



**ANALISIS PERFORMA ALKALINE FUEL CELL DENGAN
KATALIS Ni/C PADA ANODA**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Teknik Mesin*

SKRIPSI

Oleh

**RAAFI ADITYA NUGRAHA
201910101078**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN, KEBUDAYAAN, RISET, DAN
TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
JEMBER
2024**

PERSEMBAHAN

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas kelimpahan rahmat serta hidayah-Nya, serta sholawat dan salam semoga selalu tercurahkan kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW. Skripsi ini dipersembahkan dengan penuh cinta kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis, Bapak Didik Budi Hariyanto S.Sos. dan Ibu Retno Sri Hastuti S.E. yang telah memberikan bimbingan, semangat, doa, dukungan moral dan finansial kepada penulis hingga dapat menyelesaikan studi sarjana;
2. Kepada kakek dan nenek penulis Alm. Bapak Kusni Gondosuseno S.Pd., Almh. Ibu Musini Ama.Pd., dan Ibu Suharsih yang telah memberikan dukungan moral dan finansial kepada penulis;
3. Bapak Dosen yang telah memberikan ilmu selama ini, khususnya kepada Bapak Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik S.T, M.T. dan Bapak Ir. Fransiscus Xaverius Kristianta M.Eng yang telah membimbing penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan;
4. Kepada partner terbaik penulis, Naning Maskuriah yang telah menemani dan memberikan dukungan penulis dalam berproses;
5. Almamater Program Studi Teknik Mesin Universitas Jember.

MOTTO

“The only way to do great work is to love what you do”

- Steve Jobs -

“It isn't that they can't see the solution. It is that they can't see the problem”

- G. K. Chesterton -

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Raafi Aditya Nugraha

NIM : 201910101078

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: *Analisis Performa Alkaline Fuel Cell Dengan Katalis Ni/C Pada Anoda* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 18 Juli 2024

Yang menyatakan,

(Meterai Rp 10.000,00)

Raafi Aditya Nugraha

NIM. 201910101078

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul *Analisis Performa Alkaline Fuel Cell Dengan Katalis Ni/C Pada Anoda* telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Kamis

Tanggal : 18 Juli 2024

Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Ir. Nasrul Ilminnafik S.T., M.T. (.....)

NIP : 197111141999031002

2. Pembimbing Anggota

Nama : Ir. Franciscus Xaverius Kristianta M.Eng (.....)

NIP : 196501202001121001

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Ir. Digdo Listyadi Setyawan ,MSc., IPM. (.....)

NIP : 196806171995011001

2. Penguji Anggota

Nama : Ir. Danang Yudistiro S.T., M.T., Ph.D. (.....)

NIP : 197902072015041001

ABSTRAK

Peningkatan permintaan energi global mendorong pengembangan energi terbarukan, salah satunya energi berbasis hidrogen melalui sel bahan bakar. Sel bahan bakar alkali (*alkaline fuel cell/AFC*) menjadi alternatif menarik karena dapat menggunakan katalis non-logam mulia. Penelitian ini bertujuan mengembangkan material katalis anoda untuk AFC berbasis nikel yang lebih ekonomis. Eksperimen dilakukan dengan mencampurkan nikel dan karbon hitam (Ni/C) sebagai material pendukung, serta *politetrafluoroethylene* sebagai pengikat. Variasi konsentrasi nikel yang digunakan adalah 0%, 10%, dan 20% dari berat keseluruhan. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi nikel berbanding lurus dengan performa AFC. Sel dengan konsentrasi nikel 20% menghasilkan tegangan, arus, dan efisiensi tertinggi. Penelitian ini membuktikan potensi nikel sebagai katalis alternatif yang efektif dan ekonomis dalam pengembangan AFC, yang dapat berkontribusi pada kemajuan teknologi energi terbarukan.

Kata kunci : *alkaline fuel cell*, katalis, anoda, nikel

ABSTRACT

Increasing global energy demand encourages the development of renewable energy, one of which is hydrogen-based energy through fuel cells. Alkaline fuel cell (AFC) is an attractive alternative because it can use non-noble metal catalysts. This research aims to develop an economical nickel-based anode catalyst material for AFC. Experiments were conducted by mixing nickel and carbon black (Ni/C) as supporting materials, and polytetrafluoroethylene as a binder. The nickel concentration variations used were 0%, 10%, and 20% by weight. Results show that increasing nickel concentration is directly proportional to AFC performance. Cells with 20% nickel concentration produced the highest voltage, current, and efficiency. This research proves the potential of nickel as an effective and economical alternative catalyst in the development of AFCs, which can contribute to the advancement of renewable energy technology.

Keywords : alkaline fuel cell, catalyst, anode, nickel

RINGKASAN

Analisis Performa *Alkaline Fuel Cell* Dengan Katalis Ni/C Pada Anoda ; Raafi Aditya Nugraha ; 201910101078; 38 Halaman; Jurusan Teknik Mesin Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Jember.

Permintaan energi global terus meningkat, tetapi bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbarui masih menjadi kontributor utama. Oleh karena itu, pengembangan energi terbarukan menjadi fokus perhatian. Energi berbasis hidrogen menjadi salah satu alternatif yang sedang dikembangkan. Hidrogen dapat diaplikasikan dalam sistem pembangkit listrik yaitu dengan cara penggunaan sel bahan bakar (*fuel cell*) melalui proses elektrokimia. Pengaplikasian *fuel cell* memiliki beberapa jenis, salah satunya adalah sel bahan bakar alkali (*alkaline fuel cell*). *Alkaline fuel cell* adalah alternatif yang menarik dibandingkan dengan *Polymer electrolyte fuel cell* (PEFC) karena bereaksi dalam media basa sehingga dapat menggunakan katalis selain logam mulia (*non noble metal catalyst*). Penelitian ini dilakukan secara eksperimental yang bertujuan untuk mengembangkan material katalis anoda dengan material selain logam mulia namun dengan performa terbaik. Salah satu katalis berbasis logam non mulia yang banyak digunakan dalam *alkaline fuel cell* adalah nikel, karena nikel mudah ditemukan dipasaran dan harganya yang relatif murah. Pada penelitian ini menggunakan material nikel *metal powder* yang dicampurkan dengan material pendukung (*support material*) karbon hitam atau biasa disebut dengan istilah Ni/C dan material pengikat *polytetrafluoroethylene*. Konsentrasi nikel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu 0%, 10%, dan 20% dari berat keseluruhan. Hasil tertinggi pada penelitian ini terdapat pada variasi konsentrasi katalis nikel 20% dengan *output* tegangan sebesar 111,17 mV, arus listrik sebesar $73 \times 10^{-4} \text{ mA/cm}^2$ dan efisiensi sebesar 7,50 %. Dari hasil penelitian ini dapat diketahui bahwa semakin tinggi konsentrasi nikel pada katalis anoda maka performa *alkaline fuel cell* juga semakin meningkat.

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, akan sangat sulit bagi penulis untuk menyelesaikannya. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Bapak Dr. Ir. Salahuddin Junus, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Jember;
3. Bapak Ir. Muhammad Trifiananto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik;
4. Bapak Dr. Nasrul Ilminnafik, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama dan Bapak Ir. Fransiscus Xaverius Kristianta M.Eng. selaku Dosen Pembimbing Anggota skripsi yang telah membimbing, memberi motivasi dan saran selama melakukan proses penyusunan skripsi ini;
5. Kedua orang tua penulis Bapak Didik Budi Hariyanto S.Sos. dan Ibu Retno Sri Hastuti S.E yang telah memberikan bimbingan, semangat, motivasi, doa, dukungan moral dan finansial kepada penulis hingga dapat menyelesaikan studi sarjana;
6. Kakek dan nenek, Alm. Bapak H. Kusni Gondosuseno S.Pd., Almh. Ibu Musini Ama.Pd., dan Ibu Suharsih yang telah memberikan dukungan moral dan finansial kepada penulis;
7. Naning Maskuriah, selaku *partner* hidup yang telah menemani perjuangan dan selalu memberikan dukungan penulis dalam berproses hingga saat ini;

8. Adik penulis M.Hafidz B.K yang senantiasa memberikan semangat kepada penulis;
9. Keluarga besar penulis yang selalu memberikan support untuk menyelesaikan studi sarjana;
10. Sahabat penulis Aron Enruico, M. Rizal Miftahuddin, M. Fahrur Roji, M. Rifqy Alfariz, M. Khadafi I.H.S.S. yang telah menemani masa perkuliahan dan berjuang bersama;
11. Seluruh saudara Tawang Alun Unej Team yang telah memberikan pengalaman dan *skill* yang bermanfaat;
12. Seluruh teman-teman mahasiswa Teknik Mesin Universitas Jember terutama angkatan 2020 (M22);
13. Dan seluruh pihak yang telah membantu dalam pengerjaan skripsi penulis kali ini.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRAK	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL	xiii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Fuel Cell</i>	5
2.1.1. Pengertian <i>Fuel Cell</i>	5
2.2 <i>Alkaline Fuel Cell (AFC)</i>	5
2.2.1. Pengertian <i>Alkaline Fuel Cell</i>	5
2.2.2. Prinsip Dasar <i>Alkaline Fuel Cell</i>	6
2.3 Elektroda	7
2.3.1. Anoda.....	7
2.3.2. Katoda.....	8
2.4 Lapisan Difusi Gas.....	8
2.5 Katalis <i>Fuel Cell</i>	9
2.6 Perhitungan	11
2.6.1 Rugi Resistansi (<i>Ohmic Loses</i>).....	11
2.6.2 Konduktivitas Listrik	11
2.6.3 Daya Listrik	12
2.6.4 Efisiensi	12
2.7 Penelitian Sebelumnya.....	13
2.8 Hipotesis	14
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	15
3.1 Metode Penelitian	15

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	15
3.3 Alat dan Bahan.....	15
3.2.1 Alat	15
3.2.2 Bahan	16
3.4 Variabel Penelitian.....	16
3.5 Prosedur Penelitian	17
3.6.1 Studi Literatur	17
3.6.2 Perancangan <i>Alkaline Fuel Cell</i>	17
3.6.3 Preparasi Katalis	18
3.6.4 Preparasi <i>Gas Diffusion Electrode</i> (GDE).....	18
3.6.5 Pengambilan Data.....	19
3.6 Analisis Data.....	19
3.7 Diagram Alir Penelitian	21
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	22
4.1 Data Hasil Pengujian	22
4.1.1 Tegangan Listrik.....	22
4.1.2 Arus Listrik.....	23
4.2 Hasil Perhitungan.....	24
4.2.1 Konduktivitas Listrik Elektroda	24
4.2.2 Daya Listrik	25
4.2.3 Efisiensi <i>Alkaline Fuel Cell</i>	26
4.3 Pembahasan	26
4.3.1 Konduktivitas Listrik Elektroda	26
4.3.2 Tegangan Listrik.....	27
4.3.3 Arus Listrik.....	28
4.3.4 Daya Listrik	29
4.3.5 Analisa Efisiensi	30
4.3.6 Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya.....	32
BAB 5. KESIMPULAN	34
5.1 Kesimpulan	34
5.2 Saran	34
DAFTAR PUSTAKA	35
LAMPIRAN.....	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Prinsip Kerja <i>Alkaline Fuel Cell</i>	7
Gambar 2. 2 Lapisan <i>Gas Diffusion Electrode</i> (GDE)	9
Gambar 3. 1 Skema <i>alkaline fuel cell</i>	17
Gambar 3. 2 Skema <i>Gas Diffusion Electrode</i>	19
Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 4. 1 Grafik waktu terhadap tegangan listrik	23
Gambar 4. 2 Grafik waktu terhadap arus listrik	24
Gambar 4. 3 Grafik variasi nikel terhadap tegangan listrik	27
Gambar 4.4 Grafik variasi nikel terhadap arus listrik	29
Gambar 4.5 Grafik variasi nikel terhadap daya listrik	30
Gambar 4.6 Grafik efisiensi <i>alkaline fuel cell</i>	31

