

ANALISA EFISIENSI ELEKTROLISIS AIR DARI *HYDROFILL* PADA SEL BAHAN BAKAR

Otto Sebastian¹, Tulus Burhanuddin Sitorus²

¹⁾ Mahasiswa Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

Jl. Almamater Kampus USU, Medan 20155

Email : master_of_navy@yahoo.com

²⁾ Staf Pengajar Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

Jl. Almamater Kampus USU, Medan 20155

Email : Tburhanudin@yahoo.com

ABSTRAK

Dunia sedang mengalami krisis energi karena bahan bakar minyak dan gas berkurang tajam akibat penggunaan secara besar-besaran oleh manusia. Manusia dihadapkan pada situasi menipisnya cadangan sumber energi fosil dan meningkatnya kerusakan lingkungan akibat penggunaan energi fosil. Sebelum terjadi krisis energi di dunia, harus dicari energi alternatif yang dapat diperbaharui. Salah satu bentuk energi alternatif yang saat ini menjadi perhatian besar adalah hidrogen. Dimana suplai energi yang dihasilkan sangat bersih karena hanya menghasilkan air sebagai emisi. Daya hidrogen terutama dalam bentuk sel bahan bakar hidrogen (*hydrogen fuel cells*) menjanjikan penggunaan bahan bakar yang ramah lingkungan. Fokus kajian ini mengenai *Fuel Cell*. Jenis *Fuel Cell* yang dikaji adalah *Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*. Tujuannya adalah Menganalisa Efisiensi Elektrolisis air pada *Hydrofill* beserta Kerugian tegangan Perpindahan Muatan, dan Kesetimbangan Energi pada *Fuel Cell*. Hasil dari kajian untuk efisiensi elektrolisis air adalah 29,83%, Kesetimbangan Energi didapat 2762.1W, dan untuk Aliran Pendinginan Massa didapat 0.035g/s. Kesimpulan dari hasil kajian yaitu agar elektrolit dibuat setipis mungkin dengan bahan konduktivitas yang tinggi agar tidak terjadi kehilangan tegangan dan mengoptimalkan transportasi massa di aliran membran.

Kata kunci : *Hydrogen Fuel Cells, Polymer Electrolyte Membrane, Efisiensi*

Abstract

The world unrenewable energy such as petroleum and gases have decrease dramatically because of the massive use for humanity using. Humans faced with depletion of fossil energy resources and increasing environmental damage resulting from the use of fossil energy. Before facing crisis energy, developing another alternative energy such as renewable energy was needed. One form of alternative energy that is currently of great concern is hydrogen. Where the supply of energy produced is very clean because it only produces water as emissions. Hydrogen power is mainly in the form of hydrogen fuel cells, promising the use of environmentally friendly fuels. Focus of this study is about Fuel Cell. Type of Fuel Cell is Polymer Electrolyte Membrane (PEM). The goal is to analyze the efficiency of electrolysis water on Hydrofill with charge transfer voltage loss, and Fuel Cell Energy Balance. The results of the study for water electrolysis efficiency is 29.83%, for Equilibrium Energy obtained 2762.1W, and for Mass Flow Cooling obtained 0.035g/s. Conclusions from the study is that the electrolyte is made as thin as possible with a high conductivity material in order to avoid loss of voltage and optimize the flow of mass transport in the membrane.

Keywords : *Hydrogen Fuel Cells, Polymer Electrolyte Membrane, Efficiency*

1. Pendahuluan

Energi menjadi komponen penting bagi kelangsungan hidup manusia karena hampir semua aktivitas

kehidupan manusia sangat tergantung pada ketersediaan energi yang cukup. Saat ini dan beberapa tahun ke depan, manusia masih akan tergantung pada sumber energi fosil karena sumber

energi fosil inilah yang mampu memenuhi kebutuhan energi manusia dalam skala besar. Sedangkan sumber energi alternatif belum dapat memenuhi kebutuhan energi manusia dalam skala besar karena fluktuasi potensi dan tingkat keekonomian yang belum bisa bersaing dengan energi konvensional.

Di lain pihak, manusia dihadapkan pada situasi menipisnya cadangan sumber energi fosil dan meningkatnya kerusakan lingkungan akibat penggunaan energi fosil. Melihat kondisi tersebut maka saat ini sangat diperlukan penelitian yang intensif untuk mencari, mengoptimalkan, dan menggunakan sumber energi alternatif. Hasil penelitian tersebut diharapkan mampu mengatasi beberapa permasalahan yang berkaitan dengan penggunaan energi fosil.

Salah satu bentuk energi alternatif yang saat ini menjadi perhatian besar pada banyak Negara, terutama di Negara maju adalah hidrogen. Hidrogen diproyeksikan oleh banyak Negara akan menjadi bahan bakar masa depan yang lebih ramah lingkungan dan lebih efisien. Dimana suplai energi yang dihasilkan sangat bersih karena hanya menghasilkan air sebagai emisi selama berlangsungnya proses.

