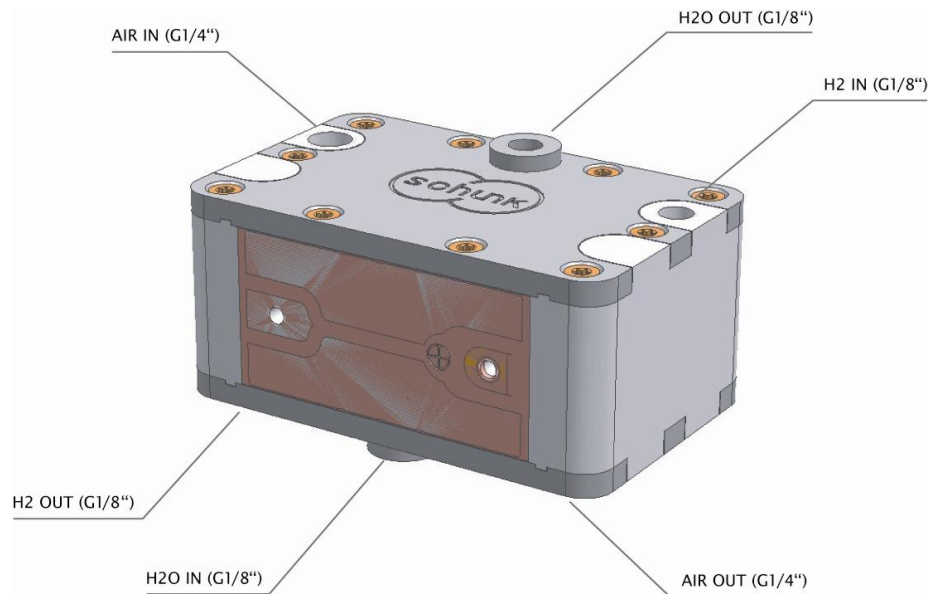


II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Fuel Cell

Fuel cell adalah suatu perangkat elektrokimia yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik melalui reaksi redoks dari suatu bahan bakar hidrogen [16]. *Fuel cell* termasuk dalam energi alternatif baru yang memiliki kelebihan yaitu efisiensi tinggi, ramah lingkungan, rendah emisi karena secara teori hasil reaksinya adalah air. Bahan bakar atau reaktan yang umum digunakan pada *fuel cell* adalah hidrogen di sisi anoda dan oksigen di sisi katoda. Reaksi antara hidrogen dan oksigen ini berlangsung pada suatu reaktor yang terdiri atas elektroda, katalisator dan elektrolit. Katalisator berfungsi untuk mempercepat reaksi redoks yang berlangsung pada reaktor *fuel cell* tanpa ikut bereaksi bersama bahan bakar sedangkan elektrolit berfungsi sebagai media transfer elektron yang dihasilkan dari oksidasi hidrogen di anoda. *Fuel cell* dirancang untuk dapat diisi reaktannya yang dikonsumsi secara kontinyu selama memproduksi listrik. Reaktan mengalir masuk dan produk dari reaktan mengalir keluar. Sehingga operasi jangka panjang dapat terus menerus dilakukan selama disuplai oleh bahan bakar (hidrogen) dan oksigen [9]. Salah satu contoh produk *fuel cell* dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut :



Gambar 2.1. Contoh produk *PEM fuel cell stack* [17]

Gambar 2.1 diatas adalah salah satu contoh produk *fuel cell*. Sebuah produk *fuel cell* biasanya terdiri atas saluran masukan dan keluaran bahan bakar (hidrogen), saluran masukan dan keluaran udara, saluran keluaran air dan terminal tegangan keluaran.

1. Jenis-Jenis *Fuel Cell*

Fuel cell memiliki jenis yang beragam dengan tingkat pengembangan dan aplikasi yang berbeda pula. Jenis *fuel cell* dapat dibedakan berdasarkan beberapa karakteristik, diantaranya adalah jenis elektrolit dan bahan bakar yang digunakan. Pemilihan tipe elektrolit mempengaruhi perbedaan temperatur kerja masing-masing *fuel cell*. Temperatur kerja dan sel tersebut juga akan mempengaruhi tipe material lain yang digunakan seperti elektroda, elektrolit, katalis dan lain-lain. Temperatur kerja juga

mempengaruhi tingkat pemrosesan bahan bakar sebelum masuk ke dalam unit sel.

Pada *fuel cell* bertemperatur rendah semua bahan bakar harus dikonversikan menjadi hidrogen. *Fuel cell* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan proses yang terjadi. *Fuel cell* dibagi menjadi langsung, tidak langsung dan regeneratif sel. Bahan bakar langsung dapat diartikan sebagai *fuel cell* yang langsung menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar yang akan diproses, sedangkan *fuel cell* tidak langsung memakai bahan bakar hidrokarbon lain yang terlebih dahulu diubah menjadi hidrogen. Sedangkan *fuel cell* regeneratif adalah tipe *fuel cell* yang menggunakan kembali produk yang dihasilkan dalam proses selanjutnya. [9]

Klasifikasi *fuel cell* yang umum berdasarkan tipe elektrolit dan bahan bakar diantaranya [5][9] :

1. *Alkaline Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Alkali / AFC.
2. *Phosphoric Acid Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Asam Fosfat / PAFC.
3. *Molten Carbonate Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Karbon / MCFC.
4. *Solid Oxide Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Oksida Padat / SOFC.
5. *Direct Methanol Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Metanol / DMFC.
6. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Membrane Pertukaran Proton / PEMFC.

2. Bagian-Bagian *Fuel Cell*

Secara umum sebuah *fuel cell* memiliki bagian-bagian sebagai berikut [19] :

1. Elektrolit

Elektrolit merupakan pemisah antara katoda dan anoda. Elektrolit berfungsi untuk memindahkan ion-ion yang terlibat dalam reaksi-reaksi reduksi dan oksidasi dalam *fuel cell*. Elektrolit sangat berpengaruh pada kinerja *fuel cell*. Elektrolit dapat berbentuk cairan, gas dan padat.

2. Katoda

Katoda merupakan elektroda yang berinteraksi dengan udara yang berfungsi menjadi batas untuk oksigen dan elektrolit, mengkatalis reaksi reduksi oksigen dan menghubungkan elektron-elektron dari sirkuit luar ke tempat reaksi.

3. Anoda

Anoda merupakan elektroda yang berinteraksi dengan bahan bakar yang berfungsi menjadi batas untuk bahan bakar dan elektrolit, mengkatalis reaksi oksidasi dan menghubungkan elektron-elektron dari tempat reaksi elektron ke sirkuit eksternal.

4. Reaktan

Reaktan adalah bahan baku atau bahan bakar yang digunakan pada *fuel cell* yang reaksinya menghasilkan energi listrik. Bahan bakar atau reaktan yang umum digunakan pada *fuel cell* adalah hidrogen di sisi anoda dan oksigen di sisi katoda.

5. Produk

Produk adalah hasil dari reaksi reaktan didalam *fuel cell*. Pada *fuel cell* produk yang dihasilkan secara teori adalah air , energi listrik dan kalor. Namun biasanya juga menghasilkan sedikit emisi.

6. Katalis

Katalis yaitu material atau bahan khusus untuk mempercepat proses reaksi kimiawi atau reduksi-oksidasi. Pada *PEM fuel cell* biasanya digunakan bahan dari platina atau campuran platina dengan material lain. Tiap individu *fuel cell* terdiri dari anoda, katoda dan elektrolit yang dihubungkan secara seri membentuk tumpukan (*stack*) *fuel cell*, yang biasanya disebut dengan *fuel cell stack*. Konfigurasi seri *fuel cell stack* ini untuk menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi.

