

OPTIMASI KATALIS BERBASIS NIKEL UNTUK *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS*

Laporan Penelitian

Disusun untuk memenuhi tugas akhir guna mencapai gelar
sarjana di bidang ilmu Teknik Kimia

oleh :

Robin Irawan

(6141901006)

Pembimbing :

Elok Fidiani, Ph.D

Arenst Andreas Arie, S.Si, M.Sc, Ph.D



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN
2022**

LEMBAR PENGESAHAN

JUDUL : OPTIMASI KATALIS BERBASIS NIKEL UNTUK *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS*

CATATAN :

Telah diperiksa dan disetujui,
Bandung, 2022

Pembimbing 1

Pembimbing 2



Elok Fidiani, Ph.D

Arenst Andreas Arie, S.Si, M.Sc, Ph.D

LEMBAR REVISI

JUDUL : OPTIMASI KATALIS BERBASIS NIKEL UNTUK *PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELLS*

CATATAN :

Telah diperiksa dan disetujui,
Bandung, 2 September 2022

Penguji 1



Dr. Angela Justina Kumalaputri, S.T., M.T.

Penguji 2



Hans Kristianto, S.T., M.T.



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK KIMIA
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS KATOLIK PARAHYANGAN**

SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Robin Irawan

NPM : 6141901006

dengan ini menyatakan bahwa laporan penelitian dengan judul:

Optimasi Katalis Berbasis Nikel untuk *Proton Exchange Membrane Fuel Cells*

adalah hasil pekerjaan saya dan seluruh ide, pendapat atau materi dari sumber lain telah dikutip dengan cara penulisan referensi yang sesuai.

Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya dan jika pernyataan ini tidak sesuai dengan kenyataan, maka saya bersedia menanggung sanksi sesuai dengan peraturan yang berlaku.

Tangerang Selatan, 27 Mei 2022

Robin Irawan
(6141901006)

INTISARI

Peningkatan temperatur global telah menjadi perhatian dunia dan banyak upaya perlu dilakukan untuk mengurangi emisi karbon yang merupakan akar permasalahan. *Green hydrogen* adalah salah satu alternatif bahan bakar yang tidak melepaskan emisi karbon. Hidrogen dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik menggunakan sebuah *fuel cell*. Di antara banyaknya jenis *fuel cell*, PEMFC menarik untuk diteliti karena aplikasinya luas, salah satunya adalah untuk transportasi, dan banyak kelebihan lainnya. Terdapat tiga fokus penelitian mengenai PEMFC yang berkaitan dengan biaya, performa dan durabilitas. Ketiga segi tersebut dalam katalis komersial (Pt/C) masih dapat ditingkatkan.

Penelitian ini berfokus pada katalis katoda yang membutuhkan aktivitas tinggi akibat kinetika ORR yang lambat. *Alloy* platinum dengan nikel secara intrinsik memiliki aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan platinum murni sekaligus mengurangi penggunaan platinum. Morfologi *nanowire* (NW) memiliki *surface defect* yang lebih sedikit, *surface energy* yang lebih rendah dan permukaan aktif yang lebih banyak dibanding morfologi *spherical nanoparticle* (NP). Berdasarkan alasan tersebut, 4 jenis katalis akan diteliti: Pt NP/C; Pt NW/C; PtNi NP/C; PtNi NW/C.

Analisis TGA (*Thermogravimetric Analysis*) mengonfirmasi adanya platinum pada katalis. Katalis dengan morfologi *nanowire* memiliki *range* temperatur pembakaran yang lebih rendah, menandakan kontak platinum yang lebih banyak dengan *support* karbon. Karakteristik katalis yang dihasilkan memiliki partikel platinum dengan struktur *face centered cubic*. Terdapat penambahan ukuran partikel setelah *alloying* yang diduga akibat penambahan atom nikel dan *sintering* akibat tahap *annealing*. Pergeseran *peak* terlihat untuk sampel PtNi NP/C namun tidak pada PtNi NW/C yang kemungkinan menandakan pembentukan struktur *core-shell* atau rendahnya kadar nikel pada variasi PtNi NW/C.

Katalis diuji dengan tes *single cell* dengan katalis Pt/C komersial sebagai anoda. Performa katalis dinilai berdasarkan hasil pengukuran kurva polarisasi (*power density* yang dinormalisasi dengan *loading* katalis pada potensial 0,6 V) dan spektra *electrochemical impedance spectroscopy*. Hasil pengujian menunjukkan peningkatan performa katalis PtNi NW/C secara intrinsik yang signifikan sebesar 3,91 kali lipat relatif terhadap katalis Pt/C komersial. Peningkatan tersebut disebabkan oleh efek *ligand* akibat *alloying* dan morfologi *nanowire*. Secara individual, kontribusi efek *alloying* lebih tinggi, yaitu 2,56 kali lipat dibanding morfologi *nanowire* yang hanya meningkatkan performa sebesar 1,53 kali lipat. Performa PtNi NP/C tidak sebaik PtNi NW/C diduga akibat tingginya kadar nikel pada permukaan katalis yang menutupi permukaan platinum yang lebih aktif.