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Variasi komposisi katalis	18
Tabel 4. 1 Data hasil pengukuran tegangan listrik.....	22
Tabel 4. 2 Data hasil pengukuran arus listrik.....	23
Tabel 4.3 Tabel nilai konduktivitas listrik elektroda	25
Tabel 4.4 Data hasil perhitungan daya listrik.....	25
Tabel 4.5 Data hasil perhitungan efisiensi <i>alkaline fuel cell</i>	26
Tabel 4.6 Perbandingan dengan penelitian terdahulu	32

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Permintaan energi global meningkat dari hari ke hari karena pertumbuhan populasi, ekonomi dan teknologi yang berkembang. Namun hingga saat ini bahan bakar berbasis fosil merupakan kontributor utama dalam pemenuhan energi global. Sifat bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbarui seperti batu bara, minyak, dan gas alam telah mendorong pemerintah di banyak negara untuk memikirkan tentang ketahanan energi (Ren J. *et al.*, 2016). Permintaan energi mulai meningkat saat ini sehingga banyak perhatian telah dicurahkan untuk pengembangan energi terbarukan. Penggantian sumber energi konvensional yang digunakan saat ini dengan sumber energi terbarukan akan berkontribusi pada pengurangan penggunaan bahan bakar fosil. Salah satu energi alternatif yang saat ini dikembangkan adalah energi berbasis hidrogen.

Hidrogen adalah sumber energi bebas karbon yang memiliki kemampuan menggantikan bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi dunia. Karena tidak meninggalkan jejak karbon, sehingga hidrogen dianggap sebagai energi yang bersih dan ramah lingkungan. Hidrogen dapat diaplikasikan dalam sistem pembangkit listrik yaitu dengan cara penggunaan sel bahan bakar (*fuel cell*). *Fuel cell* menjadikan hidrogen sebagai bahan bakar dan secara langsung mengoksidasinya menjadi listrik melalui proses elektrokimia. *Fuel cell* akan memainkan peran penting dalam mendorong transisi masa depan menuju sistem energi berkelanjutan yang tidak menghasilkan banyak emisi karbon. (Singla *et al.*, 2021). Pengaplikasian *fuel cell* memiliki beberapa jenis, salah satunya adalah sel bahan bakar alkali (*alkaline fuel cell*). *Alkaline fuel cell* adalah alternatif yang menarik dibandingkan dengan *Polymer electrolyte fuel cell* (PEFC) karena bereaksi dalam media basa sehingga dapat menggunakan katalis selain logam mulia, salah satunya adalah katalis berbasis nikel (Schulze, M., & Gülzow, E., 2004). Beberapa peneliti juga melakukan penelitian tentang katalis nikel untuk meningkatkan performa *alkaline fuel cell*.

Penelitian yang dilakukan oleh Suardamana *et al.*, (2014) menunjukkan bahwa pada *alkaline fuel cell* dengan elektroda plat *stainless steel* 304 mampu memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan seri 430, diperoleh tegangan listrik sebesar 25 mV dan arus 0,2 mA. Oleh karena itu beberapa peneliti mencari alternatif untuk meningkatkan performa *alkaline fuel cell* dengan cara menggunakan katalis berbasis nikel (Ni) pada anoda. Katalis berbasis nikel pada anoda merupakan salah satu elektrokatalis reaksi oksidasi hidrogen alternatif tanpa menggunakan platina (Davydova *et al.*, 2018). Penelitian tentang katalis berbasis nikel yang dipadukan dengan karbon dilakukan oleh (Shim J., P. *et al.*, 1998) menunjukkan bahwa aktivitas katalitik pada elektroda nikel Raney yang mengandung karbon hitam, dua kali lipat lebih besar daripada elektroda yang tidak didoping oleh karbon. Elektroda yang mengandung nikel Raney menunjukkan performa tertinggi pada elektroda karena konduktivitas listrik dan difusivitas ion hidroksida yang tinggi. Penelitian lainnya tentang katalis berbasis nikel yang dipadukan dengan karbon dilakukan oleh Chatterjee A., K. *et al.*, (2003) mengungkapkan bahwa elektroda dengan karbon berlapis nikel menghasilkan kerapatan arus yang tinggi yaitu sebesar 168,01 mA/cm² pada tegangan 0,2 V.

Berdasarkan uraian di atas maka akan dilakukan sebuah penelitian untuk mengetahui performa (tegangan listrik, arus listrik, dan efisiensi) pada *alkaline fuel cell* terhadap variasi konsentrasi katalis nikel dengan *support material* berupa karbon (Ni/C). Penelitian ini dilakukan sebagai bentuk pengembangan *alkaline fuel cell* sederhana, dengan biaya yang terjangkau.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap arus listrik yang di hasilkan *alkaline fuel cell*?
2. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap tegangan listrik yang di hasilkan *alkaline fuel cell*?
3. Bagaimana pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap efisiensi *alkaline fuel cell*?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang digunakan dalam proposal penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan pada malam hari pukul 19.00-24.00 WIB.
2. Penelitian ini dilakukan di ruangan tertutup.
3. Kondisi lingkungan selama penelitian diasumsikan tetap dan tidak berubah selama pengambilan data. Variabel seperti suhu, tekanan, dan kelembaban dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap arus listrik yang di hasilkan *alkaline fuel cell*.
2. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap tagangan listrik yang di hasilkan *alkaline fuel cell*.
3. Mengetahui pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel terhadap efisiensi *alkaline fuel cell*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang akan di dapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan literatur dalam bidang energi terbarukan.

2. Memberikan informasi tentang pengaruh variasi konsentrasi katalis nikel pada *alkaline fuel cell*.
3. Memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi energi alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Fuel Cell*

2.1.1. Pengertian *Fuel Cell*

Sel bahan bakar (*fuel cell*) adalah perangkat konversi energi yang secara terus menerus mengubah energi kimia dalam bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi elektrokimia, selama bahan bakar dan oksidan tersedia. Proses reaksi pada *fuel cell* adalah kebalikan dari elektrolisis yang mengubah air menjadi ion hidrogen dan oksigen. Dalam *fuel cell* hidrogen bertindak sebagai bahan bakar dan oksigen bertindak sebagai oksidan, yang apabila bereaksi akan menghasilkan listrik, panas dan air. *Fuel cell* dan baterai memiliki prinsip kerja yang sama, tetapi ada beberapa hal yang membedakan keduanya. Sementara baterai sekadar menyimpan energi, sedangkan *fuel cell* tidak dapat menyimpan energi, *fuel cell* harus terus diisi dengan bahan bakar (reagen) untuk memperoleh energi melalui reaksi kimia yang berkelanjutan. *Fuel cell* membutuhkan gas oksigen dan gas hidrogen untuk menghasilkan energi. Prinsip kerja *fuel cell* ini mirip dengan prinsip mesin pembakaran internal yang memerlukan reaksi antara bahan bakar minyak dan oksigen untuk mengubah energi kimia menjadi energi mekanik (Erwin *et al.*, 2018).

2.2 *Alkaline Fuel Cell (AFC)*

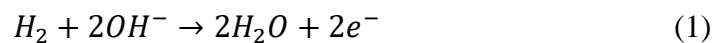
2.2.1. Pengertian *Alkaline Fuel Cell*

Alkaline Fuel Cell (AFC) telah terbukti memberikan kepadatan daya yang tinggi dan dapat mencapai masa pakai yang cukup lama, sehingga dapat bersaing dengan teknologi *fuel cell* modern seperti *Polymer Exchange Membran Fuel Cell (PEMFC)*. Elektrolit yang digunakan dalam sel bahan bakar ini adalah larutan basa yang harganya relatif murah. Sifat elektrolit yang tidak korosif memfasilitasi penggunaan beragam bahan katalis selain logam berbasis platinum, sehingga memungkinkan untuk diproduksi secara massal dengan biaya yang murah (Hamada. *et.al*, 2023).

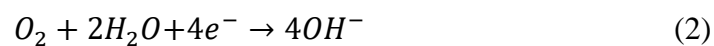
2.2.2. Prinsip Dasar *Alkaline Fuel Cell*

Prinsip dasar pengoperasian *alkaline fuel cell* dengan *fuel cell* pada umumnya adalah sama, yaitu bahan bakar bereaksi di anoda, sedangkan oksidan bereaksi di katoda, sehingga menghasilkan daya listrik dan air. Namun yang membedakan *alkaline fuel cell* dengan *fuel cell* lainnya adalah penggunaan elektrolit basa yang merupakan konduktor ion hidroksida (OH^-) yang diperoleh dari larutan kalium hidroksida (KOH).

Pada anoda *alkaline fuel cell* terjadi reaksi oksidasi hidrogen. Pada reaksi ini hidrogen yang masuk bereaksi dengan 2 ion OH^- dari larutan elektrolit, kemudian menghasilkan 2 molekul air dan 2 elektron. Reaksi redoks yang terjadi dituliskan dalam persamaan 1.



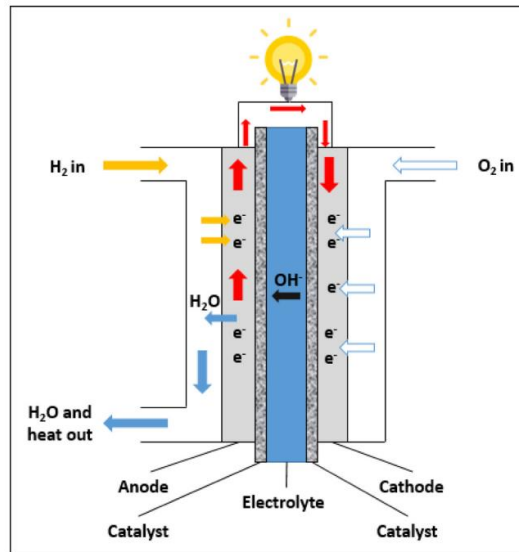
Pada sisi katoda, reaksi yang terjadi adalah reaksi reduksi oksigen. Pada reaksi ini molekul oksigen dan 2 molekul air dikombinasikan untuk membentuk ion OH^- . Kemudian ion OH^- berdifusi melalui larutan elektrolit untuk menuju sisi anoda. Reaksi redoks yang terjadi dituliskan dalam persamaan 2.



