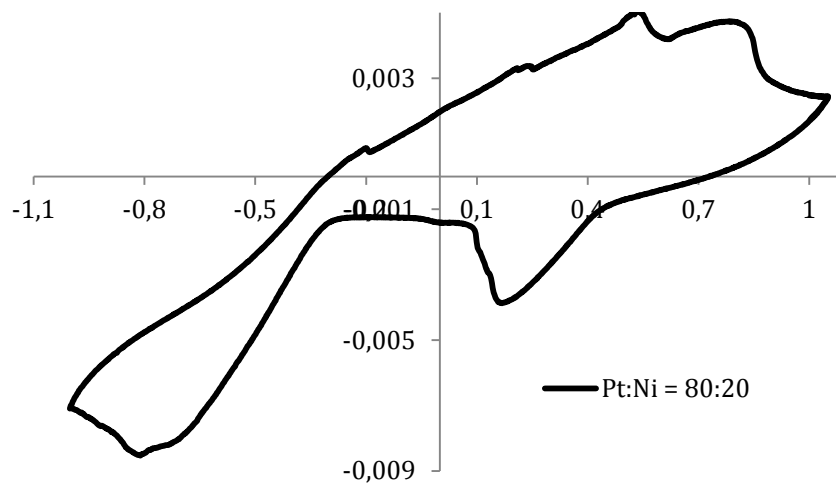


Gambar 5.17 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 20:80)

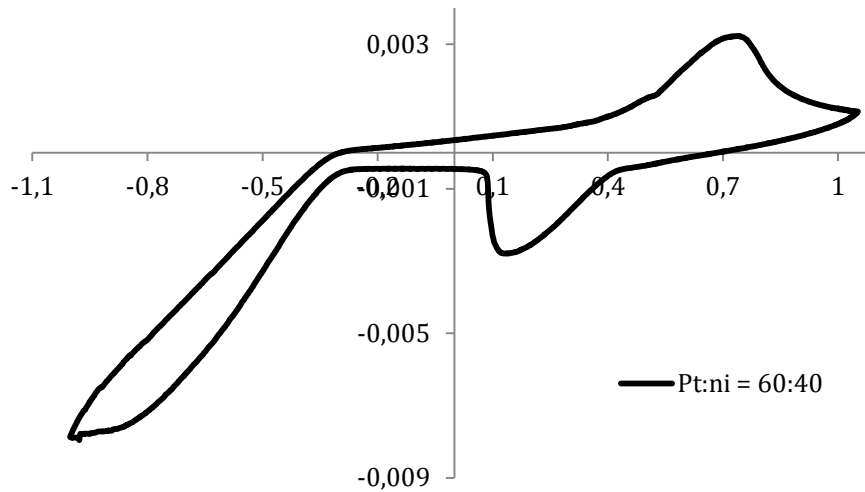


Gambar 5.18 Pola CV untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 0:100)

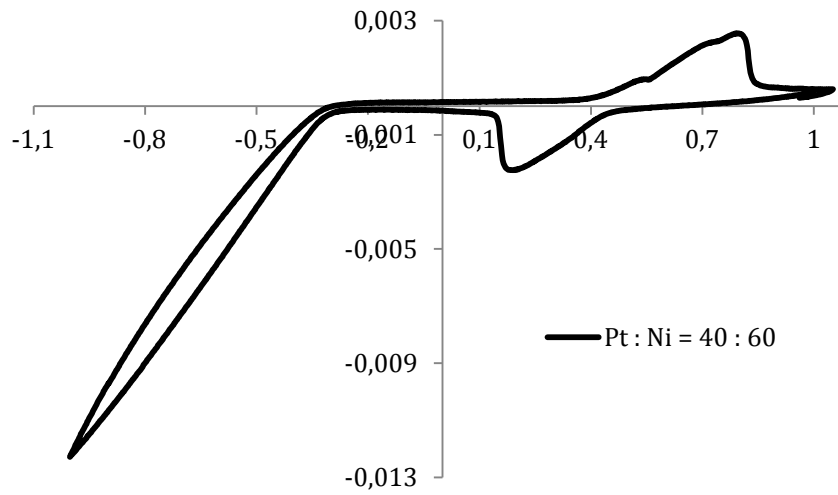
d. Analisis CV Pt-Ni/C



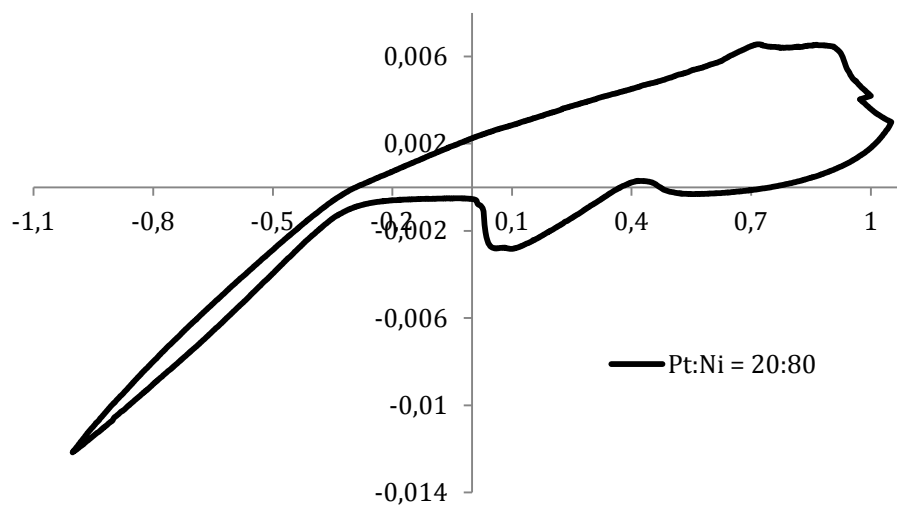
Gambar 5.19. Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 80:20)



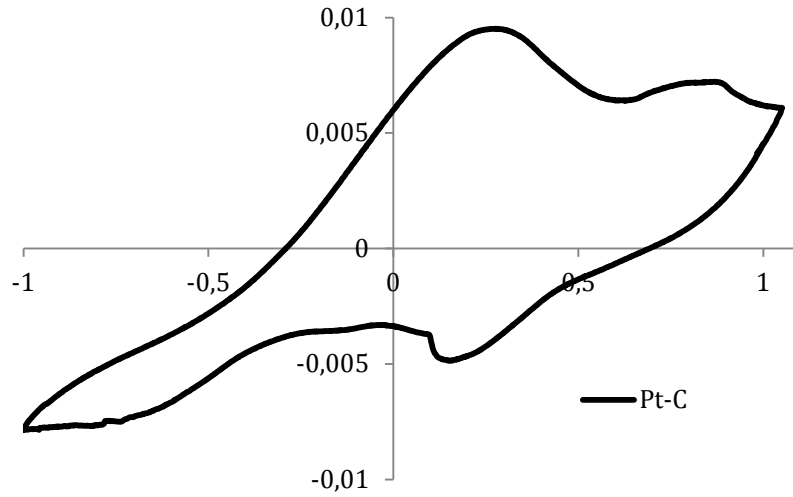
Gambar 5.20. Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 60:40)



Gambar 5.21. Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 40:60)

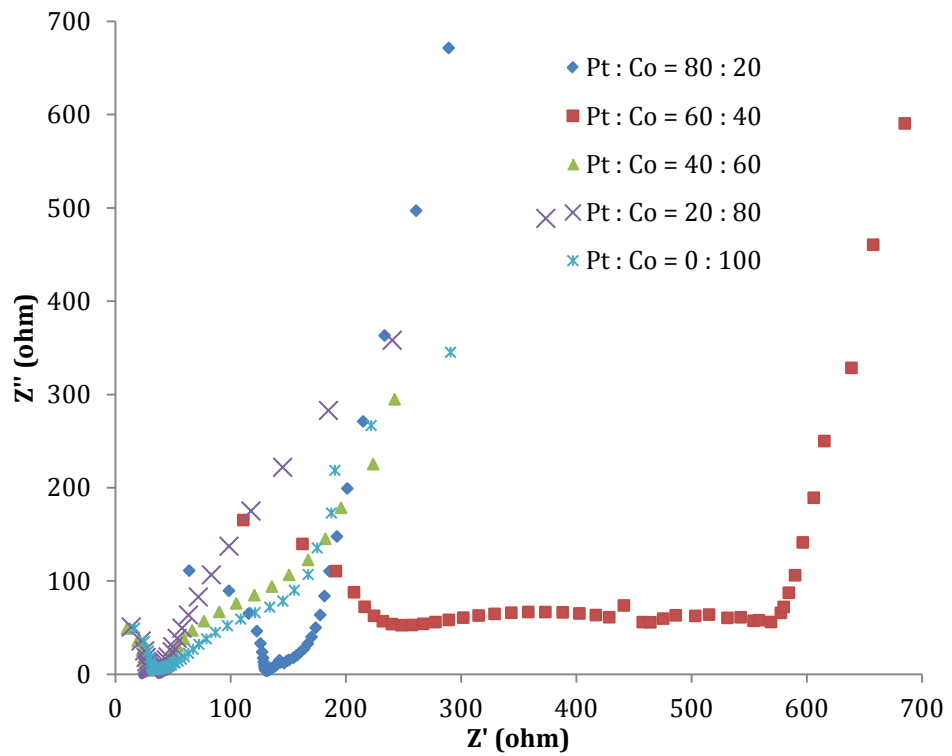


Gambar 5.22 Pola CV untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt:Ni = 0:100)



Gambar 5.23 Pola CV untuk katalis Pt /C

e. Analisis EIS Pt-Co/C



Gambar 5.24 Pola EIS gabungan untuk katalis Pt-Co/C

5.2.2. Hasil Tahapan II dan tahap III

1) Pembuatan Elektroda

Tahapan penelitian kedua adalah pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi. Proses elektrodeposisi dilakukan menggunakan metode potentiostatic menggunakan alat PGASTAT 302N dari Autolab dengan menggunakan elektroda Ag/AgCl/KCL sebagai elektroda rujukan (referen), elektroda Pt sebagai elektroda kaunter dan GDL sebagai elektroda kerja. Rincian komposisi percobaan adalah sebagai berikut:

a. Elektroda Pt-Co/C

Konsentrasi $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0,002 M (Martín et al. 2009); konsentrasi $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0,002 M dengan arus tetap = 0,2 A dan rincian percobaan seperti tercantum pada tabel 5.2.

Tabel 5.2. Komposisi percobaan pembuatan elektroda Pt-Co/C

Perbandingan (%)		Massa Pt	t (detik)	massa Co	t (detik)
Pt	Co	mgram	I = 0.2 A	gram	I = 0.2 A
1	0	2.5	24.73	0	0
0.8	0.2	2	19.79	0.5	8.19
0.6	0.4	1.5	14.84	1	16.38
0.4	0.6	1	9.89	1.5	24.56
0.2	0.8	0.5	4.95	2	32.75
0	1	0	0.00	2.5	40.94
Jumlah total zat		7.5		7.5	

b. Elektroda Pt-Ni/C

Konsentrasi $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0,002 M (Martín et al. 2009); konsentrasi $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ = 0,002 M dengan arus tetap = 0,2 A dan rincian percobaan seperti tercantum pada tabel 5.3.

Tabel 5.3. Komposisi percobaan pembuatan elektroda Pt-Ni/C

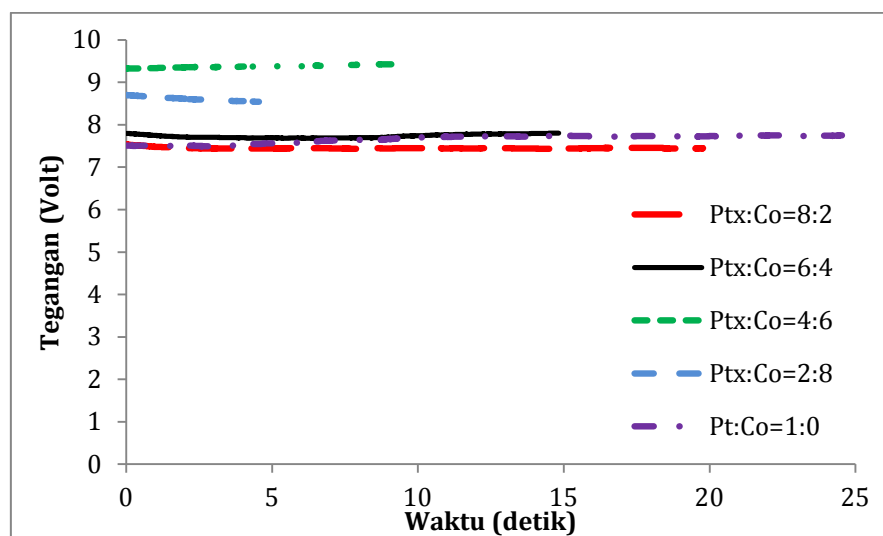
Perbandingan (%)		Massa Pt	t (detik)	massa Ni	t (detik)
Pt	Ni	mgram	I = 0.2	mgram	I = 0.2
1	0	2.5	24.73	0	0
0.8	0.2	2	19.79	0.5	8.22
0.6	0.4	1.5	14.84	1	16.44
0.4	0.6	1	9.89	1.5	24.66
0.2	0.8	0.5	4.95	2	32.88
0	1	0	0.00	2.5	41.11
Jumlah total zat		7.5		7.5	

2) Karakterisasi Elektroda

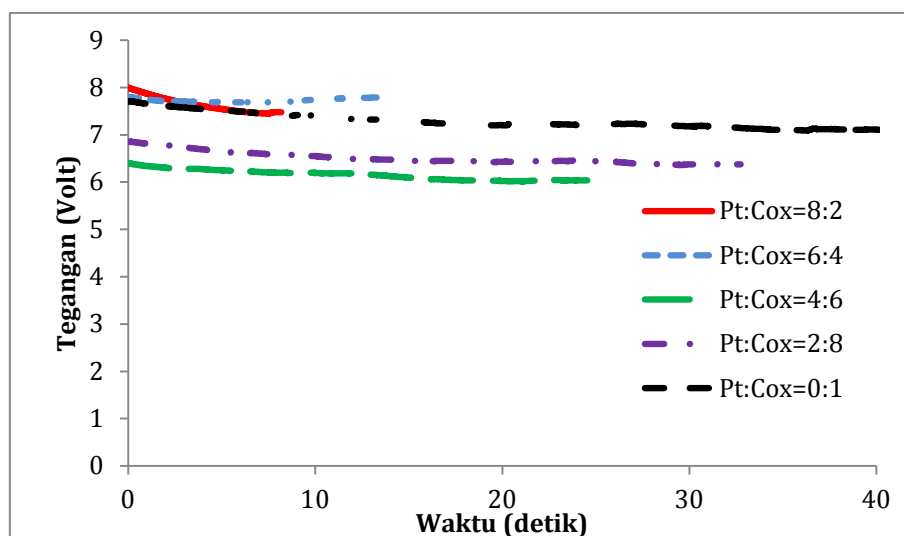
a. Analisis Hasil Elektrodeposisi

Hasil analisis elektrodeposisi meliputi elektrodeposisi larutan $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada GDL untuk menghasilkan elektroda Pt/C dilanjutkan dengan elektrodeposisi larutan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada elektroda Pt/C untuk menghasilkan elektroda Pt-Co/Cl. Sementara itu, elektroda Pt-Ni/C dibuat dengan didahului elektrodeposisi larutan $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada GDL untuk menghasilkan elektroda Pt/C dilanjutkan dengan elektrodeposisi larutan $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ pada elektroda Pt/C.

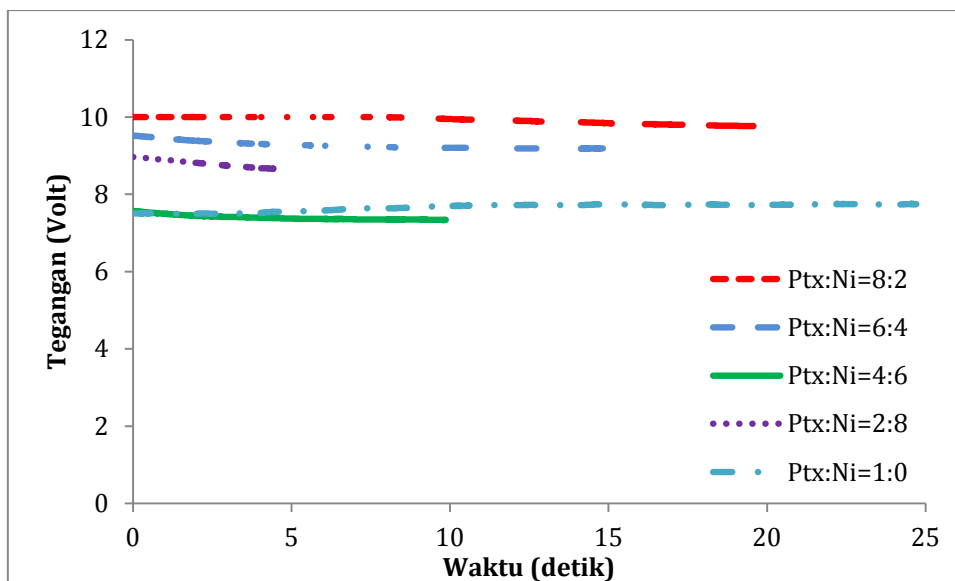
Hasil elektrodeposisi disajikan pada kurva-kurva berikut:



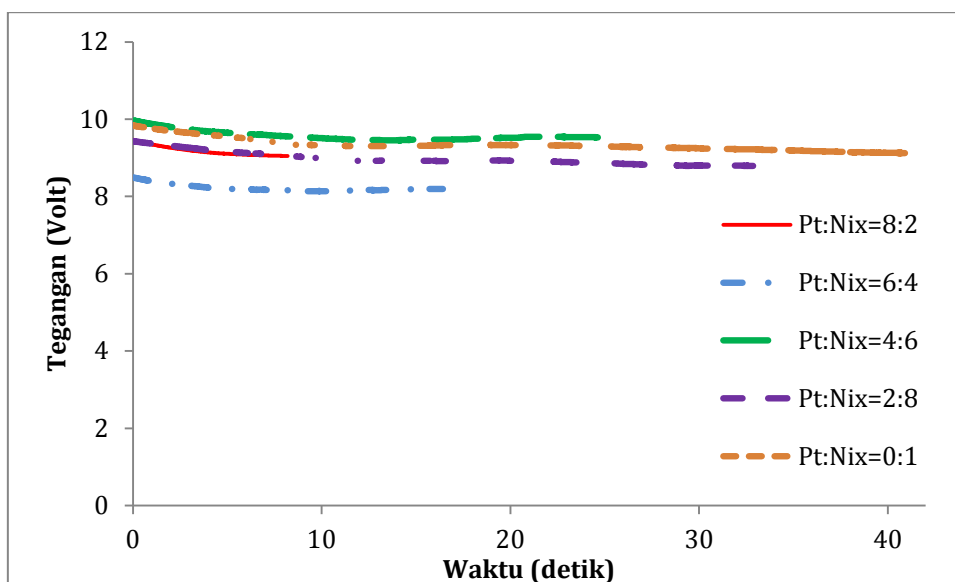
Gambar 5.25. Elektrodeposisi Pt untuk pembuatan elektroda Pt-Co/C pada GDL



Gambar 5.26. Elektrodeposisi Co dengan berbagai perbandingan pada elektroda Pt/C untuk membuat elektroda Pt-Co/C



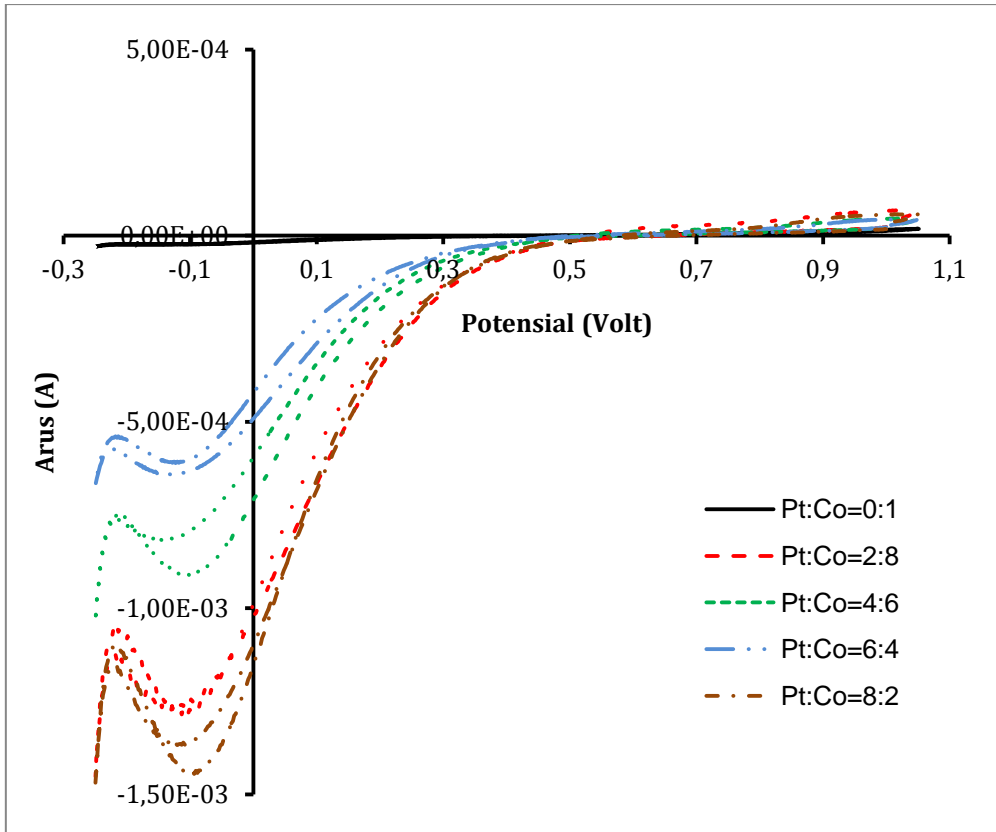
Gambar 5.27. Elektrodeposisi Pt untuk pembuatan elektroda Pt-Ni/C pada GDL