Hasil penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi untuk menghasilkan PEMFC yang lebih baik dari segi performa, durabilitas dan biaya yang bermanfaat bagi umat manusia.

Kata kunci: *fuel cell*, PEMFC, katalis berbasis nikel, *nanowire*, *testing fuel cell*

ABSTRACT

Rising global temperature has been a major issue attracting global attention. A lot of effort and endeavor are needed to reduce carbon emissions which is the root cause. Green hydrogen is one of the alternative fuels that is carbon free. Hydrogen can be utilized to generate electricity using a fuel cell. Between varieties of fuel cells, PEMFC is the most appealing to be studied because of its flexibility, it can be used in many applications, e.g., transportation, and other advantages. Three research focuses on fuel cells are about cost, performance, and durability. All these three aspects of commercial and readily available Pt/C catalyst can still be improved.

This research focuses on PEMFCs cathode catalyst which requires high activity due to its slow ORR kinetics. Platinum alloyed with nickel intrinsically has a higher activity compared to pure platinum, and at the same time, reducing platinum usage. Nanowire (NW) morphology has a fewer surface defect, lower surface energy, and exposing more active surface compared with spherical nanoparticle (NP). Based on these arguments, 4 catalyst variations were made: Pt NP/C; Pt NW/C; PtNi NP/C; PtNi NW/C.

TGA analysis confirmed that all variation of catalysts contains platinum. Catalysts with nanowire morphology showed a lower combustion temperature range, indicating larger platinum contact area with carbon support. Platinum particles within the catalyst have a face centered cubic structure. Particle size of alloyed catalysts increased presumably because of nickel atoms addition and particle sintering due to annealing process. Peak shift is also observed for PtNi NP/C sample but not for PtNi NW/C, probably caused by low nickel content or the formation of core-shell structure of PtNi NW/C.

These catalysts were tested using single cell testing with commercial Pt/C as anode catalyst. Performance of the catalyst was measured using polarization curve (based on its power density normalized with catalyst loading at 0,6 V) and electrochemical impedance spectroscopy. The results display a significant 3,91 times performance improvement of PtNi NW/C catalyst relative to commercial Pt/C catalyst. This improvement is caused by ligand effect due to alloying and nanowire morphology. Individually, alloying contributes to a greater extent that is 2,56 times compared to nanowire morphology which improves performance by only 1,53 times. The performance of PtNi NP/C catalyst is far lower than PtNi NW/C, presumably because of higher nickel content on the surface which blocks more active platinum surface.

This research is expected to contribute to a better performing, more durable, and less costly PEMFC.

Keywords: fuel cell, PEMFC, nickel based catalyst, nanowire, fuel cell testing

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis sampaikan kepada Tuhan karena berkat, rahmat dan kebaikannya, penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian ini dengan selamat.

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada banyak pihak yang berkontribusi secara langsung maupun tidak langsung dalam penelitian ini:

1. Orang tua dan keluarga penulis yang memberikan segala dukungan yang dapat diberikan.
2. Kedua dosen pembimbing, Ibu Elok dan Bapak Arenst, yang memberikan penulis ilmu dan arahan serta membimbing penulis selama penelitian berlangsung.
3. Dosen, guru dan pembimbing lainnya yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.
4. Pembimbing, peneliti di BRIN dan rekan penelitian penulis yang banyak membantu dan memberikan masukan bagi penulis selama melakukan penelitian.
5. Banyak pihak lainnya yang memberikan motivasi dan semangat agar penulis tidak menyerah dan keluar dari teknik kimia.

Penelitian ini tidak hanya sekedar untuk mendapatkan gelar sarjana teknik kimia, namun penulis berharap karya ini dapat berkontribusi dalam perkembangan dan kemajuan umat manusia di muka bumi ini.

Demikian dengan segala kekurangan dan kelebihan, penulis meminta maaf dan berterima kasih.

Tangerang Selatan, 27 Mei 2022

Robin Irawan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN	iii
LEMBAR REVISI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
INTISARI	xi
<i>ABSTRACT</i>	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Tema sentral masalah	7
1.3 Identifikasi masalah	8
1.4 Premis	8
1.5 Hipotesis	9
1.6 Tujuan penelitian	9
1.7 Manfaat penelitian	9
1.7.1 Manfaat untuk penulis	9
1.7.2 Manfaat untuk ilmu pengetahuan	9
1.7.3 Manfaat untuk masyarakat luas	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Elektrokimia FC	10
2.2 Katalis PEMFC	12
2.2.1 Morfologi Katalis	15
2.2.2 <i>Alloy</i> Platinum	17
BAB III METODE PENELITIAN	22
3.1 Prosedur kerja	22
3.1.1 Pembuatan katalis	24