Dari reaksi oksidasi dan reduksi pada persamaan 1 dan 2 digabungkan untuk membentuk reaksi total yang dituliskan pada persamaan 3 (Ferriday, T. B., & Middleton, P. H., 2021).



Dari persamaan reaksi yang terjadi pada *alkaline fuel cell* dapat digambarkan dalam prinsip kerja *alkaline fuel cell* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 (Hamada, et.al, 2023).



Gambar 2. 1 Prinsip Kerja *Alkaline Fuel Cell* (Hamada *et al.*, 2023)

2.3 Elektroda

Elektroda merupakan suatu komponen penting dalam *fuel cell* yang berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi pada *fuel cell*. Elektroda terdiri dari dua bagian yaitu sisi anoda dan sisi katoda. Kedua bagian tersebut dipisahkan oleh elektrolit yang berfungsi sebagai tempat terjadinya transfer ion. Pada elektroda juga terdapat lapisan katalis yang biasanya menggunakan bahan logam mulia untuk mempercepat reaksi redoks oksigen dan hidrogen.

2.3.1. Anoda

Anoda merupakan elektroda yang berinteraksi dengan hidrogen dan berfungsi sebagai batas antara elektrolit dan hidrogen dalam sebuah *fuel cell*. Pada anoda, terjadi reaksi oksidasi hidrogen, di mana hidrogen (H_2) melepaskan elektron dan membentuk ion hidrogen (H^+). Elektron yang dilepaskan oleh hidrogen di anoda kemudian mengalir melalui sirkuit luar, menghasilkan arus listrik yang dapat digunakan. Selain itu, anoda juga berperan dalam membentuk air (H_2O) sebagai produk akhir dari reaksi di *fuel cell*.

Anoda *fuel cell* harus memiliki konduktivitas listrik yang baik agar dapat menghantarkan elektron dengan efisien. Selain itu, anoda juga berfungsi sebagai katalis dalam reaksi oksidasi hidrogen. Katalis ini membantu menurunkan energi aktivasi reaksi, sehingga mempercepat proses oksidasi hidrogen. Material anoda

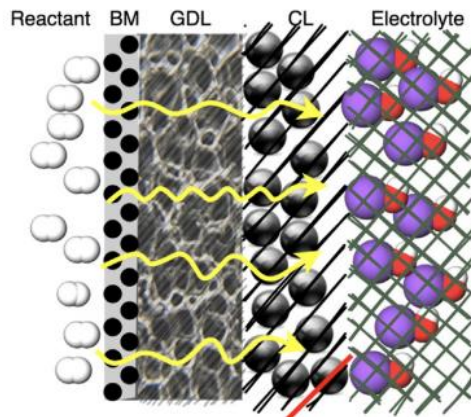
yang umum digunakan adalah platina (Pt) atau paduan logam lainnya (EG&G Technical Services Inc. 1989).

2.3.2. Katoda

Katoda merupakan elektroda yang berinteraksi dengan oksigen dan menjadi batas antara elektrolit dan oksigen. Katoda berfungsi sebagai tempat terjadinya reaksi reduksi oksigen. Selain itu katoda juga sebagai tempat untuk mengkatalis reaksi reduksi oksigen dan menghubungkan elektron dari sirkuit luar menuju tempat reaksi. Selain itu, katoda juga berperan sebagai tempat untuk mengkatalis reaksi reduksi oksigen. Katalis ini membantu menurunkan energi aktivasi reaksi, sehingga mempercepat proses reduksi oksigen. Material katoda yang umum digunakan adalah logam oksida (EG&G Technical Services Inc. 1989).

2.4 Lapisan Difusi Gas

Lapisan difusi gas atau *gas diffusion layer* (GDL) dalam sel bahan bakar merupakan lapisan yang memungkinkan reaktan mencapai situs aktif katalis sekaligus mencegah aliran elektrolit cair masuk ke dalam saluran gas. Lapisan ini adalah komponen yang penting dalam desain elektroda *fuel cell* modern atau biasa disebut *gas diffusion electrode* (GDE), yang biasanya mencakup beberapa lapisan diantaranya adalah, lapisan *backing material* (BM), *gas diffusion layer* (GDL) dan *catalyst layer* (CL) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3. GDL memiliki fungsi untuk memasok bahan bakar dan udara ke lapisan katalis (CL), sekaligus menghentikan elektrolit cair melewati elektroda.. GDL yang ideal harus bersifat menolak terhadap cairan (hidrofobik) dan memiliki konduktivitas listrik yang baik, hal ini dapat dicapai dengan menambahkan karbon hitam (CB) pada campuran yang mengandung PTFE dengan volume 25-60 % (Ferriday, T. B., & Middleton, P. H., 2021). Pada lapisan GDL maupun lapisan katalis, karbon digunakan sebagai *support material* karena dapat meningkatkan kekuatan, konduktivitas, dan kekerasan pada elektroda (Larminie, J., & Dicks, A. 2013).



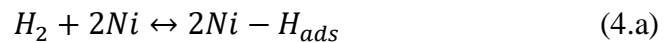
Gambar 2. 2 Lapisan *Gas Diffusion Electrode* (GDE)
(Ferriday, T. B., & Middleton, P. H., 2021).

Dalam *fuel cell*, reaksi elektrokimia terjadi pada permukaan elektroda untuk menghasilkan elektron yang kemudian disalurkan ke sirkuit luar. Proses ini melibatkan interaksi kompleks antara tiga komponen utama di elektroda, yang dikenal sebagai kontak tiga fase atau "*three phase boundary*". Ketiga komponen ini adalah bahan bakar (pada anoda) atau oksigen (pada katoda), elektrolit (dalam bentuk padat atau cair), dan elektroda itu sendiri. Kontak tiga fase ini sangat penting karena merupakan area di mana reaksi elektrokimia berlangsung, memungkinkan transfer elektron yang efisien dari bahan bakar ke sirkuit luar. Optimalisasi kontak tiga fase ini adalah kunci untuk meningkatkan performa dan efisiensi sel bahan bakar secara keseluruhan.

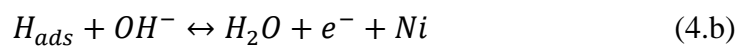
2.5 Katalis *Fuel Cell*

Katalis pada *fuel cell* berfungsi untuk mempercepat proses reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi dengan cara menurunkan energi aktivasi. Menurut Ma'ruf & Widiharsa, (2016) katalis juga merupakan suatu komponen untuk memfasilitasi reaksi oksigen dan hidrogen. Pada *fuel cell*, katalis digunakan untuk membantu mempercepat reaksi redoks yang berlangsung pada reaktor *fuel cell* tetapi tidak ikut bereaksi bersama bahan bakarnya. Berdasarkan jenisnya, katalis dibagi menjadi dua, yaitu katalis berbasis logam mulia (*noble metal catalyst*) dan katalis berbasis logam non mulia (*non noble metal catalyst*). Salah satu katalis berbasis logam non mulia yang banyak digunakan dalam *alkaline fuel cell* adalah nikel, karena nikel mudah ditemukan dipasaran dan harganya yang relatif murah.

Karena sifatnya yang dapat mempercepat reaksi elektrokimia dalam *fuel cell*, nikel dapat digunakan dalam berbagai bentuk, seperti nanopartikel, nanoplat, atau dalam bentuk elektroda berlapis. Akibatnya, nikel sering digunakan sebagai katalis dalam *alkaline fuel cell* (AFC). Nikel memiliki kemampuan untuk meningkatkan kecepatan reaksi elektrokimia yang diinginkan dalam *alkaline fuel cell*, sehingga meningkatkan performa dan efisiensi AFC secara keseluruhan (Oshchepkov, A. G. *et.al.*, 2020). Katalis nikel banyak digunakan dalam anoda *fuel cell*, karena pada anoda terjadi reaksi oksidasi hidrogen, yang berarti molekul hidrogen akan larut dalam larutan elektrolit dan meresap kembali pada permukaan elektroda selama reaksi oksidasi hidrogen (Wang T. *et al.*, 2017) (Cong, Y., Yi, B., & Song, Y. 2018) seperti yang dituliskan dalam persamaan (4).



Setelah itu hidrogen yang teradsorpsi akan teroksidasi :



Dari persamaan 4.a dapat diartikan bahwa terjadi penyerapan hidrogen pada permukaan nikel. Molekul hidrogen (H_2) diserap pada permukaan nikel, membentuk ikatan antara hidrogen dan nikel. Nikel memiliki afinitas yang baik terhadap hidrogen, sehingga dapat memfasilitasi penyerapan molekul hidrogen pada permukaannya. Setelah diserap, ikatan kovalen dalam molekul hidrogen (H-H) dilemahkan dan akhirnya terputus dengan bantuan katalis nikel, proses ini disebut disosiasi atau pemutusan ikatan kimia. Setelah ikatan H-H terputus, atom-atom hidrogen teradsorpsi pada permukaan nikel dalam bentuk spesies teradsorpsi (H-ads). Pada persamaan 4.b Spesies hidrogen teradsorpsi (H-ads) pada permukaan nikel kemudian bereaksi dengan ion hidroksida (OH^-) dari elektrolit alkalin, menghasilkan air (H_2O) dan melepaskan elektron (e^-) sesuai dengan reaksi anoda. Setelah reaksi selesai, permukaan katalis nikel menjadi bebas kembali, sehingga siap untuk menyerap molekul hidrogen baru dan mengulang siklus reaksi katalitik (Sheng, W, *et.al*, 2010).

Komposisi katalis dalam elektroda dapat berpengaruh terhadap peningkatan laju reaksi. Semakin banyak kandungan katalis dalam elektroda, maka luas permukaan katalis akan meningkat, dengan meningkatnya luas permukaan katalis maka laju adsorpsi reaktan akan semakin meningkat (Shukla, A. K. *et al.* 1986). Sehingga banyak reaktan yang bereaksi dalam elektroda dan melepas elektronnya yang mengakibatkan meningkatnya tegangan, dan arus yang dihasilkan oleh *fuel cell*.