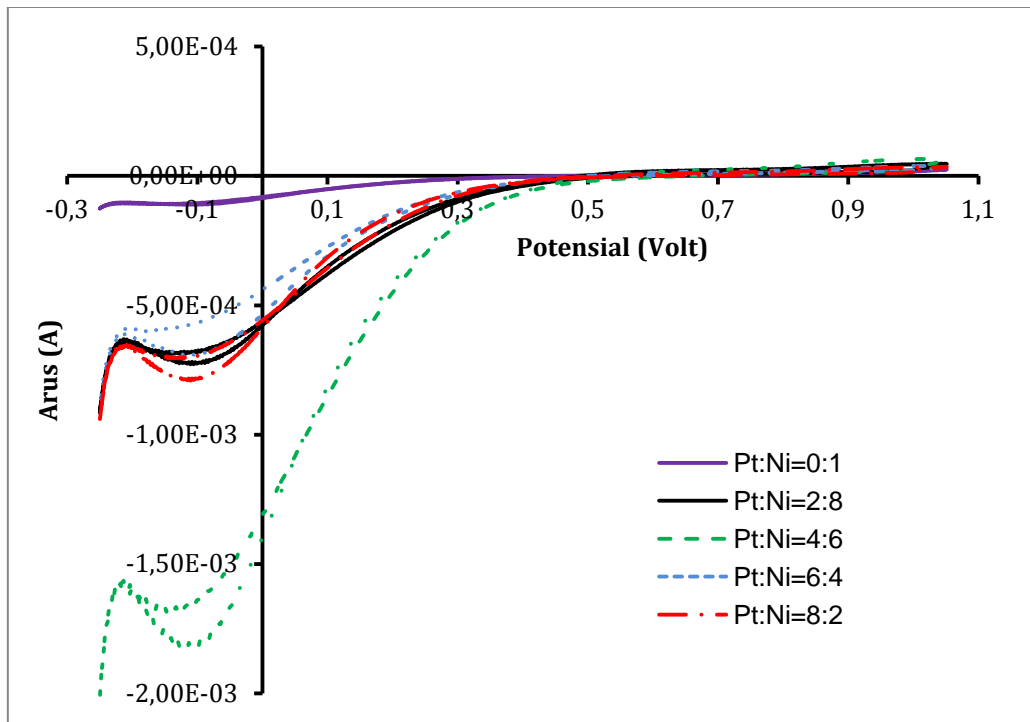
Gambar 5.28. Elektrodeposisi Ni dengan berbagai perbandingan pada Pt/C

b. Analisis CV (Cyclic Voltammetry)

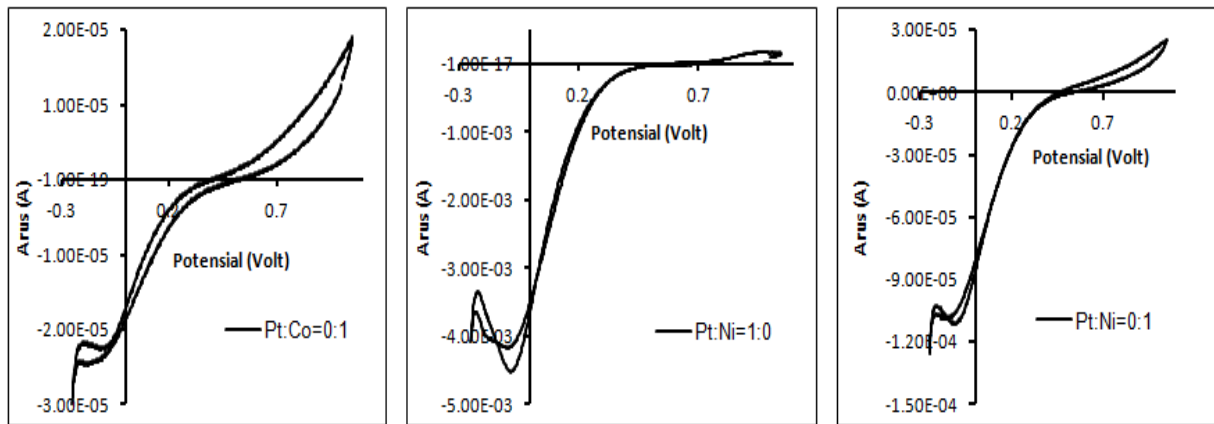
Analisa CV dilakukan menggunakan peralatan Autolab PGSTAT 302N dan pengolahan dilakukan dengan software NOVA versi 1.8.14. Analisa dilakukan dengan menggunakan elektroda Pt sebagai elektroda kaunter, elektroda Ag/AgCl /KCl sebagai elektroda rujukan dan elektroda yang dihasilkan sebagai elektroda kerja dengan laju penelusuran 50 mV/detik. Analisa CV menggunakan elektrolit larutan H_2SO_4 0,3 M. Hasil analisa CV ditunjukkan dalam gambar 5.29 sampai dengan 5.31.



Gambar 5.29. Gabungan hasil analisa CV untuk elektroda Pt-Co/C



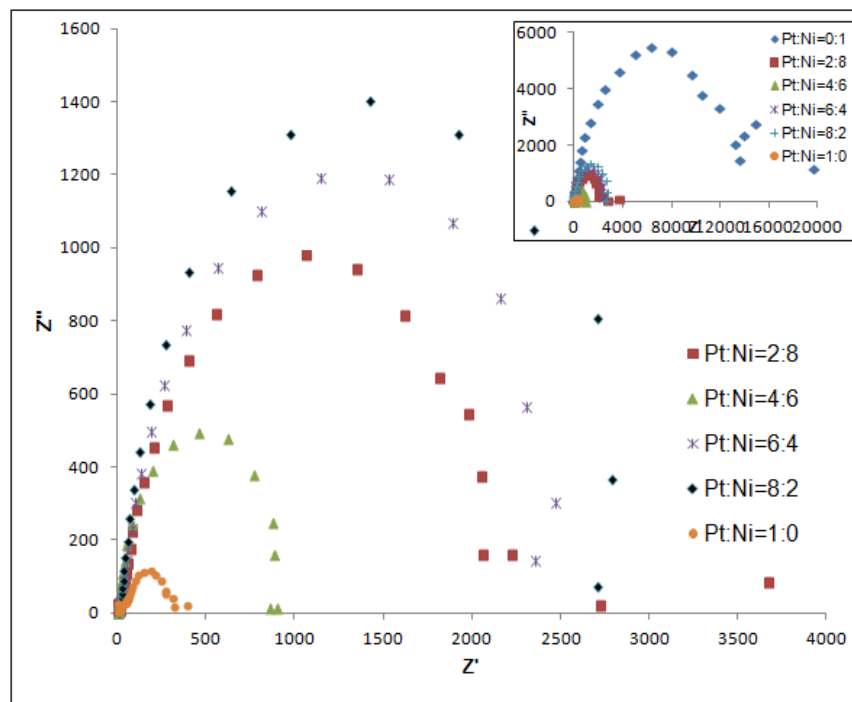
Gambar 5.30. Gabungan hasil analisa CV untuk elektroda Pt-Ni/C



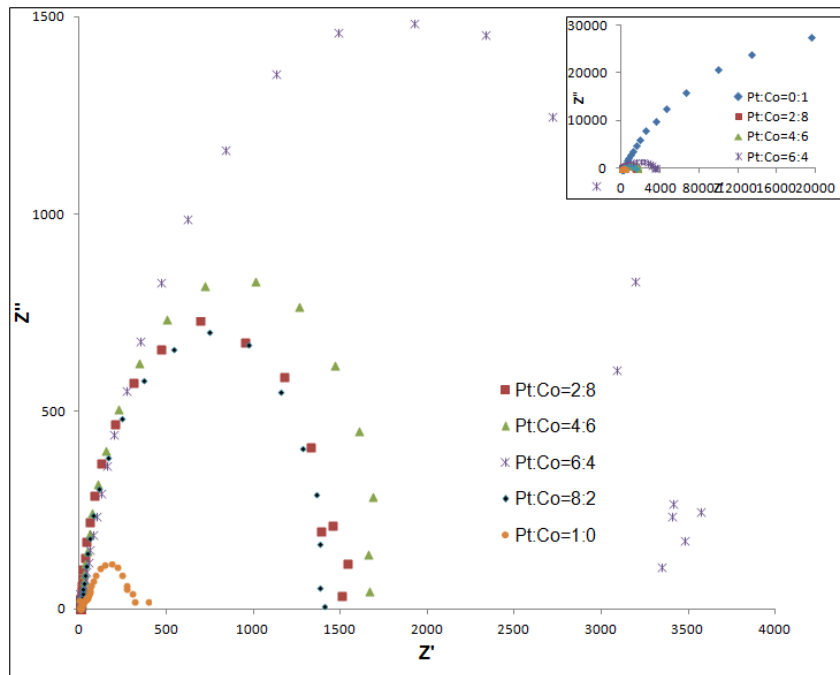
Gambar 5.31. Perbandingan hasil analisa CV untuk Pt:Co/C = 0:1, Pt:Ni=1:0 dan Pt:Ni=0:1

c. Analisis EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy)

Analisa EIS dilakukan menggunakan peralatan Autolab PGSTAT 302N dan pengolahan dilakukan dengan software NOVA versi 1.8.14. Analisa dilakukan dengan menggunakan elektroda Pt sebagai elektroda kaunter, elektroda Ag/AgCl /KCl sebagai elektroda rujukan dan elektroda yang dihasilkan sebagai elektroda kerja. Analisa dilakukan pada elektrolit larutan H_2SO_4 0,3 M. Hasil analisa EIS ditunjukkan dalam gambar 5.32 dan 5.33.



Gambar 5.32. Hasil analisa EIS untuk elektroda Pt-Ni/C (Inset perbandingan antara hasil analisa EIS untuk Pt:Ni=0:1 dengan perbandingan Pt:Ni lainnya)



Gambar 5.33. Hasil analisa EIS untuk elektroda Pt-Co/C (Inset perbandingan antara hasil analisa EIS untuk Pt:Co=0:1 dengan perbandingan Pt:Co lainnya)

Kumpulan foto kegiatan ditunjukkan dalam gambar 5.34 berikut:



Larutan $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan larutan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$



Elektroda Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dengan berbagai-bagai perbandingan



Proses elektrodeposisi



Proses analisa CV dan EIS

Gambar 5.34. Kumpulan gambar penelitian

5.3. HAMBATAN

5.3.1. Hambatan Penelitian Tahap Pertama

Hambatan utama penelitian ini adalah keterlambatan pencairan dana. Keterlambatan pencairan dana, selain disebabkan oleh perubahan jadwal secara umum, juga disebabkan oleh karena kesalahan penulisan nomor rekening, sehingga pencairan dana tahap pertama baru dapat dilakukan pada awal Juli 2014 (setelah dilakukan pembetulan dan pentransferan kembali). Keterlambatan pencairan dana berdampak pada keterlambatan pengadaan bahan kimia dan mundurnya pelaksanaan penelitian. Antisipasi telah dilakukan dengan cara melakukan order bahan di awal dengan perjanjian bahwa bahan akan dibayar setelah dana dapat dicairkan. Keterlambatan penelitian juga berdampak pada analisa/karakterisasi yang mengandalkan peralatan di luar UNSRI.

5.3.2. Hambatan Penelitian Tahap Kedua dan Ketiga

Tahap kedua dan ketiga relatif tidak ada hambatan. Penelitian tahap kedua dan ketiga fokus kepada pembuatan elektroda dengan metode elektrodeposisi. Berbeda dengan metode semburan, metode elektrodeposisi dilakukan langsung terhadap GDL.

5.4. PEMBAHASAN

5.4.1. Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Metode Reduksi

Pembuatan katalis Pt-Co/C dilakukan dengan mereduksi larutan $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan larutan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan menggunakan NaBH_4 sebagai reduktor. Sementara itu, katalis Pt-Ni/C dibuat dengan melakukan reduksi larutan $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ sekaligus menggunakan reduktor yang sama. Terbentuknya katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dikarakterisasi menggunakan analisa XRD.

Gambar 5.2 s.d. 5.13 menunjukkan spektrum XRD untuk katalis Pt-Co/C pada pelbagai komposisi. Gambar 5.2 menunjukkan munculnya puncak Pt pada $2\theta = 39,76^\circ$ (111) dan $46,23^\circ$ (200) (Yi et al. 2012). Kehadiran Co tidak begitu kentara pada $2\theta = 44,51^\circ$ dan $51,85^\circ$. Hal ini disebabkan partikel Co merupakan bagian dari aloi dengan Pt dengan konsentrasi yang relatif kecil (20%) Sebaran puncak antara $2\theta = 19$ s.d. 26° menunjukkan puncak karbon. Seiring dengan makin meningkatnya kandungan Co, maka puncak Co semakin terlihat. Gambar 5.6 memperlihatkan puncak Co pada $2\theta = 44,51^\circ$ dan $51,85^\circ$ dan gambar 5.7 menunjukkan gabungan kurva XRD untuk katalis Pt-Co/C pada pelbagai kandungan. Berdasarkan gambar 5.7, semakin meningkat kandungan Co, intensitas semakin tinggi.

Gambar 5.8 sampai 5.13 merupakan kurva XRD untuk katalis Pt-Ni/C. Berdasarkan gambar 5.8 sampai 5.10, nampak puncak tajam Pt pada $2\theta = 39,76^\circ$ (111), akan tetapi puncak Pt pada $2\theta = 46,23^\circ$ (200) tidak begitu tajam. Hal ini karena ada pengaruh dari kehadiran Ni yang muncul pada $2\theta = 44,51^\circ$. Gambar 5.12 adalah kurva XRD untuk katalis Pt-Ni/C. terdapat dua puncak utama, yaitu pada $2\theta = 44,51^\circ$ dan $2\theta = 51,85^\circ$ (Wu et al. 2009). Gambar 5.13 menunjukkan bahwa makin tinggi kandungan Ni, intensitas makin tinggi.

Karakterisasi aktivitas katalistik katalis dilakukan dengan menggunakan analisa CV (cyclic voltammetry). Berdasarkan gambar 5.14 s.d. 5.18, dapat dilihat bahwa terdapat aktivitas katalitik pada hampir semua komposisi katalis Pt-Co/C, terutama mulai komposisi Pt : Co = 40 : 60 yang menunjukkan aktivitas katalitik reversibel. Yang menarik adalah pada komposisi katalis Pt : Co = 0 : 100, puncak katodik dan anodik hampir sama dengan komposisi 40:60 dan 20:80. Hal ini menunjukkan harapan penggunaan katalis Co sebagai pendukung katalis Pt.

Nilai *electrochemical surface area* (ECSA) untuk masing-masing komposisi katalis Pt-Co/C disajikan dalam tabel 5.4

Tabel 5.4. Data ECSA untuk katalis Pt/C dan Pt-Co/C pada berbagai komposisi

Katalis	ECSA (m ² /g)
Pt/C 100 : 0	37,381
Pt-Co/C 80 : 20	18,700
Pt-Co/C 60 : 40	16,433
Pt-Co/C 40 : 60	17,285
Pt-Co/C 20 : 80	17,640
Pt-Co/C 0 : 100	25,284

Katalis Pt/C (tabel 5.4) mempunyai nilai ECSA paling tinggi. Hal ini dapat difahami karena Pt merupakan katalis utama yang digunakan dalam PEMFC untuk mengkonversi gas hidrogen dan oksigen menjadi air. Akan tetapi, aktivitas katalitik Co sebagai pendukung katalis Pt cukup dominan, bahkan pada komposisi Pt-Co/C 0:100 mempunyai ECSA cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa Co merupakan katalis yang cukup responsif dalam mengkatalisis reaksi.

Gambar 5.19 s.d. 5.23 menunjukkan kurva CV untuk paduan katalis Pt-Ni/C. Aktivitas katalitik reversibel nampak pada komposisi Pt:Ni = 60:40 dan Pt:Ni = 40:60. Sementara itu, gambar 5.23 menunjukkan kurva CV untuk katalis Pt/C. Berdasarkan gambar di atas, penggunaan katalis Ni sebagai katalis pendamping Pt diharapkan dapat mengurangi penggunaan Pt sehingga 60%.

Nilai ECSA untuk masing-masing komposisi katalis Pt-Ni/C disajikan dalam tabel 55.

Tabel 5.5. Data ECSA untuk katalis Pt-Ni/C pada berbagai komposisi

Katalis	ECSA (m ² /g)
Pt/C 100 : 0	37,381
Pt-Ni/C 80 : 20	15,453
Pt-Ni/C 60 : 40	32,021
Pt-Ni/C 40 : 60	19,438
Pt-Ni/C 20 : 80	16,191
Pt-Ni/C 0 : 100	35,797

Berdasarkan tabel 5.5 dapat dilihat juga bahwa Ni mempunyai aktivitas katalitik tinggi, terutama untuk komposisi Pt : Ni = 60 : 40 dan 0 : 100. Seperti halnya pada Co, penggunaan Ni secara mandiri ternyata mempunyai aktivitas katalitik tinggi. Akan tetapi permasalahannya, analisis CV dilakukan dengan menggunakan elektrolit asam sulfat.

Gambar 5.24 menunjukkan kurva *Electrochemical Impedance Spectroscopy* (EIS) dari katalis Pt-Co/C. Semakin tinggi kadar Co, maka impedans semakin kecil yang menunjukkan tingkat konduktivitas yang makin meningkat.

5.4.2. Pembuatan dan Karakterisasi Elektroda dengan Metode Elektrodeposisi

Elektrodeposisi dilakukan dengan metode potensistatik dengan kuat arus yang konstan (0,2 A). Berdasarkan gambar 5.25 sampai dengan 5.28 terlihat bahwa semakin rendah komposisi Pt, waktu elektrodeposisi makin kecil dan tegangan yang diperlukan bervariasi. Hal ini sesuai dengan Hukum Faraday yang menyatakan bahwa jumlah zat yang terdeposisi berbanding lurus dengan waktu yang diperlukan. Gambar 5.26 memperlihatkan elektrodeposisi larutan Co pada elektroda Pt/C untuk menghasilkan elektroda Pt-Co/C dengan berbagai perbandingan. Elektrodeposisi dengan perbandingan Pt:Co= 4:6 membutuhkan tegangan yang lebih kecil dibandingkan perbandingan yang lain. Hal ini menunjukkan bahwa hambatan elektroda termasuk paling rendah. Hal yang sebaliknya terjadi pada elektrodeposisi untuk menghasilkan elektroda Pt-Ni/C.

Hasil karakterisasi CV untuk elektroda Pt-Co/C (gambar 5.29) memperlihatkan bahwa hasil elektrodeposisi dengan kandungan Pt:Co = 8: 2 mempunyai aktivitas katalitik tertinggi. Yang menarik adalah hasil elektrodeposisi dengan kandungan Pt:Co=2:8 mempunyai aktivitas katalitik yang cukup bagus di bawah Pt:Co = 8:2. Sementara itu, hasil elektrodeposisi untuk menghasilkan elektroda Pt-Ni/C menunjukkan bahwa elektroda Pt-Ni/C dengan perbandingan Pt:Ni=4:6 menunjukkan aktivitas katalitik tertinggi, disusul oleh elektroda dengan perbandingan Pt:Ni=8:2.

Walaupun berdasarkan gambar 5.29 dan 5.30, elektroda Pt-Co/C dengan perbandingan Pt:Co=0:1 dan elektroda Pt-Ni/C dengan perbandingan Pt:Ni=0:1 tidak terlihat aktivitas katalitiknya, akan tetapi dalam gambar terpisah seperti ditunjukkan dalam gambar 5.31,

nampak aktivitas katalitik dari kedua elektroda. Aktivitas katalitik elektroda Pt-Ni/C berdasarkan gambar 5.31 relatif lebih baik berbanding elektroda Pt-Co/C dengan perbandingan yang sama. Selain itu, aktivitas katalitik Pt/C murni hasil elektrodeposisi menunjukkan aktivitas katalitik tertinggi seperti yang juga ditunjukkan dalam gambar 3.1.