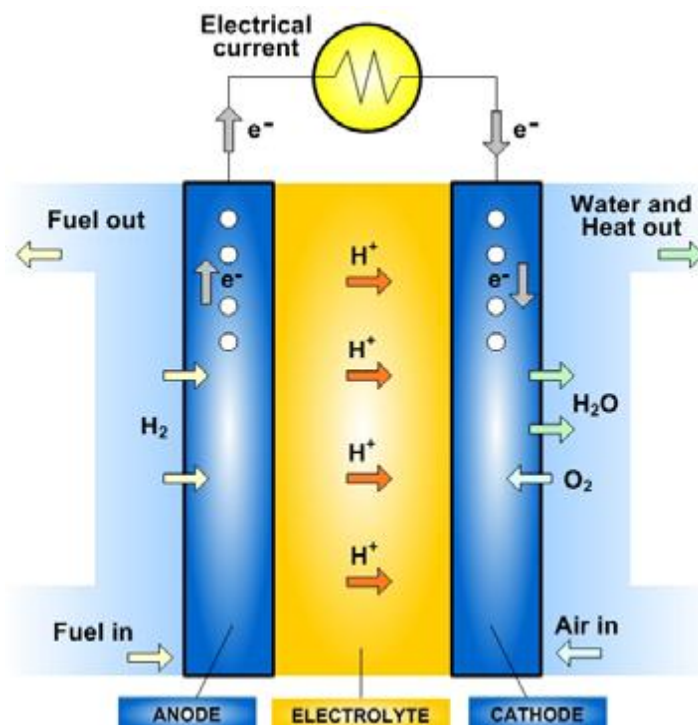
3. Prinsip Kerja Fuel Cell

Prinsip kerja sebuah *fuel cell* dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.2. dimana terdapat 2 elektroda yaitu anoda dan katoda diantara elektrolit yang terpisah satu sama lain. Bahan bakar, dalam hal ini hidrogen akan dialirkan ke permukaan anoda dengan tekanan gas tertentu sesuai kebutuhan. Dan secara bersamaan oksigen yang berasal dari udara bebas, dialirkan kepermukaan elektroda yang lain (katoda). Saat elektroda dihubungkan dengan beban dari luar, maka proses yang terjadi sebagai berikut [7][9][11]:

1. Hidrogen (H_2) yang menyentuh permukaan anoda akan beraksi secara kimiawi (reduksi), menghasilcan ion hidrogen (H^+) dan elektron (e).

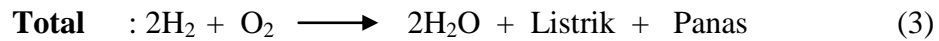
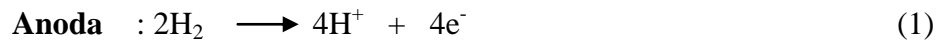
Sedangkan di katoda terjadi reaksi kimia (oksidasi) dimana oksigen (O_2) diubah menjadi ion.

2. Ion hidrogen (H^+) akan bergerak dari permukaan elektroda (anoda) menuju katoda melalui elektrolit.
3. Sedangkan elektron di anoda bergerak melalui kawat yang dihubungkan dengan beban sirkuit di luar yang akhirnya menuju elektroda yang sama dituju ion hidrogen (H^+) yaitu katoda.
4. Ion hidrogen dan elektron akan mengalami reaksi kimia dengan oksigen di katoda maka pada permukaannya akan menghasilkan air (H_2O) dan panas sebagai efek dari reaksi tersebut.



Gambar 2.2. Prinsip kerja *fuel cell*. [6]

Berikut adalah reaksi yang terjadi pada *fuel cell* secara umum [15]:

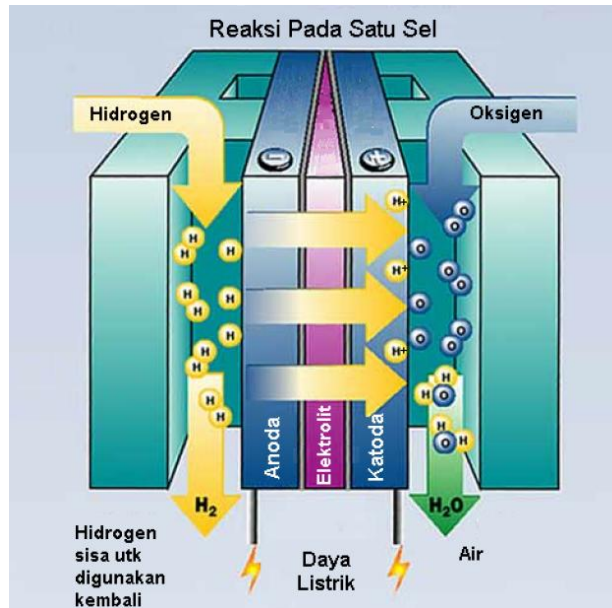


B. Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM Fuel Cell)

Salah satu jenis *fuel cell* yang paling banyak digunakan adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM fuel cell)*. *PEM fuel cell* menggunakan membran polimer sebagai elektrolitnya. Pada *fuel cell* jenis ini terjadi pertukaran proton yang ditransfer melalui elektrolit yang berada diantara anoda dan katoda. Elektrolit membran polimer pada *PEM fuel cell* dapat melewatkan ion-ion hidrogen namun bersifat isolator terhadap elektron. *PEM fuel cell* menggunakan reaktan hidrogen murni sebagai bahan bakar utamanya. [9]

1. Prinsip Kerja Proton Exchange Membrane (PEM Fuel Cell)

Pada dasarnya *PEM fuel cell* memiliki prinsip kerja yang sama dengan jenis *fuel cell* lainnya. Namun yang membedakan adalah pada *PEM fuel cell* menggunakan elektrolit membran polimer dan reaktan hidrogen murni. Selain itu juga beroperasi pada suhu dan tekanan yang rendah. Proses reaksi elektrokimia pada *PEM fuel cell* ini dimulai pada sisi anoda seperti pada gambar 2.3 dibawah ini :



Gambar 2.3. Prinsip kerja *PEM fuel cell* [11]

Pada gambar 2.3, ketika hidrogen terdifusi pada anoda yang mengandung katalisator logam *inert* (platina) maka hidrogen akan mengalami reaksi reduksi akibat logam platina tersebut, yaitu melepaskan ion hidrogen dan elektron. Elektron akan terakumulasi pada anoda (elektroda positif) sedangkan ion hidrogen akan ditransfer melalui membran elektrolit polimer menuju katoda. Saat antara katoda dan anoda diberikan beban listrik maka elektron akan mengalir dari anoda ke katoda. Aliran elektron inilah digunakan sebagai energi listrik yang dibangkitkan oleh *PEM fuel cell*. Saat elektron tiba di katoda bersama dengan ion-ion hidrogen maka akan terjadi reaksi oksidasi oleh oksigen yaitu terjadi pengikatan ion-ion hidrogen tersebut oleh oksigen dan elektron menjadi air (H_2O). [9]

2. Energi dan Potensial Reversibel *PEM Fuel Cell*

Besarnya energi yang dihasilkan pada *fuel cell* tergantung pada tekanan reaktan dan temperatur sel. Dengan menggunakan persamaan Gibbs, besarnya energi ini dinyatakan sebagai berikut:

$$\Delta g_f = \Delta g^0_f - RT_{fc} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (4)$$

Dimana Δg^0_f adalah perubahan pelepasan energi Gibbs pada tekanan standar (kJ mol^{-1}), R adalah konstanta universal gas (8.314 J/K.mol), T_{fc} adalah temperatur *PEM fuel cell* (Bar), P_{H_2} adalah tekanan hidrogen (Bar) dan P_{O_2} adalah Tekanan Oksigen (Bar) [4]. Untuk beberapa temperatur, besarnya energi ini ditunjukkan dalam tabel 2.1 berikut :

Tabel 2.1. Hubungan temperatur dan energi Gibbs pada *PEM fuel cell* [9]