Daya hidrogen terutama dalam bentuk sel bahan bakar hidrogen (*hydrogen fuel cells*) menjanjikan penggunaan bahan bakar yang ramah lingkungan, sehingga menyebabkan ketertarikan banyak perusahaan energi terkemuka di dunia, industri otomotif maupun pemerintahan. Teknologi sel bahan bakar ini dengan begitu banyak keuntungan yang dijanjikan menimbulkan gagasan "*hydrogen economy*" dimana hidrogen dijadikan sebagai bentuk energi utama yang dikembangkan [1].

1.1 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis Tingkat Efisiensi Elektrolisis air pada Hydrofill.

2. Menganalisis Keseimbangan Energi pada *PEM Fuel Cell*.
3. Menganalisis aliran pendinginan pada Hydrofill.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Energi Alternatif

Energi Alternatif adalah energi yang berasal dari sumber daya alam seperti sinar matahari, angin, hujan, pasang surut, dan panas bumi, yang dipakai secara berulang (diisi ulang secara alami). Sekitar 16% dari konsumsi energi global berasal dari energi alternatif, dengan 10% berasal dari biomassa tradisional, yang terutama digunakan untuk pemanasan, dan 3,4% dari pembangkit listrik tenaga air. Energi alternatif yang baru (pembangkit air yang kecil, biomassa modern, angin, surya, panas bumi, dan biofuel) dihitung sebagai 3% lainnya dan berkembang sangat pesat. Pangsa energi alternatif dalam pembangkit listrik adalah sekitar 19%, dengan 16% dari listrik global berasal dari pembangkit listrik tenaga air dan 3% dari energi alternatif yang baru.

Energi alternatif menggantikan bahan bakar konvensional di empat bidang yang berbeda: pembangkit listrik, air panas / pemanasan ruang, bahan bakar motor, dan jasa energi pedesaan (off-grid) [2].

- **Pembangkit listrik**

Energi alternatif menyediakan 19% dari pembangkit listrik di seluruh dunia. Pembangkit listrik alternatif yang tersebar di banyak negara, dan tenaga angin telah menyediakan porsi yang signifikan dari listrik di beberapa daerah: misalnya, 14% di negara bagian Iowa, 40% di negara bagian Jerman utara Schleswig-Holstein, dan 20% di Denmark. Beberapa negara mendapatkan sebagian besar energi mereka dari energi alternatif, termasuk Islandia dan Paraguay (100%), Norwegia (98%), Brasil (86%), Austria (62%), Selandia

Baru(65%), dan Swedia(54%) [1]

- **Pemanasan.**
Air panas surya membuat kontribusi penting untuk panas alternatif di banyak negara, terutama di Cina, yang kini memiliki 70% dari total global (180 GWth). Sebagian besar sistem yang diinstal pada bangunan apartemen multi-keluarga dan memenuhi sebagian kebutuhan air panas dari 50-60 juta rumah tangga diperkirakan di Cina [1].
- **Transportasi bahan bakar**
Energi biofuel yang alternatif telah menyebabkan penurunan yang signifikan dalam konsumsi minyak di Amerika Serikat sejak 2006. Pada Tahun 2009, 93 miliar liter biofuel diproduksi di seluruh dunia dimana setara dengan 68 miliar liter bensin, atau sekitar 5% dari produksi bensin di dunia [1].

2.2 Beberapa Bentuk Energi Alternatif

- ❖ **Tenaga angin**
Secara global, potensi jangka panjang teknis dari energi angin diyakini lima kali arus total produksi energi global, atau 40 kali dari kebutuhan listrik saat ini. Dimana turbin angin yang dipasang membutuhkan daerah yang luas, terutama di daerah yang sumber daya anginnya tinggi. Sumber daya angin di lepas pantai mempunyai kecepatan angin rata-rata ~ 90% lebih besar dari daratan, sehingga sumber daya angin di lepas pantai dapat memberikan kontribusi substansial energi secara lebih.
- ❖ **Hydropower**
Energi dalam air dapat dimanfaatkan dan digunakan. Karena air sekitar 800 kali lebih padat daripada udara, bahkan aliran air yang mengalir lambat

atau laut yang pasang, dapat menghasilkan banyak energi.