3.1.2 <i>Thermogravimetric Analysis</i>	28
3.1.3 <i>Scanning Electron Microscopy - Energy Dispersive X-Ray (SEM-EDX)</i> ..	28
3.1.4 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	28
3.1.5 Pembuatan MEA	29
3.1.6 Pengujian <i>single cell</i>	31
3.1.6.1 Aktivasi MEA	33
3.1.6.2 Pengukuran Kurva Polarisasi	34
3.1.6.3 Pengujian <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy</i>	34
3.2 Lokasi dan Pengerjaan Penelitian	36
 BAB IV PEMBAHASAN	 32
4.1 Analisis <i>Thermogravimetric</i>	32
4.2 Analisis XRD	34
4.3 Analisis SEM-EDX	36
4.4 Kurva Polarisasi	39
4.5 <i>Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)</i>	46
 BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	 49
5.1 Kesimpulan	49
5.2 Saran	49
 DAFTAR PUSTAKA	 50
LAMPIRAN A CONTOH PERHITUNGAN DAN HASIL ANTARA	65
A.1 Perhitungan Ukuran Partikel dari Data XRD	65
A.2 Penentuan <i>Lattice Parameter</i> dari Data XRD	66
LAMPIRAN B <i>SCRIPT</i> MATLAB	67
LAMPIRAN C MSDS	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Tren dan prediksi kenaikan temperatur global	1
Gambar 1.2 Tren kenaikan konsumsi energi	2
Gambar 1.3 Skema <i>fuel cell</i> berbahan bakar hidrogen	2
Gambar 1.4 Susunan <i>stack</i> PEMFC	4
Gambar 2.1 Tipikal kurva polarisasi dan kontribusi dari beberapa jenis <i>loss</i>	11
Gambar 2.2 Skema permukaan tiga fasa	13
Gambar 2.3 Skema reaksi ORR pada katalis logam mulia	14
Gambar 2.4 Plot <i>volcano</i> beberapa logam murni untuk HOR (a) dan ORR (b)	15
Gambar 2.5 TEM dan HRTEM Katalis Pt NW/C	17
Gambar 2.6 Plot <i>Volcano</i> beberapa <i>alloy</i> platinum	18
Gambar 2.7 Perbandingan performa PtNi NW/C	20
Gambar 3.1 Diagram alir prosedur kerja penelitian secara garis besar	22
Gambar 3.2 Diagram alir sintesis katalis Pt NP/C	25
Gambar 3.3 Diagram alir sintesis katalis PtNi NP/C	26
Gambar 3.4 Diagram alir sintesis katalis Pt NW/C	26
Gambar 3.5 Diagram alir sintesis katalis PtNi NW/C	27
Gambar 3.6 Diagram alir <i>annealing</i> dan <i>acid treatment</i> katalis PtNi NW/C dan PtNi NP/C27	
Gambar 3.7 Pembuatan <i>ink</i> dan <i>hand painting</i> GDL	31
Gambar 3.8 Pembuatan MEA	31
Gambar 3.9 Susunan stak <i>single cell testing</i>	32
Gambar 3.10 Susunan stak FC yang tersambung dengan <i>test system</i>	33
Gambar 3.11 Diagram alir prosedur pengujian single cell	33
Gambar 3.12 Sel Randles	35
Gambar 3.13 Plot Nyquist sel Randles	36
Gambar 4.1 Hasil TGA	32
Gambar 4.2 Hasil TGA katalis Pt/C komersial	33
Gambar 4.3 Hasil XRD keempat sampel	34
Gambar 4.4 SE <i>imaging</i> sampel PtNi NW/C (kiri) dan PtNi NP/C (kanan)	37
Gambar 4.5 BSE <i>imaging</i> sampel PtNi NW/C (kiri) dan PtNi NP/C (kanan)	37
Gambar 4.6 BSE <i>imaging</i> (kiri), Pt <i>elemental mapping</i> (tengah), dan Ni <i>elemental mapping</i> (kiri) sampel PtNi NW/C dengan pembesaran 5000x	37

Gambar 4.7 BSE <i>imaging</i> (kiri), Pt <i>elemental mapping</i> (tengah), dan Ni <i>elemental mapping</i> (kiri) sampel PtNi NP/C dengan pembesaran 5000x	38
Gambar 4.8 <i>Sum spectrum</i> EDX sampel PtNi NW/C	38
Gambar 4.9 <i>Sum spectrum</i> EDX sampel PtNi NP/C	39
Gambar 4.10 Kurva polarisasi MEA (kiri) dan <i>power density</i> @0,6 V	40
Gambar 4.11 Kurva polarisasi sampel PtNi NW/C yang diulang tiga kali	41
Gambar 4.12 Hasil <i>fitting</i> data kurva polarisasi	43
Gambar 4.13 Kurva polarisasi dengan nilai <i>exchange current density</i> yang berbeda	45
Gambar 4.14 Kurva polarisasi dengan nilai i_{loss} yang berbeda	46
Gambar 4.15 Nyquist plot spektra potensiostatik EIS pada OCV	46
Gambar 4.16 Tipikal spektra EIS dari sebuah FC	47
Gambar 4.17 Spektra EIS dengan <i>loop mass transfer</i>	48
Gambar 4.18 Model <i>fitting</i> spektra EIS dan model sirkuit ekuivalen	49
Gambar A.1 Contoh penentuan nilai FWHM untuk sampel Pt NP/C	65