Berdasarkan hasil analisa EIS seperti nampak pada gambar 5.32, impedans dari elektroda Pt-Ni/C dengan perbandingan Pt:Ni=4:6 termasuk yang paling kecil setelah elektroda dengan perbandingan Pt:Ni=1:0. Semakin kecil impedansi, maka konduktivitasnya semakin tinggi. Dengan demikian, elektroda Pt-Ni/C dengan perbandingan Pt:Ni=4:6 berdasarkan hasil analisa CV dan EIS, layak untuk digunakan sebagai elektroda PEMFC menggantikan elektroda dengan katalis Pt/C. Sementara itu, berdasarkan gambar 5.33, elektroda yang mempunyai impedansi terkecil selain Pt:Co=1:0 adalah Pt:Co=8:2 dan Pt-Co=2:8. Hal ini pun sesuai dengan hasil analisa CV. Dengan demikian, berdasarkan analisa CV dan EIS, elektroda Pt-Co/C dengan kandungan Pt:Co = 8:2 atau Pt:Co=2:8 layak dipertimbangkan untuk digunakan sebagai elektroda PEMFC menggantikan elektroda dengan katalis Pt/C.

BAB 6

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1. Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah:

- a. Proses reduksi $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dalam matrik karbon dengan menggunakan NaBH_4 sebagai reduktor berhasil membentuk katalis Pt-Co/C, dan reduksi $\text{H}_2\text{PtCl}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dan $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ dengan reduktor yang sama membentuk katalis Pt-Ni/C yang dibuktikan dengan analisis XRD.
- b. Baik Co maupun Ni menunjukkan aktivitas katalitik yang cukup baik, seperti ditunjukkan oleh analisa CV dan EIS.
- c. Berdasarkan hasil analisa CV dan EIS, maka elektroda Pt-Co/C yang dapat digunakan sebagai elektroda PEMFC adalah elektroda dengan perbandingan Pt:Co=2:8. Hal ini berlaku untuk dua metode pembuatan yang digunakan. Sementara itu, elektroda Pt-Ni/C yang dapat dipertimbangkan untuk digunakan sebagai elektroda PEMFC adalah elektroda dengan perbandingan Pt:Ni=4:6.

6.2. Saran

Pembuatan elektroda Pt-Co/C dan Pt-Ni/C untuk MEA PEMFC diharapkan dapat menghasilkan MEA dengan kinerja tinggi dan tahan lama. Penelitian tahun pertama diharapkan dapat dilanjutkan dengan penelitian tentang pembuatan MEA untuk keperluan PEMFC pada BTS di tahun kedua.

Daftar Pustaka

- Adilbish, G., J.-W. Kim, H.-G. Lee & Y.-T. Yu 2013. Effect of the deposition time on the electrocatalytic activity of Pt/C catalyst electrodes prepared by pulsed electrophoresis deposition method. *International Journal of Hydrogen Energy* 38(9): 3606-3613.
- Ahn, S.-Y., Y.-C. Lee, H. Y. Ha, S.-A. Hong & I.-H. Oh 2004. Effect of the ionomers in the electrode on the performance of PEMFC under non-humidifying conditions. *Electrochimica Acta* 50(2-3): 673-676.
- André D. Taylor, E. Y. K., Virgil P. Humes, Jeremy Kizuka, Levi T. Thompson 2007 Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells. *Journal of Power Sources* 171: 101-106.
- Barbir, F. 2005. PEM Fuel Cells : Theory and practice, Elsevier.
- Bonifácio, R. N., J. O. A. Paschoal, M. Linardi & R. Cuenca 2011. Catalyst layer optimization by surface tension control during ink formulation of membrane electrode assemblies in proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources* 196(10): 4680-4685.
- Chaisubanan, N. & N. Tantavichet 2013. Pulse reverse electrodeposition of Pt-Co alloys onto carbon cloth electrodes. *Journal of Alloys and Compounds* 559(0): 69-75.
- Chen, E. 2003. Fuel Cell Technology Handbook. Thermodynamics and Electrochemical Kinetics. G. Hoogers. Boca Raton, CRC Press.
- Chisaka, M. & H. Daiguji 2006. Effect of glycerol on micro/nano structures of catalyst layers in polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta* 51(23): 4828-4833.
- Cindrella, L., A. M. Kannan, J. F. Lin, K. Saminathan, Y. Ho, C. W. Lin & J. Wertz 2009. Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells--A review. *Journal of Power Sources* 194(1): 146-160.
- Das, P. K., X. Li & Z.-S. Liu 2007. Analytical approach to polymer electrolyte membrane fuel cell performance and optimization. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 604: 72-90.
- Daud, W. R. W., A. B. Mohamad, A. A. H. Kadhum, R. Chebbi & S. E. Iyuke 2004 Performance optimisation of PEM fuel cell during MEA fabrication. *Energy Conversion and Management* 45: 3239-3249.
- EG&G Technical Services, I. 2004. Fuel Cell Handbook, U.S. Department of Energy Office of Fossil Energy.
- Esmailifar, A., S. Rowshanzamir, M. H. Eikani & E. Ghazanfari 2010. Synthesis methods of low-Pt-loading electrocatalysts for proton exchange membrane fuel cell systems. *Energy* 35(9): 3941-3957.
- Grau, S., M. Montiel, E. Gómez & E. Vallés 2013. Ternary PtCoNi functional films prepared by electrodeposition: Magnetic and electrocatalytic properties. *Electrochimica Acta* 109(0): 187-194.
- Kim, H., N. P. Subramanian & B. N. Popov 2004. Preparation of PEM fuel cell electrodes using pulse electrodeposition. *Journal of Power Sources* 138(1-2): 14-24.
- Kim, K.-H., K.-Y. Lee, H.-J. Kim, E. Cho, S.-Y. Lee, T.-H. Lim, S. P. Yoon, I. C. Hwang & J. H. Jang 2010. The effects of Nafion® ionomer content in PEMFC MEAs prepared by a catalyst-coated membrane (CCM) spraying method. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(5): 2119-2126.
- Lertviriyapaisan, S. & N. Tantavichet 2010. Sublayers for Pt catalyst electrodeposition electrodes in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(19): 10464-10471.
- Litster, S. & G. McLean 2004. PEM fuel cell electrodes. *Journal of Power Sources* 130(1-2): 61-76.
- Makino, K., K. Furukawa, K. Okajima & M. Sudoh 2007. Performance of sputter-deposited platinum cathodes with Nafion and carbon loading for direct methanol fuel cells. *Journal of Power Sources* 166(1): 30-34.
- Martín, A. J., A. M. Chaparro, B. Gallardo, M. A. Folgado & L. Daza 2009. Characterization and single cell testing of Pt/C electrodes prepared by electrodeposition. *Journal of Power Sources* 192(1): 14-20.
- Moreno, B., J. R. Jurado & E. Chinarro 2009. Pt-Ru-Co catalysts for PEMFC synthesized by combustion. *Catalysis Communications* 11(2): 123-126.

- Mougenot, M., A. Caillard, P. Brault, S. Baranton & C. Coutanceau 2011. High Performance plasma sputtered PdPt fuel cell electrodes with ultra low loading. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(14): 8429-8434.
- Nam, J. H., K.-J. Lee, G.-S. Hwang, C.-J. Kim & M. Kaviany 2009. Microporous layer for water morphology control in PEMFC. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52(11–12): 2779-2791.
- Passos, R. R., V. A. Paganin & E. A. Ticianelli 2006. Studies of the performance of PEM fuel cell cathodes with the catalyst layer directly applied on Nafion membranes. *Electrochimica Acta* 51(25): 5239-5245.
- Radhakrishnan, V. & P. Haridoss 2011. Effect of GDL compression on pressure drop and pressure distribution in PEMFC flow field. *International Journal of Hydrogen Energy* 36(22): 14823-14828.
- Rajalakshmi, N. & K. S. Dhathathreyan 2008. Nanostructured platinum catalyst layer prepared by pulsed electrodeposition for use in PEM fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 33(20): 5672-5677.
- Rohendi, D., E. H. Majlan, A. B. Mohamad, W. R. Wan Daud, A. A. Hassan Kadhum & L. K. Shyuan 2013. Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*(0).
- Saha, M. S., A. F. Gullá, R. J. Allen & S. Mukerjee 2006. High performance polymer electrolyte fuel cells with ultra-low Pt loading electrodes prepared by dual ion-beam assisted deposition. *Electrochimica Acta* 51(22): 4680-4692.
- Seo, A., J. Lee, K. Han & H. Kim 2006. Performance and stability of Pt-based ternary alloy catalysts for PEMFC. *Electrochimica Acta* 52(4): 1603-1611.
- Sharma, S. & B. G. Pollet 2012. Support materials for PEMFC and DMFC electrocatalysts—A review. *Journal of Power Sources* 208(0): 96-119.
- Srinivasan, S. 2006. Fuel Cells : From Fundamentals to Applications. New York, Springer.
- Starz, K.-A., R. Zuber, A. Kramer, K. Fehl, J. Kohler & S. Wittpahl 2002. Ink for producing membrane electrode assemblies for fuel cells. U. S. P. Application. US.
- Su, H.-N., Q. Zeng, S.-J. Liao & Y.-N. Wu 2010. High performance membrane electrode assembly with ultra-low platinum loading prepared by a novel multi catalyst layer technique. *International Journal of Hydrogen Energy* 35(19): 10430-10436.
- Thompson, S. D., L. R. Jordan & M. Forsyth 2001. Platinum electrodeposition for polymer electrolyte membrane fuel cells. *Electrochimica Acta* 46(10-11): 1657-1663.
- Vinayan, B. P., R. I. Jafri, R. Nagar, N. Rajalakshmi, K. Sethupathi & S. Ramaprabhu 2012. Catalytic activity of platinum–cobalt alloy nanoparticles decorated functionalized multiwalled carbon nanotubes for oxygen reduction reaction in PEMFC. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(1): 412-421.
- Wang, Y., K. S. Chen, J. Mishler, S. C. Cho & X. C. Adroher 2011. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Applied Energy* 88(4): 981-1007.
- Wang, Z.-B., P.-J. Zuo, Y.-Y. Chu, Y.-Y. Shao & G.-P. Yin 2009. Durability studies on performance degradation of Pt/C catalysts of proton exchange membrane fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy* 34(10): 4387-4394.
- Wu, H., D. Wexler & G. Wang 2009. PtNi alloy nanoparticles as cathode catalyst for PEM fuel cells with enhanced catalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds* 488(1): 195-198.
- Xiong, L., A. M. Kannan & A. Manthiram 2002. Pt-M (M=Fe, Co, Ni and Cu) electrocatalysts synthesized by an aqueous route for proton exchange membrane fuel cells. *Electrochemistry Communications* 4(11): 898-903.
- Xiong, L. & A. Manthiram 2005. High performance membrane-electrode assemblies with ultra-low Pt loading for proton exchange membrane fuel cells. *Electrochimica Acta* 50(2005): 3200-3204.
- Yi, L., L. Liu, X. Liu, X. Wang, W. Yi, P. He & X. Wang 2012. Carbon-supported Pt–Co nanoparticles as anode catalyst for direct borohydride-hydrogen peroxide fuel cell:

- Electrocatalysis and fuel cell performance. *International Journal of Hydrogen Energy* 37(17): 12650-12658.
- Yu, X. & S. Ye 2007. Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC: Part I. Physico-chemical and electronic interaction between Pt and carbon support, and activity enhancement of Pt/C catalyst. *Journal of Power Sources* 172(1): 133-144.
- Zhang, J. Z., K. Hongsirikarn & J. G. Goodwin Jr 2011. Effect and siting of Nafion® in a Pt/C proton exchange membrane fuel cell catalyst. *Journal of Power Sources* 196(19): 7957-7966.
- Zhang, S., X.-Z. Yuan, J. N. C. Hin, H. Wang, K. A. Friedrich & M. Schulze 2009. A review of platinum-based catalyst layer degradation in proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Power Sources* 194(2): 588-600.

PEMBUATAN DAN KARAKTERISASI KATALIS Pt-Co/C DAN Pt-Ni/C UNTUK ELEKTRODA PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL (PEMFC)

Dedi Rohendi¹⁾, M. Faizal²⁾, Addy Rachmat¹⁾, Assaidah Adnan³⁾, Jarot Raharjo⁴⁾

¹ Jurusan Kimia Fakultas MIPA UNSRI

² Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik UNSRI

³ Jurusan Fisika Fakultas MIPA UNSRI

Jl. Palembang-Prabumulih Km. 32 Inderalaya Ogan Ilir Sumsel telp: (0711) 580269

4 Pusat Teknologi Mineral BPPT

Gd II BPPT Lantai 22, Jl MH Thamrin 8, Jakarta Pusat Telp (021) 3169876

e-mail : rohendi19@gmail.com

Seminar Ilmiah Insentif Riset Sinas 2004, Bandung, 1 - 2 Oktober 2014

ABSTRAK

Salah satu jenis fuel cell dengan keunggulan pada suhu operasi yang relatif rendah, tingkat konversi tinggi dan aplikasi yang beragam adalah Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC). Komponen sangat penting dalam PEMFC adalah elektroda yang terdapat pada Membrane Electrode Assembly (MEA), yang merupakan pusat reaksi elektrokimia perubahan gas hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik dan air sebagai buangan. Karena mempunyai fungsi sangat penting, maka elektroda PEMFC harus mendapat perhatian khusus dalam upaya pencapaian kinerja tinggi terutama dalam aktivitas katalitik dan daya tahannya. Hal yang perlu dikaji untuk menghasilkan elektroda dengan kinerja tinggi adalah kandungan dan jenis katalis serta metode pembuatannya. Pada penelitian ini, dikaji pembuatan elektroda dengan metode reduksi senyawa $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ dalam substrat karbon vulcan XC72 untuk menghasilkan katalis Pt-Co/C dan reduksi senyawa $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ untuk menghasilkan katalis Pt-Ni/C. Penggunaan logam golongan transisi lain selain platina sebagai katalis pendukung platina dimaksudkan untuk meningkatkan fungsi katalitik elektroda dan mengurangi kandungan platina yang relatif mahal dan mudah teracuni. Hasil karakterisasi katalis dengan menggunakan analisis Cyclic Voltammetry (CV) menunjukkan bahwa Co dan Ni dapat digunakan sebagai katalis pendukung untuk Pt dan analisis XRD menunjukkan keberadaan Co dan Ni hasil reduksi..

Kata Kunci : MEA, Pt-Co/C, Pt-Ni/C, PEMFC

I. PENDAHULUAN

Fuel cell merupakan peralatan elektrokimia yang dapat mengubah energi bebas yang tersedia dalam bahan bakar (energi kimia) langsung menjadi kerja yang bermanfaat dalam bentuk energi listrik [1, 2]. Fuel cell dengan keunggulan pada tingkat konversi yang tinggi, tingkat polusi yang rendah, modular dan beragam sumber bahan bakarnya diharapkan dapat menggantikan sumber energi konvensional yang ada [3, 4]. Teknologi Fuel Cell pun pasti akan hadir di Indonesia

karena desakan yang makin kuat untuk menghadirkan sumber energi yang bersih. Saat ini, penggunaan fuel cell di dunia sudah memasuki tahap komersialisasi untuk kendaraan, sementara di Indonesia, fuel cell sudah mulai digunakan sebagai sumber energi pada *Base Transceiver Station* (BTS) tanpa dukungan kemandirian dalam penguasaan teknologinya.

Salah satu jenis fuel cell dengan keunggulan suhu operasi yang relatif rendah, tingkat konversi tinggi dan aplikasi yang beragam (keperluan energi mudah alih, kendaraan bermotor dan

sumber energi untuk perumahan) adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC) [1, 5].

Salah satu komponen yang sangat penting dalam PEMFC adalah elektroda yang terdapat pada *Membrane Electrode Assembly* (MEA). Elektroda merupakan pusat reaksi elektrokimia perubahan gas hidrogen dan oksigen menjadi energi listrik dan air sebagai buangan [6, 7]. Karena mempunyai fungsi sangat penting, maka elektroda PEMFC harus mendapat perhatian khusus dalam upaya pencapaian kinerja tinggi terutama dalam aktivitas katalitik dan daya tahannya [2]. MEA dengan kerapatan arus yang tinggi dapat mereduksi ukuran stack PEMFC secara signifikan dan penurunan kandungan katalis Pt akan menurunkan harga fuel cell secara keseluruhan.

Katalis yang digunakan dalam elektroda fuel cell umumnya katalis berbasis platina yang cukup mahal dan mudah teracun [8-10]. Selain katalis tunggal platina, pemakaian logam golongan transisi lain selain platina dilaporkan digunakan sebagai katalis pendukung platina [11-13]. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan fungsi katalitik elektroda dan mengurangi kandungan platina [10]. Pada penelitian ini digunakan paduan antara katalis Pt dengan Co dan Ni di dalam substrat karbon vulcan XC-72.

Tujuan penelitian ini adalah membuat dan mengkarakterisasi katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C untuk digunakan dalam elektroda PEMFC. Penggunaan paduan katalis Pt dengan Co dan Pt dengan Ni dimaksudkan untuk mengurangi penggunaan Pt dalam elektroda dan meningkatkan fungsi katalitik dari katalis.

Proses pembuatan katalis dilakukan dengan metode reduksi berdasarkan kajian yang telah dilakukan sebelumnya [14].

II. METODOLOGI

Katalis yang dibuat dalam penelitian ini adalah gabungan katalis platina dan kobal dalam matriks karbon vulcan XC-72 dalam bentuk Pt-Co/C dan gabungan katalis Pt-Ni/C dengan perbandingan berat komposisi masing-masing 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 dan 0:100 untuk perbandingan Pt dengan Co dan Ni.

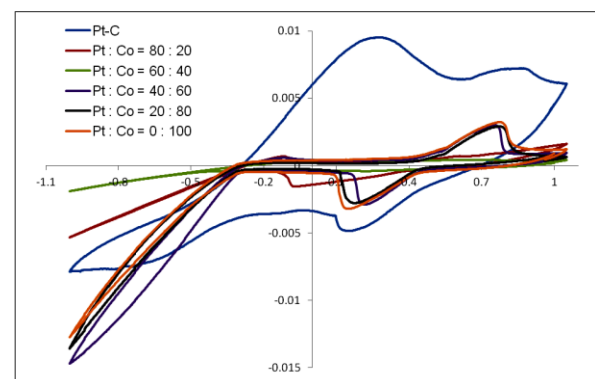
Pembuatan katalis Pt-Co/C dan Pt-Ni/C dilakukan dengan metode reduksi larutan $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan larutan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ secara bersamaan dengan pereduksi larutan $NaBH_4$ 1 M

pada matriks serbuk karbon vulcan XC-72. Sejumlah tertentu massa $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ dimasukkan ke dalam 100 mL air demin sambil terus diaduk kontinyu selama 30 menit. PH larutan dipertahankan pada pH 10 dengan menambahkan larutan NaOH 3 M. Ke dalam larutan ditambahkan 1 mL larutan $NaBH_4$ 1 M setetes demi setetes sambil terus diaduk. Setelah 24 jam pengadukan, katalis yang dihasilkan disaring dan dicuci dengan air sampai ion Cl tidak terdeteksi. Katalis kemudian dikeringkan dalam oven vacum pada suhu $80^\circ C$ selama 12 jam. Perbandingan berat Pt dan Co dalam katalis yang dibuat adalah 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80 dan 0:100. Prosedur yang sama juga berlaku untuk pembuatan katalis Pt-Ni/C dengan melakukan proses reduksi larutan $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan larutan $NiCl_2 \cdot 6H_2O$. Katalis yang dihasilkan dikarakterisasi aktivitas katalitiknya dengan menggunakan analisis voltametri siklik (CV) dan struktur kristalnya dengan XRD. Analisa CV dilakukan dengan menggunakan katalis sebagai elektroda kerja, elektroda Ag/AgCl dan kalomel jenuh sebagai elektroda konter dan referensi. Analisa dilakukan dengan menggunakan larutan elektrolit H_2SO_4 0,3 M. Aktifitas katalitik dari katalis ditentukan dengan menghitung luas permukaan aktif secara elektrokimia (*electrochemical surface area / ECSA*).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Analisa CV

Hasil pengukuran CV untuk paduan katalis Pt-Co/C disajikan pada gambar 3.1 dengan katalis Pt/C sebagai pembanding.



Gambar 3.1. Kurva CV untuk paduan katalis Pt/C dan Pt-Co/C pada berbagai komposisi

Berdasarkan gambar 3.1 dapat dilihat bahwa terdapat aktivitas katalitik pada hampir semua komposisi katalis Pt-Co/C, terutama mulai komposisi Pt : Co = 40 : 60 yang menunjukkan aktivitas katalitik reversibel. Yang menarik adalah pada komposisi katalis Pt : Co = 0 : 100, puncak katodik dan anodik hampir sama dengan komposisi 40:60 dan 20:80. Hal ini menunjukkan harapan penggunaan katalis Co sebagai pendukung katalis Pt.