- ❖ **Energi Matahari**
Energi matahari adalah energi yang berasal dari matahari melalui bentuk radiasi matahari. Generasi listrik bertenaga surya bergantung pada *photovoltaic* dan mesin panas. Daftar sebagian aplikasi surya lainnya termasuk pemanas ruangan dan pendinginan melalui arsitektur surya, pencahayaan, air panas surya, memasak dengan sel surya, dan proses suhu panas tinggi untuk keperluan industri..
- ❖ **Hidrogen**
Hidrogen juga adalah unsur paling melimpah dengan persentase kira-kira 75% dari total massa unsur alam semesta. Kebanyakan bintang dibentuk oleh hidrogen dalam keadaan plasma. Senyawa hidrogen relatif langka dan jarang dijumpai secara alami di bumi, dan biasanya dihasilkan secara industri dari berbagai senyawa hidrokarbon seperti metana. Hidrogen juga dapat dihasilkan dari air melalui proses elektrolisis, namun proses ini secara komersial lebih mahal daripada produksihidrogen dari gas alam [3].

2.3 Sel Bahan Bakar

Seorang berkebangsaan Inggris yang bernama Sir William Robert Grove, manusia pertama pembuat alat sederhana yang belakangan disebut sebagai Sel Bahan Bakar.

Di tahun 1889, kata Sel Bahan Bakar pertama kali diperkenalkan oleh Ludwig Mond dan Charles Langer yang mencobamembuat Sel Bahan Bakaryang dipakai untuk industri batu bara.

Di tahun 1920 penelitian Sel Bahan Bakardi Jerman membuka jalan bagi pembuatan siklus karbonat dan

Sel Bahan Bakar oksida padat seperti yang ada sekarang ini.

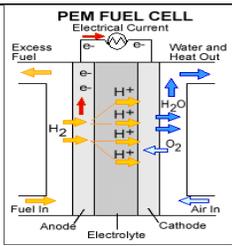
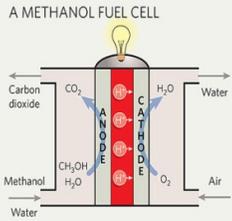
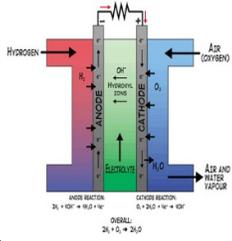
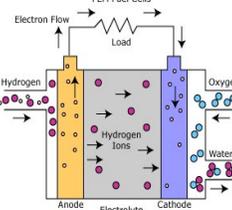
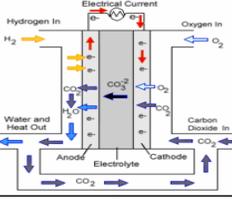
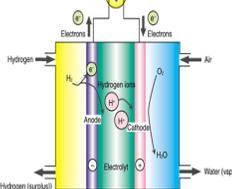
Di tahun 1932, seorang insinyur Francis T. Bacon memulai penelitian penting dalam Sel Bahan Bakar. Penelitiannya berlangsung hingga tahun 1959 dalam pendemonstrasian model desainnya menghasilkan 5.000 watt yang dapat menghidupkan mesin pengelas. Sel Bahan Bakar tersebut akhirnya disebut sebagai *Bacon Cell* [4].

Selama tahun 1960-an memproduksi tenaga listrik berbasis Sel Bahan Bakar untuk NASA sebagai tenaga pesawat ruang angkasa yaitu Gemini dan Apollo. Sistem Sel Bahan Bakar yang dipakai dalam alat ini berdasar pada *sel Bacon*.

Tak hanya itu, teknologi Sel Bahan Bakar yang ditemukan juga menjadi bervariasi, seperti ditemukannya Sel Bahan Bakar yang lebih efisien dalam menghasilkan gas hidrogen hingga jumlahnya semakin berlipat. Teknologi ini bahkan melibatkan proses fermentasi oleh mikroba yang sebelumnya sangat mustahil sekali di dalam produksi bahan bakar.

Teknologi ini berkembang sejak tahun 2000 yang kita kenal sebagai MFC atau *Microbial Fuel Cell*. MFC ini selain menghasilkan hidrogen yang banyak hingga 4 kali lipat dari Sel Bahan Bakar biasa, substrat yang dipakai mikroba dalam berfermentasi adalah limbah rumah tangga, industri ataupun limbah pertanian yang tidak terpakai sehingga selain yang dihasilkan adalah gas hidrogen juga didapatnya produk akhir berupa air bersih yang tentu saja dapat dipakai untuk berbagai macam kebutuhan.

Tabel 1. Jenis-Jenis Sel bahan bakar. [5]

Jenis	Elektrolit	Gambar
<i>Polymer Exchange Membrane</i> (PEM)	Polymer elektrolit (H^+)	
<i>Direct Methanol Fuel Cell</i> (DMFC)	Elektrolit polymer (H^+)	
<i>Alkaline</i> (AFC)	Kalilug e (KOH)	
<i>Phosphoric Acid Fuel Cell</i> (PAFC)	<i>Phosphoric Acid</i> (H^+)	
<i>Molten Carbonate</i> (MFC)	Molten Carbonate (CO_3^{2-})	
<i>Solid Oxide</i> (SOFC)	Lapisan keramik (O^{2-})	

Direct methanol fuel cell (DMFC) digerakkan menggunakan methanol murni, yang dicampur dengan uap dan dialirkan secara langsung ke anoda daripada sel bahan bakar. DMFC ini tidak mempunyai permasalahan tempat

penyimpanan seperti sel bahan bakar lain pada umumnya.