No	Fase Produk Air	Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)	Δg^0_f (kJ mol^{-1})
1	Cair	25	-237,2
2	Cair	50	-228,2
3	Gas	80	-226,1
4	Gas	100	-225,2
5	Gas	200	-220,4
6	Gas	400	-210,3
7	Gas	600	-199,6
8	Gas	800	-188,6
9	Gas	1000	-177,4

Besarnya potensial reversibel sebuah *PEM fuel cell* dapat dicari dengan persamaan [9]:

$$E_o = - \frac{\Delta g^0_f}{2F} \quad (5)$$

Dimana E_o adalah besarnya potensial reversibel (Volt), Δg^0_f adalah perubahan pelepasan energi Gibbs pada tekanan standar (kJ mol^{-1}) dan F adalah konstanta Faraday (96485 Coulomb). Sehingga untuk temperatur operasi 200°C besarnya potensial reversibelnya adalah :

$$E_o = - \frac{-220,4}{2 \times 96485} \times 1000 = 1,14 \text{ Volt} \quad (6)$$

Dalam kondisi sebenarnya potensial reversibel tersebut dapat lebih kecil. Hal ini dikarenakan faktor kemurnian hidrogen, tekanan dan kondisi reaksi berlangsung. Dalam kondisi operasi berbeban, tegangan *fuel cell* memiliki karakteristik tertentu. Hal ini karena pada *fuel cell* terdapat rugi-rugi (*drop* tegangan) yaitu rugi-rugi aktivasi (*activation losses*), rugi-rugi resistansi (*ohmic losses*) dan rugi-rugi konsentrasi (*concentration losses*). [4]

3. Persamaan Nernst pada *PEM Fuel Cell*

Persamaan Nernst menyatakan besarnya tegangan *fuel cell* pada kondisi beban nol (*open circuit*). Besarnya tegangan pada *PEM fuel cell* ini dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur operasi [13]. Hal ini dijelaskan pada persamaan Nernst berikut :

$$E_{fc} = E_o + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{P_{H_2} \sqrt{(P_{O_2})}}{P_{H_2O}} \right\} \quad (7)$$

Dimana :

E_{fc} = Tegangan beban nol *fuel cell* (Volt)

E_o = Besarnya potensial reversibel (Volt)

P_{H_2} = Tekanan hidrogen (Bar)

P_{O_2} = Tekanan oksigen (Bar)

P_{H_2O} = Tekanan uap air (Bar)

R = Konstanta universal gas (8.314 J/K.mol)

T = Temperatur (Kelvin)

Dari persamaan diatas maka diketahui bahwa semakin besar tekanan reaktan dan temperatur *PEM fuel cell* maka tegangannya semakin besar.[9]

4. Rugi Aktivasi dan Arus Internal *PEM Fuel Cell*

Rugi aktivasi di anoda dan katoda terjadi dari reaksi pemutusan dan pembentukan elektron-proton ikatan kimia. Sedangkan arus internal terjadi pada elektron di elektrolit yang diakibatkan dari timbulnya aliran pembuangan bahan bakar melalui elektrolit yang terdifusi dalam elektrolit [13][5]. Besarnya kedua rugi tersebut dinyatakan sebagai:

$$V_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i_{fc} + i_n}{i_o} \right) \quad (8)$$

Dimana :

V_{act} = Rugi aktivasi dan arus internal (Volt)

i_{fc} = Arus *PEM fuel cell* (A)

i_n = Densitas Arus internal pada rugi arus internal (A/cm²)

i_o = Densitas perubahan arus pada rugi aktivasi (A/cm²)

α = Koefisien transfer perubahan reaksi (0-1)

R = Konstanta universal gas (8.314 J/K.mol)

T = Temperatur (Kelvin)

5. Rugi Resistansi (*Ohmic Losses*)

Elektroda dan elektrolit memiliki sifat resistif. Akibat sifat resistif ini timbul tegangan jatuh yang besarnya linear terhadap arus *fuel cell*. Resistivitas pada *fuel cell* ini dinyatakan sebagai *area specific resistance (ASR)* yaitu besarnya resistansi *fuel cell* setiap luas permukaan penampang [13][5]. Besarnya rugi resistansi ini dinyatakan sebagai berikut :

$$V_{ohm} = A \times ASR \times (i_n + i_{fc}) \quad (9)$$

Dimana :

A = Luas penampang *PEM fuel cell* (cm²)

ASR = *area specific resistance* (Ohm/ cm²)

i_{fc} = Arus *PEM fuel cell* (A)

i_n = Densitas arus internal pada rugi arus internal (A/cm²)

6. Rugi Konsentrasi (*Concentration Losses*)

Rugi konsentrasi (*concentration*) terjadi akibat perubahan konsentrasi dari reaktan yang mengalir pada elektroda selama bahan bakar digunakan. Karena penurunan konsentrasi mengakibatkan reaktan gagal mengalir dengan cukup pada permukaan elektroda (*mass transport loss*). Rugi konsentrasi juga mengindikasikan tegangan jatuh *PEM fuel cell* dan arus

maksimum pada *PEM fuel cell*. Hal ini karena batas konsentrasi / aliran hidrogen berkorelasi positif terhadap jumlah arus maksimum yang dihasilkan *PEM fuel cell*. [13][5][2]

Rugi konsentrasi atau *mass transport* ini dirumuskan sebagai [13][2]:

$$V_{conc} = \frac{RT}{2F} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) \ln \left(\frac{i_{max}}{i_{max} - i_{fc}}\right), i_{fc} < i_{max} \quad (10)$$

Dimana :

i_{max} = Arus maksimum (arus kritis) *PEM fuel cell* (Ampere)

F = Konstanta Faraday (96.485 Coulomb)

R = Konstanta universal gas (8.314 J/K.mol)

T = Temperatur (Kelvin)

α = Koefisien transfer perubahan reaksi (0-1)

7. Kapasitas Arus Maksimum *PEM Fuel Cell*

Pada rugi konsentrasi dipengaruhi oleh besarnya arus maksimum. Arus maksimum pada *PEM fuel cell* dipengaruhi oleh temperatur, tekanan dan banyaknya aliran hidrogen yang disuplai ke *PEM fuel cell* (Liter/menit). Proses konversi dari jumlah hidrogen ke bentuk arus ini didapatkan berdasarkan persamaan Faraday dan hukum gas ideal sebagai berikut [5][3]:

$$i_{max} = \frac{PH_2 \times 0.98 \times FH_2 \times eff \times F \times z \times \text{bil. estimasi}}{R \times T \times 60} \quad (11)$$

Dimana :

i_{max} = Arus maksimum (arus kritis) *PEM fuel cell* (Ampere)

FH_2 = Banyaknya jumlah aliran hidrogen (Liter/menit)

Eff = Efisiensi *PEM fuel cell* (%)

z = Jumlah elektron valensi hidrogen (2)

F = Konstanta Faraday (96.485 Coulomb)

R = Konstanta universal gas (8.314 J/K.mol)

T = Temperatur (Kelvin)

8. Tegangan Operasi *PEM Fuel Cell*

Tegangan operasi *PEM fuel cell* mencakup tegangan reversibel, tegangan beban nol persamaan Nernst dan rugi-rugi yang berlaku pada *PEM fuel cell* yaitu rugi aktivasi, rugi arus internal, rugi ohmik dan rugi konsentrasi / transport. Sehingga besarnya tegangan operasi ini dirumuskan sebagai berikut [15][6]:

$$V_{fc} = N(E_{fc} - V_{act} - V_{ohm} - V_{conc}) \quad (12)$$

Dimana :

N = Jumlah sel dalam stack

E_{fc} = Tegangan beban nol (V)

V_{act} = Rugi aktivasi dan arus internal (V)

V_{ohm} = Rugi resistansi (V)