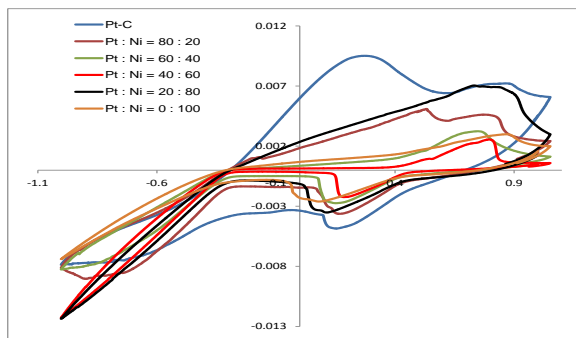
Nilai ECSA untuk masing-masing komposisi katalis Pt-Co/C disajikan dalam tabel 3.1

Tabel 3.1. Data ECSA untuk katalis Pt/C dan Pt-Co/C pada berbagai komposisi

Katalis	ECSA (m ² /g)
Pt/C 100 : 0	37,381
Pt-Co/C 80 : 20	18,700
Pt-Co/C 60 : 40	16,433
Pt-Co/C 40 : 60	17,285
Pt-Co/C 20 : 80	17,640
Pt-Co/C 0 : 100	25,284

Katalis Pt/C (tabel 3.1) mempunyai nilai ECSA paling tinggi. Hal ini dapat difahami karena Pt merupakan katalis utama yang digunakan dalam PEMFC untuk mengkonversi gas hidrogen dan oksigen menjadi air. Akan tetapi, aktivitas katalitik Co sebagai pendukung katalis Pt cukup dominan, bahkan pada komposisi Pt-Co/C 0:100 mempunyai ECSA cukup tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa Co merupakan katalis yang cukup responsif dalam mengkatalisis reaksi.

Hasil pengukuran CV untuk paduan katalis Pt-Ni/C disajikan dalam gambar 3.2.



Gambar 3.2. Kurva CV untuk paduan katalis Pt-Ni/C pada berbagai komposisi.

Berdasarkan gambar 3.2, aktivitas katalitik reversibel nampak pada komposisi Pt:Ni = 60:40 dan Pt:Ni = 40:60. Berdasarkan gambar di atas, penggunaan katalis Ni sebagai katalis pendamping Pt diharapkan dapat mengurangi penggunaan Pt sehingga 60%.

Nilai ECSA untuk masing-masing komposisi katalis Pt-Ni/C disajikan dalam tabel 3.2.

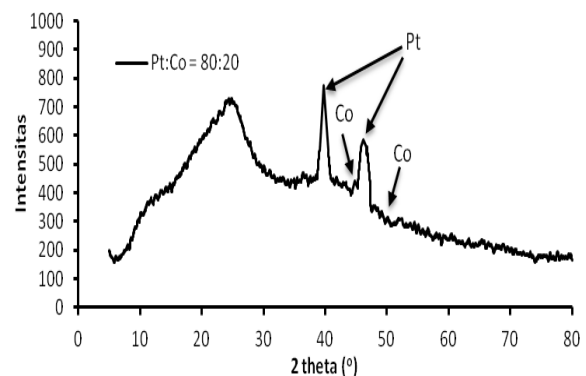
Tabel 3.2. Data ECSA untuk katalis Pt-Ni/C pada berbagai komposisi

Katalis	ECSA (m ² /g)
Pt/C 100 : 0	37,381
Pt-Ni/C 80 : 20	15,453
Pt-Ni/C 60 : 40	32,021
Pt-Ni/C 40 : 60	19,438
Pt-Ni/C 20 : 80	16,191
Pt-Ni/C 0 : 100	35,797

Berdasarkan tabel 3.2 dapat dilihat juga bahwa Ni mempunyai aktivitas katalitik tinggi, terutama untuk komposisi Pt : Ni = 60 : 40 dan 0 : 100. Seperti halnya pada Co, penggunaan Ni secara mandiri ternyata mempunyai aktivitas katalitik tinggi. Akan tetapi permasalahannya, analisis CV dilakukan dengan menggunakan elektrolit asam sulfat.

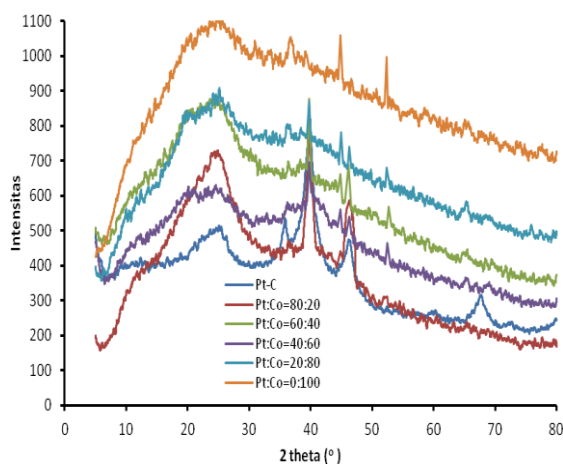
3.2. Analisa XRD

Contoh hasil pengamatan XRD untuk katalis Pt-Co/C ditunjukkan pada gambar 3.3 dan gabungan seluruh hasil pengamatan ditunjukkan pada gambar 3.4.



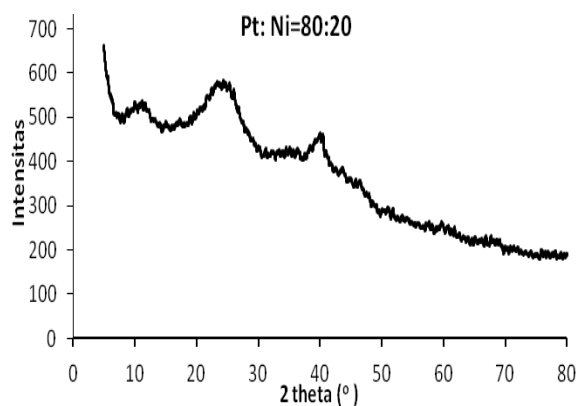
Gambar 3.3 Contoh pola XRD untuk katalis Pt-Co/C (kandungan Pt:Co = 80:20)

Gambar 3.3 menunjukkan munculnya puncak Pt pada $2\theta = 39,76^\circ$ (111) dan $46,23^\circ$ (200) [14]. Kehadiran Co tidak begitu kentara pada $2\theta = 44,51^\circ$ dan $51,85^\circ$. Hal ini disebabkan partikel Co merupakan bagian dari aloi dengan Pt dengan konsentrasi yang relatif kecil (20%). Hal yang sama juga ditunjukkan dalam hasil kajian sebelumnya [12, 14]. Sementara itu, sebaran puncak antara $2\theta = 19$ s.d. 26° menunjukkan puncak khas untuk karbon. Seiring dengan makin meningkatnya kandungan Co, maka puncak Co semakin terlihat. Hal ini dapat dilihat dari gambar 3.4.



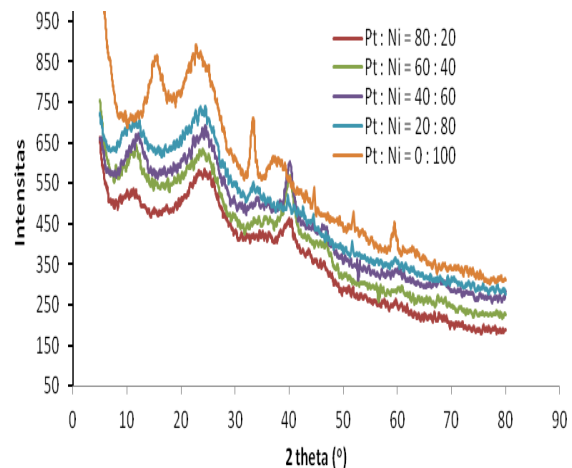
Gambar 3.4 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt/C dan Pt-Co/C pada berbagai komposisi

Contoh hasil pengamatan XRD untuk katalis Pt-Ni/C ditunjukkan pada gambar 3.5 dan hasil pengamatan gabungan ditunjukkan pada gambar 3.6.



Gambar 3.5 Contoh pola XRD untuk katalis Pt-Ni/C (kandungan Pt: Ni = 80:20)

Berdasarkan gambar 3.5 nampak puncak tajam Pt pada $2\theta = 39,76^\circ$ (111), akan tetapi puncak Pt pada $2\theta = 46,23^\circ$ (200) tidak begitu tajam. Hal ini karena ada pengaruh dari kehadiran Ni yang muncul pada $2\theta = 44,51^\circ$. Ni biasanya dikarakterisasi melalui tiga puncak pada $2\theta = 44,5$ (111), $51,8$ (200) dan $76,4$ (222) [15], akan tetapi, seperti halnya pada katalis Pt-Co/C. Ni masuk pada struktur kristal Pt sehingga tidak muncul dalam bentuk puncak yang tajam.



Gambar 3.6 Pola XRD untuk gabungan katalis Pt-Ni/C pada berbagai komposisi

Berdasarkan gambar 3.6, terdapat dua puncak utama Ni, yaitu pada $2\theta = 44,51^\circ$ dan $2\theta = 51,85^\circ$ pada komposisi Pt : Ni = 0 : 100. Gambar 3.6 juga menunjukkan bahwa makin tinggi kandungan Ni, intensitas makin tinggi.

IV. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah:

- Proses reduksi $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ dalam matrik karbon dengan menggunakan $NaBH_4$ sebagai reduktor berhasil membentuk katalis Pt-Co/C, dan reduksi $H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$ dan $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ dengan reduktor yang sama membentuk katalis Pt-Ni/C yang dibuktikan dengan analisis XRD.
- Baik Co maupun Ni menunjukkan aktivitas katalitik yang cukup baik, seperti ditunjukkan oleh analisa CV.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Wang, Z.-B., Zuo, P.-J., Chu, Y.-Y., Shao, Y.-Y., and Yin, G.-P., (2009), Durability studies on performance degradation of Pt/C catalysts of proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(10), pp. 4387-4394.
- [2] Wang, Y., Chen, K. S., Mishler, J., Cho, S. C., and Adroher, X. C., (2011), A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research, *Applied Energy*, 88(4), pp. 981-1007.
- [3] André D. Taylor, E. Y. K., Virgil P. Humes, Jeremy Kizuka, Levi T. Thompson, (2007), Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells, *Journal of Power Sources* 171, pp. 101-106.
- [4] Daud, W. R. W., Mohamad, A. B., Kadhum, A. A. H., Chebbi, R., and Iyuke, S. E., (2004), Performance optimisation of PEM fuel cell during MEA fabrication, *Energy Conversion and Management*, 45, pp. 3239-3249.
- [5] Su, H.-N., Zeng, Q., Liao, S.-J., and Wu, Y.-N., (2010), High performance membrane electrode assembly with ultra-low platinum loading prepared by a novel multi catalyst layer technique, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(19), pp. 10430-10436.
- [6] Litster, S., and McLean, G., (2004), PEM fuel cell electrodes, *Journal of Power Sources*, 130(1-2), pp. 61-76.
- [7] Rohendi, D., Majlan, E. H., Mohamad, A. B., Wan Daud, W. R., Hassan Kadhum, A. A., and Shyuan, L. K., (2013), Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions, *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(22), pp. 9431-9437.
- [8] Zhang, S., Yuan, X.-Z., Hin, J. N. C., Wang, H., Friedrich, K. A., and Schulze, M., (2009), A review of platinum-based catalyst layer degradation in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources*, 194(2), pp. 588-600.
- [9] Sharma, S., and Pollet, B. G., (2012), Support materials for PEMFC and DMFC electrocatalysts—A review, *Journal of Power Sources*, 208(0), pp. 96-119.
- [10] Cho, Y.-H., Park, H.-S., Cho, Y.-H., Jung, D.-S., Park, H.-Y., and Sung, Y.-E., (2007), Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell, *Journal of Power Sources*, 172(1), pp. 89-93.
- [11] Xiong, L., Kannan, A. M., and Manthiram, A., (2002), Pt-M (M=Fe, Co, Ni and Cu) electrocatalysts synthesized by an aqueous route for proton exchange membrane fuel cells, *Electrochemistry Communications*, 4(11), pp. 898-903.
- [12] Hsu, S.-P., Liu, C.-W., Chen, H.-S., Chen, T.-Y., Lai, C.-M., Lee, C.-H., Lee, J.-F., Chan, T.-S., Tsai, L.-D., and Wang, K.-W., (2013), The effect of Mn addition on the promotion of oxygen reduction reaction performance for PtCo/C catalysts, *Electrochimica Acta*, 105(0), pp. 180-187.
- [13] Tasic, G. S., Miljanic, S. S., Marceta Kaninski, M. P., Saponjic, D. P., and Nikolic, V. M., (2009), Non-noble metal catalyst for a future Pt free PEMFC, *Electrochemistry Communications*, 11(11), pp. 2097-2100.
- [14] Yi, L., Liu, L., Liu, X., Wang, X., Yi, W., He, P., and Wang, X., (2012), Carbon-supported Pt-Co nanoparticles as anode catalyst for direct borohydride-hydrogen peroxide fuel cell: Electrocatalysis and fuel cell performance, *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(17), pp. 12650-12658.
- [15] Geng, X., Zhang, H., Ye, W., Ma, Y., and Zhong, H., (2008), Ni-Pt/C as anode electrocatalyst for a direct borohydride fuel cell, *Journal of Power Sources*, 185(2), pp. 627-632.

ELECTRODE FOR PEMFC: A REVIEW

D. Rohendi^{1*}, M. Faizal², J. Raharjo³, A. Rachmat¹, A. Adnan⁴,

¹ Dept. of Chemistry, Faculty of Mathematics and Sciences, Sriwijaya University, Inderalaya, Indonesia

² Dept. of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Sriwijaya University, Inderalaya, Indonesia

³Center of Materials Technology, Agency for the Assessment and Application of Technology, Puspitek 224 building, Tangerang Selatan, Indonesia

⁴ Dept. of Physics, Faculty of Mathematics and Sciences, Sriwijaya University, Inderalaya, Indonesia

Abstract

The electrode is the most important component of the membrane electrode assembly (MEA) of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs); it is the site of the electrochemical reaction of converting fuel (in this case, hydrogen) and oxygen to produce water and electrical energy. Attempts to improve the performance and durability of electrodes have sought to answer the challenges arising from the use of PEMFC as an efficient and competitive energy source. To accomplish this goal and to solve problems relating to PEMFC electrodes, a thorough understanding of the structure and function of each component, manufacturing method, characterization and electrode performance and durability testing become very important. Therefore, in this paper, we discuss the structure, function and manufacturing of each component, as well as degradation and durability tests, electrode characterization methods and water management studies. This study aims to provide comprehensive information about PEMFC electrodes.

Keywords: GDL, CL, hydrophobicity, electrode, water management.

***Corresponding author:** *rohendi19@gmail.com*

1. INTRODUCTION

Fuel cell technology is promising for the environmentally friendly production of energy of both sufficient quality and quantity. Fuel cells are expected to be an efficient energy source that is free of pollutants and that has a high energy density compared to conventional energy sources.

One type of fuel cell that is promising and highly efficient is the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC). This fuel cell produces electrical energy from an electrochemical reaction between hydrogen gas and oxygen (the fuel and oxidant, respectively) through the catalyst layer on both electrodes and uses a proton exchange membrane as the electrolyte [1].

The PEMFC is widely used as a promising energy conversion device for vehicles and for stationary and portable power systems because of its high power density, energy efficiency, lack of pollutant emissions and low operating temperature [1-5]. The commercialization success of the PEMFC lies in its ability to demonstrate optimal performance in the conversion of fuel to electricity with a high current density [6].

One of the most important components in a PEMFC is the electrode, where hydrogen gas and oxygen are converted to produce electricity and water.

Two important factors that slow the development and commercialization of PEMFCs are cost and durability. The high cost of PEMFCs is largely due to the use of platinum as a catalyst, which comprises 55% of all PEMFC manufacturing costs [7]. Platinum is used as a catalyst because it is very effective in the catalysis reaction and has high chemical stability, exchange current density and work function [8]; however, platinum is expensive and easily poisoned [9]. Therefore, the development of fuel cells is directed to the development of electrodes and reduction of the amount of platinum catalyst [9,10], perhaps even replacing platinum with a non-noble metal, such as Co, in the anode [7]. Although its performance is not as high as that of the platinum catalyst, the use of Co as a catalyst in PEMFCs is promising for decreasing the cost of PEMFC manufacturing.

PEMFC durability remains restricted. For PEMFCs in 2015, the United States Department of Energy (DOE) has a lifetime target of 5,000 h for vehicle energy systems and 40,000 h for stationary power systems. However, the actual PEMFC technology achievements to date are 1,700 and 10,000 h, respectively [11]. Attempts to perform fuel cell durability tests are expensive and require a considerable amount of time. Therefore, researchers have proposed a method called the accelerated test [12-14]. Some durability test standards have been developed by the DOE as well as the fuel cell testing and standardization thematic network (FCTESTNET). In addition to the endurance test, the accelerated test is also used for conditioning or fuel cell incubation to achieve optimum conditions. Depending on the membrane electrode assembly (MEA) type, conditioning can require several hours or even days. Some theoretical aspects and considerations for conditioning include activation and cleansing of the catalyst from impurities, cleaning the remaining catalysts and membranes from the dry and wet membrane electrode structures and activation of the Nafion ion as a proton conductor [15]. A commonly used method involves heating the cell without a gas supply followed by a shortcut connection between the anode and cathode for a few minutes. After hydrogen and oxygen gas flow and the voltage has reached 1.0 V OCV, the fuel cell is placed under load for 6 h. The conditioning process is considered complete when the voltage changes by <1 mV.

Discussion of the electrode structure, components, and manufacturing and characterization methods is very important to highlight the problems related to PEMFC electrodes and how to solve them. Many researchers have attempted to investigate portions of the electrodes to improve the performance and durability of the whole electrode, but there have been few review papers on the whole electrode. Among those who have written a review paper about electrodes is Litster [10], who focuses on CL but has less in-depth discussion of GDL. Additionally, Litster also discusses electrode resistance. In fact, the research on the durability of electrode materials continues to grow because, although the degradation of the PEMFC cannot be avoided, it can be minimized by understanding the mechanism and components that suffer degradation. [12].

This paper intends to review the research that has been conducted and to become a reference for future researchers of electrode problems.

2. ELECTRODE STRUCTURE AND COMPONENT

Electrodes are generally structured with three layers: backing layer (BL), gas diffusion layer (GDL) and catalyst layer (CL) [16]. Some researchers consider the electrode to be composed of only a GDL and CL, with the GDL consisting of two layers, namely a macroporous layer as the backing layer (made from carbon paper or carbon cloth) and a microporous layer (MPL) made from carbon powder and hydrophobic / hydrophilic agents. The electrode structure according to Park [17,18] is presented in Figure 1.

Fig 1. Structure of PEMFC electrode [17,19]

During the preparation of the electrodes, the BL (macro porous layer), GDL (MPL) and CL should be carefully considered. The BL and GDL, as supporters of the catalyst layer, should have the following features: high electrical conductivity, good interaction as a catalyst supporter, high surface area, the ability to repel water and prevent flooding, corrosion resistance and the ability to easily restore catalysis functions [8]. The GDL and CL can be prepared using several methods, including casting, painting and brushing [2,20]; injection molding [3,21]; impregnation [9,22]; spraying [18,23]; thin layer; CCM [24,25]; and electro deposition [26,27].

In addition to serving as electrochemical reaction centers, electrodes must flow electrons from the anode to the cathode. In accordance with this function, the electrode must fulfill three aspects. *First*, the electrode must have appropriate pores for reactants. *Second*, the electrode should have a chemical catalyst to break the bonds of the fuel to form more reactive ions. *Third*, the electrode must conduct electrons to the external circuit. A proper PEMFC electrode structure has three phases: the gas phase reactant, catalyst particles and ionic conductors. Catalyst particles must directly contact the electron conductor. Electrons will flow on carbon in which catalyst particles are immobilized. [28].

In the MEA, the electrodes include an anode and a cathode. The anode is the site of the oxidation of hydrogen into H^+ and electrons that flow to the cathode. Meanwhile, the reduction of oxygen to produce water (H_2O) occurs at the cathode. The reaction that occurs at the cathode is $4H^+ + O_2 + 4e^- \rightarrow 2 H_2O$.

The electrochemical processes forming water in the cathode are shown in Figure 2.

Fig 2. Electrochemical processes forming water at the cathode [10]

Many studies of electrodes specifically discuss the cathode [22,29-47] because a number of considerations, for example, the oxygen reduction reaction (ORR) is slower than hydrogen oxidation [45], require a high catalyst content to maintain an adequate response speed [48], large overpotential and 80% of the causes of the loss of cell voltage [41]. In addition, PEMFC applications (especially for vehicles) require more use of air as the oxidant in the cathode. Because the oxygen content in air is approximately 20%, more oxidant intake is required, and the catalyst has high affinity. Inflow of air as the oxidant brings other impurities that would cause catalyst poisoning. Among the researchers who comprehensively discussed the cathode is Yu [41,42], who described the catalyst activity and durability of Pt / C for PEMFC cathodes.