Alkaline fuel cells adalah salah satu dari teknologi sel bahan bakar yang dikembangkan, dan merupakan yang pertama digunakan secara luas untuk program penghasil energi listrik dan air pada pesawat luar angkasa oleh NASA. Sel bahan bakar ini menggunakan potasium hidroksida dalam air sebagai elektrolit dan dapat menggunakan beberapa jenis dari metal sebagai katalis pada anoda dan katoda.

Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) menggunakan cairan asam fosfor sebagai elektrolit dan elektroda besi karbon yang mengandung katalis platinum. PAFC ini lebih dikenal sebagai generasi pertama dari sel bahan bakar modern. PAFC lebih toleran terhadap ketidakmurnian daripada bahan bakar yang telah diubah menjadi hidrogen daripada Sel bahan bakar PEM.

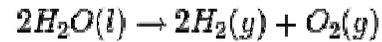
Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) saat ini sedang dikembangkan untuk gas natural dan batubara untuk kegunaan elektrik, industri, dan aplikasi militer. MCFC adalah sel bahan bakar yang bekerja pada temperatur tinggi yang menggunakan elektrolit yang terdiri dari *molten carbonate salt mixture*, lithium aluminium oksida (LiAlO₂).

Solid Oxide Fuel Cell (SOFC) menggunakan bahan keramik yang keras dan tidak mudah berkarat sebagai elektrolit. SOFC ini diharapkan dapat memiliki efisiensi 50 – 60 % untuk mengubah bahan bakar menjadi listrik.

2.4 Elektrolisis Air

Elektrolisis air adalah peristiwa penguraian senyawa air (H₂O) menjadi oksigen (O₂) dan hidrogen gas (H₂) dengan menggunakan arus listrik yang melalui air tersebut. Pada katode, dua molekul air bereaksi dengan menangkap dua elektron, tereduksi menjadi gas H₂ dan ion hidroksida (OH⁻). Sementara itu pada anode, dua molekul air lain terurai menjadi gas oksigen (O₂), melepaskan 4 ion H⁺

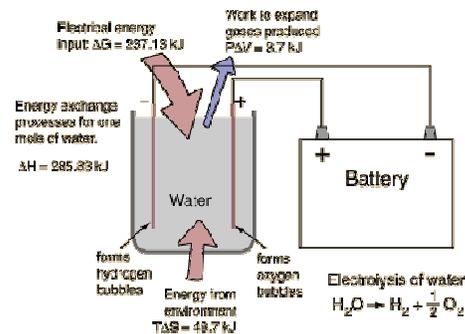
serta mengalirkan elektron ke katode. Ion H⁺ dan OH⁻ mengalami netralisasi sehingga terbentuk kembali beberapa molekul air. Reaksi keseluruhan yang setara dari elektrolisis air dapat dituliskan sebagai berikut.



Gas hidrogen dan oksigen yang dihasilkan dari reaksi ini membentuk gelembung pada elektrode dan dapat dikumpulkan. Prinsip ini kemudian dimanfaatkan untuk menghasilkan hidrogen dan hidrogen peroksida (H₂O₂) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar kendaraan hidrogen [5].

❖ Proses Elektrolisis Air

Dengan menyediakan energi dari baterai, Air (H₂O) dapat dipisahkan ke dalam molekul diatomik hidrogen (H₂) dan oksigen (O₂).



Gambar 1. Proses Elektrolisis air.^[7]

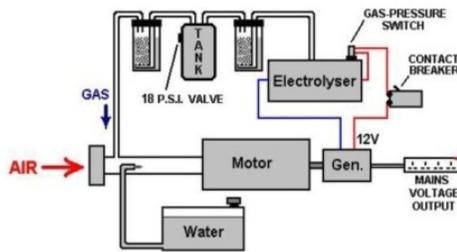
Elektrolisis satu mol air menghasilkan satu mol gas hidrogen dan setengah mol gas oksigen dalam bentuk diatomik. Sebuah analisis yang rinci dari proses memanfaatkan potensi termodinamika dan hukum pertama termodinamika. Proses ini berada di 298K dan satu tekanan atmosfer, dan nilai-nilai yang relevan yang diambil dari tabel sifat termodinamika [6].