DAFTAR TABEL

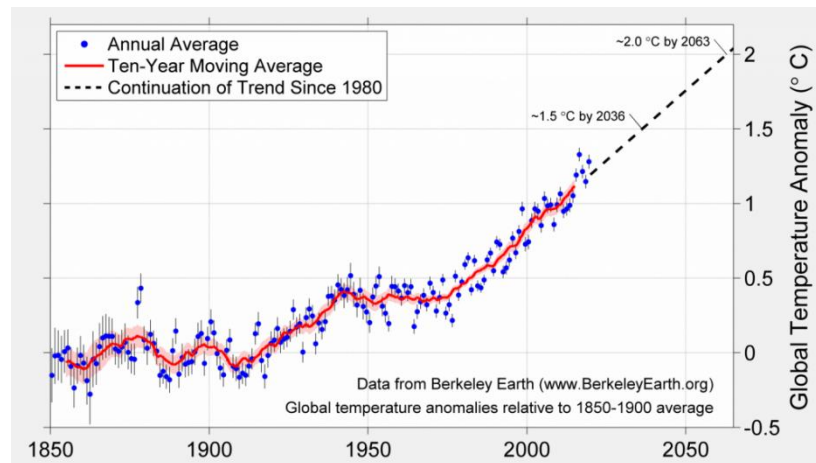
Tabel 1.1 Perbandingan beberapa jenis <i>fuel cell</i>	5
Tabel 3.1 Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian	22
Tabel 3.2 Alat-alat yang digunakan dalam penelitian	23
Tabel 4.1 Persentase berat dan atom elemen sampel PtNi NP/C dan PtNi NW/C	38
Tabel 4.2 Parameter model persamaan 4.2 hasil <i>fitting</i> dan perhitungan	44
Tabel 4.3 Parameter model sirkuit ekuivalen	49
Tabel A.1 Hasil antara penentuan ukuran partikel	65
Tabel A.2 Hasil antara penentuan <i>lattice parameter</i>	66
Tabel C.1 MSDS bahan kimia bagian <i>hazard, stability and reactivity</i>	68
Tabel C.2 MSDS bahan kimia bagian <i>handling and storage</i>	74
Tabel C.3 MSDS bahan kimia bagian <i>first aid measures</i>	80

BAB I

PENDAHULUAN

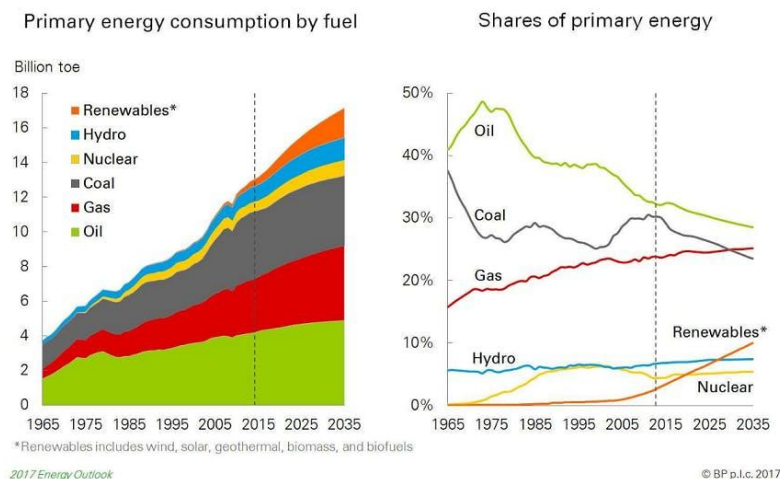
1.1 Latar belakang

Sejak revolusi industri, temperatur global telah meningkat lebih dari 1 °C (MacMillan dan Turrentine, 2021). Prediksi berdasarkan tren kenaikan temperatur menunjukkan jika temperatur global mencapai 1,5 °C pada tahun 2036 dan 2 °C pada tahun 2063 (Anon, 2022). Dampak buruk akibat kenaikan ini menyebabkan banyak negara berusaha untuk mengurangi emisi GHG (*Greenhouse Gas*) yang menjadi akar permasalahan, termasuk Indonesia dengan target *net zero emissions* pada tahun 2060 (Priyadi, 2021).



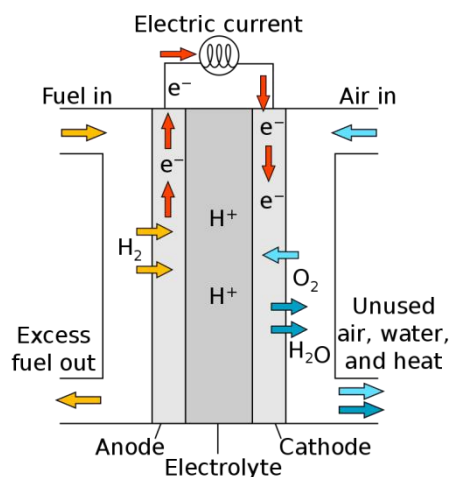
Gambar 1.1 Tren dan prediksi kenaikan temperatur global (Anon, 2022)

Sektor energi berperan besar dalam emisi GHG (Jati, 2021). Berdasarkan gambar 1.2, setiap tahun tren konsumsi energi terus meningkat (Anon, 2022) sedangkan kebutuhan akan *clean energy* semakin dirasakan. *Green hydrogen* dapat menjadi salah satu solusi untuk mengurangi *non-renewable energy* yang proporsi penggunaannya masih besar di Indonesia (Dudley, 2021). *Green hydrogen* adalah hidrogen yang dihasilkan seluruhnya oleh energi terbarukan atau dari tenaga rendah karbon (Permana, 2022). Berbagai skema implementasi *green hydrogen* telah dikembangkan (de Miranda, 2019) namun berada di luar kajian penelitian ini.