2.6 Perhitungan

2.6.1 Rugi Resistansi (*Ohmic Loses*)

Rugi resistansi merupakan kerugian akibat hambatan listrik pada elektroda, dan hambatan terhadap aliran ion dalam elektrolit (Larminie, J., & Dicks, A. 2013). Persamaan yang menyatakan tentang rugi resistansi dapat dinyatakan dengan ukuran penurunan tegangan hanya sebanding dengan arus, seperti dalam persamaan 5.

$$V = I \times R \quad (5)$$

Dimana:

V = Tegangan listrik (V)

I = Arus Listrik (A)

R = Resistansi/Hambatan (Ohm)

2.6.2 Konduktivitas Listrik

konduktivitas listrik (σ) adalah kebalikan dari resistivitas (ρ), yang merupakan ukuran kemampuan bahan untuk menghantarkan arus listrik. Hubungan antara konduktivitas listrik, resistivitas, dan hambatan listrik dinyatakan dengan persamaan 6.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{R/(L \times A)} \quad (6)$$

Keterangan :

σ = Konduktivitas listrik (dalam satuan Siemens per meter, S/m)

- ρ = Resistivitas (dalam satuan ohm-meter, $\Omega \cdot m$)
 L = Panjang Penampang penghantar (m)
 R = Hambatan listrik (dalam satuan ohm, Ω)
 A = Luas penampang penghantar (m^2)

Persamaan konduktivitas listrik ini menunjukkan bahwa konduktivitas listrik suatu bahan berbanding terbalik dengan resistivitasnya. Semakin besar konduktivitas listrik suatu bahan, maka semakin mudah bahan tersebut menghantarkan arus listrik (Halliday, D., et.al 2014).

2.6.3 Daya Listrik

Daya listrik (W_{el}) merupakan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan *fuel cell* seperti yang dinyatakan pada persamaan 7 (Barbir F., 2013).

$$W_{el} = V \times I \quad (7)$$

Keterangan :

- W_{el} = daya keluaran listrik yang dihasilkan *fuel cell* (Watt)
 V = tegangan listrik (V)
 I = arus listrik (A)

2.6.4 Efisiensi

Efisiensi *fuel cell* didefinisikan sebagai rasio antara listrik yang dihasilkan dan hidrogen yang dikonsumsi. Efisiensi *fuel cell* dinyatakan dalam konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik. Efisiensi yang tinggi sangat diinginkan untuk penggunaan bahan bakar secara optimal. Untuk mencari efisiensi *fuel cell* dapat menggunakan persamaan 8.a (Barbir F., 2013).

$$\eta = \frac{W_{el}}{W_{H_2}} \quad (8.a)$$

Konsumsi hidrogen menurut hukum Faraday adalah berbanding lurus dengan arus yang dihasilkan. Maka dari itu dapat dituliskan dalam persamaan 8.b & 8.c.

$$N_{H_2} = \frac{I}{nF} \quad (8.b)$$

$$W_{H_2} = \Delta H \frac{I}{nF} \quad (8.c)$$

Keterangan :

η : Efisiensi (%)

W_{H_2} : nilai energi hidrogen yang dikonsumsi dalam Joule per detik (J/s)/(Watt)

n : jumlah elektron yang ditransfer (dalam kasus ini $n=2$)

F : konstanta Faraday (96,485 *Coulomb/mol*)

N_{H_2} : Jumlah hidrogen yang dikonsumsi (mol/s)

ΔH : *hydrogen higher heating value* (286 *kJ/mol*)

Menurut Barbir F., (2013) $\frac{\Delta H}{nF}$ memiliki dimensi volt, dan nilai $\Delta H = 286 \text{ kJ mol}^{-1}$ memiliki nilai sebesar 1,482 V dalam HHV (*Higher Heating Value*), yang disebut sebagai potensial termonetral. Dengan menggabungkan Persamaan 8.a hingga 8.c, efisiensi *fuel cell* berbanding lurus dengan tegangan listrik. Maka dapat dituliskan dalam persamaan 9.

$$\eta = \frac{V}{1,482} \quad (9)$$

Tegangan yang digunakan dalam persamaan 9 merupakan tegangan aktual yang diperoleh dari *output fuel cell* dan diasumsikan bahan bakar (hidrogen) diubah sepenuhnya didalam *fuel cell*.

2.7 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang dilakukan oleh Suardamana *et al.*, (2014) menunjukkan bahwa pada *alkaline fuel cell* dengan elektroda plat *stainless steel* 304 mampu memberikan performa yang lebih baik dibandingkan dengan seri 430, diperoleh tegangan listrik sebesar 25 mV dan arus listrik sebesar 0,2 mA menggunakan satu pasang elektroda pada menit ke 30. Penelitian tentang katalis berbasis nikel dilakukan oleh Shim J.P *et al.*, (1998) menunjukkan bahwa aktivitas katalitik pada elektroda nikel Raney yang mengandung karbon hitam dua kali lipat dari elektroda yang tidak didoping oleh karbon, *output* arus dan tegangan tertinggi yaitu sebesar 100 mV. Ketika jumlah karbon hitam meningkat, maka kepadatan arus akan semakin meningkat atau tinggi. Penelitian lainnya tentang katalis berbasis nikel yang dipadukan dengan karbon dilakukan oleh Chatterjee A., K. *et al.*, (2003)

mengungkapkan bahwa elektroda dengan karbon berlapis nikel menghasilkan kerapatan arus yang tinggi yaitu sebesar $168,01 \text{ mA/cm}^2$ pada tegangan 0,2 V. Penelitian ini juga menyatakan bahwa elektroda *fuel cell* yang dilapisi nikel memiliki karakteristik yang mirip dengan platina. Oleh karena itu, nikel dapat digunakan sebagai pengganti platina.

2.8 Hipotesis

Berdasarkan studi literatur, hipotesis penelitian ini adalah bahwa semakin besar presentase komposisi katalis nikel pada *alkaline fuel cell* akan meningkatkan arus listrik, tegangan listrik, dan efisiensi sel. Hal ini disebabkan oleh perluasan area permukaan reaktif untuk penyerapan dan reaksi hidrogen, yang menghasilkan lebih banyak elektron.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode eksperimental dengan variasi katalis anoda *alkaline fuel cell*. Pengamatan dilakukan secara langsung untuk memperoleh data. Dalam penelitian ini yang diamati adalah variasi komposisi katalis nikel dengan support material berupa karbon hitam (Ni/C) terhadap performa *alkaline fuel cell*.

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi dan waktu untuk melaksanakan penelitian adalah sebagai berikut:

Lokasi : Workshop UKM Otomotif Tawang Alun Universitas Jember.

Waktu : November 2023 – Selesai

3.3 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat

Adapun peralatan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Satu unit *alkaline fuel cell*
2. Tabung gas oksigen & hidrogen
3. *Valve*
4. *Pressure gauge*
5. Selang gas
6. Multimeter
7. Data logger
8. Papan *breadboard*
9. Kabel & penjepit buaya
10. Lampu LED 3mm
11. Alat Press
12. *Furnance*
13. Pipa Stainless

3.2.2 Bahan

Adapun bahan yang digunakan dalam percobaan ini yaitu:

1. Karbon hitam (*carbon black vulcan N330 CABOT powder by MERAKI CHEMICAL*)
2. Serbuk Nikel (*Nickel powder by LOBA CHEMIE PVT. LTD.*)
3. Serbuk *Polytetrafluoroethylene* (PTFE)
4. *Isoprophyl alcohol*
5. *Stainless steel 304*
6. *Stainless steel mesh*
7. Gas Oksigen
8. Gas Hidrogen

3.4 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas dari penelitian ini adalah pengaruh variasi nikel dan karbon dengan komposisi nikel 0%, 10%, dan 20%, yang diaplikasikan pada anoda *alkaline fuel cell*.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Arus listrik (mA)
- b. Tegangan listrik (mV)
- c. Efisiensi (%)

3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Konsentrasi KOH dalam larutan elektrolit 30%
- b. Elektroda yang digunakan adalah jenis *gas diffusion electrode* (GDE) dengan luas aktif 30 cm²
- c. Katalis pada katoda adalah (MnO₂/C) dengan konsentrasi 10%
- d. Tekanan Hidrogen 1 Bar

- e. Tekanan Oksigen 0,5 Bar

3.5 Prosedur Penelitian

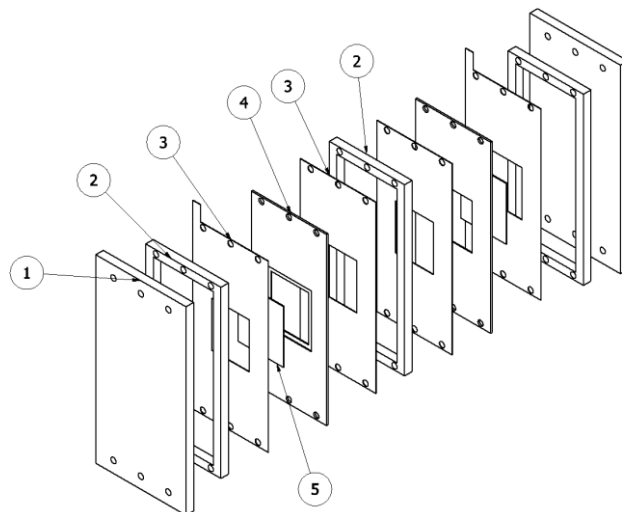
Prosedur yang dilakukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

3.6.1 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan tujuan untuk mengumpulkan, menelaah, dan menganalisis berbagai sumber informasi yang relevan dengan topik penelitian. Studi literatur dilakukan dengan cara mengumpulkan sumber literatur yang relevan dengan penelitian yang didapatkan dari jurnal ilmiah, buku akademik, maupun laporan penelitian terdahulu.

3.6.2 Perancangan *Alkaline Fuel Cell*

Alkaline fuel cell yang dirancang dalam penelitian ini menggunakan elektroda *gas diffusion electrode* (GDE) yang terdiri dari dua lapisan yaitu katalis sebagai tempat reaksi dan difusi gas untuk menahan kebocoran elektrolit. Konsentrasi KOH yang digunakan dalam larutan elektrolit adalah sebesar 30%. *Alkaline fuel cell* disusun dalam satu *stack* yang terdiri dari beberapa bagian yaitu, *monopolar plate* sebagai tempat hidrogen, oksigen dan elektrolit, *Current collector*, *gasket*, *gas diffusion electrode* (GDE), yang diapit dengan *end plate* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Skema *alkaline fuel cell*

Keterangan :

- | | | |
|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| 1. <i>End Plate</i> | 2. <i>Monopolar Plate</i> | 5. <i>Gas diffusion electrode</i> |
| 3. <i>Current Collector</i> | 4. <i>Gasket</i> | |