Tabel 2. Energi yang diperlukan dalam mengelektrolisis Air.^[7]

Kuantitas	H ₂ O	H ₂	0,5 O ₂	Mengubah
Entalpi	285,83 kJ	0		$\Delta H = 285,83 \text{ kJ}$
Entropi	69,91 J/K	130,68 J/K	0,5 x 205,14 J/K	$T\Delta S = 48,7 \text{ kJ}$

❖ **Metode –metode Elektrolisis air**

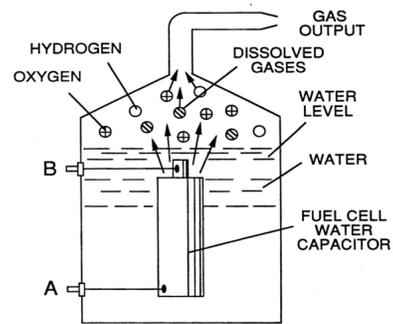
Combustible fuel engine (carbon based) yang dianggap efisien, rata rata memiliki efisiensi dibawah 40%. Banyak sekali panas yang hilang ketika merubah energi kimia (*fuel*) menjadi energi gerak. Sehingga efisiensi energi didalam *combustible fuel engine* (motor bakar) sangat rendah. Ketika dipakai untuk menghasilkan listrik *fuel* (BBM) akan sangat banyak yg dipakai.



Gambar 2.Sel Elektrolisis Generator Hidrogen.

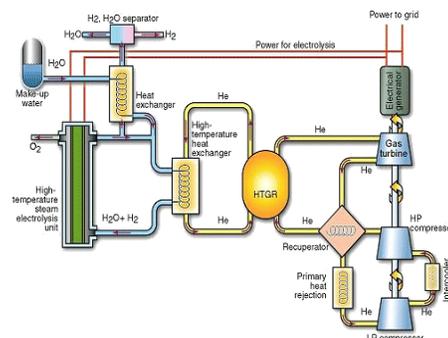
Di tahun 1974. Profesor Brown berhasil menemukan campuran sempurna gas hidrogen dan oksigen yang didapatnya melalui suatu proses elektrolisa air (hidrolisa) yang tidak membutuhkan energi listrik terlalu besar, bahkan menghasilkan daya ledakan yang cukup besar yang dapat dimanfaatkan dalam mesin bakar. Profesor Brown kemudian menamakan campuran gas yang

eksplosif tadisebagai gas Brown (*Brown Gas*).



Gambar 3. Fuel Cell Circuit.^[4]

Produksi hidrogen dengan elektrolisis H₂O suhu tinggi (*High Temperature Electrolysis*) merupakan metode yang baru dan sedang dalam proses pengembangan. Metode ini dilakukan guna meningkatkan efisiensi elektrolisis H₂O. Ketika suhu elektrolisis H₂O sekitar 900°C, maka efisiensi total produksi hidrogen bisa mencapai 55%.



Gambar 4. High Temperature Electrolysis.^[6]

2.5 Efisiensi

Elektrolisis air memerlukan minimal 286 kJ input energi listrik untuk memisahkan mol masing-masing. Karena setiap mol air memerlukan dua mol elektron, energi listrik khusus yang diperlukan adalah 143 kJ / mol (8.9 × 10²³ eV / mol). Maka kemudian bahwa input daya listrik minimum per ampere, yaitu 1,48 W / ampere. Pada gilirannya,

potensi elektrolitik minimum untuk elektrolisis air atau 1,48 V. Dengan demikian, setiap arus (I) pada tegangan yang diberikan (V) lebih besar dari 1,48 V adalah tegangan lebih dan menghasilkan panas.

Elektrolisis air tidak mengkonversi 100% energi listrik menjadi energi kimia hidrogen. Proses ini membutuhkan potensi lebih ekstrim dari apa yang diharapkan berdasarkan jumlah sel reversibel potensial reduksi. Ini potensi kelebihan untuk berbagai bentuk overpotential dimana energi ekstra ini akhirnya hilang sebagai panas.

Para efisiensi energi dari elektrolisis air bervariasi secara luas dengan angka yang disebutkan di bawah ini di sisi optimis. Beberapa laporan 50-80%. Nilai-nilai ini hanya mengacu pada efisiensi mengkonversi energi listrik menjadi energi kimia hidrogen. Jika kita menganggap hanya input energi listrik untuk sebuah elektroliser dan entalpi pembakaran dari produk H₂, maka efisiensi di atas 90% untuk elektroliser sederhana adalah khas (dengan katalis platinum). Energi yang hilang dalam menghasilkan listrik untuk elektroliser tidak termasuk dalam angka ini. Misalnya, ketika mempertimbangkan sebuah pembangkit listrik yang mengkonversi panas reaksi nuklir menjadi hidrogen melalui elektrolisis, efisiensi total mungkin lebih dekat dengan 30-45%, meskipun inefisiensi *powerplants* dalam mengubah panas menjadi energi listrik biasanya tidak termasuk dalam efisiensi, sehingga ukuran efisien 50-80% menjadi efisiensi yang lebih realistis.