Meanwhile, many discussions of the anode have focused attention on catalyst poisoning by CO and H_2S gases [49-55]. Meland [55] described three stages of CO poisoning of the anode, namely adsorption / diffusion, the degree of charge transfer and proton hydration. CO can close the active sites of the catalyst and adsorb to the carbon matrix and then reduce the speed of hydrogen adsorption on the electrode surface.

2.1. Gas Diffusion Layer (GDL)

2.1.1. GDL structure and function

In general, the GDL is a mixture of carbon, water, alcohol and polytetrafluoroethylene (PTFE) or other hydrophobic substances. The purpose of PTFE is to facilitate the transportation of gas and water during fuel cell operation under flooding conditions [10,56]. The GDL connects bipolar plates with the CL and consists of a macroporous layer as the backing layer, made of carbon paper or carbon cloth, and a microporous layer (MPL) that is

made of carbon powder and hydrophobic / hydrophilic substances [6,17,18,57,58]. Park [17] and Han [59] considered a GDL that consisted only of a BL to be a monolayer GDL and that containing an additional MPL to be a double-layered GDL. Other researchers have noted that a GDL can consist of a macroporous layer only (without MPL) or with MPL [60,61], and some researchers indicate that the GDL is the BL itself [10,59,62-65].

Carbon powder is one of the most important components in the GDL. Comparison studies of carbon substrates as components of MPL GDL or CL have been conducted by some researchers [8,59,66]. Carbon black Vulcan XC-72R and acetylene black are commonly used as carbon substrates, but there have been developments in the use of nano-sized carbon, such as carbon nanotubes (CNT) and carbon nanofibers (CNF); substrates of MPL filler and catalyst layer-based titanium, tin and silicon are also widely used [8]. Liu [67] investigated the influence of carbon black content (0 to 10 wt%) on the performance of PEMFC and found that the density of carbon paper increases with increasing carbon black content but does not significantly increase the thickness and resistivity of the carbon paper surface. The use of various types of carbon and carbon-based compounds is essentially an attempt to improve the performance and durability of the PEMFC.

The BL has been used as a supporting layer for PEMFC electrodes by several researchers [16,68-71]. In addition to the BL, the term “supporting layer” has also been applied to gas diffusion backing (GDB) [72,73] or gas diffusion media (GDM) [74-77]. The BL is a layer that serves as a retainer and keeps moisture away from the electrodes [78]; it is also a gas diffuser and provides electron and water routes out of the electrode. Carbon-based materials are commonly used as BL for the following reasons: acid resistance, improved gas permeability, good electrical conductivity, elastic character when in the depressed position, and ability to maintain porosity [17]. Thus, the BL must meet several requirements; among others, it must be able to conduct electrons well but be hydrophobic enough to push and drain water as well as to facilitate access to gas transport in reacting with the catalyst layer [79]. In addition, the BL should be sufficiently strong to support the overall electrode layer. Typical BL thicknesses are between 0.2 and 0.5 mm. The carbon substrate in the BL forms macropores with 60 to 90% porosity, 100 to 400 μm (0.1 to 0.4 mm) thickness and 20 to 50 μm pore diameter. The hydrophobic polymer depth seeping into the carbon substrate is between 5 and 40 μm [28].

The macropore substrate in the BL is the largest contributor to the porosity for gas flow and has high electrical conductivity, while the MPL (made of carbon powder and PTFE and located between the BL and CL) serves to reduce the resistance current, arrange the hydrophobicity level and water traffic control [80-83] and prevent the CL from seeping into the BL [59]. Nam [83] has demonstrated the influence of the MPL in regulating water. On the CL side, the MPL enhances catalytic activity by lowering the size and level of water saturation on the MPL-CL interface, while on the GDL side, the MPL reduces the level of saturation to the GDL.

The addition of MPL has been shown to improve GDL performance [57]. Han introduced a GDL with a specific name, CFGDL (carbon-filled gas diffusion layer), that pervades both sides of the carbon cloth with MPL and found that the CFGDL increases the electrical contact between the GDL and bipolar plate and between the GDL and the catalyst layer. Additionally, the CFGDL is a good supporter of the catalyst layer. Han showed that the best composition of PTFE and carbon content in CFGDL is 40 wt% and 6 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectively.

The GDL in the PEMFC have functions as a gas spreader, current collector and water guide [6,18,24,84]. As a gas spreader, the GDL should be porous [59]. In addition, the GDL also serves to transfer heat from the catalyst layer to the current collector [58]. As the current collector, the GDL should be quite conductive, and, as part of the water flows out of the

electrode layer, the GDL should be sufficiently hydrophobic, especially when the fuel cell is working at a high current density and using air as the oxidant [58,72]. Meanwhile, Lin [85] stated that the GDL has three important functions: controlling the water balance in the MEA, providing mechanical support for the MEA and facilitating electrical contact between the electrode and current collector. Further research has been based on hydrophobic and hydrophilic properties, gas diffusion, water management and surface design. According to Arvay [58], the GDL has four main functions, namely (1) providing transmission electrons to or from the CL with a resistivity range of 0 - 0.08 $\Omega\cdot\text{cm}$; (2) providing transport of reactants and products to and from the CL with a typical porosity of 0.7 - 0.8, (3) providing transport heat from the CL to the current collector, and (4) providing the mechanical structure to support the electrolyte. On the CL side, the MPL enhances catalytic activity by decreasing the size and level of saturation of water spots on the MPL-CL interface, while on the GDL side, the MPL reduces the level of saturation through arranging the density level towards the GDL.

A review paper on the GDL by Cindrella [6] discusses the features of the GDL (hydrophobicity, porosity, permeability, transport properties, compaction and structure), its influence on fuel cell performance and manufacturing and coating process. Meanwhile, Park [17] has compiled research on GDL materials and design, and Arvay [58] has discussed characterization techniques. Furthermore, Zamel [64] studied the effective transport properties of the PEMFC and focused on the GDL (structure, diffusion coefficient and thermal and electrical conductivity).

The important factors of the GDL are its structure design, porosity, hydrophobicity, hydrophilicity, gas permeability, water management and surface morphology. Although the manufacturing cost of GDL is not very high, the GDL is influential in determining PEMFC performance.

2.1.2. GDL preparation

Because the GDL function is quite important in determining PEMFC performance, GDL research has grown to encompass composition, manufacturing and characterization methods.

As part of the GDL, BL research has been of interest, especially its manufacturing methods and composition. BL preparation usually uses carbon paper or carbon cloth that is coated with a Teflon emulsion to increase the hydrophobic nature of the layer.

To improve the performance of the BL and MPL, the content of PTFE and other hydrophobic substances and their relationship with conductivity and hydrophobicity are widely studied [74,86-90]. Hydrophobicity is important because the GDL should be able to reveal and flush out water to avoid flooding. PTFE is used to increase mechanical stability and hydrophobicity as well as to avoid the occurrence of flooding and closure of the electrode pores [88]. Lin [56] investigated the influence of adding PTFE to the GDL and found that the addition of PTFE can increase gas and water transportation when fuel cells operate in flooding. Research of the influence of PTFE has also been conducted by many researchers [74,91,92], who found different results about the optimal content of each component that depended on the material used.

In addition to PTFE, other hydrophobic substances commonly used include polyvinylidene fluoride (PVDF) and fluorinated ethylene propylene (FEP). Lim [93] studied the influence of FEP as a hydrophobic substance in the GDL on the performance of PEM fuel cells using the backing layer Toray 090. Meanwhile, Liu [63] used carbon cloth as a BL and PEF as a binder and measured thickness, contact angle, horizontal gas permeability and resistivity. Li [89] used a dimethyl silicone oil (DSO) at the cathode as a hydrophobic substance to prevent flooding, and Wang [62] added sucrose to carbon paper for further

carbonization before adding PTFE. The addition of sucrose increased BL hydrophobicity by reducing the PTFE content.

Attempts to improve GDL performance through increased functionality and hydrophilicity/hydrophobicity have also been performed to improve water management [94]. Chun created two layers of microporosity. The middle layer had hydrophilic properties and at the surface had hydrophobic properties. The hydrophilic layer serves to increase the internal humidity, which improves the performance of a single-cell PEMFC under low humidity conditions, as shown in Figure 3.

Fig 3. GDL polarization curves under different conditions: PA2AML1 for a single MPL, PA2ADL2 for a double MPL with the hydrophilic layer above and PA2ADL3 hydrophilic layer below [94].

In addition to hydrophobic substance types, methods of adding hydrophobic substances have been studied. Chiu [88] introduced a sputtering method to add PTFE to carbon cloth as BL electrodes. Chiu suggested this sputtering method because it is faster and cleaner. Meanwhile, in the normal method, macropores are often blocked by large PTFE molecules that then reduce gas permeability and electron transfer efficiency from the electrode. In addition to the sputtering technique, the placement of hydrophobic substances can be accomplished in various ways, such as dipping, spraying and brushing [17]. Research of the influence of PTFE content on BL and MPL performance revealed the level of hydrophobicity and conductivity and optimum morphology.

The effect of PTFE on carbon cloth is shown in Figure 4.

Fig 4. SEM images of carbon cloth a) without and b) with 15 wt% Teflon [79]

Meanwhile, the effect of PTFE on carbon paper is shown in Figure 5.

Fig 5. SEM micrographs of carbon SGL704E paper (a) before and (b) after hydrophobic treatment (PTFE content: 40%) [57].

In an attempt to obtain high GDL performance, BL varieties have been compared [18]. Park explained the influence of GDL made of carbon paper and carbon cloth with or without MPL and analyzed such properties as porosity, surface structure, hydrophobicity, water absorption, polarization and resistivity. Park also found that carbon paper with 5 wt% PTFE in MPL produces better performance than the commercial carbon cloth Elat-LT-1400W and also demonstrated that the total volume and average pore diameter of carbon paper are larger than those of carbon cloth with the same PTFE content. Meanwhile, Wang [95] has analyzed and compared the performance of carbon paper and carbon cloth in PEMFC and found that carbon cloth is a better choice in high humidity. For dry conditions, carbon paper is better due to its pore structure and ability to retain water that is needed to increase the moisture level of the membrane and ionic conductor.

The structures of several BLs are presented in Figure 6.

Fig 6. Several types of BLs: (a) SGL 10BA, (b) P75 Ballard, (c) SGL 24BA, (d) SGL 34BA, (e) 090 Toray, (f) E-Tek Cloth 'A' [69].

Other studies have investigated the influence of the hydrophobic substance, type of BL and characterization. However, the role of the BL in the mechanism of mass transport of

reactants and products has not been widely discussed. In addition, the sintering time and temperature have also not been reviewed.

The addition of carbon substrates and different types of BL in the preparation of GDL will generally influence GDL thickness. The influence of carbon content on the performance of the PEMFC substrate was studied by Liu [67], while the influence of BL thickness on MEA performance has also been studied [85]; the results are shown in Figure 7.

Fig 7. Influence of GDL thickness on the performance of the MEA. #1. 330 μm , #2. 250 μm , #3. 210 μm , #4. 170 μm , #5. 130 μm [85].

Lin found that a GDL with a thickness of 330 μm and larger pore radius has the highest current density with 3.0 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ carbon content compared with thinner layers. Meanwhile, Lee [96] has also studied the influence of the thickness and porosity of the GDL on PEMFC performance. Lee manufacturing GDL by rolling, spraying and screen printing, which causes different GDL thickness and porosity. Lee also found that GDL with thicknesses above 300 μm have relatively better performance and that spraying and screen-printing methods result in better performance than the rolling method.

Fig 8. SEM images of GDL produced by (a) rolling, (b) spraying and (c) screen printing methods [96].

Research on the GDL manufacturing process, especially the process of MPL implantation in BLs, has been performed with coating [82,93,97], screen printing, [96] and spraying methods [16,19]. One spray method that has been studied is the robotic spraying technique [98]. Celebi [99] made GDL by pasting CNF on carbon paper using a homogeneous deposition precipitation (HDP) nickel method. The use of nickel with the HDP method proved successful for CNF deposited on one side and allows adjustment of the GDL thickness.

Among the MPL manufacturing processes, Chen [100] impressively compared the manufacturing of MPL for GDL with wet and dry methods. Chen found that MPL made by the dry process has better performance, especially when the fuel cell operates with high oxygen consumption and at high humidity levels. Additionally, the mass transportation is even better. The dry method produces more mesopores, higher electrical conductivity and more stable hydrophobicity (Figure 9 and Figure 10). The dry method is accomplished by mixing Vulcan XC-72 carbon and PTFE with powder content of 30 wt%, which is placed on carbon paper and heated at 240°C for 30 min and then sintered at 340°C for 30 min.

Fig 9. Performance comparison between the dry method and wet method at the speed of 70 wt% oxygen consumption [100]

Fig 10. Comparison between MPL produced with (a) wet and (b) dry methods with carbon content of 0.1 $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}$ [100].

2.1.3. GDL characterization

In general, GDL characterization is divided into two method classes: ex-situ (GDL separately) and in-situ (in a fuel cell system). Ex-situ methods include electrical and thermal conductivity, mechanical properties (tensile strength, compressibility and bending properties), porosity and pore size distribution, gas permeability, surface morphology, cross-

sectional morphology, contact angle and surface energy, cyclic voltammetry, simulation, and modeling; in-situ methods include measuring impedance, water transfer, modeling and simulation [58]. Studies of gas permeability and anisotropy for several types of GDL in various directions have been performed [101] and found that the in-plane direction for various types of GDL has a larger gas permeability than the through-plane direction. In addition, GDL with uniform fiber expressions have a greater degree of anisotropy.

Radhakrishnan [102] analyzed stress reduction, performed compression tests, and measured channel intrusion and electrical resistivity for carbon paper and carbon cloth to compare their performances. He found that the through-plane resistivity of carbon paper is higher than the resistivity of carbon cloth. In contrast, the in-plane resistivity of carbon paper is lower than that of carbon cloth. Associated with the influence of intrusion, Radhakrishnan found that the intrusion of carbon paper is smaller than that of carbon cloth. However, according to Yang [103], carbon cloth is more practical as a BL than carbon paper because of its compressibility, elasticity, and flexibility. One of the advantages of carbon paper is its more even distribution and more delicate structure, but it is easily broken and must be carefully handled. Basically, carbon paper and carbon cloth perform well when tested for thermal and chemical stability for use as a BL in a PEMFC.

The influence of the BL and GDL on fuel cell performance is widely studied, such as by Ismail [92], who investigated the influence of PTFE addition on GDL electrical conductivity and found that GDL with 50 wt% PTFE content performs better than GDL with 25 wt% PTFE content in the case of in-plane conductivity. Ismail and Zhou [48] found that in-plane conductivity is more useful for determining the conductivity of BL than through-plane conductivity.

Zhou [48] studied the influence of GDL conductivity on fuel cell performance and found that performance improved with higher conductivity. In addition, through-plane conductivity influenced ohmic losses, and in-plane conductivity affected overpotential and local current density. In addition to the influence of conductivity, Zhou also investigated the influence of GDL thickness on current density and found that the pattern of its relative characteristic was no different with increased thickness. However, if the thickness of the GDL reduced, then the current density decreased drastically in the shoulder and back to normal at the channel. Meanwhile, Ismail [92] explained the effect of adding PTFE on GDL conductivity with a carbon paper BL; he found that PTFE content influences the in-plane conductivity of the GDL. GDL with in-plane conductivity along different perpendicular directions produce double conductivity. Ismail also found that an increase of PTFE content in the MPL was not related to the conductivity. MPL conductivity with PTFE content of 50 wt% is greater than that of MPL with 25 wt% PTFE content. In different conditions, Park [74] investigated the influence of PTFE content in the BL (defined as GDM) for gas permeability, pore diameter, and I-V performance in a single cell; he found that the gas permeability and pore diameter increased up to a certain rate and then declined with increasing PTFE content. Park also found that increasing PTFE content does not have a positive impact on the I-V performance for high water condensation level on the boundary surface of the GDM with the CL.

Characterization of carbon paper and carbon cloth based on pore size has been reported by Zhao [104] and is shown in Figure 11.

Fig 11. Pore diameter of a. carbon paper and b. carbon cloth [104].

Based on Figure 11, the pore diameter of carbon paper is smaller than that of carbon cloth, but the pore capacity of carbon paper is larger.

The influence of temperature on the electrical resistivity and tensile strength of BL was studied by Zhang [105], who observed from SEM and XRD that the electrical resistivity and tensile strength decreased with increasing temperature.

Studies of GDL have been accomplished before and include such areas as characterization and manufacturing [6,58], material and design [17] as well as the properties of mass transport, heat, and power [64]. All studies contribute to the understanding of GDL structure, design and function.

2.2. Catalyst Layer (CL)

2.2.1. CL components and function

Appropriate to its name, the CL in the electrode is the layer that catalyzes the conversion reaction of hydrogen and oxygen to water and electricity. The CL generally consists of a catalyst, carbon substrates, hydrophobic substances, and an ionomer from electrolyte, such as Nafion. The catalyst has an important role in accelerating the oxidation of hydrogen gas and reduction of oxygen gas to water, while the Nafion ionomer provides access for H^+ ions to pass through from the anode to the cathode side [106]. The CL thickness is between 5 and 100 μm , with a porosity of 40 to 70%, and the catalyst should be well dispersed with a particle size of 1 to 10 nm [28]. Carbon-based materials are used as catalyst substrates because of their high conductivity; examples include carbon powder, graphite, and active carbon. Marie [107] introduced the use of carbon aerogels as a CL substrate with larger porosity and surface area compared to carbon black. Depending on the thickness of the electrode layer, catalyst loading on the catalyst layer is between 0.01 and 5 $mg\ cm^{-2}$.

Hydrophobic substances in the CL serve as a catalyst binder and keep the CL hydrophobic but still flowing. To bind the catalyst and increase hydrophobicity, PTFE is generally used [108]. Thus, the high absorption of reactant gas and hydrophobic state should be optimized carefully so that a CL is produced with a high level of catalyst needs. In addition, the durability of the catalyst is an important design constraint [10].

The CL should be able to facilitate the effective flow of electrons generated or absorbed by the electrochemical reaction in a given situation and should be able to drain H^+ ions from the anode to the membrane. Therefore, the Nafion ionomer is added to the CL. There are several properties of the catalyst layer that should be optimized to produce desired performances of the catalyst material, including the level of adsorption of reactants, hydrophobicity levels, and transmission of ions and electricity [10].

2.2.2. Catalyst in the CL

The catalyst in the PEMFC accelerates the reaction of chemical energy conversion in the fuel and oxidant into electricity and water. The catalyst must have several features, including high internal activity (especially for the cathode), high electrical conductivity, and environmentally friendliness.

The PEMFC catalysts can be grouped into three categories: platinum-based catalysts, platinum-based catalysts modified by adding other metals, such as Cr, Cu, Co or Ru, and non-platinum-based catalysts, such as non-noble metal or organometallic catalysts [109]. Because platinum is still the most effective catalyst used in PEMFCs, the research of platinum-based catalysts in PEMFCs dominate research, either related to the influence of Pt content and particle size [9,110], the type of carbon substrate [35], CL placement or manufacturing [22,39,106,111-115], the influence of the solvent [4,116,117], the influence of hydrophobic substances [37,108], catalyst and CL characterization [118], the effect of porosity [119], the effect of surface structure and layers [31,32], modeling and optimization

[45,120], degradation and durability of Pt [1,41,109,121-123], or the expansion of Pt catalysts on carbon nano-tubes [124].

The use of platinum alloy is intended to reduce the content of Pt catalysts without significant loss of catalytic performance. Examples of Pt alloy catalysts that include other metals are Pt-Ru [125], Pt-Co [36,126], Pt-Pd [38,127], Pt-Ru-Co [128], Pt-Co-Cr [129] and the combination of Pt with Fe, Co, Cu and Ni [130]. It has been reported that the use of metal alloys can improve the performance of the catalyst [41] because the presence of other metal alloys with Pt can increase the size of the catalyst's active site. However, the durability of the catalyst remains to be proven.

The use of non-platinum catalysts remains a challenge for researchers and is a barrier to the development of fuel cell catalysts. Platinum is an expensive catalyst and is easily poisoned. Non-platinum catalysts have been attempted, including 5,10,15,20-tetrakis-(4-methoxy-phenyl)-porphine cobalt (II) [46], Ir-V alloys [131], cobalt-based catalysts [7], nitrogen-based catalysts [132], catalysts based on metal carbide and other metal oxides [50], and catalytic iron acetate [133]. Faubert reported that 0.2 wt% Fe absorbed in perylenetetracarboxylic dianhydride (PTCDA) in the cathode has a very similar performance to the cathode using a platinum catalyst with 2 wt% content in MEA (1 cm²). Specific nitrogen-based catalysts have been studied by Wong [134] in the development of a nitrogen-based carbon catalyst.