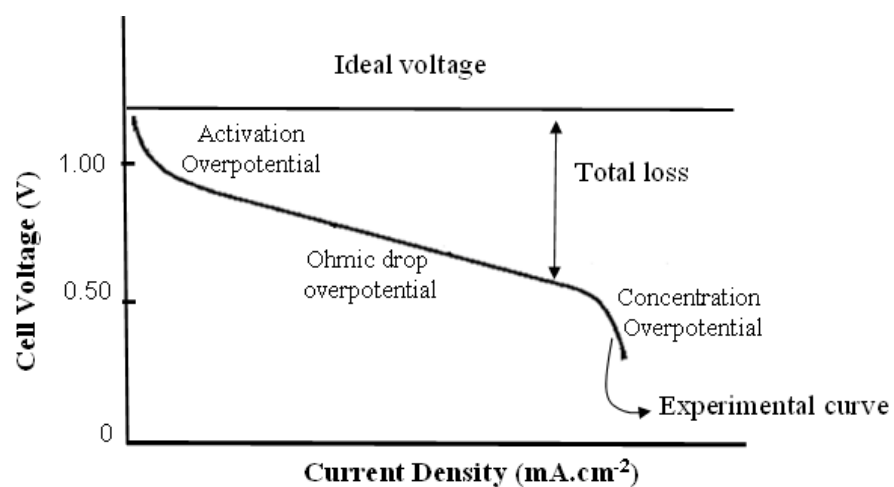
V_{con} = Rugi konsentrasi (V)

Persamaan diatas secara keseluruhan dapat dituliskan sebagai persamaan tegangan *PEM fuel cell* pada persamaan (13) sebagai berikut [9]:

$$V_{fc} = N \left\{ \left(E_o + \frac{RT}{2F} \ln \left\{ \frac{PH_2 \sqrt{(PO_2)}}{PH_2O} \right\} \right) - \left(\frac{RT}{2\alpha F} \ln \left(\frac{i_{fc} + i_n}{i_o} \right) \right) - \right. \\ \left. \left(A \times ASR \times (i_n + i_{fc}) \right) - \frac{RT}{2F} \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) \ln \left(\frac{i_{max}}{i_{max} - i_{fc}} \right) \right\} \quad (13)$$

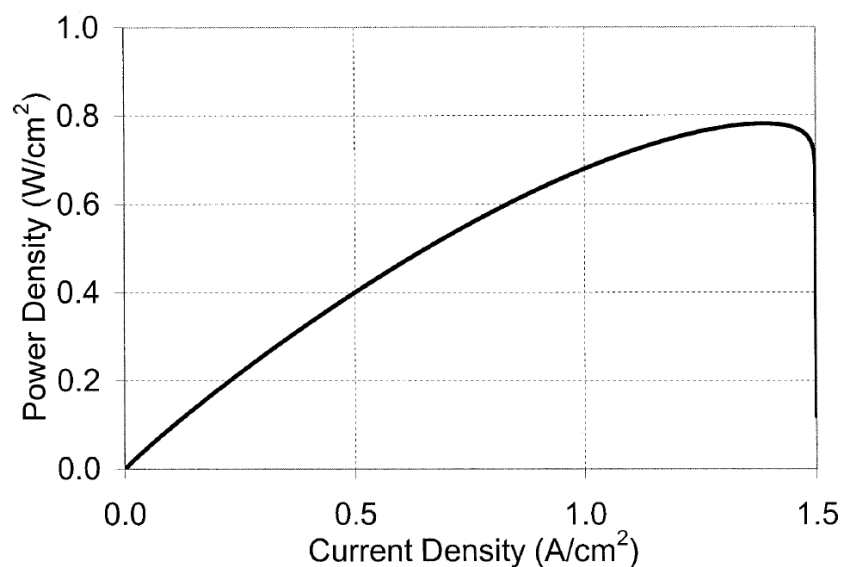
9. Karakteristik Listrik PEM Fuel Cell

Akibat adanya rugi-rugi pada *PEM fuel cell* yaitu rugi aktivasi, rugi arus internal, rugi ohmik dan rugi konsentrasi yang sebanding dengan arus pada *PEM fuel cell*. Maka pada *PEM fuel cell* memiliki karakteristik listrik tertentu. Karakteristik ini digambarkan sebagai hubungan arus dan tegangan yang digambarkan pada gambar 2.4 Karakteristik ini terbagi menjadi karakteristik beban nol (*open circuit*), berbeban dan hubung singkat (*short circuit*). Pada saat beban nol, besarnya tegangan *PEM fuel cell* adalah tegangan maksimum yaitu tegangan persamaan Nernst. Saat mulai dibebani maka penurunan tegangan mulai terjadi terutama akibat rugi aktivasi, rugi arus internal dan rugi ohmik. Disaat pembebanan maksimum maka tegangan akan jatuh mendekati nol akibat adanya konsentrasi kritis dari bahan bakar dan efek hubung singkat (*short circuit*).



Gambar 2.4. Karakteristik arus dan tegangan *PEM fuel cell*. [13][19]

Karakteristik tegangan dan arus ini menghasilkan karakteristik hubungan arus dan daya pada *PEM fuel cell* seperti dijelaskan pada gambar 2.5 berikut. Daya pada *PEM fuel cell* akan sebanding dengan arus yang mengalir hingga pada titik daya maksimum yang dapat dihasilkannya.



Gambar 2.5. Karakteristik arus dan daya *PEM fuel cell*. [2]

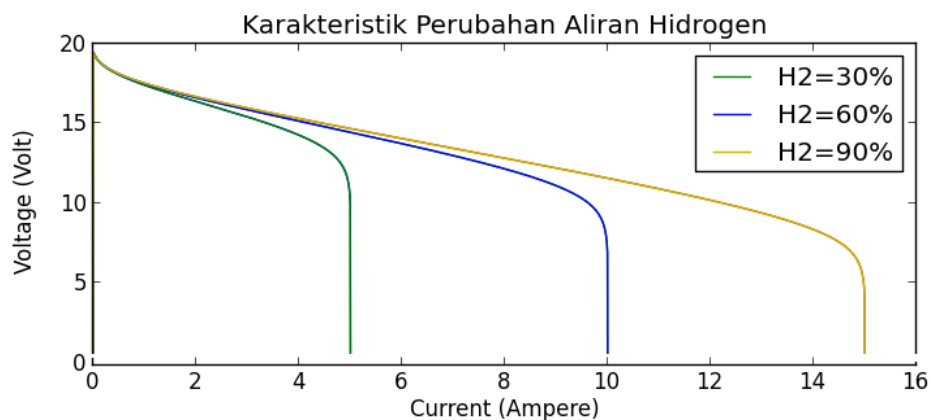
10. Karakteristik Perubahan Variabel Operasi *PEM Fuel Cell*

Ada beberapa hal dapat mempengaruhi kinerja dan daya yang dihasilkan oleh sebuah *PEM fuel cell* yaitu diantaranya ialah :

1. Jumlah aliran reaktan hidrogen

Banyaknya hidrogen yang disuplai ke dalam *PEM fuel cell* berpengaruh besar terhadap arus dan daya yang dihasilkan. Semakin banyak reaktan hidrogen maka akan semakin banyak elektron dan ion positif yang terbentuk dalam reaktor *PEM fuel cell*. Jumlah aliran hidrogen juga berkorelasi terhadap besar arus maksimum yang dapat dihasilkan oleh

PEM fuel cell tersebut [9]. Hubungan jumlah hidrogen ini dijelaskan pada gambar 2.6 berikut :