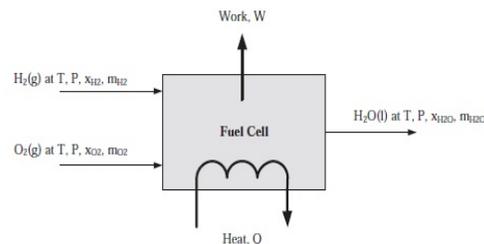
2.6 Keseimbangan Energi pada Sel Bahan Bakar

❖ Prosedur Keseimbangan Energi

Dalam hal untuk secara akurat memodelkan system fuel cell, energi yang mengalir ke dalam dan keluar dari setiap unit proses di dalam subsistem fuel cell, dan di dalam fuel cell itu

sendiri, perlu untuk dihitung dalam hal untuk menentukan keseluruhan kebutuhan energi yang diperlukan untuk proses. Perhitungan keseimbangan energi untuk menentukan temperatur keluar cell dapat diketahui dengan komposisi reaktan, temperatur, penggunaan H₂ dan O₂, daya yang ingin dihasilkan, dan persentase dari kerugian panas. Prosedur untuk memformulasikan keseimbangan energi adalah sebagai berikut :

1. Diagram alir harus digambar dan ditandai. Informasi yang cukup harus diikuti kedalam diagram alir untuk mengetahui entalpi spesifik dari setiap aliran komponen. Hal ini termasuk temperature yang diketahui, tekanan, fraksi mol, laju aliran masa, dan fasa.
1. Rumus keseimbangan masa mungkin diperlukan untuk menentukan laju aliran dari setiap aliran komponen.
2. Entalpi spesifik dibutuhkan untuk menentukan setiap aliran komponen. Perhitungan ini dapat dihasilkan dari tabel termodinamika, atau dapat dihitung apabila data tersebut tidak tersedia.
3. Langkah terakhir adalah untuk menulis laporan yang tepat dari rumus keseimbangan energi, dan menghasilkan kuantitas yang diinginkan.



Gambar 5. Detail Diagram alir untuk mendapat persamaan keseimbangan energi.^[5]

❖ **Kesetimbangan energi pada fuel cell**

Cara lain untuk menyatukan kesetimbangan energi fuel cell adalah jumlah dari keseluruhan input energi sama dengan jumlah dari keseluruhan energi output [5] :

$$\sum(h_i)_{in} = W_{el} + \sum(h_i)_{out} + Q \quad (1)$$

Input adalah entalpi dari bahan bakar, oksidan, dan uap air. Output yang dihasilkan adalah energi listrik yang dihasilkan, entalpi dari aliran yang keluar dari fuel cell, dan panas yang meninggalkan fuel cell melalui cairan pendingin, konveksi ataupun radiasi.

Entalpi (J/s) untuk setiap gas kering atau campuran dari gas – gas kering adalah [5] :

$$h = \dot{m} c_p T \quad (2)$$

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa dari gas atau campuran (g/s), C_p adalah panas spesifik (J/gK) dan T adalah temperatur °C

Apabila gas memiliki peningkatan panas yang tinggi (mudah terbakar), entalpy kemudian ditulis sebagai [5] :

$$h = \dot{m}(C_p T + h_{HHV}^0) \quad (3)$$

Dimana h_{HHV}^0 adalah nilai panas yang lebih tinggi dari gas (J/g) pada 0°C. Nilai panas biasanya dihitung pada 25°C, bagaimanapun, nilai panas yang lebih tinggi dibutuhkan untuk dihitung pada temperatur yang dipilih. Entalpi dari uap air [5] adalah:

$$h = \dot{m}_{H_2O(g)} C_{p,H_2O(g)} T + h_{fg}^0 \quad (4)$$

Entalpi dari air [5] adalah:

$$h = \dot{m}_{H_2O(l)} C_{p,H_2O(l)} T \quad (5)$$

Input dan output dari kesetimbangan energi dapat dengan cepat menjadi menyulitkan ketika kesetimbangan panas ditunjukkan oleh setiap lapisan fuel cell dengan sendirinya dan/atau pemanasan stack dan pendinginan termasuk didalamnya.

❖ **Pendinginan Udara**

Kebanyakan sel bahan bakar PEM menggunakan udara untuk pendinginan sel bahan bakar. Ada beberapa metode untuk mencapai ini, dan metode yang terkenal termasuk meletakkan saluran pendinginan ke pelat bipolar, atau menggunakan pendingin pelat sel bahan bakar secara terpisah. Laju aliran udara dapat dicari dari kesetimbangan energy yang simple.