2.2.3. Polymer ion content in the CL

Conductive polymer ionomers, such as Nafion, contribute to improving the performance of the electrode. A Nafion ionomer placed on the CL helps H⁺ ions flow from the anode to the polymer membrane and then through the cathode [135]. In addition to serving as the proton transmitter, ionomer polymers also function as a CL binder and provide hydrophilic groups to retain moisture and its ionic post [25,136]. Increasing the amount of Nafion in the CL has two utilization effects: improvement of the electrochemical active surface and enhancement of the ion conductivity in general. However, there is an optimal threshold amount of Nafion that could be added; if the amount is too small, it will limit the entrance of the proton delivery to the membrane, and if the amount is too much, absorption and flow of gas will be negatively impacted [10,22]. Passos adopted the implantation of the catalyst layer on the membrane, using a Nafion solution with different content levels, from 10 to 40% dry weight, calculated from the total weight of the catalyst layer. Passos found that there is an increase in the current of hydrogen desorption and the platinum active surface area with increased percentage of Nafion. Several researchers had sought to observe the effect of Nafion ionomer addition [25,137,138]. Lee [137] studied the effect of adding the Nafion ionomer on the surface and compared it with addition of Nafion in the CL; he found that the distribution of Nafion on the surface results in better performance than Nafion distributed inside the CL. Meanwhile, Zhang [31] introduced the influence of Nafion on the dual-bonded PEMFC cathode structure, and data show that the reduction rate of Nafion in the CL hydrophobic layer improves electrode performance. Chaparro [138] discovered that the optimal Nafion ionomer content for the cathode with the electric spraying method is 15 wt%. The influence of the Nafion content on catalyst activity was characterized by Lai [139], who concluded that the optimum Nafion content based on I-V test and EIS is 1.0 mg.cm⁻², and the interface resistance is very closely linked to the three-phase region (nutrient response, electrolytes and catalysts). In addition, previous research by Sasikumar [140] attempted to investigate the dependence of the optimum Nafion content on the catalyst content. He found that a low catalyst content requires more Nafion. In addition, the Nafion content is not related to the thickness of the

membrane. Ahn [136] investigated the influence of the Nafion ionomer equivalent weight and showed that ionomer polymers with a low equivalent weight are ideal in low humidity to maintain moisture and ionic conductivity due to the greater number of sulfuric acid functional groups.

Fig 12. Schematic planar representation of the catalyst layer. The Nafion ionomer was incorporated within the catalyst layer on its surface (A), inside (B) and both together (C). [137]

2.2.4. Manufacturing of CL

Improvement of CL performance has been attempted, either through selection of catalyst type and content, manufacturing method, or ionomer type and content. CL manufacturing has grown based on recent research developments and views. Some methods of manufacturing electrocatalysts, including their advantages and disadvantages, are described by Park [141]. According to Park, the thin layer method in CL manufacturing is effective in the use of Pt catalysts but, for a micro-PEMFC application, proved not effective because of the greater required Pt content. For the electrodeposition method, the required amount of Pt is lower, but the method is doubted for actual utilization. Meanwhile, the sputtering method has the ability to deposit Pt directly to various types of MEA with ultra-low Pt loading. However, low consumption and low Pt function remain restrictions. If these problems can be overcome, then the sputtering technique will be a promising technique for the future. The other method is the dual IBAD method, which combines the electro-spray technique and Sol Pt with the ultra-low Pt loading method, with optimal use of Pt. Meanwhile, Lee [96] notes that the spray technique is more advantageous than the brush technique to reduce the charge transfer resistance and extend the three-phase region. Hwang [142] also discovered that the screen printing technique is more satisfactory than the spray and other techniques. The screen printing technique can be used for large-scale production of MEA.

Casting methods other than the Doctor Bladed standard method of pasting polyphosphoric acid (PPA) on the membrane media for PEMFC with high operating temperatures are performed by Harris [143], who found that the slot die extrusion method is advantageous for cost effectiveness, continuity, and uniformity. The casting method is generally chosen because of simplicity, ability to make various shapes and sizes, as well as relatively low cost.

The spraying method has been used by many researchers [98,138,144,145] due to advantages in terms of convenience (especially for multi-layer), uniformity, and high performance. Meanwhile, the electrocatalyst manufacturing method with galvanostatic pulses [146] and preferential pulsed electrodeposition (PED) [113] has already been explored. Although the performance results are relatively low, the idea of optimizing the Pt catalyst can be considered.

Among the several manufacturing methods of the electrode catalyst layer, Abaoud [111] introduced a hybrid or mixed technique (combination of spray and screen printing methods) in the manufacturing of the CL. Abaoud found that the performance of electrodes made with the hybrid method is better than those of electrodes made with either only screen printing or only spray method. A diagram of electrode manufacturing using the hybrid method is presented in Figure 13.

Fig 13. CL manufacturing diagram using the hybrid method [111].

Song examined the influence of PTFE in ink on the CL with a new CCM performance-modified method [108]. Catalyst ink containing platinum and PTFE in various

concentrations was first sprayed on a layer of aluminum foil and then sintered at 340°C before being pasted on a Nafion 212 membrane and pressed with a heater. Song emphasizes his research of the influence of PTFE content on electrochemical activity, hydrophobicity, and ohmic resistance; the optimal reported PTFE content is 5 wt%. A large PTFE content increases not only hydrophobicity but also ohmic resistance. Similar research has focused on the cathode and investigated the influence of PTFE and CL pattern [37]. Therdthianwong found that a chess pattern results in higher performance than a stripe pattern at a catalyst content level of 0.5 mg cm⁻².

One study sought to improve the performance of the catalyst layer by using the electro spray deposition method with different platinum and ionomer content levels [138]. Chaparro found that the optimum Nafion ionomer content was 15%, as shown in Figure 14.

Fig 14. Polarization curves corresponding to MEAs with cathodes deposited by electro spray with different indicated amounts of ionomer in the catalyst layer (values are given as weight percentage within the catalyst layer). Pt cathode load: 0.20 mg cm⁻² [138].

Chaparro showed that the electro spray method is not significantly different from the conventional method (brushing) in terms of fuel cell performance at the same catalyst content level but requires slightly more ionomer content.

Antolini [147] discussed the types of fuel cell carbon backing catalysts and their activities. Contrary to some researchers, Antolini states that carbon mesopores (pore size 2-50 nm) gave better results for the placement of Pt particles than micro- (<2 nm) or macropores (>50 nm). The mesoporous structure facilitates mass transfer well. All discussion leads to efforts for improving the performance of the catalyst layer.

Meanwhile, Wee [112] has compiled research on the various available methods of manufacturing catalyst layers with low Pt catalyst contents. Wee discussed the modified thin layer, electrodeposition, sputtering deposition, dual ion-beam deposition, and electroless deposition methods. According to Wee, the use of catalysts with a low Pt content is intended to reduce MEA manufacturing costs and PEMFC weight. Reduction of Pt content depends on the manufacturing method, substrate content and electrode structure.

Other than research on the influence of the material content and operation conditions, the structure of the CL layer has already been studied. The CL layer generally consists of a layer comprising a catalyst component, hydrophobic substances, and electrolyte ionomer components. A CL with two layers has been studied [34,148], with an increase in the performance compared to the CL with only one layer. Additionally, a CL with three layers has been manufactured [145]. The use of a CL with three layers is intended to reduce the interface resistance between the CL and GDL in the first layer and between the CL and membrane electrolyte in the second and third layers.

3. ELECTRODE DEGRADATION AND DURABILITY TESTS

Degradation is a very important topic that must be addressed in a PEMFC because it can cause a decrease in the lifetime of the fuel cell. Degradation is divided into three groups: baseline degradation that occurs because of long-term application, which is irreversible and cannot be avoided; degradation that occurs due to repetition or operating conditions; and degradation that occurs when fuel cells experience adverse operating conditions, such as lack of fuel [149]. Many researchers have sought to understand the degradation mechanism of each component to overcome the speed of degradation of the fuel cell as a whole.

Based on research results, degradation often occurs in the GDL, platinum catalyst and the CL, carbon supporter, membranes and bipolar plates [12,150,151]. In addition to the

above factors, degradation can occur due to inefficient water management, which will lead to flooding or even dehydration, poisoning the fuel and oxidant [150]. GDL degradations occur because of the oxidation of carbon, PTFE decomposition and mechanical degradation [12,151]. Meanwhile, the degradation of the CL includes catalyst maturation, loss or transfer of catalysts, corrosion of carbon, electrolyte and interface degradation [109], and decrease of the catalyst active surface area due to catalyst agglomeration occurring mainly in the cathode [152]. The degradation of PEMFC as a system was previously studied by Wu [151], questioning degradation in terms of mechanisms and strategies to overcome them. Other topics of study have included the degradation of the membrane, catalyst and catalyst layer, and the GDL and bipolar plate. The degradation of the catalyst and catalyst layer includes catalyst contamination by impurities, loss of activity due to the sintering process, catalyst migration to the carbon substrate and catalyst dissolution to the membrane layer.

When the catalyst or the CL is degraded, the change in catalyst particle size generally cannot be observed in fuel cell operation conducted at constant voltage and current as long as the operation is running. However, the degradation of the anode will appear when the fuel cell is used for long periods of time, while at the cathode, the particle size grows with increasing temperature, length of tests, potential and moisture [152]. The Zhang study [109] of platinum-based CL degradation is quite comprehensive, covering the causes of the degradation of the CL and its components, equipment, diagnostic methods and strategies to reduce or overcome.

The general degradation in MEA, especially in multi-stack, is polarity reversal during fuel cell operation that will cause permanent damage [153]. The main cause of polarity reversal is a lack of reactants and fuel at the anode, while the fuel cell receives load. Taniguchi has tested the influence of air and fuel shortages.

One factor that causes a decline in the PEMFC life for vehicle applications is rapidly changing vehicle operating conditions, such as changes in the loading cycle, high power conditions, idling condition and the cycle of turning the vehicle on and off. Yu [11] has covered the causes, consequences and ways to overcome the performance degradation of PEMFC due to the influence of turning the fuel cell on and off.

Another matter that needs attention is increasing the durability of PEMFC equipment. Wu [151] explained PEMFC performance degradation mechanisms and mitigation strategies. The worst-performing areas observed by Wu were the membrane, CL, GDL and bipolar plate.

To increase MEA endurance, an MEA durability test was performed by Zhang [13] through the Accelerate Stress Test (AST). There are three clusters of research that examine MEA durability: 1) investigation and experimental validation, 2) mathematical modeling, and 3) performance degradation handling strategies. Tanuma and Terazono [154] used hindered amine light stabilizers (HALS) to increase the lasting power of MEA and proved that it increased drastically. The HALS amino group reacts with the carboxyl group at the BL, forming complex compounds that can slow the formation of hydrogen peroxide during fuel cell operation.

4. ELECTRODE CHARACTERIZATION AND PERFORMANCE TESTS

Electrode characterization and performance tests are important stages to assess the suitability level of the electrode to be used. Common electrode characterization and performance tests are described below.

4.1. Conductivity

The conductivity of PEMFC electrodes is divided into two categories: electrical and ionic. Electrical conductivity is a measure of the electrode's ability to conduct electrons from the CL to the GDL and then to the bipolar plate. The measured electrical conductivity consists of through-plane and in-plane conductivity. Unlike through-plane conductivity, data for which are usually provided by the GDL manufacturer (depicting the conductivity level of the GDL conducting the electrons), in-plane conductivity is highly important to properly describe the ability of the GDL to conduct electrons on every surface to the bipolar plate. Meanwhile, ionic conductivity describes the electrolyte membrane's ability to conduct H^+ ions from the anode to the cathode. These two conductivity parameters contribute significantly to the performance of the PEMFC. Ismail [92] investigated the influence of PTFE content on the through-plane and in-plane electrical conductivity. Meanwhile, Mironov [155] has compared two methods of electrical conductivity measurements: four electrode (FE) and four-point electrode (FPE) methods. The influence of conductivity on the conduit and floor section from GDE has been measured [156]. Zhou [48] has modeled the electrical resistivity influence on GDL performance and demonstrated that the electrical resistivity of the GDL can be ignored. Meanwhile, the characteristic research of the ionic conductivity of sulfonated polyarylenethioether sulfones as the electrolyte membrane fuel cell was conducted by Bai [157], and the data show that ionic conductivity depends on temperature and humidity.

One way to improve the electrical conductivity of PEMFC is to increase the pressure pins between components. However, the increase in pressure should be maintained such that no component damage occurs or the traffic of the reactants in the GDL is reduced [158].

4.2. *Hydrophobicity*

Many researchers are interested in hydrophobicity because it can influence the water rejection rate of the electrode components. Water molecules should continue to the outer layer and cannot be retained in the pores of the BL, GDL or CL because it can inhibit reactant gas flow and cause flooding. For that reason, the electrodes should be sufficiently hydrophobic. In addition to the use of PTFE, the influence of PEF hydrophobic substances in the GDL on PEMFC performance has been studied [63,93]. Meanwhile, Li [89] investigated the effect of adding the hydrophobic substance dimethyl silicon oil (DSO) on PEMFC cathode performance and found that a DSO content level of 0.5 mg.cm^{-2} is optimal. Several other researchers focused on the influence of CL hydrophobicity on PEMFC performance; Yu [159] investigated the hydrophobicity of the CL and its influence on PEMFC performance. Interestingly, Yu investigated the influence of time against hydrophobicity, and hydrophobicity was observed using ESEM; observations were confirmed by measuring the contact angle. Meanwhile, Chun [94] analyzed the contact angle of both a GDL double layer consisting of hydrophobic and hydrophilic layers and a GDL single layer in the order shown in Figure 15; contact angle observations are also shown in Figure 16.

Fig15. GDL structures with single- and double-layer MPL: (a) PA2AML1, (b) PA2ADL2, (c) PA2ADL3[94].

Fig 16. MPL contact angles: (a) PA2AML1, (b) PA2ADL2, (c) PA2ADL3[94].

Hydrophobicity is measured using a contact angle meter, which measures the contact angle of water molecules with the substrate surface. Greater contact angles imply higher hydrophobicity.

4.3. Porosity, Surface and Particle Analysis

Porosity in the electrode, including the BL, GDL and CL, is important for the transportation of reactants and products for the reactions at the electrodes [59]. Porosity also regulates traffic between oxygen gas entering the electrode and water leaving the electrode. When porosity is balanced with adequate levels of hydrophobicity, oxygen will be able to pass through the pores even while water is exiting [6]. The influence of pore structure on PEMFC performance gained the attention of Yoon [119]. Good pore structure will facilitate both the flow of oxygen to the reaction zone and the release of water. Some researchers have more deeply studied the influence of porosity on electrode performance, based on size or distribution of pores. Jordan [66] compared the influence of the use of acetylene black (AB) carbon powder and Vulcan carbon black XC-72 by examining the performance of electrodes based on pore size caused by the two types of carbon and found that the use of AB was superior because the more effective transportation mechanism of the reactants. Meanwhile, Huang [160] modeled the effect of porosity gradients on the performance of the electrode. From the data, Huang determined that the porosity gradient aids in transfer of condensate water, increases oxygen consumption and can reduce the level of stress reduction.

Porosity and surface structure were analyzed using SEM (scanning electron microscopy). In addition to the pore structure and surface, SEM can also determine the thickness and cross section structure of the electrode. Usually, SEM is combined with energy dispersive X-ray (EDX) measurements, which allow elemental analysis on the surface of the sample. EDX is a very valuable technique that analyzes changes in the elemental composition of a fuel cell layer, either as a result of particle migration, growth and wash-up of catalyst particles or contamination of fuel cell components due to operation [161].

In addition to SEM, the CL structure can be characterized using TEM, XPS and XRD [162]. TEM analysis is very useful for analyzing the structure of the fuel cell because it can reveal the spatial distribution of each component and analyze the composition of the local area at the nano or atomic scale [163]. TEM has three main important advantages as a material characterization technique. First, TEM can capture images of material structures with atomic-level resolution. Second, TEM has a steady theoretical basis for image analysis. Third, TEM is capable of microanalysis when combined with spectroscopic methods. For example, TEM can be combined with EDX spectroscopy and thus provide more information on the major disadvantages of a material. The weakness of TEM is the difficulty of preparing samples and sample damage caused by high-energy electrons. Studies using TEM analysis include references [35,125,128,131,146,164,165].

XPS is an internal characterization tool that uses monochromatic X-ray radiation. The full energy of the X-ray is transferred to an electron in an inner energy layer, which causes electrons to leave the surface. Photoelectron energy comes from the X-ray and is the energy required to leave the surface. The energy required to escape from the surface depends on the type of atom. Studies using XPS analysis include references [35,128,129,144].

X-ray diffraction (XRD) is the most widely used technique in materials characterization. It is a non-destructive technique that reveals detailed information about the chemical composition and crystallographic structure of natural materials and synthetic substances [166]. XRD is a rapid and important method for determining the stability of the catalyst by calculating the size of the metal particles. Catalytic activity is highly dependent on the shape, size and distribution of metal particles. In addition, catalyst supporters also have a role in improving catalytic function. X-ray diffraction and electron microscopy can both provide information about particles smaller than 10 nm. However, XRD analysis provides

information about the size of fine crystals instead of the actual particle size, while TEM yields local information generated from the results by calculating the average volume [164]. The use of XRD analysis in the development of fuel cells includes Pt/C catalyst characterization using various types of carbon [35,125], characterization of non-platinum catalysts [131,165], testing of the catalytic activity and durability in the liquid electrolyte [164], characterization of the resultant catalyst [128], influence of catalyst content on a thin layer of electrode [167], and electro-kinetic oxygen reduction [168].

4.4. *Electrochemical Performance*

Electrochemical characterization and performance tests of the electrode, especially in the CL, are accomplished in various ways, including cyclic voltammetry (CV), linear sweep voltammetry (LSV), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

CV is an important technique that is used often in electrochemical analysis because it offers a wide range of experimental information and insight regarding the kinetic and thermodynamic aspects of chemical systems. CV methods are used in fuel cell electroanalysis to calculate the electrochemical active area in the catalyst layer, estimate the limit of catalyst oxidation, and analyze catalyst activity. CV analysis can be performed with in situ or ex situ methods. The in situ method uses a two-electrode configuration in which the analyzed electrode is the working electrode, and the other electrode is used as the reference and counter electrode. The in situ method has been widely used to determine the electrochemical active area and analyze the use of catalysts in PEM fuel cells. Meanwhile, the ex situ method uses three electrodes: the analyzed electrode is a working electrode, the counter electrode is a second electrode, and a calomel electrode is the reference electrode. The ex situ method can simply and quickly screen electrocatalysts, but it is not suitable for the assessment of fuel cell electrodes under different operating conditions [161]. Analysis to test electrode performance with CV has performed by many researchers [9,118,131,164,168-170].

LSV is the most frequently used technique to estimate the gas crossover events that pass through the membrane in a PEM fuel cell, membrane deterioration, and short circuit detection. LSV can be used directly in various fuel cell operating conditions [146]. During the test, the linear potential of fuel cell electrodes is scanned to obtain limited current, which is useful for calculating the rate of cross-hydrogenation. This test can be performed online without disassembling the cell system. Thus, the gas cross rates provided by LSV reflect the realistic membrane situation under actual working conditions. Due to its convenience and suitability, LSV has become a basic test method for determining the suitability of materials when evaluating a new membrane. During deterioration tests in the worst scenarios or long-term fuel cell operation, LSV can be easily used before and after surgery or during any period of operation to assess the evolution of gas crossover. Lee [162] conducted galvanostatic analysis of single- and multi-cells in situ without needing to disassemble the MEA.

EIS is quite widely used by researchers for characterizing and testing PEMFC [171]. EIS can be operated without damage, providing detailed diagnostic information on electrochemical phenomena included in the load transfer reactions at the electrode and electrolyte interface, the reaction mechanism and the electrode material properties. EIS has been used in PEM fuel cell studies with the following goals: (1) to provide microscopic information about the fuel cell system, which in turn can help in structure optimization and selection of the most suitable operating conditions, (2) to equip the system model with an appropriate equivalent circuit and obtain electrochemical system parameters, (3) to distinguish the individual contribution of each component, which can help in identifying problems in fuel cell components, and (4) to identify individual contributions to the total

impedance of the PEM fuel cell from the processes of different electrodes, such as interface charge transfer and mass transport in both the catalyst and supporting layer [172].

There is at least one review of the EIS method, which can determine the disability that results from the kinetic process, ohmic loss, and mass transfer, and has also successfully distinguished the influence from various processes [173]. Other researchers have used EIS in PEMFC characterization for a large number of purposes: PEMFC multi-stack analysis operated in various conditions and loading [174], PEM fuel cell diagnosis [172,175,176], correlation of capacitance with catalyst active area and ion transportation properties with ionic conductivity [177], analysis of high-temperature PEM fuel cells [178,179], characterization of anti-flood in the CL [180], testing of the CL through introduction parameters [176], characterization of PEMFC failure [181], evaluation of the MPL [182], GDL compression investigation on ongoing fuel cells [183], determination of the membrane proton's post force at frequencies 1-300 kHz using a swing voltage [184].