Gambar 1.2 Tren kenaikan konsumsi energi (Anon, 2022)

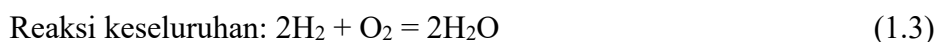
Hidrogen dapat dikonversi menjadi energi melalui *Fuel Cell* (FC). FC adalah sebuah sistem elektrokimia, konsepnya sama seperti baterai yang menggunakan reaksi kimia untuk menghasilkan listrik (Breeze, 2017). Berbeda dengan baterai, FC tidak mengandung reaktan kimia, melainkan hanya sebuah tempat untuk reaksi kimia berjalan, sehingga reaktan perlu disuplai secara kontinu. Mekanisme kerja dari FC dapat dijelaskan dengan gambar di bawah ini.



Gambar 1.3 Skema *fuel cell* berbahan bakar hidrogen (Mattuci, 2015)

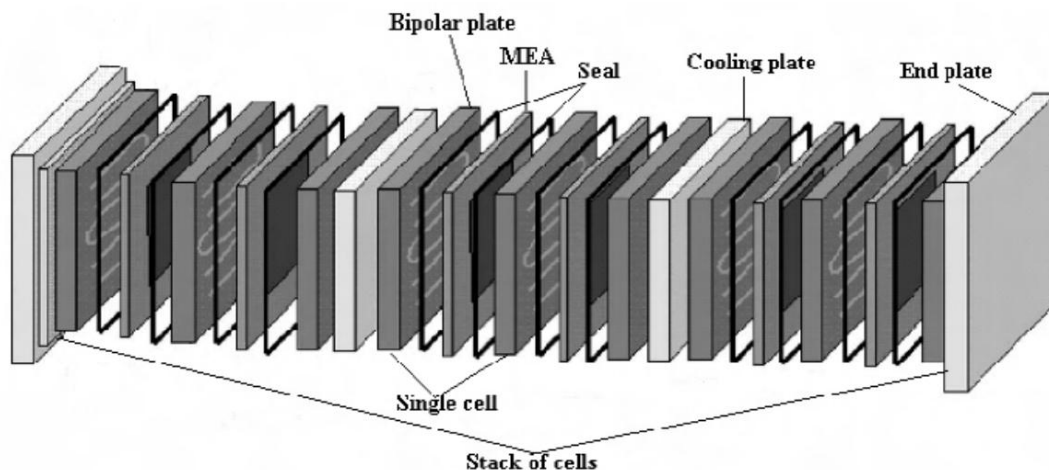
Hidrogen (*fuel*) disuplai ke anoda dan teradsorpsi pada permukaan platinum (katalis) yang lalu mendisosiasikan hidrogen menjadi ion hidrogen dan elektron. Sementara pada katoda terjadi disosiasi oksigen menjadi atom oksigen. Setiap atom oksigen kemudian bereaksi dengan dua elektron dari anoda yang melalui sirkuit eksternal menjadi ion oksigen,

yang kemudian bereaksi dengan proton yang bergerak melalui elektrolit membentuk molekul air. Semua tahap ini dapat dilihat dengan reaksi setengah sel di bawah (Breeze, 2017). Reaksi yang terjadi sepenuhnya secara elektrokimia tanpa terjadi pembakaran (Pers. 1.1-1.3) (Zhang, 2008).



Terdapat beberapa komponen utama penyusun sebuah FC (Dicks dan Rand, 2018): medium elektrolit untuk menghantarkan ion, dapat berupa padatan yang cukup berpori untuk dibasahi oleh cairan elektrolit atau membran polimer atau keramik; anoda dan katoda yang mengandung katalis yang terdispersi pada material yang dapat menghantarkan listrik; sambungan listrik yang menghubungkan anoda dan katoda yang umumnya menggunakan *bipolar plate* untuk menghubungkan permukaan negatif satu sel ke permukaan positif sel selanjutnya, sekaligus memiliki *channel/flow-field* dengan alur tertentu sehingga dapat menyuplai gas *fuel* dan *oksidan* dan sebagai aliran buangan air; dan *seal* atau *gasket* untuk mencegah gas *fuel* dan oksidan bercampur

FC umumnya tersusun seperti pada gambar 1.4 yang disebut sebagai *stack* FC. Anoda dan katoda akan mengapit membran dan susunan ini disebut sebagai MEA (*Membrane Electrode Assembly*). *Gasket* akan dipasang di sekeliling anoda dan katoda untuk mencegah kebocoran dan agar gas tidak bercampur. MEA akan diapit oleh *bipolar plate*. *Stack* FC dapat berisi beberapa lapis MEA-*bipolar plate* untuk menghasilkan daya yang dibutuhkan. *Stack* dapat dilengkapi dengan *cooling plate* untuk mengendalikan temperatur *stack*.