Dalam mengestimasi temperature dinding maksimum dari saluran, koefisien perpindahan panas dapat dipakai. Bilangan *Nusselt* adalah :

$$Nu = \frac{h D_h}{k} \quad (6)$$

Dimana Nu adalah bilangan *Nusselt*, D_h adalah diameter hidrolis, h adalah koefisien perpindahan panas konveksi, dan k adalah konduktivitas panas fluida (W/mK). Untuk saluran yang mempunyai flux konstanta panas pada batasan, dengan rasio aspek yang tinggi dan aliran laminar, Incropera dan DeWitt melaporkan $Nu=8.23$.

Diameter Hidrolis (D_h) dapat didefinisikan [5] sebagai:

$$D_h = \frac{4 A_c}{P_{cs}} \quad (7)$$

Dimana A_c dan P_{cs} adalah daerah cross sectional dan keliling dari lingkaran saluran pendingin , masing-masing.

Ingat bahwa untuk saluran melingkar, bilangan Reynold harus <2300 untuk memastikan aliran laminar melalui saluran tersebut. Bilangan Reynolds , Re , dapat dihitung dengan menggunakan Rumus [5] :

$$Re = \frac{\rho V_m D_{ch}}{\mu} = \frac{V_m D_{ch}}{\nu} \quad (8)$$

Dimana V_m adalah kecepatan karakteristik dari aliran (m/s) , D_{ch} adalah diameter aliran saluran atau panjang karakteristik (m), ρ adalah kepadatan fluida (kg/m³), μ adalah viskositas fluida (Ns/m²), dan ν adalah viskositas kinematika (m²/s).

Persamaan ini sedikit diubah untuk pendinginan [5] :

$$Re = \frac{4m_{coolant}}{\mu_{gas}P_{cs}} \dots\dots\dots(9)$$

Dimana μ adalah viskositas gas atau fluida (Ns/m²).

Korelasi empiris dari Incropera dan DeWitt membolehkan bilangan Nusselt dan koefisien perpindahan panas untuk udara [5] ditentukan :

$$Nu = \frac{0.664Re^{1/2}}{2} * \frac{Pr^{1/4}}{3} (Pr > 0.6) \quad (10)$$

Pendinginan memanans karena perjalanan sepanjang saluran , oleh karena itu, ada perbedaan suhu antara saluran aliran inlet dan outlet. Dengan asumsi fluk panas seragam, perbedaan temperatur antara padat dan gas [5] adalah

$$Q = L_{plat}P_{cs}h(T_{permukaan}-T_{gas}) \quad (11)$$

Dimana L_{plate} adalah panjang dari pelat bipolar, $T_{surface}$ adalah temperature dari permukaan pelat bipolar, dan T_{gas} adalah temperature dari gas.

Hubungan antara permukaan temperature dan sel tepi didapat menggunakan kesetimbangan energi dengan plat bipolar , katoda , dan anoda[5] :

$$Q = L_{plat}P_{cs}K_{padat} \frac{(T_{edge}-T_{permukaan})}{t_{bc}} \quad (12)$$

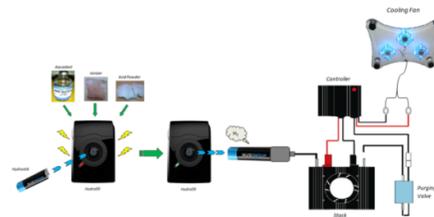
Dimana t_{bc} adalah ketebalan dari pelat bipolar , katoda , anoda dan elektrolit ; k_{solid} adalah konduktivitas panas padat(W/mK); dan T_{edge} adalah temperature dari sel tepi. Persamaan ini berasumsi bahwa perbedaan temperatur adalah konstan sepanjang saluran masuk dikarenakan asumsi flux panas konstan.

3. Experimental Setup

Pengujian ini dimulai dengan melakukan pemisahan molekul H₂O dari aquadest menjadi H₂ dan O₂. Dan lalu kemudian H₂ tersebut diisi ke dalam tabung pengisian *Hydrostik*. Pada saat pemisahan molekul H₂O ini dilakukan pembacaan temperatur air

dengan menggunakan Agilient. Kabel – kabel *termocouple* dihubungkan ke dalam air yang akan dielektrolisis. Flash disk dihubungkan ke Agilient untuk pembacaan data. Setelah *Hydrostik* penuh diisi dengan H₂ maka flash disk dicabut dan kemudian dibaca menggunakan microsoft excel.

Setelah pengisian *Hydrostik* penuh, maka kemudian flash disk dihubungkan kembali ke Agilient untuk pembacaan pada saat *hydrostik* dihubungkan ke *stack* dan menghasilkan listrik. Kabel – kabel *termocouple* dihubungkan pada permukaan *hydrostik*, lubang input dan lubang output yang terdapat pada *stack fuel cell*. Setelah *fuel cell* beroperasi secara penuh dan hidrogen yang terdapat di dalam *hydrostik* habis, flash disk dicabut dan dibaca menggunakan excel untuk mengetahui temperatur pada kondisi saat pengoperasian.