3.6.3 Preparasi Katalis

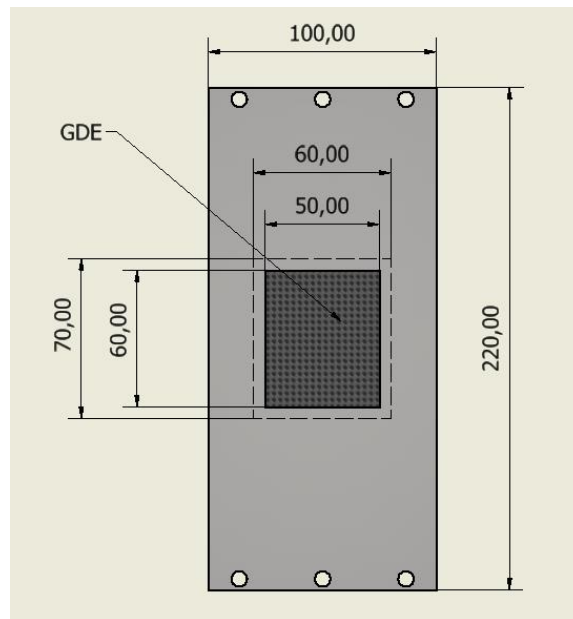
Nikel yang digunakan sebagai katalis merupakan nikel metal powder yang didapatkan dari online marketplace, sedangkan karbon yang digunakan adalah *carbon black*. Nikel, *carbon black* dan *Polytetrafluoretylene* (PTFE) dengan berat total 4 gram dicampurkan hingga homogen dan ditambahkan *isoprophyl alcohol* hingga menjadi pasta kemudian digulung secara manual pada permukaan *stainless steel mesh* (*backing material*) hingga membentuk lembaran. Luasan aktif permukaan katalis pada elektroda adalah 50×60 mm. Variasi komposisi nikel dan karbon yang akan digunakan dalam penelitian ini dicantumkan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variasi komposisi katalis

	Nikel (Ni)	Karbon (C)	PTFE
Ni 0%	0%	10%	90%
Ni 10%	10%	10%	80%
Ni 20%	20%	10%	70%

3.6.4 Preparasi *Gas Diffusion Electrode*(GDE)

Lapisan difusi gas dibuat dengan cara yang sama yaitu dengan mencampurkan *carbon black* dengan PTFE dengan komposisi 2:8 dengan berat 4 gram dan ditambahkan *isopropyl alcohol*. Untuk membuat *gas diffusion electrode*, lapisan katalis dan lapisan difusi gas disusun pada *stainless steel mesh* 100 dengan ukuran 60 x 70 mm, ditekan menggunakan alat press, dan kemudian dipanaskan pada suhu 320°C dalam *furnance* selama 30 menit untuk memberikan karakteristik hidrofobik. GDE yang telah dibuat kemudian diukur resistansinya untuk menemukan nilai konduktivitas listrik, agar memenuhi standart, GDE harus memiliki nilai konduktivitas listrik lebih dari 0,01 S/m (Rohendi, D., & Adnan, Y. 2010) (Halfon, E. B., & Suss, M. E., 2019). Skema *gas diffusion electrode* dapat dilihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Skema *Gas Diffusion Electrode*

3.6.5 Pengambilan Data

Dalam penelitian ini, data akan diambil di dalam ruangan (ruangan tertutup) antara pukul 19.00 hingga 24.00 WIB. Kondisi lingkungan selama pengambilan data akan dijaga agar tetap konsisten. Output dari *alkaline fuel cell*, berupa arus listrik (mA) dan tegangan listrik (mV), akan dicatat setiap 2 menit selama 10 menit dengan menggunakan pembebanan lampu LED. Pengulangan pengambilan data akan dilakukan sebanyak 3 kali pada setiap variasi sampel katalis. Proses pengambilan data dimulai ketika gas hidrogen dan oksigen disuplai ke dalam *alkaline fuel cell*.

3.6 Analisis Data

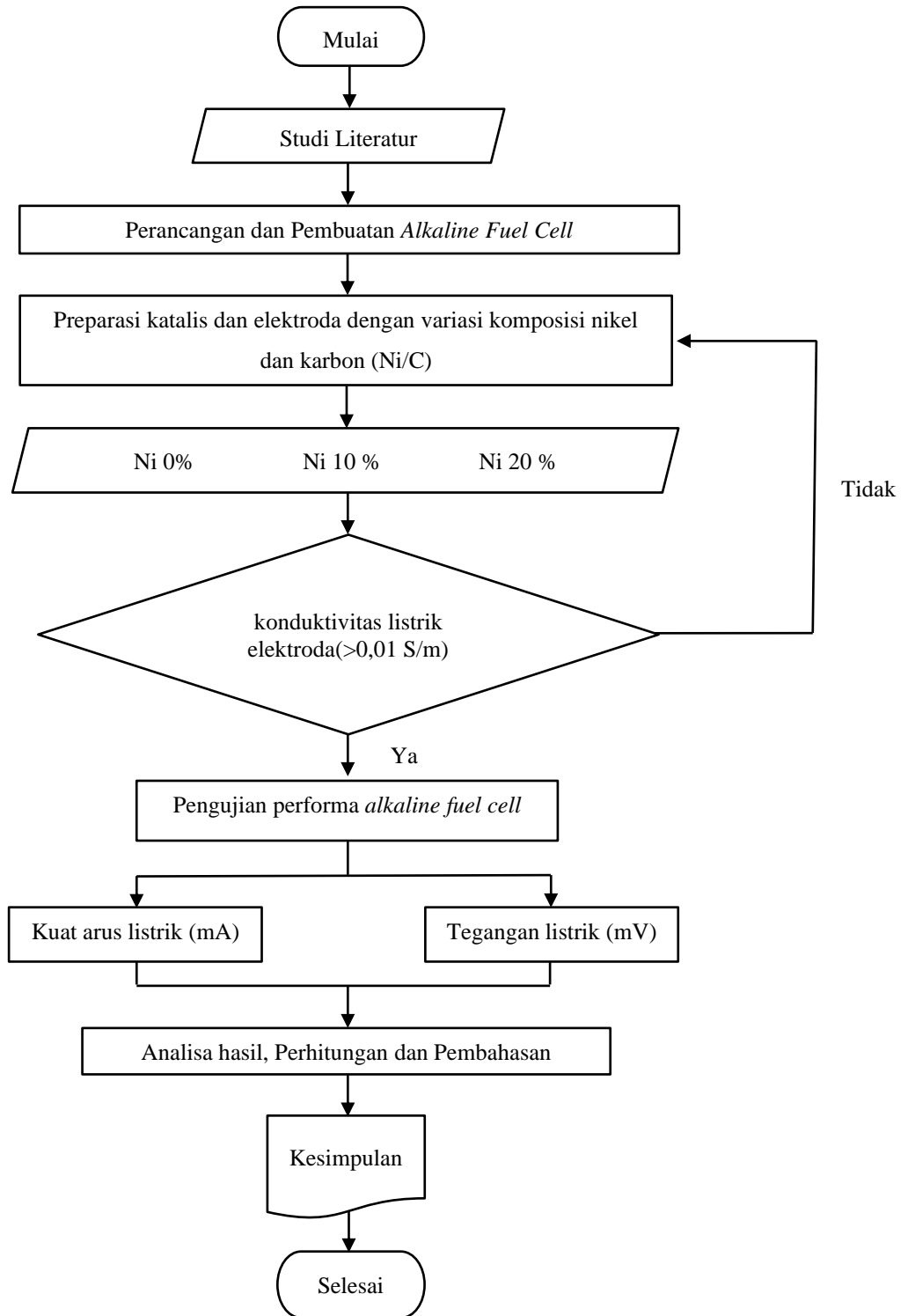
Penelitian ini menggunakan metode analisis berupa tampilan grafik yang menampilkan analisa pengaruh katalis dengan variasi campuran nikel dan karbon (Ni 0%, Ni 10%, dan Ni 20%) pada *alkaline fuel cell* terhadap arus dan tegangan yang dihasilkan. Analisis data digunakan untuk mencari variasi campuran katalis nikel dan karbon terbaik yang dapat digunakan dalam pengoperasian *alkaline fuel cell*. Analisis pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis tegangan listrik (mV) yang dihasilkan *alkaline fuel cell* dengan variasi komposisi katalis pada anoda.

2. Menganalisis arus listrik (mA) yang dihasilkan *alkaline fuel cell* dengan menggunakan beban berupa lampu LED pada setiap variasi komposisi katalis pada anoda.
3. Menghitung daya (mW) dari hasil keluaran arus dan tegangan *alkaline fuel cell* yang dihitung dengan persamaan 7.
4. Menghitung efisiensi *fuel cell* (%) dengan persamaan 9.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dari penelitian ini di tunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Diagram Alir Penelitian

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Pengujian

Pengambilan data analisis performa *alkaline fuel cell* dengan variasi katalis nikel dan karbon terdiri dari 3 (tiga) parameter yaitu tegangan listrik, arus listrik, dan efisiensi *alkaline fuel cell*.

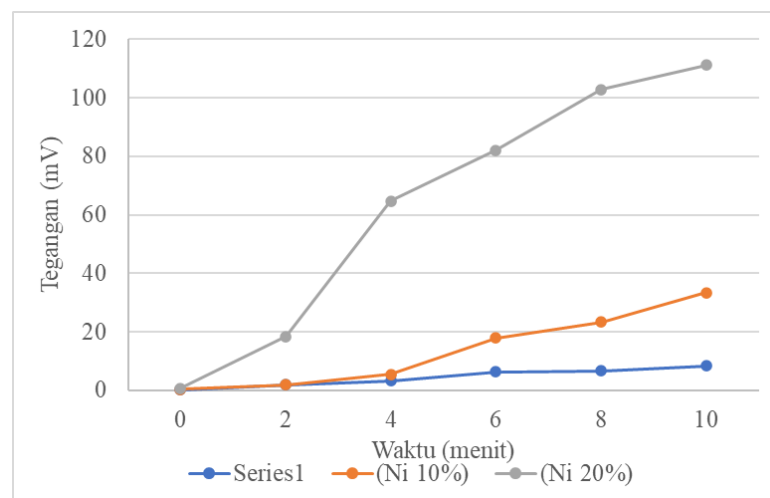
4.1.1 Tegangan Listrik

Pengukuran tegangan listrik pada *alkaline fuel cell* dilakukan pada variasi katalis dengan komposisi Ni 0%, Ni 10%, dan Ni 20%. Pengambilan data dimulai saat gas hidrogen dan oksigen disuplai ke dalam *fuel cell* dengan tekanan 0.5 bar dan 1 bar, pengukuran tegangan listrik menggunakan *datalogger*. Dilakukan pencatatan tegangan listrik setiap 2 menit sekali selama 10 menit, dengan tiga kali pengulangan setiap variasi katalis. Data yang diperoleh disajikan dalam Lampiran 3. Kemudian diolah dan disajikan dalam tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Data hasil pengukuran tegangan listrik

Waktu (menit)	Tegangan Listrik (mV)		
	Ni 0%	Ni 10 %	Ni 20 %
0	0.31	0.40	0.70
2	1.85	1.99	18.43
4	3.28	5.52	64.7
6	6.42	17.93	82.1
8	6.76	23.37	102.9
10	8.40	33.41	111.17

Gambar 4.1 menunjukkan grafik tegangan listrik yang dihasilkan *alkaline fuel cell* terhadap waktu reaksi, pada variasi anoda dengan komposisi Ni 0% yang tertinggi pada menit ke 10 yaitu 8,40 mV dan terendah pada menit ke 2 yaitu 1.85 mV, variasi Ni 10% yang tertinggi pada menit ke 10 yaitu 35,38 mV dan terendah pada menit ke 2 yaitu 1.99 mV, dan variasi Ni 20% yang tertinggi pada menit ke 10 yaitu 111,17 mV dan terendah pada menit ke 2 yaitu 18,43 mV. Tegangan listrik yang dihasilkan meningkat seiring dengan berjalannya waktu reaksi, dan mencapai puncaknya pada menit ke 10.