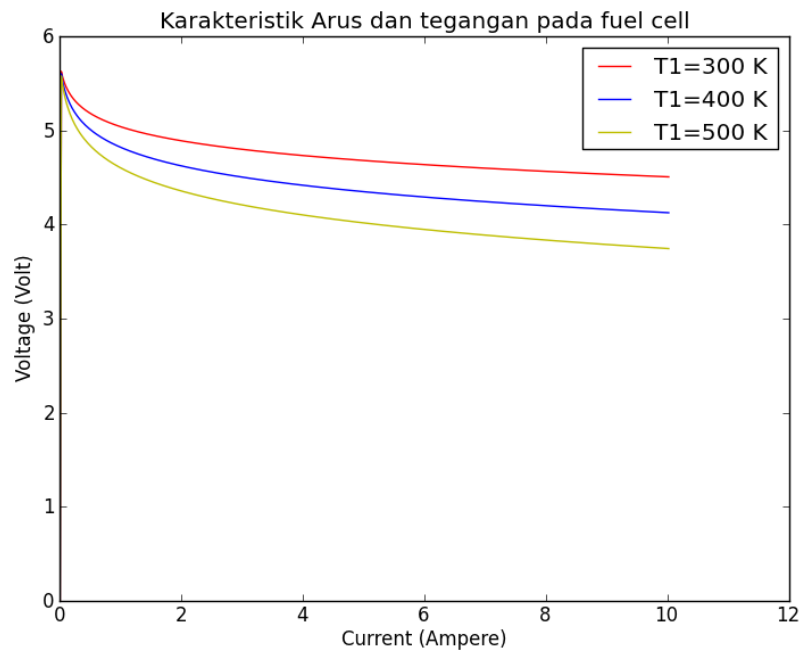
Gambar 2.6. Hubungan temperatur terhadap tegangan *PEM fuel cell* (Gambar hasil simulasi Phytion 2.7)

Pada gambar 2.6 terdapat tiga buah grafik dengan variasi jumlah hidrogen yakni grafik berwarna hijau, biru dan kuning dengan nilai masing-masing 30%, 60% dan 90% dimana 100% hidrogen sama dengan 2 Liter/menit hidrogen. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar jumlah hidrogen yang digunakan *PEM fuel cell* maka semakin besar kapasitas arus maksimum yang dihasilkan *PEM fuel cell*.

2. Temperatur

Temperatur mempengaruhi laju reaksi hidrogen dan oksigen di dalam *PEM fuel cell*. Dalam hal ini mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh *PEM fuel cell* tersebut, semakin rendah temperatur operasi maka menghasilkan tegangan keluaran yang semakin besar pula [9]. Hubungan perubahan temperatur terhadap keluaran *PEM fuel cell* ini dapat dilihat pada gambar 2.6. Pada gambar 2.6 terdapat tiga buah grafik dengan variasi temperatur yakni grafik berwarna merah, biru dan kuning

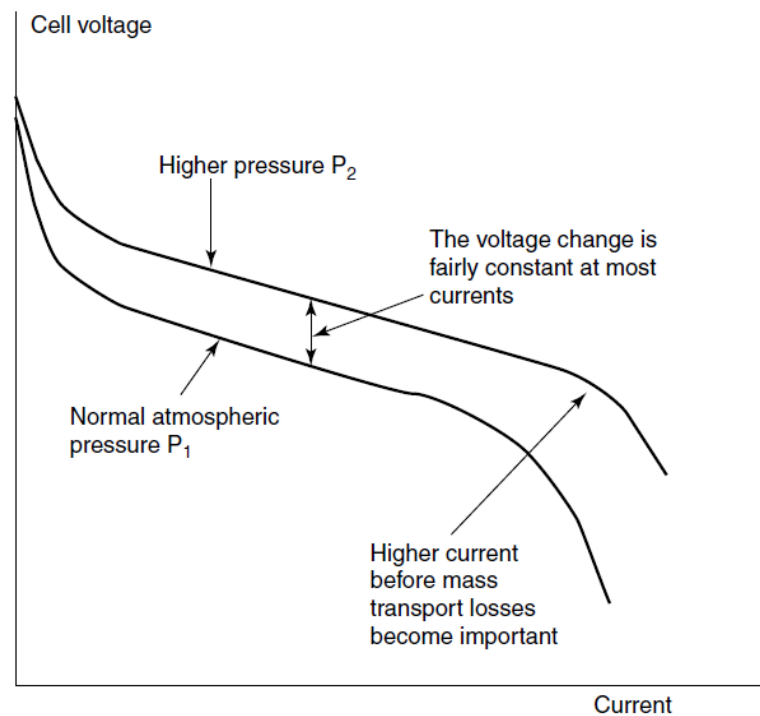
dengan nilai temperatur masing-masing 300, 400 dan 500 Kelvin. Dari ketiga grafik tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar temperatur operasi *PEM fuel cell* maka semakin kecil tegangan keluaran yang dihasilkan *PEM fuel cell*.



Gambar 2.7. Hubungan temperatur terhadap tegangan *PEM fuel cell* (Gambar hasil simulasi Python 2.7)

3. Tekanan reaktan dan produk

Tekanan yang makin tinggi menghasilkan kerapatan hidrogen yang makin tinggi. Semakin tinggi kerapatan hidrogen maka semakin besar jumlah mol hidrogen yang tersedia [9]. Hubungan tekanan dan tegangan pada *PEM fuel cell* ini dapat dijelaskan pada gambar 2.8 berikut :



Gambar 2.8. Hubungan tekanan terhadap tegangan *PEM fuel cell*. [9]

Pada gambar 2.8 saat tekanan operasi lebih tinggi, tegangan pada *PEM fuel cell* lebih besar daripada saat tekanan atmosfer. Dengan demikian semakin tinggi tekanan kerja sebuah *PEM fuel cell* dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih besar.

4. Konsentrasi atau kemurnian reaktan

Konsentrasi dapat dinyatakan sebagai konsentrasi hidrogen atau oksigen dalam udara. Semakin besar konsentrasi reaktan yang digunakan maka akan semakin besar daya yang dapat dihasilkan oleh *fuel cell* tersebut.[9]

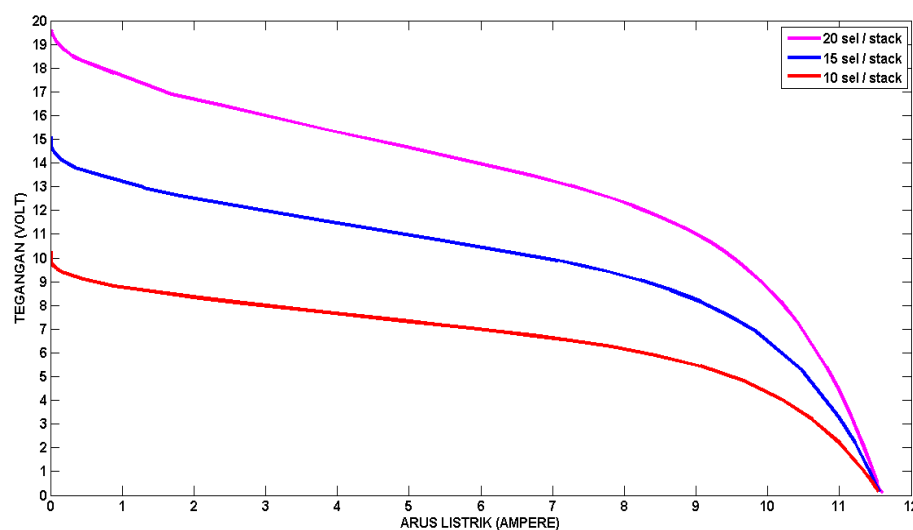
5. Konsentrasi katalis platina dalam anoda

Logam platina digunakan sebagai katalis penting pada *PEM fuel cell*. Karena harga logam platina yang mahal dan dengan jumlah yang terbatas maka biasanya platina ditambahkan (*dopping*) dalam bentuk serbuk ke

anoda, komposisi antara anoda dan katoda ini dinyatakan sebagai konsentrasi. Semakin besar konsentrasi platina dalam anoda maka proses reaksi berlangsung semakin baik, sehingga menghasilkan tegangan yang lebih besar. [9]