Gambar 6. *Experimental Setup*

4. Analisa Data

4.1 Efisiensi pada Hydrofill

Analisa data untuk mendapatkan Efisiensi pada *Hydrofill*

Menghitung Efisiensi pada *Hydrofill*

Dari hasil teori, energi yang diperlukan untuk mengelektrolisis air adalah sebesar 285,83kJ.

- Sehingga dicari massa air teori sebagai berikut :
 $Q = 285,83 \text{ kJ} = 285.830 \text{ J}$
 $\Delta T = 25^\circ\text{C}$
 $c = 4200 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$
 $m_{h_2O} = Q / c \cdot \Delta T$
 $= 285.830 / 4200 \times 25$
 $= 2,722 \text{ kg}$
- Mencari mol Hidrogen dari *Hydrofill*

$$\begin{aligned}
 P_{H_2} &= 478,62 \text{ Psi} \\
 &= 32,56 \text{ atm} \\
 T &= 65^\circ\text{C} = 338^\circ\text{K} \\
 V_{H_2} &= 3\text{L} \\
 \text{Maka mol } H_2: \\
 P_{H_2} \cdot V_{H_2} &= n_{H_2} \cdot R \cdot T \\
 32,56 \times 3 &= n_{H_2} \times 0,082 \times 338 \\
 n_{H_2} &= 3,52 \text{ mol}
 \end{aligned}$$

- Mencari massa H₂O pada *Hydrofill*

$$m_{H_2O} = (n_{H_2} \times Ar_{H_2}) + (n_{O_2} \times Ar_{O_2}) \\
 = (3,52 \times 2) + (1,76 \times 16) = 35,2 \text{ g} = 0.035\text{kg}$$

- Perbandingan massa teori dan praktek

$$\frac{m_{teori}}{m_{praktek}} = \frac{2,722}{0,035} = 1 : 77,77$$

- Mencari Q_{teori} dengan perbandingan dari massa teori dan praktek

$$\begin{aligned}
 Q_{teori} &= \frac{Q}{77,77} = \frac{285.830}{77,77} \\
 &= 3675,32 \text{ J}
 \end{aligned}$$

- Mencari Q_{praktek} pada *Hydrofill*

$$\begin{aligned}
 T_{inlet} &= 25^\circ\text{C} \\
 T_{outlet} &= 32,46^\circ\text{C} \\
 m_{H_2O} &= 0,035 \text{ kg} \\
 C_{air} &= 4200 \text{ J/Kg}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_{praktek} &= m_{H_2O} \cdot c_{air} \cdot \Delta T \\
 &= 0,035 \times 4200 \times 7,46 \\
 &= 1096,62 \text{ J}
 \end{aligned}$$

- Efisiensi

$$\begin{aligned}
 \eta &= \frac{Q_{praktek}}{Q_{teori}} \times 100\% = \\
 &= \frac{1096,62}{3675,32} \times 100\% = 29,83\%
 \end{aligned}$$

5. Kesimpulan

- Tingkat Efisiensi elektrolisis air pada *Hydrofill* berdasarkan data-data yang

dianalisis adalah sebesar 29,83%.

- Kesetimbangan energi pada fuel stack adalah 2762.1W.
- Laju aliran pendinginan massa yang dibutuhkan adalah 0.035g/s.

6. Saran

- Untuk mendapatkan Efisiensi elektrolisis air yang lebih maksimal, bisa menggunakan metode *High Temperature Electrolysis*.
- Agar ketebalan membran dapat dibuat setipis mungkin, dan menggunakan bahan yang mempunyai konduktivitas tinggi dimana terhubung dengan baik satu sama lainnya.
- Agar lebih mengoptimalkan transportasi massa yang terjadi di aliran membran.
- Diperlukan kajian lanjutan agar didapatkan hasil yang lebih memuaskan lagi.

Daftar Pustaka

- [1] Gesser, H.D .2002. *Applied Chemistry : A textbook for Engineers and Technologists*. Kluwer Academic/Plenum Publisers, New York
- [2] Herring S. , 2004, *High Temperatur Electrolysis*, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Gaithersburg
- [3] Hidayatulloh, DR. Poempida. Bahan Bakar Air
- [4] Meyer, Stanley A. 1990. Method For The Production of Fuel Gas. United States Patent
- [5] Spiegel, Colleen. 2008. *PEM Fuel cell modeling and simulation using MATLAB*. Elsevier's Science & Technology Rights Department in Oxford, UK.
- [6] Young Stuart A. 1991. *Apparatus and Method For Generating Hydrogen and Oxygen By Electrolytic Dissociation of Water*. United States Patent