Gambar 4. 1 Grafik waktu terhadap tegangan listrik

4.1.2 Arus Listrik

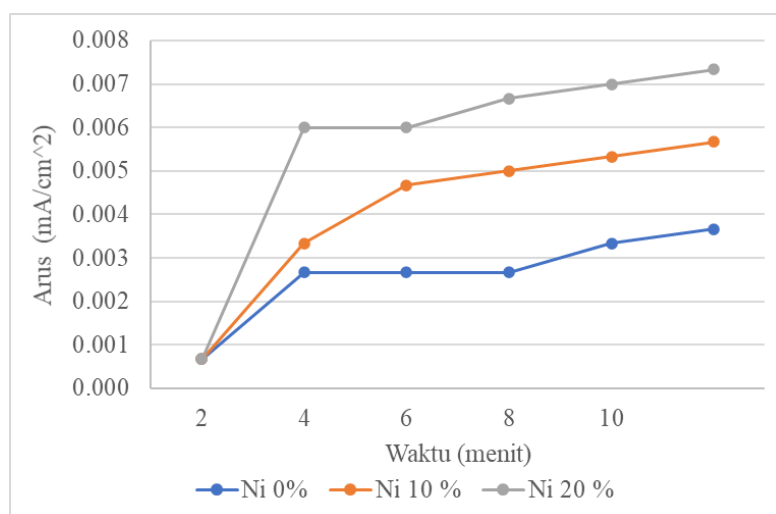
Pengukuran arus listrik pada *alkaline fuel cell* dilakukan pada variasi katalis dengan komposisi Ni 0%, Ni 10%, Ni 20%. Pengambilan data dimulai saat gas hidrogen dan oksigen disuplai ke dalam *fuel cell* dengan tekanan 0.5 bar dan 1 bar menggunakan multimeter. Dilakukan pencatatan arus listrik setiap 2 menit sekali selama 10 menit, dengan tiga kali pengulangan setiap variasi katalis. Data yang diperoleh disajikan dalam Lampiran 4, kemudian diolah dan disajikan dalam Tabel 4.1. Data yang ditampilkan merupakan data pengukuran arus listrik per satuan luas aktif elektroda, dengan luas 30 cm². Saat pengukuran dilakukan pembebanan menggunakan lampu LED dan diperoleh hasil yang dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Data hasil pengukuran arus listrik

Waktu (menit)	Arus Listrik ($\times 10^{-4}$ mA/cm ²)		
	Ni 0%	Ni 10 %	Ni 20 %
0	7	7	7
2	27	33	60
4	27	47	60
6	27	50	67
8	33	53	70
10	37	57	73

Berdasarkan grafik yang disajikan dalam Gambar 4.2, hasil pengukuran arus listrik pada variasi katalis Ni 0% tertinggi pada menit ke 10 yaitu 37×10^{-4} mA/cm²

dan terendah pada menit ke 2 yaitu $27 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$, variasi Ni 10% tertinggi pada menit ke 10 yaitu $57 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$ dan terendah pada menit ke 2 yaitu $33 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$, dan variasi Ni 20% tertinggi pada menit ke 10 yaitu $73 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$ dan terendah pada menit ke 2 yaitu $60 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$. Arus listrik yang dihasilkan meningkat seiring berjalannya waktu reaksi dan mencapai puncaknya pada menit ke 10.



Gambar 4. 2 Grafik waktu terhadap arus listrik

4.2 Hasil Perhitungan

4.2.1 Konduktivitas Listrik Elektroda

Dalam penelitian ini konduktivitas listrik elektroda diukur sebagai acuan kualitas elektroda yang dibuat, karena pembuatan elektroda secara manual dan dengan bahan yang sederhana. Pengukuran nilai konduktivitas listrik dilakukan dengan cara mengukur resistansi dari elektroda menggunakan multimeter digital yang kemudian dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 6. Apabila nilai konduktivitas listrik melebihi standart maka dapat dikatakan bahwa elektroda dapat digunakan dalam penelitian. Data pengukuran resistansi elektroda dapat dilihat dalam Lampiran 2. Dari data resistansi, dilakukan perhitungan dan didapatkan nilai konduktivitas listrik pada elektroda yang disajikan dalam bentuk Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Tabel nilai konduktivitas listrik elektroda

	Konduktivitas listrik (S/m)		
	Ni 0%	Ni 10%	Ni 20%
Rata- rata	0,01	0,02	0,04

Berdasarkan Tabel 4.3 didapatkan hasil perhitungan nilai konduktivitas listrik elektroda pada variasi katalis Ni 0% adalah 0,01 S/m, variasi Ni 10% adalah 0,02 S/m, dan variasi Ni 20% sebesar 0,04 S/m.

4.2.2 Daya Listrik

Daya listrik yang dihasilkan *alkaline fuel cell* didapatkan berdasarkan data rata-rata tegangan listrik dan arus listrik pada setiap variasi katalis anoda dan dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 7. Perhitungan daya listrik pada masing-masing variasi dapat dilihat dalam Lampiran 5, dan disajikan dalam tabel yang dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data hasil perhitungan daya listrik

Waktu (menit)	Daya ($\times 10^{-4}$mW)		
	Ni 0%	Ni 10%	Ni 20%
0	0,06	0,00	0,00
2	1,48	1,99	33,17
4	2,62	7,73	116,46
6	5,14	26,9	164,20
8	6,76	37,39	216,09
10	9,24	56,80	244,57

Berdasarkan Tabel 4.4 didapatkan hasil perhitungan daya listrik pada variasi katalis Ni 0% tertinggi pada menit ke 10 yaitu $9,24 \times 10^{-4}$ mW dan terendah pada menit ke 2 yaitu $1,48 \times 10^{-4}$ mW, variasi Ni 10% tertinggi pada menit ke 10 yaitu $56,80 \times 10^{-4}$ mW dan terendah pada menit ke 2 yaitu $1,99 \times 10^{-4}$ mW, dan variasi Ni 20% tertinggi pada menit ke 10 yaitu $244,57 \times 10^{-4}$ mW dan terendah pada menit ke 2 yaitu $33,17 \times 10^{-4}$ mW.

4.2.3 Efisiensi *Alkaline Fuel Cell*

Efisiensi *alkaline fuel cell* didapatkan berdasarkan data rata-rata tegangan listrik pada setiap variasi katalis anoda dan dilakukan perhitungan menggunakan persamaan 11. Perhitungan efisiensi pada masing-masing variasi dapat dilihat dalam Lampiran 6, dari hasil perhitungan, disajikan dalam bentuk tabel seperti yang ditunjukkan Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Data hasil perhitungan efisiensi *alkaline fuel cell*

Waktu (menit)	Efisiensi (%)		
	Ni 0%	Ni 10 %	Ni 20 %
0	0.02	0.03	0.05
2	0.12	0.13	1.24
4	0.22	0.37	4.37
6	0.43	1.21	5.54
8	0.46	1.58	6.94
10	0.57	2.25	7.50

Berdasarkan Tabel 4.5 didapatkan hasil perhitungan Efisiensi *Alkaline Fuel Cell* pada variasi katalis Ni 0% tertinggi pada menit ke 10 yaitu 0,57% dan terendah pada menit ke 2 yaitu 0,12%, variasi Ni 10% tertinggi pada menit ke 10 yaitu 2,25% dan terendah pada menit ke 2 yaitu 0,13% , dan variasi Ni 20% tertinggi pada menit ke 10 yaitu 7,50% dan terendah pada menit ke 2 yaitu 1,24 %.

4.3 Pembahasan

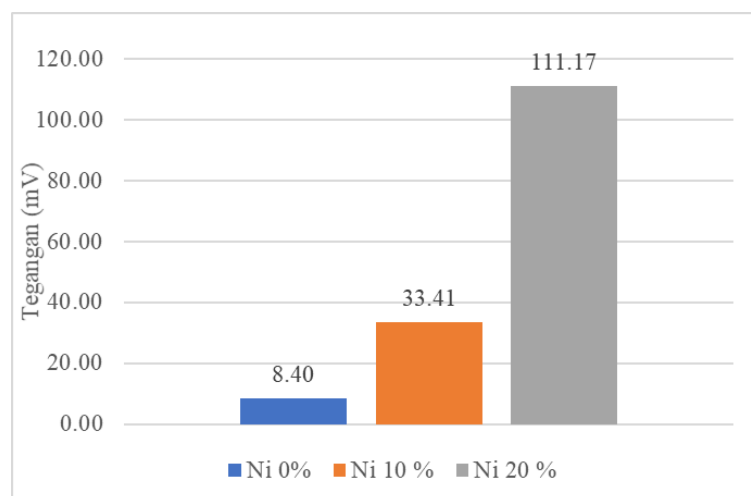
4.3.1 Konduktivitas Listrik Elektroda

Konduktivitas listrik adalah ukuran kemampuan suatu material untuk menghantarkan arus listrik. Nilai konduktivitas tinggi menunjukkan bahwa material tersebut mudah menghantarkan listrik, sedangkan nilai konduktivitas rendah menunjukkan bahwa material tersebut adalah isolator, yang buruk dalam menghantarkan listrik. (Halliday, D., *et al* 2014). Elektroda dengan kualitas yang baik memiliki nilai konduktivitas listriknya melebihi 0,01 S/m (Rohendi, D., & Adnan, Y. 2010). Dari data yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 dapat diketahui bahwa variasi Ni 20% memiliki nilai konduktivitas tertinggi yaitu sebesar 0,04 S/m. Sehingga ketiga sampel dinyatakan layak untuk diuji dalam *alkaline fuel cell* karena

nilai konduktivitas listriknya melebihi standart yang ditetapkan. Peningkatan konduktivitas listrik pada elektroda disebabkan karena nikel yang disuport dengan karbon hitam memiliki konduktivitas listrik yang tinggi. Seperti pada penelitian yang dilakukan oleh Kinoshita H. *et al.* (2008) yang menyatakan bahwa nilai konduktivitas listrik meningkat seiring dengan peningkatan kandungan nikel dalam elektroda.

4.3.2 Tegangan Listrik

Tegangan listrik tertinggi yang dihasilkan *alkaline fuel cell* tercatat pada menit ke 10 sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 4.3. Hasil pengukuran menunjukkan variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0% (tanpa nikel) menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 8,40 mV. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 10% menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 33,41 mV. Variasi katalis dengan kosentrasi nikel 20% menghasilkan tegangan tertinggi sebesar 111,17 mV.