5. WATER MANAGEMENT

Water management in the electrode cannot be ignored. Water is needed to hydrate the electrolyte membrane and accelerate H^+ circulation on the CL; for these conditions, adequate amounts of water are necessary. However, the presence of too much water will cause flooding that can cover the pores on the GDL and CL. Thus, the organization and management of water is a very important topic [185]; water management was one of the most important issues in the commercialization of PEMFC in connection to ensure high proton conductivity from the electrolyte membrane and sufficient supply of reactants to the reaction center [186].

Reactions in the PEMFC produce electricity, water and heat. The heat generated is the energy lost due to the conversion of chemical energy in the fuel and oxidant into electrical energy that cannot be completely held. The heat produced will evaporate water in the reaction system, causing drying, particularly on the membrane. Perfluorosulfonic acid (PFSA) membranes, such as Nafion, have their protonic post force in the hydrated state. Increasing the reaction heat will accelerate the drying membrane and thus decrease the PEMFC performance as a result of increasing the resistance in the membrane. For this reason, adequate membrane hydration without causing flooding is an important aspect in water management [186].

The GDL must regulate traffic, quantity of reactants, and water management. The mass transport mechanism in PEMFC electrodes is illustrated in Figure 17.

Fig 17. Mass flow diagram in PEMFC electrodes [185].

The role of the MPL in regulating water can be seen in Figures 18 and 19.

Fig 18. Cathode structure a) without and b) with the MPL [83].

Fig 19. Mechanism of water transport in the CL and membrane [187].

Some studies that specifically discuss water management include the use of X-ray imaging in evaluating PEMFC water management [188], characterization of water produced at different operating temperatures [189], water removal in the anode as a diagnostic tool to check flooding in PEMFC cathodes [61], characterization of water transport in the GDM [75,190], study of water transfer from the GDL by reactant flow [191], and the study of water in the liquid form in PEMFC [192].

Some water management considerations from conducted research are summarized below.

- a. The MPL must have a higher level of hydrophobicity and smaller GDL pore size (in this case, the BL) to prevent flooding at the electrodes. The small pore size (especially at the CL-MPL interface) prevents the growth of water droplets and reduces the saturation level at the CL-MPL interface [83].
- b. Water balance was critical to not only the performance but also the durability of PEMFC [187].
- c. When water begins condensing, it flows through capillary pressure, determined by the pore radius and hydrophobic level.
- d. The production of hydrophobic material is one of the criteria that facilitate water management [63,88,93,94,159,180].

CONCLUSION

Electrodes are one component of the MEA of PEMFCs that have a very important function and role. The electrodes are the site of the electrochemical conversion of hydrogen and oxygen gas to electricity and water. However, the electrochemical process that occurs is not simple because it involves the mass transfer of materials and reaction products as well as electrons. Therefore, an understanding of the structure and function of each component, manufacturing method, characterization and testing of electrode performance, and durability is highly critical. Information about the research focused on the electrode will be a key part of the effort to improve electrode performance. This review study was able to provide information about the prior research of electrodes.

ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support for this work from the Universiti Kebangsaan Malaysia under DIP Grant (DIP-2012-05) and Ministry of Education Malaysia under LRGs Grant (LRGS/2013/UKM-UKM/TP/01)

Reference

- [1] Z-B Wang, P-J Zuo, Y-Y Chu, Y-Y Shao, G-P Yin (2009) Durability studies on performance degradation of Pt/C catalysts of proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 4387-4394.
- [2] WRW Daud, AB Mohamad, AAH Kadhum, R Chebbi, SE Iyuke (2004) Performance optimisation of PEM fuel cell during MEA fabrication, *Energy Conversion and Management* 45: 3239–3249.
- [3] EYK Andr´e D. Taylor, Virgil P. Humes, Jeremy Kizuka, Levi T. Thompson (2007) Inkjet printing of carbon supported platinum 3-D catalyst layers for use in fuel cells, *Journal of Power Sources* 171: 101–106.
- [4] M Chisaka, H Daiguji (2006) Effect of glycerol on micro/nano structures of catalyst layers in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Electrochimica Acta* 51: 4828-4833.
- [5] JH Nam, K-J Lee, G-S Hwang, C-J Kim, M Kaviany (2009) Microporous layer for water morphology control in PEMFC, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 2779-2791.
- [6] L Cindrella, AM Kannan, JF Lin, et al. (2009) Gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells--A review, *Journal of Power Sources* 194: 146-160.

- [7] GS Tasic, SS Miljanic, MP Marceta Kaninski, DP Saponjic, VM Nikolic (2009) Non-noble metal catalyst for a future Pt free PEMFC, *Electrochemistry Communications* 11: 2097-2100.
- [8] S Sharma, BG Pollet (2012) Support materials for PEMFC and DMFC electrocatalysts—A review, *Journal of Power Sources* 208: 96-119.
- [9] Y-H Cho, H-S Park, Y-H Cho, D-S Jung, H-Y Park, Y-E Sung (2007) Effect of platinum amount in carbon supported platinum catalyst on performance of polymer electrolyte membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 172: 89-93.
- [10] S Litster, G McLean (2004) PEM fuel cell electrodes, *Journal of Power Sources* 130: 61-76.
- [11] Y Yu, H Li, H Wang, X-Z Yuan, G Wang, M Pan (2012) A review on performance degradation of proton exchange membrane fuel cells during startup and shutdown processes: Causes, consequences, and mitigation strategies, *Journal of Power Sources* 205: 10-23.
- [12] X-Z Yuan, H Li, S Zhang, J Martin, H Wang (2011) A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols, *Journal of Power Sources* 196: 9107-9116.
- [13] S Zhang, X Yuan, H Wang, et al. (2009) A review of accelerated stress tests of MEA durability in PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 388-404.
- [14] S Vengatesan, MW Fowler, X-Z Yuan, H Wang (2011) Diagnosis of MEA degradation under accelerated relative humidity cycling, *Journal of Power Sources* 196: 5045-5052.
- [15] X-Z Yuan, S Zhang, JC Sun, H Wang (2011) A review of accelerated conditioning for a polymer electrolyte membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 196: 9097-9106.
- [16] SE Iyuke, AB Mohamad, AAH Kadhun, WRW Daud, C Rachid (2003) Improved membrane and electrode assemblies for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 114: 195-202.
- [17] S Park, J-W Lee, BN Popov (2012) A review of gas diffusion layer in PEM fuel cells: Materials and designs, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 5850-5865.
- [18] S Park, BN Popov (2011) Effect of a GDL based on carbon paper or carbon cloth on PEM fuel cell performance, *Fuel* 90: 436-440.
- [19] S Park, J-W Lee, BN Popov (2006) Effect of carbon loading in microporous layer on PEM fuel cell performance, *Journal of Power Sources* 163: 357-363.
- [20] L Xiong, A Manthiram (2005) High performance membrane-electrode assemblies with ultra-low Pt loading for proton exchange membrane fuel cells, *Electrochimica Acta* 50: 3200-3204.
- [21] VV Silas Towne, James Holbery, Peter Rieke (2007) Fabrication of polymer electrolyte membrane fuel cell MEAs utilizing inkjet print technology, *Journal of Power Sources* 171: 575-584.
- [22] RR Passos, VA Paganin, EA Ticianelli (2006) Studies of the performance of PEM fuel cell cathodes with the catalyst layer directly applied on Nafion membranes, *Electrochimica Acta* 51: 5239-5245.
- [23] H-N Su, S-J Liao, T Shu, H-L Gao (2010) Performance of an ultra-low platinum loading membrane electrode assembly prepared by a novel catalyst-sprayed membrane technique, *Journal of Power Sources* 195: 756-761.
- [24] L Sun, R Ran, G Wang, Z Shao (2008) Fabrication and performance test of a catalyst-coated membrane from direct spray deposition, *Solid State Ionics* 179: 960-965.
- [25] K-H Kim, K-Y Lee, H-J Kim, et al. (2010) The effects of Nafion® ionomer content in PEMFC MEAs prepared by a catalyst-coated membrane (CCM) spraying method, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 2119-2126.

- [26] H Kim, NP Subramanian, BN Popov (2004) Preparation of PEM fuel cell electrodes using pulse electrodeposition, *Journal of Power Sources* 138: 14-24.
- [27] MS Saha, AF Gullá, RJ Allen, S Mukerjee (2006) High performance polymer electrolyte fuel cells with ultra-low Pt loading electrodes prepared by dual ion-beam assisted deposition, *Electrochimica Acta* 51: 4680-4692.
- [28] K-A Starz, R Zuber, A Kramer, K Fehl, J Kohler, S Wittpahl (2002) in *Application USP* (ed), US
- [29] YG Yoon, TH Yang, GG Park, WY Lee, CS Kim (2003) A multi-layer structured cathode for the PEMFC, *Journal of Power Sources* 118: 189-192.
- [30] K Wikander, H Ekström, AEC Palmqvist, G Lindbergh (2007) On the influence of Pt particle size on the PEMFC cathode performance, *Electrochimica Acta* 52: 6848-6855.
- [31] X Zhang, P Shi (2006) Dual-bonded catalyst layer structure cathode for PEMFC, *Electrochemistry Communications* 8: 1229-1234.
- [32] S-W Perng, H-W Wu (2010) Effect of the prominent catalyst layer surface on reactant gas transport and cell performance at the cathodic side of a PEMFC, *Applied Energy* 87: 1386-1399.
- [33] K Suárez-Alcántara, O Solorza-Feria (2008) Kinetics and PEMFC performance of RuxMoySez nanoparticles as a cathode catalyst, *Electrochimica Acta* 53: 4981-4989.
- [34] M Srinivasarao, D Bhattacharyya, R Rengaswamy, S Narasimhan (2010) Performance analysis of a PEM fuel cell cathode with multiple catalyst layers, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 6356-6365.
- [35] M Kim, J-N Park, H Kim, S Song, W-H Lee (2006) The preparation of Pt/C catalysts using various carbon materials for the cathode of PEMFC, *Journal of Power Sources* 163: 93-97.
- [36] BP Vinayan, RI Jafri, R Nagar, N Rajalakshmi, K Sethupathi, S Ramaprabhu (2012) Catalytic activity of platinum–cobalt alloy nanoparticles decorated functionalized multiwalled carbon nanotubes for oxygen reduction reaction in PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 412-421.
- [37] A Therdthianwong, P Saenwiset, S Therdthianwong (2012) Cathode catalyst layer design for proton exchange membrane fuel cells, *Fuel* 91: 192-199.
- [38] Z-M Zhou, Z-G Shao, X-P Qin, X-G Chen, Z-D Wei, B-L Yi (2010) Durability study of Pt–Pd/C as PEMFC cathode catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 1719-1726.
- [39] S Martin, PL Garcia-Ybarra, JL Castillo (2010) High platinum utilization in ultra-low Pt loaded PEM fuel cell cathodes prepared by electrospraying, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 10446-10451.
- [40] CY Du, GP Yin, XQ Cheng, PF Shi (2006) Parametric study of a novel cathode catalyst layer in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 160: 224-231.
- [41] X Yu, S Ye (2007) Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC: Part I. Physico-chemical and electronic interaction between Pt and carbon support, and activity enhancement of Pt/C catalyst, *Journal of Power Sources* 172: 133-144.
- [42] X Yu, S Ye (2007) Recent advances in activity and durability enhancement of Pt/C catalytic cathode in PEMFC: Part II: Degradation mechanism and durability enhancement of carbon supported platinum catalyst, *Journal of Power Sources* 172: 145-154.
- [43] J Qiao, B Li, D Yang, J Ma (2009) High PEMFC performance by applying Ir-V nanoparticles as a cathode catalyst, *Applied Catalysis B: Environmental* 91: 198-203.

- [44] CV Rao, J Parrondo, SL Ghatty, B Rambabu (2010) High temperature polymer electrolyte membrane fuel cell performance of PtxCoy/C cathodes, *Journal of Power Sources* 195: 3425-3430.
- [45] X Feng, Y Wang (2010) Multi-layer configuration for the cathode electrode of polymer electrolyte fuel cell, *Electrochimica Acta* 55: 4579-4586.
- [46] TS Olson, K Chapman, P Atanassov (2008) Non-platinum cathode catalyst layer composition for single Membrane Electrode Assembly Proton Exchange Membrane Fuel Cell, *Journal of Power Sources* 183: 557-563.
- [47] N Bussayajarn, H Ming, KK Hoong, WY Ming Stephen, CS Hwa (2009) Planar air breathing PEMFC with self-humidifying MEA and open cathode geometry design for portable applications, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 7761-7767.
- [48] T Zhou, H Liu (2006) Effects of the electrical resistances of the GDL in a PEM fuel cell, *Journal of Power Sources* 161: 444-453.
- [49] B Li, J Qiao, D Yang, et al. (2010) Effect of metal particle size and Nafion content on performance of MEA using Ir-V/C as anode catalyst, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 5528-5538.
- [50] A Serov, C Kwak (2009) Review of non-platinum anode catalysts for DMFC and PEMFC application, *Applied Catalysis B: Environmental* 90: 313-320.
- [51] FA de Bruijn, DC Papageorgopoulos, EF Sitters, GJM Janssen (2002) The influence of carbon dioxide on PEM fuel cell anodes, *Journal of Power Sources* 110: 117-124.
- [52] TV Reshetenko, G Bender, K Bethune, R Rocheleau (2011) Systematic study of back pressure and anode stoichiometry effects on spatial PEMFC performance distribution, *Electrochimica Acta* 56: 8700-8710.
- [53] B Moreno, E Chinarro, JC Pérez, JR Jurado (2007) Combustion synthesis and electrochemical characterisation of Pt–Ru–Ni anode electrocatalyst for PEMFC, *Applied Catalysis B: Environmental* 76: 368-374.
- [54] R Lin, C Cao, H Zhang, H Huang, J Ma (2012) Electro-catalytic activity of enhanced CO tolerant cerium-promoted Pt/C catalyst for PEM fuel cell anode, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 4648-4656.
- [55] A-K Meland, S Kjelstrup (2007) Three steps in the anode reaction of the polymer electrolyte membrane fuel cell. Effect of CO, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 610: 171-178.
- [56] G Lin, T Van Nguyen (2005) Effect of thickness and hydrophobic polymer content of the gas diffusion layer on electrode flooding level in a PEMFC, *J Electrochem Soc* 152: A1942-A1948.
- [57] M Han, SH Chan, SP Jiang (2006) Development of carbon-filled gas diffusion layer for polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources* 159: 1005-1014.
- [58] A Arvay, E Yli-Rantala, CH Liu, et al. (2012) Characterization techniques for gas diffusion layers for proton exchange membrane fuel cells – A review, *Journal of Power Sources* 213: 317-337.
- [59] M Han, JH Xu, SH Chan, SP Jiang (2008) Characterization of gas diffusion layers for PEMFC, *Electrochimica Acta* 53: 5361-5367.
- [60] T Kitahara, T Konomi, H Nakajima (2010) Microporous layer coated gas diffusion layers for enhanced performance of polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources* 195: 2202-2211.
- [61] R Anderson, M Blanco, X Bi, DP Wilkinson (2012) Anode water removal and cathode gas diffusion layer flooding in a proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 16093-16103.

- [62] E-D Wang, P-F Shi, C-Y Du (2008) Treatment and characterization of gas diffusion layers by sucrose carbonization for PEMFC applications, *Electrochemistry Communications* 10: 555-558.
- [63] C-H Liu, T-H Ko, J-W Shen, S-I Chang, S-I Chang, Y-K Liao (2009) Effect of hydrophobic gas diffusion layers on the performance of the polymer exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 191: 489-494.
- [64] N Zamel, X Li (2013) Effective transport properties for polymer electrolyte membrane fuel cells – With a focus on the gas diffusion layer, *Progress in Energy and Combustion Science* 39: 111-146.
- [65] A Tamayol, M Bahrami (2011) Water permeation through gas diffusion layers of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 196: 6356-6361.
- [66] LR Jordan, AK Shukla, T Behrsing, NR Avery, BC Muddle, M Forsyth (2000) Diffusion layer parameters influencing optimal fuel cell performance, *Journal of Power Sources* 86: 250-254.
- [67] C-H Liu, T-H Ko, Y-K Liao (2008) Effect of carbon black concentration in carbon fiber paper on the performance of low-temperature proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 178: 80-85.
- [68] C Xu, TS Zhao, Q Ye (2006) Effect of anode backing layer on the cell performance of a direct methanol fuel cell, *Electrochimica Acta* 51: 5524-5531.
- [69] JT Gostick, MW Fowler, MD Pritzker, MA Ioannidis, LM Behra (2006) In-plane and through-plane gas permeability of carbon fiber electrode backing layers, *Journal of Power Sources* 162: 228-238.
- [70] J Zhang, L Feng, W Cai, C Liu, W Xing (2011) The function of hydrophobic cathodic backing layers for high energy passive direct methanol fuel cell, *Journal of Power Sources* 196: 9510-9515.
- [71] M Möst, M Rzepka, U Stimming (2009) Analysis of the diffusive mass transport in the anode side porous backing layer of a direct methanol fuel cell, *Journal of Power Sources* 191: 456-464.
- [72] J-H Lin, W-H Chen, S-H Su, Y-K Liao, T-H Ko (2008) Carbon film coating on gas diffusion layer for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 184: 38-43.
- [73] C-M Lee, Y-H Pai, J-M Zen, F-S Shieu (2009) Characterization of Teflon-like carbon cloth prepared by plasma surface modification for use as gas diffusion backing in membrane electrode assembly, *Materials Chemistry and Physics* 114: 151-155.
- [74] G-G Park, Y-J Sohn, T-H Yang, Y-G Yoon, W-Y Lee, C-S Kim (2004) Effect of PTFE contents in the gas diffusion media on the performance of PEMFC, *Journal of Power Sources* 131: 182-187.
- [75] C Quick, D Ritzinger, W Lehnert, C Hartnig (2009) Characterization of water transport in gas diffusion media, *Journal of Power Sources* 190: 110-120.
- [76] M Prasanna, HY Ha, EA Cho, SA Hong, IH Oh (2004) Influence of cathode gas diffusion media on the performance of the PEMFCs, *Journal of Power Sources* 131: 147-154.
- [77] Y-H Lai, PA Rapaport, C Ji, V Kumar (2008) Channel intrusion of gas diffusion media and the effect on fuel cell performance, *Journal of Power Sources* 184: 120-128.
- [78] C Du, B Wang, X Cheng (2009) Hierarchy carbon paper for the gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 187: 505-508.
- [79] AL Dicks (2006) The role of carbon in fuel cells, *Journal of Power Sources* 156: 128-141.
- [80] V Gurau, M Bluemle, E De Castro, Y Tsou, JJ Mann, J Zawodzinski (2006) Characterization of transport properties in gas diffusion layers for proton exchange

- membrane fuel cells 1. Wettability (internal contact angle to water and surface energy of GDL fibers), *J Power Sources* 160(2): 1156–1162.
- [81] DH Ahmed, HJ Sung, J Bae (2008) Effect of GDL permeability on water and thermal management in PEMFCs—I. Isotropic and anisotropic permeability, *International Journal of Hydrogen Energy* 33: 3767-3785.
- [82] S Park, J-W Lee, BN Popov (2008) Effect of PTFE content in microporous layer on water management in PEM fuel cells, *Journal of Power Sources* 177: 457-463.
- [83] JH Nam, K-J Lee, G-S Hwang, C-J Kim, M Kaviani (2009) Microporous layer for water morphology control in PEMFC, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 52: 2779-2791.
- [84] G Velayutham (2011) Effect of micro-layer PTFE on the performance of PEM fuel cell electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 14845-14850.
- [85] JF Lin, J Wertz, R Ahmad, M Thommes, AM Kannan (2010) Effect of carbon paper substrate of the gas diffusion layer on the performance of proton exchange membrane fuel cell, *Electrochimica Acta* 55: 2746-2751.
- [86] D Bevers, R Rogers, M von Bradke (1996) Examination of the influence of PTFE coating on the properties of carbon paper in polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources* 63: 193-201.
- [87] AM Chaparro, B Gallardo, MA Folgado, AJ Martín, L Daza (2009) PEMFC electrode preparation by electrospray: Optimization of catalyst load and ionomer content, *Catalysis Today* 143: 237-241.
- [88] KF Chiu, KW Wang (2007) Hydrophobic coatings on carbon electrodes for proton exchange membrane fuel cells, *Surface and Coatings Technology* 202: 1231-1235.
- [89] A Li, M Han, SH Chan, N-t Nguyen (2010) Effects of hydrophobicity of the cathode catalyst layer on the performance of a PEM fuel cell, *Electrochimica Acta* 55: 2706-2711.
- [90] D Rohendi, EH Majlan, AB Mohamad, WRW Daud, AAH Kadhum, LK Shyuan (2014) Effect of PTFE content and sintering temperature on the properties of a fuel cell electrode backing layer, *Journal of Fuel Cell Science and Technology* 11.
- [91] J-C Tsai, C-K Lin (2011) Effect of PTFE content in gas diffusion layer based on Nafion®/PTFE membrane for low humidity proton exchange membrane fuel cell, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers* 42: 945-951.
- [92] MS Ismail, T Damjanovic, DB Ingham, L Ma, M Pourkashanian (2010) Effect of polytetrafluoroethylene-treatment and microporous layer-coating on the in-plane permeability of gas diffusion layers used in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 195: 6619-6628.
- [93] C Lim, CY Wang (2004) Effects of hydrophobic polymer content in GDL on power performance of a PEM fuel cell, *Electrochimica Acta* 49: 4149-4156.
- [94] JH Chun, KT Park, DH Jo, et al. (2011) Development of a novel hydrophobic/hydrophilic double micro porous layer for use in a cathode gas diffusion layer in PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 8422-8428.
- [95] Y Wang, C-Y Wang, KS Chen (2007) Elucidating differences between carbon paper and carbon cloth in polymer electrolyte fuel cells, *Electrochimica Acta* 52: 3965-3975.
- [96] H-K Lee, J-H Park, D-Y Kim, T-H Lee (2004) A study on the characteristics of the diffusion layer thickness and porosity of the PEMFC, *Journal of Power Sources* 131: 200-206.
- [97] AM Kannan, S Sadananda, D Parker, L Munukutla, J Wertz, M Thommes (2008) Wire rod coating process of gas diffusion layers fabrication for proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 178: 231-237.