Gambar 1.4 Susunan *stack* PEMFC (Mehta dan Cooper, 2003)

Fuel cell memiliki beberapa keunggulan: dapat diaplikasikan secara luas dari skala besar hingga kecil, mulai dari pembangkit listrik stasioner sampai sumber listrik untuk komputer portabel; efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan mesin-mesin pembakaran dan tidak terpengaruh oleh ukuran FC; sederhana dan simpel, tidak ada bagian yang bergerak; tidak berisik bahkan dengan bagian-bagian pendukung; dan *zero emission* dengan bahan bakar hidrogen yang bersih dengan produk samping hanya uap air (Breeze, 2017; Anon 2022).

Terdapat beberapa jenis FC dengan karakteristik yang berbeda yang umumnya dibedakan oleh elektrolit, ion yang bergerak pada elektrolit atau *fuel* yang digunakan:

1. PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) dengan elektrolit polimer padat dengan ion hidrogen yang bergerak dari anoda ke katoda;
2. AFC (*Alkaline Fuel Cell*) dengan ion hidroksida yang bergerak;
3. PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*) dengan asam fosfat sebagai elektrolit;
4. MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) dengan ion karbonat sebagai elektrolit; dan
5. SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) dengan elektrolit berupa padatan keramik yang menghantarkan ion oksigen (Dicks dan Rand, 2018).

Perbandingan mengenai aplikasi dan kelebihan dari kelima tipe FC ini dirangkum dalam tabel 1.

Penelitian ini berfokus pada PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*). Aplikasi dari PEMFC lebih luas dibanding *fuel cell* lainnya (Anon, 2022) dengan emisi yang hanya terdiri dari uap air sehingga dapat mengurangi GHG dan polutan yang berbahaya untuk kesehatan yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar fosil.

Tabel 1.1 Perbandingan beberapa jenis *fuel cell* (Anon, 2022)

Type <i>Fuel Cell</i>	Aplikasi	Kelebihan
<i>Proton Exchange Membrane</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pembangkit daya cadangan - Pembangkit daya portabel - Pembangkit terdistribusi - Transportasi - Kendaraan terspesialisasi 	<ul style="list-style-type: none"> - Jenis elektrolit yang mengurangi masalah korosi - Temperatur rendah - <i>Start up</i> yang cepat
<i>Alkaline</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Militer - Luar angkasa - Pembangkit daya cadangan - Transportasi 	<ul style="list-style-type: none"> - Material stabil yang dapat digunakan lebih banyak sehingga komponen lebih murah - Temperatur rendah - <i>Start up</i> yang cepat
<i>Phosphoric Acid</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pembangkit terdistribusi 	<ul style="list-style-type: none"> - Cocok untuk CHP (<i>Combined Heat and Power</i>) - Toleransi terhadap pengotor bahan bakar yang lebih tinggi
<i>Molten Carbonate</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Utilitas listrik - Pembangkit terdistribusi 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi tinggi - Bahan bakar yang fleksibel - Cocok untuk CHP - Siklus <i>hybrid</i>/gas turbin
<i>Solid Oxide</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Pembangkit daya bantu - Utilitas listrik - Pembangkit terdistribusi 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi tinggi - Bahan bakar yang fleksibel - Elektrolit padat - Cocok untuk CHP - Siklus <i>hybrid</i>/gas turbin

Menurut U.S. *Department of Energy*, tiga tantangan utama dalam pengembangan FC adalah terkait biaya, performa, dan durabilitas (Anon, 2022). Ketiga aspek tersebut masih dapat ditingkatkan salah satunya dengan mengoptimalkan katalis. Penelitian mengenai katalis PEMFC dapat dibagi menjadi dua kategori yaitu katalis berbasis PGM (*Platinum Group Metals*) dan katalis bebas PGM. Katalis platinum dan *alloy* platinum yang merupakan katalis berbasis PGM menjadi katalis yang paling banyak digunakan untuk anoda dan katoda (Molmen dkk., 2021). Pengembangan katalis berbasis PGM

umumnya berfokus pada empat pendekatan: *alloying* logam PGM dengan logam lain; optimisasi struktur dan ukuran katalis platinum murni; optimasi *support* katalis; dan perlindungan katalis dalam struktur organik (Molmen dkk., 2021).

Alloying platinum dapat mengurangi biaya PEMFC karena sebagian besar biaya berasal dari tingginya kadar platinum yang digunakan dan juga dapat meningkatkan aktivitas intrinsik katalis (Zhang, 2008; Greeley, dkk., 2009). Pendekatan *alloying* logam platinum umumnya dilakukan dengan logam Fe, Co, Ni dan Cu (Molmen dkk., 2021). Banyak penelitian berfokus mengembangkan katalis PtNi didasarkan oleh aktivitas katalis Pt₃Ni (111) yang 90 kali lebih tinggi dibanding katalis *state-of-the-art* Pt NP/C (Zhang, 2008). Struktur oktahedral dapat menyediakan banyak permukaan platinum (111) yang umumnya disintesis menggunakan *capping agent* (Li dkk., 2019). Oleh karena itu mayoritas penelitian berfokus pada pengembangan *alloy* PtNi tanpa dan dengan struktur nanopartikel oktahedral (Molmen dkk., 2021) namun struktur lain seperti *nanocage*, dan *nanoframe* juga banyak diteliti (Sun dkk., 2021).