Gambar 4. 3 Grafik variasi nikel terhadap tegangan listrik

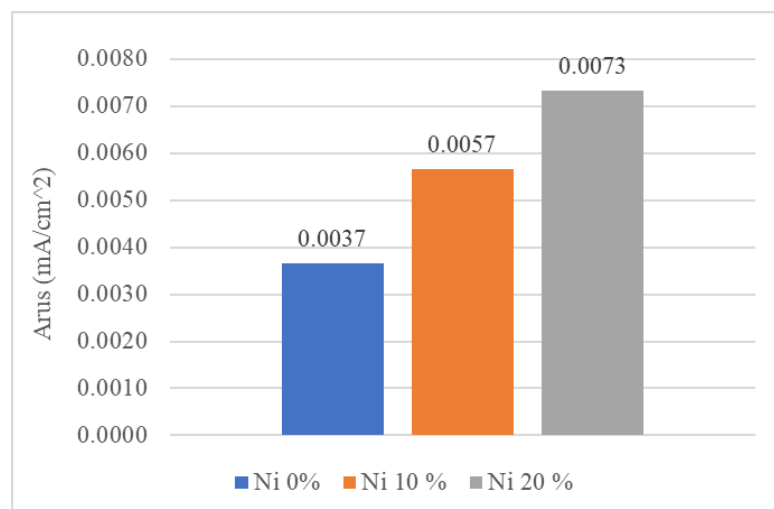
Berdasarkan grafik pada Gambar 4.3 tegangan listrik yang dihasilkan oleh *alkaline fuel cell* meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi nikel (Ni). Peningkatan tegangan listrik sebesar 297.7% dari 0% ke 10% Ni, diikuti oleh kenaikan 232.7% dari 10% ke 20% Ni. Peningkatan ini disebabkan karena semakin banyak konsentrasi nikel maka semakin banyak atom nikel yang dapat mengikat hidrogen menjadi H *adsorb*, yang kemudian bereaksi dengan ion OH⁻ untuk membentuk molekul air dan elektron. Karena semakin banyak atom hidrogen yang

terikat oleh nikel maka elektron yang terbentuk juga akan semakin meningkat, sehingga dapat meningkatkan tegangan listrik yang dihasilkan.(Wang T. *et al.*, 2017).

Nikel merupakan jenis logam transisi yang memiliki aktivitas katalik yang baik pada anoda *alkaline fuel cell* (Oshchepkov, A. G. *et.al.*, 2020). Nikel sebagai katalis memiliki kemampuan untuk menurunkan energi aktivasi pada reaksi oksidasi bahan bakar. Energi aktivasi merupakan energi minimum yang dibutuhkan untuk memulai reaksi kimia, dimana semakin rendah energi aktivasi maka reaksi pada *fuel cell* akan mudah terjadi (EG&G Technical Services Inc. 1989). Peningkatan laju reaksi dapat menghasilkan lebih banyak elektron sehingga dapat meningkatkan tegangan listrik yang dihasilkan.

4.3.3 Arus Listrik

Arus listrik tertinggi yang dihasilkan *alkaline fuel cell* tercatat pada menit ke 10, yang ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 4.2. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0% (tanpa katalis nikel) menghasilkan arus listrik tertinggi sebesar $37 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 10% menghasilkan arus listrik tertinggi sebesar $57 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 20% menghasilkan arus listrik tertinggi sebesar $73 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$, peningkatan arus listrik yang terjadi sebesar 100% dari variasi tanpa katalis. Berdasarkan grafik yang disajikan pada Gambar 4.2 dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi nikel yang diberikan, maka arus listrik yang dihasilkan akan semakin besar. Kenaikan arus listrik pada penelitian ini berbanding lurus dengan kenaikan tegangan yang dihasilkan, hal ini sesuai dengan hukum ohm pada persamaan 5, yang menunjukkan bahwa arus listrik berbanding lurus dengan tegangan listrik, namun besarnya arus listrik juga di pengaruhi oleh resistansi pada rangkaian listrik yang mengakibatkan arus yang dihasilkan menjadi lebih kecil (Larminie, J., & Dicks, A. 2013).

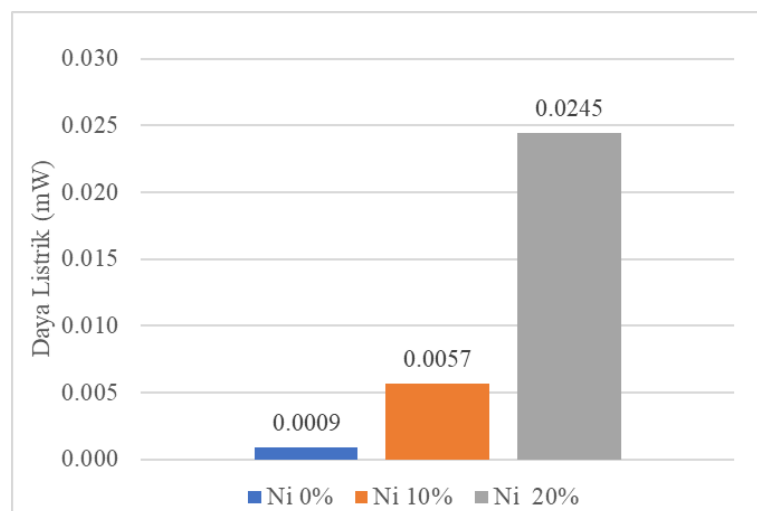


Gambar 4.4 Grafik variasi nikel terhadap arus listrik

Peningkatan arus listrik yang dihasilkan juga dapat disebabkan karena nikel yang disupport karbon memiliki nilai konduktivitas yang baik sehingga dapat meningkatkan mobilitas elektron ke sirkuit luar. Hal ini juga dibuktikan dengan hasil pengujian konduktivitas listrik pada penelitian ini yang menunjukkan nilai konduktivitas terbaik pada variasi konsentrasi nikel 20% yaitu sebesar 0,04 S/m. Kenaikan arus listrik ini sama dengan penelitian yang dilakukan oleh Chatterjee A.,K. *et.al* (2003) yang menyimpulkan bahwa penggunaan nikel sebagai katalis dapat menghasilkan kepadatan arus yang tinggi.

4.3.4 Daya Listrik

Besar daya listrik yang dihasilkan dapat ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 4.3. Daya listrik tertinggi pada variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0%, 10% dan 20% terjadi pada menit ke-10. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0% (tanpa nikel) menghasilkan daya listrik tertinggi sebesar $9,24 \times 10^{-4}$ mW. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 10% menghasilkan daya listrik tertinggi sebesar $56,80 \times 10^{-4}$ mW. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 20% menghasilkan daya listrik tertinggi sebesar $244,57 \times 10^{-4}$ mW.



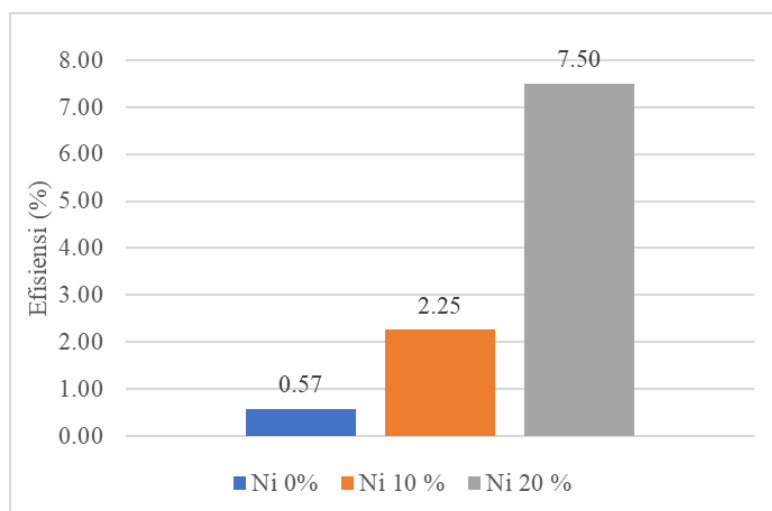
Gambar 4.5 Grafik variasi nikel terhadap daya listrik

Daya listrik yang dihasilkan oleh *alkaline fuel cell* meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi nikel (Ni) yang diberikan pada anoda. Peningkatan daya listrik yang signifikan terjadi pada pemberian konsentrasi nikel tertinggi pada penelitian ini yaitu 20% yang mencapai daya listrik tertinggi yaitu sebesar $244,57 \times 10^{-4} \text{ mW}$. Peningkatan daya dari variasi 0% ke 10% Ni adalah 533%, sedangkan dari variasi 10% ke 20% Ni adalah 330%. Data yang disajikan melalui grafik dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi konsentrasi nikel yang diberikan, maka daya listrik yang dihasilkan akan semakin besar. Peningkatan daya listrik berbanding lurus dengan peningkatan tegangan dan arus listrik. Hal ini dapat dibuktikan melalui persamaan 7, yang menyatakan bahwa daya listrik yang dihasilkan merupakan hasil kali dari tegangan dan arus listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* (Barbir F., 2013). Pernyataan tersebut sesuai dengan hasil dari penelitian ini karena *output* yang dihasilkan oleh *alkaline fuel cell* berupa arus dan tegangan tertinggi terdapat pada variasi konsentrasi katalis nikel 20%.

4.3.5 Efisiensi *Alkaline Fuel Cell*

Efisiensi *fuel cell* didefinisikan sebagai rasio antara listrik yang dihasilkan dan bahan bakar (hidrogen) yang dikonsumsi. Efisiensi *fuel cell* dinyatakan dalam konversi energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik. Efisiensi yang dihasilkan dapat ditunjukkan melalui grafik pada Gambar 4.4. Daya listrik tertinggi pada variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0%, 10% dan 20% terjadi pada menit

ke-10. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 0% (tanpa nikel) menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 0,57%. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 10% menghasilkan efisiensi sebesar 2,39%. Variasi katalis dengan konsentrasi nikel 20% menghasilkan efisiensi tertinggi sebesar 7,50%.



Gambar 4.6 Grafik efisiensi *alkaline fuel cell*

Berdasarkan grafik yang disajikan dalam Gambar 4.4, efisiensi *alkaline fuel cell* menunjukkan peningkatan seiring dengan bertambahnya konsentrasi katalis nikel (Ni) pada anoda. Efisiensi ini dihitung menggunakan persamaan yang menggunakan *output alkaline fuel cell* berupa tegangan listrik sebagai variabel utama. Peningkatan efisiensi tertinggi sebesar 7,50% tercapai pada variasi konsentrasi nikel 20%, yang juga menghasilkan tegangan listrik terbesar dalam penelitian ini. Secara keseluruhan, dari variasi 0% ke 20% Ni, terjadi peningkatan efisiensi sebesar 1216%. Peningkatan efisiensi ini dapat dijelaskan oleh kemampuan nikel dalam meningkatkan kecepatan reaksi elektrokimia dalam *alkaline fuel cell*, sebagaimana dilaporkan oleh Oshchepkov, A. G. *et al.* (2020). Hasil penelitian ini mengonfirmasi bahwa penggunaan katalis nikel dengan konsentrasi optimal dapat secara signifikan meningkatkan performa dan efisiensi *alkaline fuel cell* secara keseluruhan, yang dibuktikan dari peningkatan efisiensi yang dihasilkan.