- [98] R Sitanggang, AB Mohamad, WRW Daud, AAH Kadhum, SE Iyuke (2009) Fabrication of gas diffusion layer based on x-y robotic spraying technique for proton exchange membrane fuel cell application, *Energy Conversion and Management* 50: 1419-1425.
- [99] S Celebi, TA Nijhuis, J van der Schaaf, FA de Bruijn, JC Schouten (2011) Carbon nanofiber growth on carbon paper for proton exchange membrane fuel cells, *Carbon* 49: 501-507.
- [100] J Chen, H Xu, H Zhang, B Yi (2008) Facilitating mass transport in gas diffusion layer of PEMFC by fabricating micro-porous layer with dry layer preparation, *Journal of Power Sources* 182: 531-539.
- [101] JT Gostick, MW Fowler, MA Ioannidis, MD Pritzker, YM Volkovich, A Sakars (2006) Capillary pressure and hydrophilic porosity in gas diffusion layers for polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Power Sources* 156: 375-387.
- [102] V Radhakrishnan, P Haridoss (2011) Differences in structure and property of carbon paper and carbon cloth diffusion media and their impact on proton exchange membrane fuel cell flow field design, *Materials & Design* 32: 861-868.
- [103] H Yang, HC Tu, IL Chiang (2010) Carbon cloth based on PAN carbon fiber practicability for PEMFC applications, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 2791-2795.
- [104] TS Zhao, ZX Liang, JB Xu (2009) in Editor-in-Chief: Jürgen G (ed) *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* Elsevier, Amsterdam
- [105] X Zhang, Z Shen (2002) Carbon fiber paper for fuel cell electrode, *Fuel* 81: 2199-2201.
- [106] RN Bonifácio, JOA Paschoal, M Linardi, R Cuenca (2011) Catalyst layer optimization by surface tension control during ink formulation of membrane electrode assemblies in proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 196: 4680-4685.
- [107] J Marie, R Chenitz, M Chatenet, S Berthon-Fabry, N Cornet, P Achard (2009) Highly porous PEM fuel cell cathodes based on low density carbon aerogels as Pt-support: Experimental study of the mass-transport losses, *Journal of Power Sources* 190: 423-434.
- [108] W Song, H Yu, L Hao, Z Miao, B Yi, Z Shao (2010) A new hydrophobic thin film catalyst layer for PEMFC, *Solid State Ionics* 181: 453-458.
- [109] S Zhang, X-Z Yuan, JNC Hin, H Wang, KA Friedrich, M Schulze (2009) A review of platinum-based catalyst layer degradation in proton exchange membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 194: 588-600.
- [110] K Wikander, H Ekström, AEC Palmqvist, Gr Lindbergh (2007) On the influence of Pt particle size on the PEMFC cathode performance, *Electrochimica Acta* 52: 6848-6855.
- [111] HA Abaoud, M Ghouse, KV Lovell, GN Al-Motairy (2005) A hybrid technique for fabricating PEMFC's low platinum loading electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy* 30: 385-391.
- [112] J-H Wee, K-Y Lee, SH Kim (2007) Fabrication methods for low-Pt-loading electrocatalysts in proton exchange membrane fuel cell systems, *Journal of Power Sources* 165: 667-677.
- [113] N Rajalakshmi, KS Dhathathreyan (2008) Nanostructured platinum catalyst layer prepared by pulsed electrodeposition for use in PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 33: 5672-5677.
- [114] T Uma, M Nogami (2007) Fabrication and performance of Pt/C electrodes for low temperature H₂/O₂ fuel cells, *Journal of Membrane Science* 302: 102-108.

- [115] J Lobato, MA Rodrigo, JJ Linares, K Scott (2006) Effect of the catalytic ink preparation method on the performance of high temperature polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 157: 284-292.
- [116] R Fernández, P Ferreira-Aparicio, L Daza (2005) PEMFC electrode preparation: Influence of the solvent composition and evaporation rate on the catalytic layer microstructure, *Journal of Power Sources* 151: 18-24.
- [117] T-H Yang, Y-G Yoon, G-G Park, W-Y Lee, C-S Kim (2004) Fabrication of a thin catalyst layer using organic solvents, *Journal of Power Sources* 127: 230-233.
- [118] N Rajalakshmi, KS Dhathathreyan (2007) Catalyst layer in PEMFC electrodes-- Fabrication, characterisation and analysis, *Chemical Engineering Journal* 129: 31-40.
- [119] YG Yoon, GG Park, TH Yang, JN Han, WY Lee, CS Kim (2003) Effect of pore structure of catalyst layer in a PEMFC on its performance, *International Journal of Hydrogen Energy* 28: 657-662.
- [120] ZD Wei, HB Ran, XA Liu, et al. (2006) Numerical analysis of Pt utilization in PEMFC catalyst layer using random cluster model, *Electrochimica Acta* 51: 3091-3096.
- [121] TTH Cheng, E Rogers, AP Young, S Ye, V Colbow, S Wessel (2011) Effects of crossover hydrogen on platinum dissolution and agglomeration, *Journal of Power Sources* 196: 7985-7988.
- [122] Z-B Wang, P-J Zuo, X-P Wang, J Lou, B-Q Yang, G-P Yin (2008) Studies of performance decay of Pt/C catalysts with working time of proton exchange membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 184: 245-250.
- [123] MS Mamat, SA Grigoriev, KA Dzhush, DM Grant, GS Walker (2010) The performance and degradation of Pt electrocatalysts on novel carbon carriers for PEMFC applications, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 7580-7587.
- [124] YS Yun, H Bak, H-J Jin (2010) Porous carbon nanotube electrodes supported by natural polymeric membranes for PEMFC, *Synthetic Metals* 160: 561-565.
- [125] M Carmo, T Roepke, C Roth, AM dos Santos, JGR Poco, M Linardi (2009) A novel electrocatalyst support with proton conductive properties for polymer electrolyte membrane fuel cell applications, *Journal of Power Sources* 191: 330-337.
- [126] S Woo, I Kim, JK Lee, S Bong, J Lee, H Kim (2011) Preparation of cost-effective Pt-Co electrodes by pulse electrodeposition for PEMFC electrocatalysts, *Electrochimica Acta* 56: 3036-3041.
- [127] SA Grigoriev, EK Lyutikova, S Martemianov, VN Fateev (2007) On the possibility of replacement of Pt by Pd in a hydrogen electrode of PEM fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4438-4442.
- [128] B Moreno, JR Jurado, E Chinarro (2009) Pt-Ru-Co catalysts for PEMFC synthesized by combustion, *Catalysis Communications* 11: 123-126.
- [129] A Seo, J Lee, K Han, H Kim (2006) Performance and stability of Pt-based ternary alloy catalysts for PEMFC, *Electrochimica Acta* 52: 1603-1611.
- [130] L Xiong, AM Kannan, A Manthiram (2002) Pt-M (M=Fe, Co, Ni and Cu) electrocatalysts synthesized by an aqueous route for proton exchange membrane fuel cells, *Electrochemistry Communications* 4: 898-903.
- [131] B Li, J Qiao, J Zheng, D Yang, J Ma (2009) Carbon-supported Ir-V nanoparticle as novel platinum-free anodic catalysts in proton exchange membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 5144-5151.
- [132] M Vikkisk, I Kruusenberg, U Joost, E Shulga, K Tammeveski (2013) Electrocatalysis of oxygen reduction on nitrogen-containing multi-walled carbon nanotube modified glassy carbon electrodes, *Electrochimica Acta* 87: 709-716.

- [133] G Faubert, R Côté, JP Dodelet, M Lefèvre, P Bertrand (1999) Oxygen reduction catalysts for polymer electrolyte fuel cells from the pyrolysis of FeII acetate adsorbed on 3,4,9,10-perylenetetracarboxylic dianhydride, *Electrochimica Acta* 44: 2589-2603.
- [134] WY Wong, WRW Daud, AB Mohamad, AAH Kadhum, KS Loh, EH Majlan (2013) Recent progress in nitrogen-doped carbon and its composites as electrocatalysts for fuel cell applications, *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [135] JZ Zhang, K Hongsirikarn, JG Goodwin Jr (2011) Effect and siting of Nafion® in a Pt/C proton exchange membrane fuel cell catalyst, *Journal of Power Sources* 196: 7957-7966.
- [136] S-Y Ahn, Y-C Lee, HY Ha, S-A Hong, I-H Oh (2004) Effect of the ionomers in the electrode on the performance of PEMFC under non-humidifying conditions, *Electrochimica Acta* 50: 673-676.
- [137] D Lee, S Hwang (2008) Effect of loading and distributions of Nafion ionomer in the catalyst layer for PEMFCs, *International Journal of Hydrogen Energy* 33: 2790-2794.
- [138] AM Chaparro, B Gallardo, MA Folgado, AJ Martín, L Daza (2009) PEMFC electrode preparation by electrospray: Optimization of catalyst load and ionomer content, *Catalysis Today* 143: 237-241.
- [139] C-M Lai, J-C Lin, F-P Ting, S-D Chyou, K-L Hsueh (2008) Contribution of Nafion loading to the activity of catalysts and the performance of PEMFC, *International Journal of Hydrogen Energy* 33: 4132-4137.
- [140] G Sasikumar, JW Ihm, H Ryu (2004) Dependence of optimum Nafion content in catalyst layer on platinum loading, *Journal of Power Sources* 132: 11-17.
- [141] J-H Park, J-H Kim, H-K Lee, T-H Lee, Y-I Joe (2004) A novel direct deposition of Pt catalysts on Nafion impregnated with polypyrrole for PEMFC, *Electrochimica Acta* 50: 769-775.
- [142] DS Hwang, CH Park, SC Yi, YM Lee (2011) Optimal catalyst layer structure of polymer electrolyte membrane fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 9876-9885.
- [143] TAL Harris, DF Walczyk (2006) Development of a Casting Technique for Membrane Material Used in High-Temperature PEM Fuel Cells, *Journal of Manufacturing Processes* 8: 8-20.
- [144] R Benítez, J Soler, L Daza (2005) Novel method for preparation of PEMFC electrodes by the electrospray technique, *Journal of Power Sources* 151: 108-113.
- [145] D Rohendi, EH Majlan, AB Mohamad, WR Wan Daud, AA Hassan Kadhum, LK Shyuan (2013) Characterization of electrodes and performance tests on MEAs with varying platinum content and under various operational conditions, *International Journal of Hydrogen Energy* 38: 9431-9437.
- [146] J Lee, J Seo, K Han, H Kim (2006) Preparation of low Pt loading electrodes on Nafion (Na⁺)-bonded carbon layer with galvanostatic pulses for PEMFC application, *Journal of Power Sources* 163: 349-356.
- [147] E Antolini (2009) Carbon supports for low-temperature fuel cell catalysts, *Applied Catalysis B: Environmental* 88: 1-24.
- [148] H-N Su, Q Zeng, S-J Liao, Y-N Wu (2010) High performance membrane electrode assembly with ultra-low platinum loading prepared by a novel multi catalyst layer technique, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 10430-10436.
- [149] N Yousfi-Steiner, P Moçotéguy, D Candusso, D Hissel (2009) A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation, *Journal of Power Sources* 194: 130-145.

- [150] W Schmittinger, A Vahidi (2008) A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells, *Journal of Power Sources* 180: 1-14.
- [151] J Wu, XZ Yuan, JJ Martin, et al. (2008) A review of PEM fuel cell durability: Degradation mechanisms and mitigation strategies, *Journal of Power Sources* 184: 104-119.
- [152] RA Silva, T Hashimoto, GE Thompson, CM Rangel (2012) Characterization of MEA degradation for an open air cathode PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 7299-7308.
- [153] A Taniguchi, T Akita, K Yasuda, Y Miyazaki (2008) Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation, *International Journal of Hydrogen Energy* 33: 2323-2329.
- [154] T Tanuma, S Terazono (2008) Improving MEA durability by using surface-treated catalysts, *Journal of Power Sources* 181: 287-291.
- [155] VS Mironov, JK Kim, M Park, S Lim, WK Cho (2007) Comparison of electrical conductivity data obtained by four-electrode and four-point probe methods for graphite-based polymer composites, *Polymer Testing* 26: 547-555.
- [156] A Higier, H Liu (2011) Effects of the difference in electrical resistance under the land and channel in a PEM fuel cell, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 1664-1670.
- [157] Z Bai, MF Durstock, TD Dang (2006) Proton conductivity and properties of sulfonated polyarylenethioether sulfones as proton exchange membranes in fuel cells, *Journal of Membrane Science* 281: 508-516.
- [158] P Zhou, P Lin, CW Wu, Z Li (2011) Effect of nonuniformity of the contact pressure distribution on the electrical contact resistance in proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 6039-6044.
- [159] HM Yu, C Ziegler, M Oszcipok, M Zobel, C Hebling (2006) Hydrophilicity and hydrophobicity study of catalyst layers in proton exchange membrane fuel cells, *Electrochimica Acta* 51: 1199-1207.
- [160] Y-X Huang, C-H Cheng, X-D Wang, J-Y Jang (2010) Effects of porosity gradient in gas diffusion layers on performance of proton exchange membrane fuel cells, *Energy* 35: 4786-4794.
- [161] H Wang, X-Z Yuan, H Li (eds) (2012) *PEM Fuel Cell Diagnostic Tools*. CRC Press Taylor & Francis Group, Boca Rotan
- [162] K-S Lee, B-S Lee, SJ Yoo, et al. (2012) Development of a galvanostatic analysis technique as an in-situ diagnostic tool for PEMFC single cells and stacks, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 5891-5900.
- [163] T Akita, A Taniguchi, J Maekawa, et al. (2006) Analytical TEM study of Pt particle deposition in the proton-exchange membrane of a membrane-electrode-assembly, *Journal of Power Sources* 159: 461-467.
- [164] I Takahashi, SS Kocha (2010) Examination of the activity and durability of PEMFC catalysts in liquid electrolytes, *Journal of Power Sources* 195: 6312-6322.
- [165] K Suárez-Alcántara, A Rodríguez-Castellanos, R Dante, O Solorza-Feria (2006) RuxCrySez electrocatalyst for oxygen reduction in a polymer electrolyte membrane fuel cell, *Journal of Power Sources* 157: 114-120.
- [166] J Zhang (2008) in Zhang J (ed) *Fundamental and Applications* Springer, Vancouver
- [167] S Du, BG Pollet (2012) Catalyst loading for Pt-nanowire thin film electrodes in PEFCs, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 17892-17898.

- [168] I Gatto, A Stassi, E Passalacqua, AS Aricò (2013) An electro-kinetic study of oxygen reduction in polymer electrolyte fuel cells at intermediate temperatures, *International Journal of Hydrogen Energy* 38: 675-681.
- [169] J Shan, PG Pickup (2000) Characterization of polymer supported catalysts by cyclic voltammetry and rotating disk voltammetry, *Electrochimica Acta* 46: 119-125.
- [170] A Pozio, M De Francesco, A Cemmi, F Cardellini, L Giorgi (2002) Comparison of high surface Pt/C catalysts by cyclic voltammetry, *Journal of Power Sources* 105: 13-19.
- [171] A Parthasarathy, S Srinivasan, AJ Appleby, CR Martin (1992) Electrode kinetics of oxygen reduction at carbon-supported and unsupported platinum microcrystallite/Nafion® interfaces, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 339: 101-121.
- [172] X Yuan, H Wang, J Colin Sun, J Zhang (2007) AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis—A review, *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4365-4380.
- [173] X Yuan, H Wang, J Colin Sun, J Zhang (2007) AC impedance technique in PEM fuel cell diagnosis--A review, *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4365-4380.
- [174] X Yan, M Hou, L Sun, et al. (2007) AC impedance characteristics of a 2�kW PEM fuel cell stack under different operating conditions and load changes, *International Journal of Hydrogen Energy* 32: 4358-4364.
- [175] S Asghari, A Mokmeli, M Samavati (2010) Study of PEM fuel cell performance by electrochemical impedance spectroscopy, *International Journal of Hydrogen Energy* 35: 9283-9290.
- [176] M Kheirmand, A Asnafi (2011) Analytic parameter identification of proton exchange membrane fuel cell catalyst layer using electrochemical impedance spectroscopy, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 13266-13271.
- [177] EB Easton, PG Pickup (2005) An electrochemical impedance spectroscopy study of fuel cell electrodes, *Electrochimica Acta* 50: 2469-2474.
- [178] M Mamlouk, K Scott (2011) Analysis of high temperature polymer electrolyte membrane fuel cell electrodes using electrochemical impedance spectroscopy, *Electrochimica Acta* 56: 5493-5512.
- [179] SJ Andreasen, JR Vang, SK Kær (2011) High temperature PEM fuel cell performance characterisation with CO and CO₂ using electrochemical impedance spectroscopy, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 9815-9830.
- [180] A Li, SH Chan, N-t Nguyen (2009) Anti-flooding cathode catalyst layer for high performance PEM fuel cell, *Electrochemistry Communications* 11: 897-900.
- [181] W Mérida, DA Harrington, JM Le Canut, G McLean (2006) Characterisation of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) failures via electrochemical impedance spectroscopy, *Journal of Power Sources* 161: 264-274.
- [182] M Maidhily, N Rajalakshmi, KS Dhathathreyan (2011) Electrochemical impedance diagnosis of micro porous layer in polymer electrolyte membrane fuel cell electrodes, *International Journal of Hydrogen Energy* 36: 12352-12360.
- [183] G Dotelli, L Omati, P Gallo Stampino, P Grassini, D Brivio (2011) Investigation of gas diffusion layer compression by electrochemical impedance spectroscopy on running polymer electrolyte membrane fuel cells, *Journal of Power Sources* 196: 8955-8966.
- [184] S Erce, H Erdener, RG Akay, H Yücel, N Baç, I Eroglu (2009) Effects of sulfonated polyether-etherketone (SPEEK) and composite membranes on the proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) performance, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 4645-4652.

- [185] C-J Tseng, S-K Lo (2010) Effects of microstructure characteristics of gas diffusion layer and microporous layer on the performance of PEMFC, *Energy Conversion and Management* 51: 677-684.
- [186] K Jiao, X Li (2011) Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cells, *Progress in Energy and Combustion Science* 37: 221-291.
- [187] W Dai, H Wang, X-Z Yuan, et al. (2009) A review on water balance in the membrane electrode assembly of proton exchange membrane fuel cells, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 9461-9478.
- [188] S-G Kim, S-J Lee (2013) A review on experimental evaluation of water management in a polymer electrolyte fuel cell using X-ray imaging technique, *Journal of Power Sources* 230: 101-108.
- [189] K-H Hou, C-H Lin, M-D Ger, S-W Shiah, H-M Chou (2012) Analysis of the characterization of water produced from proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) under different operating thermal conditions, *International Journal of Hydrogen Energy* 37: 3890-3896.
- [190] B Ramos-Alvarado, JD Sole, A Hernandez-Guerrero, MW Ellis (2012) Experimental characterization of the water transport properties of PEM fuel cells diffusion media, *Journal of Power Sources* 218: 221-232.
- [191] K Jiao, J Park, X Li (2010) Experimental investigations on liquid water removal from the gas diffusion layer by reactant flow in a PEM fuel cell, *Applied Energy* 87: 2770-2777.
- [192] A Bazylak (2009) Liquid water visualization in PEM fuel cells: A review, *International Journal of Hydrogen Energy* 34: 3845-3857.