Terdapat pendekatan lain untuk menyediakan struktur dengan banyak permukaan (111) dengan memanfaatkan struktur *nanowire* (NW) (Sun dkk., 2008b; Colliard dan Koenigsmann, 2017). Struktur *nanowire* dapat menutupi kekurangan struktur *polyhedra* seperti oktahedral dan tetrahedral yang masih memiliki banyak *surface defect* pada bagian sisi atau sudut yang tidak diinginkan (Bu dkk., 2016). Zhang, dkk (2017) melakukan sintesis Pt₃Ni NW/C dengan surfaktan *Cetyl Trimethyl Ammonium Bromide* (CTAB) dan didapatkan *mass activity* lebih besar 2,5 kali dari katalis Pt NP/C komersial Johnson Matthey, namun durabilitasnya dinilai masih kurang dikarenakan kadar nikel yang larut setelah *durability testing* yang masih tinggi. Nikel memiliki nilai potensial reduksi sebesar -0,23 V (Atkins, dkk., 2018), sehingga dapat terlarut dalam kondisi asam saat *fuel cell* beroperasi. Chang dkk berhasil melakukan sintesis PtNi NW dengan *mass activity* lebih tinggi sekitar 3,7 kali dari katalis Pt NP/C komersial dari E-tek tanpa menggunakan surfaktan dengan proses *hydrothermal* (Chang dkk., 2017). Hasil penelitian Chang dkk juga menunjukkan tingginya kadar nikel yang larut: rasio Pt:Ni sebelum *durability testing* sebesar 1,6:1,3 dan sebesar 1,2:0,2 setelah *durability testing* (Chang dkk., 2017). Wu dkk meneliti mengenai Au-Pt₃Ni NW/C menggunakan surfaktan CTAB dan *oleylamine* (OAm) dengan *mass activity* 14,7 kali lebih tinggi dari katalis Pt NP/C komersial Johnson Matthey (Wu dkk., 2019). Mereka menambah Au dengan jumlah yang sangat sedikit untuk meningkatkan durabilitasnya yang dapat mencegah segregasi nikel ke permukaan.

Penelitian-penelitian tersebut telah membuktikan jika katalis Pt₃Ni dengan struktur NW dapat meningkatkan *mass activity* katalis secara signifikan. Namun dari penelitian-penelitian tersebut terdapat dua kekurangan utama: metode sintesis yang rumit dan menggunakan surfaktan yang menambah kompleksitas dalam sistem reaksi ditambah tahap *post treatment* untuk menghilangkan surfaktan yang menempel pada permukaan yang bisa menutupi permukaan aktif (Song et al., 2021); tanpa penambahan Au, kadar nikel yang dapat terlarut masih tinggi sehingga katalis dapat kehilangan efek *alloying* yang menguntungkan. Penelitian ini akan mencoba mengatasi kedua kekurangan tersebut.

Sun dkk berhasil melakukan sintesis struktur Pt NW/C menggunakan metode yang relatif sederhana dengan reduksi prekursor platinum H₂PtCl₆ dengan HCOOH dan beberapa penelitian lain menunjukkan hasil yang sama dengan pertumbuhan permukaan (111) (Sun dkk., 2008a; Sun dkk., 2011a; Sun dkk., 2008b; Sun dkk., 2011b). Berdasarkan metode ini, nikel akan direduksi pada permukaan Pt NW/C, lalu untuk meningkatkan durabilitas dan ketahanan dari perlarutan nikel, struktur *core-shell* dengan nikel sebagai *core* akan dibentuk dengan *thermal annealing*. Kontribusi dari efek *alloying* dan morfologi katalis terhadap performa PEMFC akan diteliti lebih lanjut dengan variasi: Pt NP/C dari reduksi prekursor platinum dengan NaBH₄; Pt NW/C dari reduksi prekursor platinum dengan HCOOH; PtNi NP/C dari reduksi kedua prekursor dengan NaBH₄ diikuti dengan pembentukan struktur *core-shell*; PtNi NW/C dari reduksi prekursor nikel dengan NaBH₄ pada permukaan Pt NW/C dan diikuti dengan pembentukan struktur *core-shell*. Performa katalis PtNi NW/C diharapkan memberikan performa terbaik dibanding ketiga variasi lainnya yang diukur berdasarkan *power density* pada voltase 0,6 V.

1.2 Tema sentral masalah

Katalis PtNi NW/C dinilai memiliki aktivitas yang lebih superior dibanding katalis Pt NP/C komersial serta dapat mengurangi penggunaan platinum. Oleh karena itu penelitian ini berfokus pada sintesis katalis PtNi NW/C dengan metode yang lebih sederhana dibanding penelitian serupa yang umumnya menggunakan surfaktan atau *capping agent*.