4.3.6 Perbandingan Dengan Penelitian Sebelumnya

Dilakukan perbandingan antara penelitian saat ini dengan penelitian sebelumnya agar membuktikan bahwa terjadi peningkatan performa *alkaline fuel cell* yang ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perbandingan dengan penelitian terdahulu

Penelitian	Tahun	Anoda	Katoda	Tegangan (mV)	Arus(mA/cm ²)
Penelitian saat ini	2024	Ni/C	MnO ₂ /C	111,7	73 x 10 ⁻⁴
Penelitian Suardamana <i>et al.</i>	2014	Stainless Steel 304	Stainless Steel 304	25	12 x 10 ⁻⁴
Penelitian Shim J.P. <i>et al.</i>	1998	Reney Nickel/C	Platinum	120	200

Penelitian ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam performa *alkaline fuel cell* dibandingkan dengan penelitian Suardamana *et al.* (2014). Dengan desain dan kondisi operasi *fuel cell* yang sama, modifikasi elektroda dari stainless steel 304 menjadi *gas diffusion electrode* (GDE) dengan katalis Ni/C pada anoda dan MnO₂/C pada katoda menghasilkan peningkatan tegangan yang signifikan dari 25 mV menjadi 111,7 mV, setara dengan kenaikan 350%. Arus listrik yang dihasilkan juga mengalami peningkatan dari 12 x 10⁻⁴ mA/cm² menjadi 73 x 10⁻⁴ mA/cm². Peningkatan performa ini membuktikan efektivitas penggunaan GDE dengan katalis nikel dalam meningkatkan performa *alkaline fuel cell* terutama tegangan listrik yang dihasilkan.

Perbandingan lain dilakukan pada penelitian tentang katalis nikel seperti pada penelitian Shim J., P. *et al.* (1998) menggunakan katalis anoda Reney nickel yang dipadukan karbon hitam menunjukkan hasil yang cukup tinggi dengan output tegangan listrik sebesar 120 mV dan arus listrik sebesar 200 mA/cm², tegangan listrik yang dihasilkan tidak jauh berbeda pada penelitian ini dengan selisih 8,3 mV, di sisi lain arus listrik yang dihasilkan jauh berbeda, hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, seperti hambatan ohmik pada sirkuit luar yang tinggi, spesifikasi alat yang berbeda, luas elektroda yang berbeda dan kondisi operasi yang berbeda.

Namun pada penelitian ini cukup membuktikan bahwa terdapat pengaruh penambahan katalis pada anoda, hal ini dibuktikan dengan *output alkaline fuel cell* dengan katalis lebih tinggi daripada *output alkaline fuel cell* tanpa katalis.

BAB 5. KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian analisis performa *alkaline fuel cell* dengan katalis anoda berbasis nikel dan karbon, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Peningkatan konsentrasi katalis nikel pada anoda *alkaline fuel cell* menghasilkan tegangan listrik yang lebih tinggi, karena memperluas area permukaan reaktif untuk penyerapan dan reaksi hidrogen sehingga menghasilkan banyak elektron. Pada penelitian ini tegangan listrik tertinggi mencapai 111,17 mV.
2. Peningkatan konsentrasi katalis nikel pada sel bahan bakar alkali menghasilkan kenaikan arus listrik yang berbanding lurus dengan tegangan, sesuai dengan hukum Ohm. Peningkatan arus listrik juga disebabkan oleh meningkatnya konduktivitas listrik pada anoda dengan konsentrasi nikel tertinggi. Hal ini menunjukkan efektivitas nikel dalam meningkatkan performa *alkaline fuel cell*. Pada penelitian ini arus tertinggi mencapai $73 \times 10^{-4} \text{mA/cm}^2$.
3. Penambahan konsentrasi katalis nikel pada anoda *alkaline fuel cell* meningkatkan efisiensi sel, dengan peningkatan tertinggi sebesar 7,50% pada konsentrasi nikel 20%. Peningkatan ini disebabkan oleh kemampuan nikel dalam mempercepat reaksi elektrokimia, yang menghasilkan tegangan listrik lebih tinggi dan meningkatkan performa keseluruhan *alkaline fuel cell*.

5.2 Saran

1. Menambah luas reaksi aktif pada elektroda agar didapatkan performa *alkaline fuel cell* yang lebih baik serta efisien.
2. Memadukan katalis nikel dengan jenis *support material* lain yang memiliki efektivitas yang lebih baik seperti carbon nanotube, atau logam dengan lain seperti tembaga, cobalt dan lain sebagainya.

DAFTAR PUSTAKA

- Barbir F., (2013). Fuel Cell Electrochemistry. In PEM Fuel Cells: Theory and Practice (second edition) (pp. 33–72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387710-9.00003-5>
- Chatterjee, A. K., Sharon, M., & Banerjee, R. (2003). Alkaline fuel cell: Carbon nanobeads coated with metal catalyst over porous ceramic for hydrogen electrode. *Journal of Power Sources*, 117(1–2), 39–44. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00111-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00111-3)
- Cong, Y., Yi, B., & Song, Y. (2018, February 1). Hydrogen oxidation reaction in alkaline media: From mechanism to recent electrocatalysts. *Nano Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.12.008>
- Davydova, E. S., Mukerjee, S., Jaouen, F., & Dekel, D. R. (2018). Electrocatalysts for Hydrogen Oxidation Reaction in Alkaline Electrolytes. *ACS Catalysis*, 8(7), 6256–6274. doi: 10.1021/acscatal.8b00689
- EG&G Technical Services Inc. (1989). Fuel cell handbook (Seventh Edition). *Choice Reviews Online*, 26(11), 26-6292-26-6292.
- Erwin, dkk. (2018). Kajian Penerapan Sistem Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Alternatif Ramah Lingkungan Pada Kendaraan Bermotor. *Jurnal Pendidikan Teknik Mesin Undiksha*, 8(1), 1-8. doi: 10.23887/jptm.v8i1.45831.
- Ferriday, T. B., & Middleton, P. H. (2021). Alkaline fuel cell technology - A review. *International Journal of Hydrogen Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.203>
- Halfon, E. B., & Suss, M. E. (2019). Measurements of the electric conductivity of an electrode as it transitions between static and flowable modes. *Electrochemistry Communications*, 99, 61–64. <https://doi.org/10.1016/j.elecom.2018.12.016>
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentals of Physics* (10th ed.). Wiley.
- Hamada, A. T., Orhan, M. F., & Kannan, A. M. (2023, December 1). Alkaline fuel cells: Status and prospects. *Energy Reports*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.05.276>
- Kinoshita, H., Yonezawa, S., Kim, J. H., Kawai, M., Takashima, M., & Tsukatani, T. (2008). Preparation and characterization of Ni-plated polytetrafluoroethylene plate as an electrode for alkaline fuel cell.

Journal of Power Sources, 183(2), 464–470.
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.05.056>

- Larminie, J., & Dicks, A. (2013). Fuel cell systems explained: Second edition. Fuel Cell Systems Explained: Second Edition (pp. 1–406). Wiley.
<https://doi.org/10.1002/9781118878330>
- Ma'fur, H., & Widiharsa, F. (2016). Fuel Cell Sebagai Sumber Energi Listrik Alternatif Pengisi Baterai Dengan Pengendali Panas. *Transmisi*, 12(1), 45–54.
- Oshchepkov, A. G., Braesch, G., Bonnefont, A., Savinova, E. R., & Chatenet, M. (2020). Recent Advances in the Understanding of Nickel-Based Catalysts for the Oxidation of Hydrogen-Containing Fuels in Alkaline Media. *ACS Catalysis*. American Chemical Society
<https://doi.org/10.1021/acscatal.0c00101>
- Ren J., Musyoka N.M, Langmi H.W, Mathe M, Liao S (2016) Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: a critical review. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(1):289–311
- Rohendi, D., & Adnan, Y. (2010). Pembuatan Elektroda Fuel Cell dengan Metode Elektrodeposisi Menggunakan Katalis Pt-Cr/C dan Pt/C dan Karakterisasinya. *Jurnal Penelitian Sains*, 13(2), 13206.
- Sazali, N., Wan Salleh, W.N., Jamaludin, A.S., & Mhd Razali, M.N. (2020). New Perspectives on Fuel Cell Technology: A Brief Review. *Membranes*, 10(5), 99. doi: 10.3390/membranes10050099.
- Schulze, M., & Gülzow, E. (2004). Degradation of nickel anodes in alkaline fuel cells. In *Journal of Power Sources* (Vol. 127, pp. 252–263).
<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.09.021>
- Sheng, W., Gasteiger, H. A., & Shao-Horn, Y. (2010). Hydrogen Oxidation and Evolution Reaction Kinetics on Platinum: Acid vs Alkaline Electrolytes. *Journal of The Electrochemical Society*, 157(11), B1529.
<https://doi.org/10.1149/1.3483106>
- Shim, J. P., Park, Y. S., Lee, H. K., & Lee, J. S. (1998). Hydrogen oxidation characteristics of Raney nickel electrodes with carbon black in an alkaline fuel cell. *Journal of Power Sources*, 74(1), 151–154.
[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(98\)00060-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(98)00060-3)
- Shukla, A. K., Ramesh, K. V., & Kannan, A. M. (1986). Fuel cells: Problems and prospects. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences - Chemical Sciences*, 97(3–4), 513–527. <https://doi.org/10.1007/BF02849209>

- Singla, M.K., Nijhawan, P., & Oberoi, A.S. (2021). Hydrogen fuel and fuel cell technology for cleaner future: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(12), 15607-15626. doi: 10.1007/s11356-020-12231-8.
- Suardamana, I., Sucipta, M., & Sugita, I. K. G. (2014). Rancangan Alkaline Fuel Cell Sederhana dengan Menggunakan Stainless Steel sebagai Elektrodanya. *Jurnal Energi Dan Manufaktur*, 7(1), 1-6.
- Wang, T., Xie, H., Chen, M., D'Aloia, A., Cho, J., Wu, G., & Li, Q. (2017, December 1). Precious metal-free approach to hydrogen electrocatalysis for energy conversion: From mechanism understanding to catalyst design. *Nano Energy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.10.045>
- Zhao, L., Liu, Y., Han, X., Ding, Y., Kong, W., Tong, Y., Xing, W. (2021). Theoretical study of the alkaline hydrogen oxidation reaction on Ni-Based nanocluster Catalysts: Effects of graphene supports and dopants. *Applied Surface Science*, 567. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2021.150895>

LAMPIRAN

Lampiran 3.1 Desain *Alkaline Fuel Cell*

Lampiran 3.2 Alat dan bahan penelitian

Lampiran 3.3 Skema Penelitian

Lampiran 4.1 Pengukuran konduktivitas listrik elektroda

Lampiran 4.2 Data pengukuran tegangan listrik

Lampiran 4.3 Data pengukuran arus listrik

Lampiran 4.4 Perhitungan Konduktivitas Listrik

Lampiran 4.4 Perhitungan daya listrik

Lampiran 4.5 Perhitungan Efisiensi

Lampiran 4.6 Dokumentasi Penelitian