6. Jumlah sel dalam *stack*

Pada *PEM fuel cell* untuk menghasilkan tegangan yang besar maka setiap satu buah sel yang terdiri dari satu anoda dan katoda diserikan. Konfigurasi seri antar sel ini disebut sebagai tumpukan (*stack*). Berikut adalah grafik yang menjelaskan jumlah sel dalam *stack* terhadap tegangan yang dihasilkan [9]. Hubungan perubahan jumlah sel terhadap keluaran *PEM fuel cell* ini dapat dilihat pada gambar 2.9 berikut :



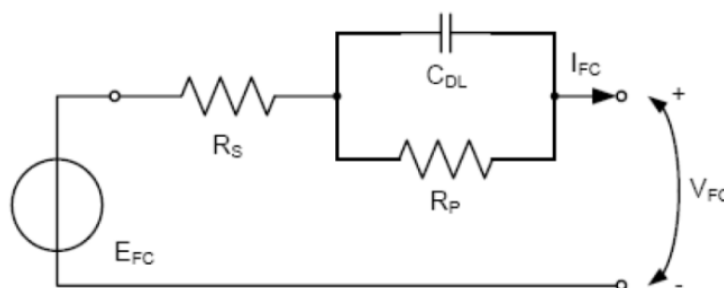
Gambar 2.9. Hubungan jumlah sel terhadap tegangan *PEM fuel cell* (Gambar hasil simulasi Phytion 2.7)

Pada gambar 2.9 terdapat tiga buah grafik dengan variasi jumlah sel yakni grafik berwarna merah, biru dan merah muda dengan nilai temperatur masing-masing 10 sel, 15 sel dan 20 sel. Dari ketiga grafik

tersebut dapat diketahui bahwa semakin besar jumlah sel pada *PEM fuel cell* maka semakin besar tegangan keluaran yang dihasilkan *PEM fuel cell*.

11. Rangkaian Ekuivalen *PEM Fuel Cell*

Bentuk dinamis sebuah *PEM fuel cell* dapat direpresentasikan dalam bentuk ekuivalen rangkaian listrik seperti pada gambar 2.10 berikut :



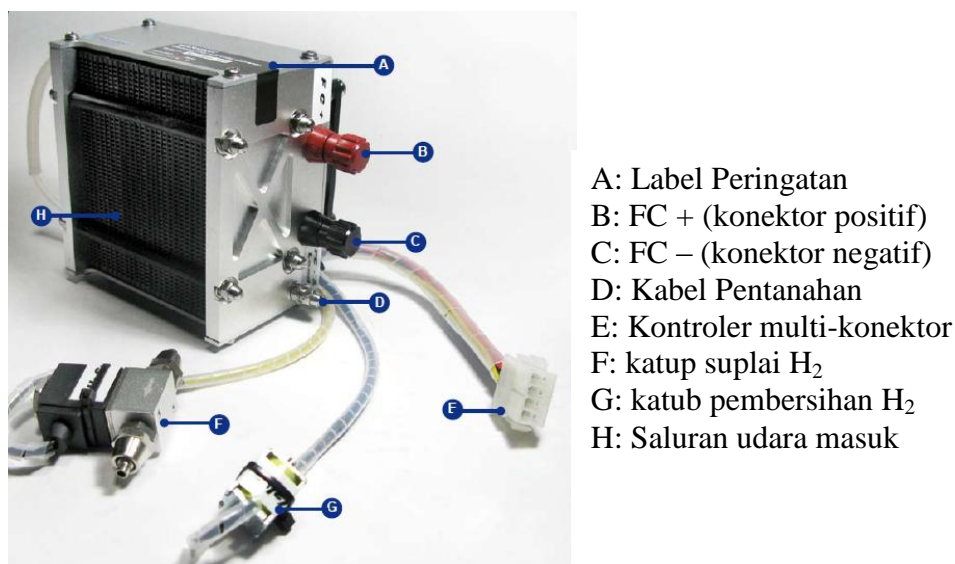
Gambar 2.10. Rangkaian ekuivalen *PEM fuel cell*. [16].

Pada gambar 2.10, E_{FC} mewakili tegangan beban nol *fuel cell*, sedangkan R_S mewakili rugi ohmik, C_{DL} dan R_P yang tersusun paralel mewakili impedansi dan kapasitansi geometrik antara anoda dan katoda, I_{FC} mewakili arus yang mengalir pada *fuel cell* dan V_{FC} mewakili tegangan terminal *fuel cell*.

C. Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Horizon H-100

Proton exchange membrane fuel cell stack Horizon H-100 adalah salah satu produk *PEM fuel cell* buatan *Horizon Fuel Cell Technologies* yang memiliki kapasitas daya maksimum sebesar 100 Watt, arus hubung singkat maksimum

sebesar 12 Ampere dan tegangan beban nol sebesar 20 Volt [16]. Produk ini menjadi satu-satunya *PEM fuel cell* yang menjadi referensi / acuan bagi simulator *PEM fuel cell* yang dibuat. Gambar dan bagian-bagian dari *PEM fuel cell stack Horizon H-100* ini dijelaskan pada gambar 2.11 berikut :



Gambar 2.11. *Proton exchange membrane fuel cell Horizon H-100.*[16]

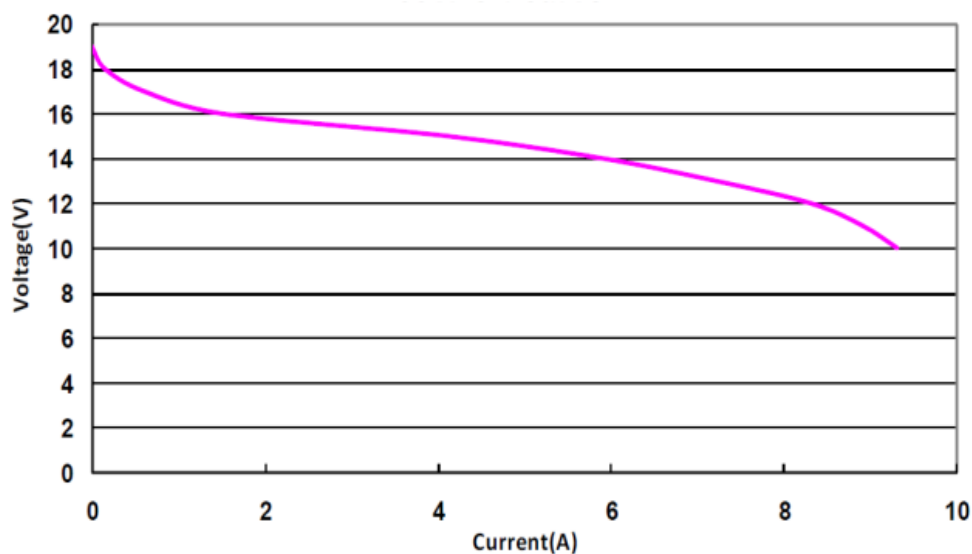
Proton exchange membrane fuel cell stack Horizon H-100 ini memiliki spesifikasi yang dijelaskan pada tabel 2.2 berikut :

Tabel 2.2. Parameter *PEM fuel cell stack Horizon H-100* [16]

No	Parameter	Nilai
1	Jumlah Sel (N)	20
2	Rate Power	100 W
3	Temp. Stack Maksimum	65° C
4	Tekanan Hidrogen	0.45-0.55 bar
5	Aliran Hidrogen Maximum	1.3 L/min
6	Luas Penampang (A)	11.8 x 10.4 cm
7	Efisiensi Stack	40%