Untuk mengetahui pengaruh *alloying* nikel pada platinum dan morfologi katalis (*nanowire* dan *nanoparticle*) terhadap performa *fuel cell*, katalis akan divariasikan (Pt NP/C, Pt NW/C, PtNi NP/C dan PtNi NW/C) dan diuji dengan *single cell testing* serta dilakukan karakterisasi fisik menggunakan analisa *thermogravimetric*, *X-ray diffraction*,

dan *scanning electron microscopy-energy dispersive X-ray*. Hasil pengujian *single cell testing* dinilai lebih merefleksikan katalis saat beroperasi pada *fuel cell* dibanding hasil pengujian katalis yang lebih umum dengan *half cell testing (rotating disc electrode testing)*. Performa sel dinilai dari *power density* sel pada 0,6 V yang dinormalisasi dengan massa platinum dan spektra *electrochemical impedance spectroscopy (EIS)*.

1.3 Identifikasi masalah

1. Bagaimana performa katalis hasil pengujian *single cell*?
2. Apakah morfologi katalis (*nanowire* dan *nanoparticle*) memberikan pengaruh terhadap performa sel?
3. Apakah *alloying* platinum dengan nikel memberikan pengaruh terhadap performa sel?

1.4 Premis

1. *Alloying* nikel pada platinum dengan rasio nikel terhadap platinum sebesar 1:3 meningkatkan aktivitas katalis secara signifikan dibandingkan dengan katalis platinum biasa dan Pt NP/C komersial (Greeley, dkk., 2009; Stamenkovic, dkk., 2006; Mardle, dkk., 2020; Chen, dkk., 2008).
2. Aktivitas katalis platinum dengan morfologi NW lebih tinggi dibandingkan katalis Pt NP/C komersial (Mardle, dkk., 2020; Jiang, dkk., 2017; Xia, dkk., 2013; Liang, dkk., 2011; Sun, dkk., 2008; Sun, dkk., 2010).
3. Katalis platinum dengan morfologi NW dapat disintesis dengan mudah tanpa menggunakan surfaktan atau *capping agent* dengan hanya menggunakan HCOOH (Mardle, dkk., 2020; Sun dkk., 2008a; Sun dkk., 2011a; Sun dkk., 2008b; Sun dkk., 2011b).
4. *Alloy* nikel pada platinum dengan morfologi NW meningkatkan aktivitas katalis secara signifikan (Zhang dkk., 2017; Chang dkk., 2017; Wu dkk., 2019).
5. Nikel pada *alloy* platinum dengan morfologi NW masih memiliki kecenderungan untuk larut yang dibuktikan dengan hasil pengujian durabilitas (Zhang dkk., 2017; Chang dkk., 2017).
6. Katalis platinum dengan morfologi NW lebih aktif dibanding morfologi oktahedral yang banyak diteliti (Bu dkk., 2016)
7. *Post-treatment* dapat mengurangi kadar logam *alloying* yang larut pada kondisi operasi FC yang bersifat asam seperti PEMFC, salah satu metode adalah dengan *thermal annealing*

untuk membentuk struktur *core-shell* dengan logam *shell* yang melindungi logam *core* (Zhang, 2008; Oezaslan dkk., 2013).

1.5 Hipotesis

1. Katalis PtNi NW/C memberikan performa terbaik karena efek gabungan *alloying* dan morfologi *nanowire*.
2. Morfologi *nanowire* meningkatkan performa sel berdasarkan peningkatan luas permukaan yang (111) lebih aktif dan *surface defect* yang berkurang.
3. *Alloying* platinum dengan nikel meningkatkan performa sel berdasarkan kontribusi efek elektronik dan struktural.

1.6 Tujuan penelitian

1. Mempelajari performa sel dengan variasi katalis katoda yang berbeda melalui pengujian kurva polarisasi dan EIS *single cell*.
2. Mempelajari pengaruh *alloying* nikel dan morfologi katalis terhadap performa sel.
3. Mempelajari proses sintesis katalis dan *membrane electrode assembly* (MEA).
4. Mempelajari karakteristik katalis hasil sintesis melalui pengujian fisik TGA, XRD, dan SEM-EDX.

1.7 Manfaat penelitian

1.7.1 Manfaat untuk penulis

Penelitian ini menyediakan peluang bagi penulis untuk mempelajari dan mengaplikasikan secara langsung ilmu mengenai PEMFC dan juga menambah pengalaman dan keterampilan bekerja di laboratorium sintesis dan pengujian.

1.7.2 Manfaat untuk ilmu pengetahuan

Penelitian ini memperluas bidang *fuel cell* terutama PEMFC dalam segi katalis untuk katoda. Pengaruh struktur katalis dan *alloying* terhadap performa sel diteliti lebih lanjut dengan pengujian *single cell* yang jarang dilakukan pada penelitian katalis PEMFC biasanya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat membantu atau menginspirasi mahasiswa, peneliti atau siapapun yang sedang mengembangkan, mempelajari dan/atau meneliti PEMFC.

1.7.3 Manfaat untuk masyarakat luas

Katalis hasil penelitian ini diharapkan dapat meningkatkan performa PEMFC sehingga PEMFC suatu hari dapat digunakan oleh masyarakat luas sebagai sumber energi terpercaya tanpa emisi karbon.