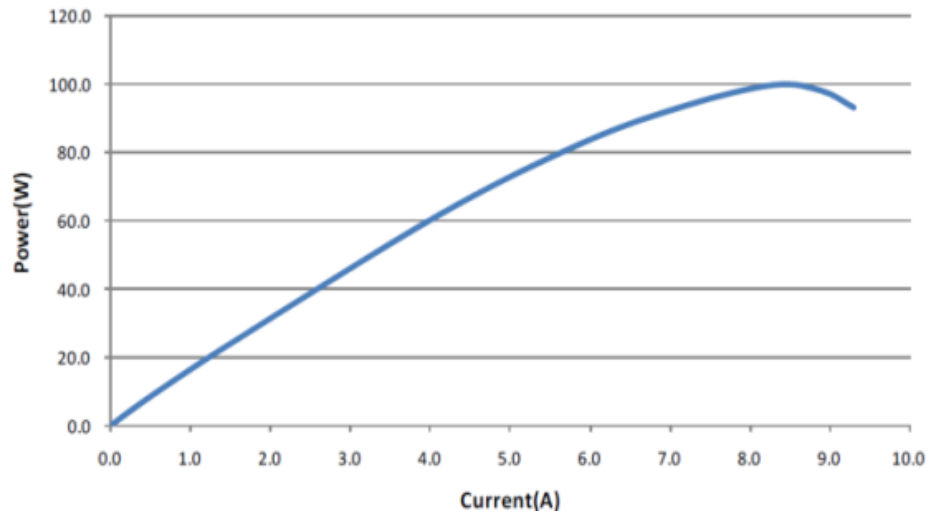
8	Over Current Shut Down	12 Ampere
9	Arus Maksimum Mode Standar	9.5 Ampere

Karakteristik *Proton exchange membrane fuel cell stack Horizon H-100* terdiri atas karakteristik arus-tegangan pada kondisi *baseline* yang dijelaskan pada gambar 2.12 berikut :



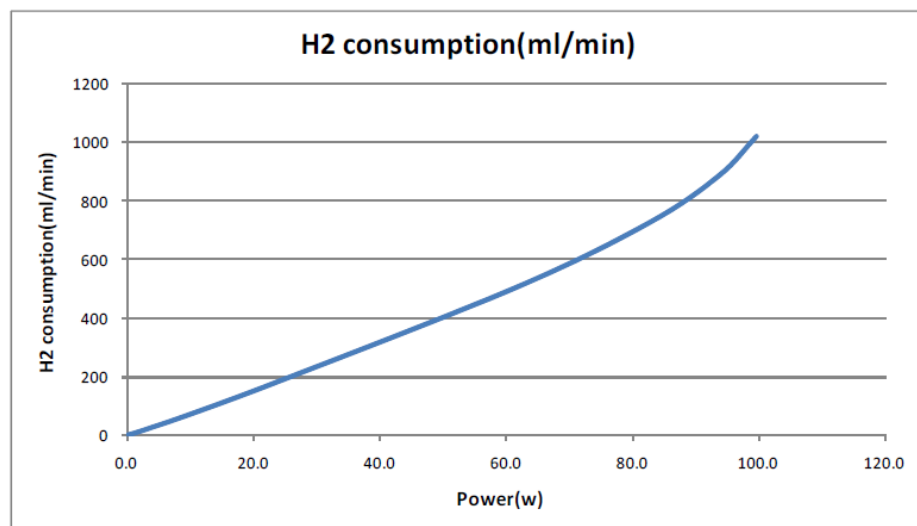
Gambar 2.12. Karakteristik arus dan tegangan *PEM fuel cell Stack Horizon H-100 (datasheet)*. [16]

Hubungan arus dan tegangan ini secara khusus membentuk karakteristik pembebanan dimana semakin besar pemakaian arus maka semakin kecil tegangan terminal *fuel cell*. Dari hubungan tegangan dan arus ini membentuk hubungan arus dan daya *fuel cell* yang dijelaskan pada gambar 2.13. Semakin besar arus maka semakin besar daya yang digunakan hingga pada saat titik kritis dimana daya maksimum *fuel cell* tersedia. Selain itu terdapat hubungan banyaknya jumlah aliran hidrogen yang disuplai terhadap besarnya daya yang dihasilkan. Hubungan ini dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut :



Gambar 2.13. Karakteristik arus dan daya *PEM fuel cell Stack Horizon H-100* (datasheet).[16]

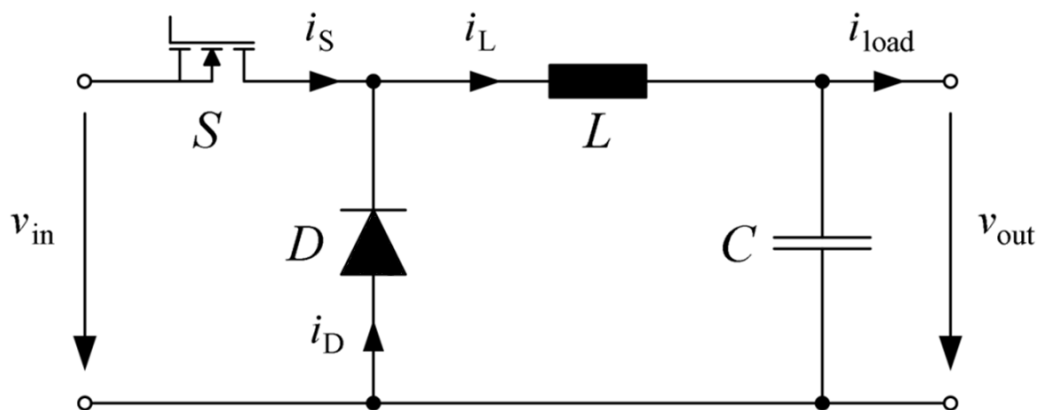
Pada gambar 2.14, semakin besar jumlah hidrogen akan menghasilkan daya listrik yang semakin besar pula. Namun dititik tertentu terdapat batasan dimana daya listrik tidak mengalami kenaikan yang signifikan terhadap penambahan jumlah aliran hidrogen (titik kritis).



Gambar 2.14. Karakteristik konsumsi hidrogen dan daya *PEM fuel cell Stack Horizon H-100* (datasheet).[16]

D. Buck Converter

Buck converter adalah salah satu konverter DC ke DC yang digunakan untuk menurunkan dan mengontrol tegangan. Tegangan keluaran (V_{out}) dikontrol dengan mengatur lebar pulsa atau *duty cycle* (D) pada komponen *switch* (S). [4] Topologi sederhana dari rangkaian *Buck converter* ini dapat dilihat pada gambar 2.15 berikut :



Gambar 2.15. Topologi sederhana rangkaian *Buck converter*. [4]

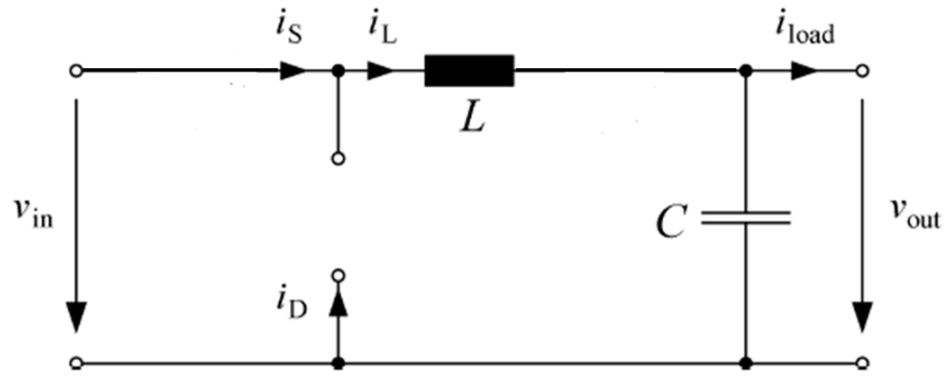
1. Prinsip Kerja *Buck Converter*

Pada dasarnya Buck konverter digunakan untuk menurunkan tegangan dengan mengatur lebar pulsa pensaklaran komponen *switch*. Komponen saklar (*switch*) yang umum digunakan biasanya seperti Mosfet, IGBT dan Transistor BJT. [4] Prinsip dari Buck konverter ini dibagi menjadi dua mode yaitu mode saat saklar *off* dan sakelar *on*. Dimana :

1. Ketika saklar tertutup (*on*)

Dioda bekerja *reversed/block* sehingga suplai masukan mengalir ke induktor (L) juga ke beban dan terjadi penyimpanan muatan oleh induktor.

Kondisi saklar tertutup ini dijelaskan pada gambar 2.16 berikut :



Gambar 2.16. Rangkaian ekuivalen *Buck converter* pada keadaan saklar tertutup. [4]

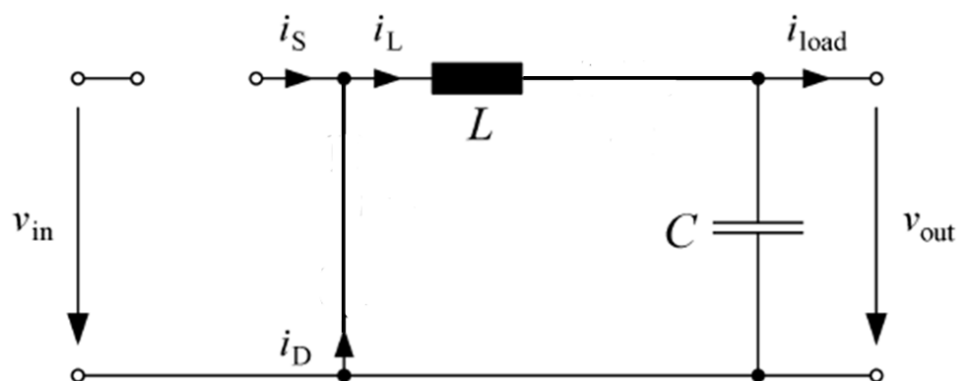
Pada saat kondisi saklar tertutup (*on*) berlaku persamaan sebagai berikut :

$$\Delta I_{L_{on}} = \int_0^{t_{on}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} t_{on} , \quad t_{on} = DT \quad (14)$$

$$\Delta I_{L_{on}} = \frac{V_{in} - V_{out}}{L} \times DT \quad (15)$$

2. Ketika saklar terbuka (*off*)

Dioda bekerja *forward/unblock* sehingga energi yang disimpan di induktor dapat mengalir ke beban. Kondisi saklar terbuka ini dijelaskan pada gambar 2.17 berikut :



Gambar 2.17. Rangkaian ekuivalen *Buck converter* pada keadaan saklar terbuka. [4]

Pada saat kondisi saklar terbuka (*off*) berlaku persamaan sebagai berikut :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{t_{on}+t_{off}} \frac{V_L}{L} dt = \frac{-V_{out}}{L} t_{off} , t_{off} = (1 - D)T \quad (16)$$

$$\Delta I_{L_{off}} = \frac{-V_{out}}{L} x (1 - D)T \quad (17)$$

Pada kondisi kontinyu besarnya arus saat *switch* terbuka dan saat *switch* tertutup adalah sama besar. Hal ini dijelaskan pada persamaan berikut :[17]

$$\Delta I^+_{L_{on}} + \Delta I^-_{L_{off}} = 0 \quad (18)$$

$$\frac{V_{in} - V_{out}}{L} DT - \frac{V_{out}}{L} (1 - D)T = 0 \quad (19)$$

$$V_{in}D - V_{out} = 0 \quad (20)$$

Sehingga besarnya tegangan keluaran pada *Buck converter* dapat dirumuskan dengan :

$$V_{out} = V_{in} \cdot D \quad (21)$$

Kemudian untuk menghitung besarnya *ripple* tegangan dan arus dirumuskan sebagai berikut [17]:

$$\Delta I = \frac{V_{in} \cdot D (1 - D)}{f \cdot L} \quad (22)$$

$$\Delta V = \frac{V_{in} \cdot D (1 - D)}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot C} \quad (23)$$

Dimana :

D = Lebar pulsa (*duty cycle*) penyalaan komponen *switch* (0-1)

f = Frekuensi (Herz)

L = Induktansi inductor (Henry)

C = Kapasitansi kapasitor (Farad)

V_{in} = Tegangan masukan (Volt)

V_{out} = Tegangan keluran (Volt)

V_L = Tegangan Induktor (Volt)

E. Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah chip yang berfungsi sebagai pengontrol rangkaian elektronik dan umumnya dapat menyimpan program didalamnya. Mikrokontroler umumnya terdiri dari *CPU (central processing unit)*, memori, I/O tertentu dan unit pendukung seperti *analog-to-digital converter (ADC)* yang sudah terintegrasi di dalamnya. Pada penelitian ini digunakan Arduino Mega 2560 sebagai kontroler dan penghasil sinyal *PWM*. Arduino Mega 2560 adalah salah satu jenis mikrokontroler Arduino yang menggunakan prosessor ATmega2560. Arduino ini memiliki 54 pin I/O digital (15 diantaranya dapat berfungsi sebagai *PWM*), 16 input analog, 4 UART (*serial port*), 16 MHz Osilator kristal, koneksi *USB*, konektor daya, *ICSP*, dan tombol reset. Bahasa program yang digunakan adalah bahasa C dengan perangkat lunak kompilernya adalah *sketch* atau *Arduino IDE* [17].

Spesifikasi teknis Arduino Mega 2560 dijelaskan pada tabel 2.3 dibawah ini :

Tabel 2.3. Spesifikasi teknis Arduino Mega 2560.[17]

Keterangan	Spesifikasi
Mikrokontroler	ATmega2560
Tegangan Operasi	5V
Tegangan masuk (rekomendasi)	7-12V
Tegangan masuk (batas)	6-20V
Pin I/O Digital	54 (15 diantaranya dapat

	berfungsi sebagai <i>PWM</i>)
Pin Input Analog	16
Arus DC per I/O Pin	40 mA
Arus DC pada Pin 3.3V	50 mA
Memori <i>Flash</i>	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Kecepatan <i>clock</i>	16 MHz

Dimensi dan bentuk fisik Arduino Mega 2560 dijelaskan pada gambar 2.18 berikut :



Gambar 2.18. Arduino Mega 2560. [18]

F. Kontroler Proporsional–Integral-Derivatif (*PID Controller*)

Kontroler PID digunakan untuk meningkatkan kepresisian dan keakuratan tegangan output pada *Buck converter*. Secara matematis kontroler PID dijelaskan pada persamaan berikut [20]:

$$mv(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (24)$$

Dimana :

$mv(t)$ = Keluaran dari pengontrol PID atau *Manipulated Variable*

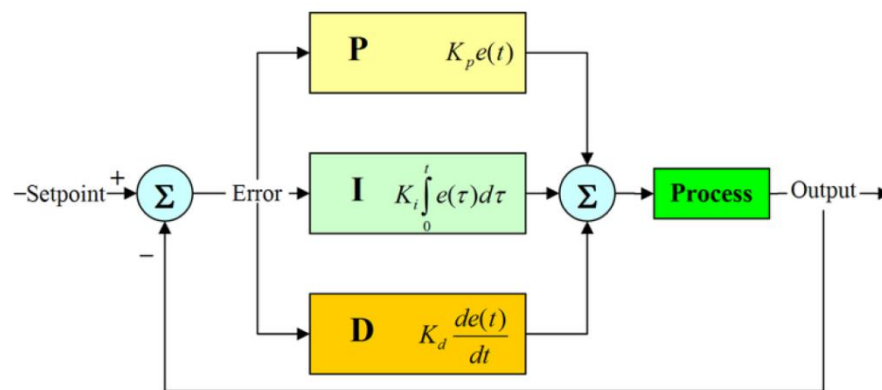
K_p = Konstanta Proporsional

T_i = Konstanta Integral

T_d = Konstanta Derivatif

$e(t)$ = Error (selisih antara set point dengan level aktual)

Model matematik sebuah kontroler PID dijelaskan pada gambar 2.19 berikut :

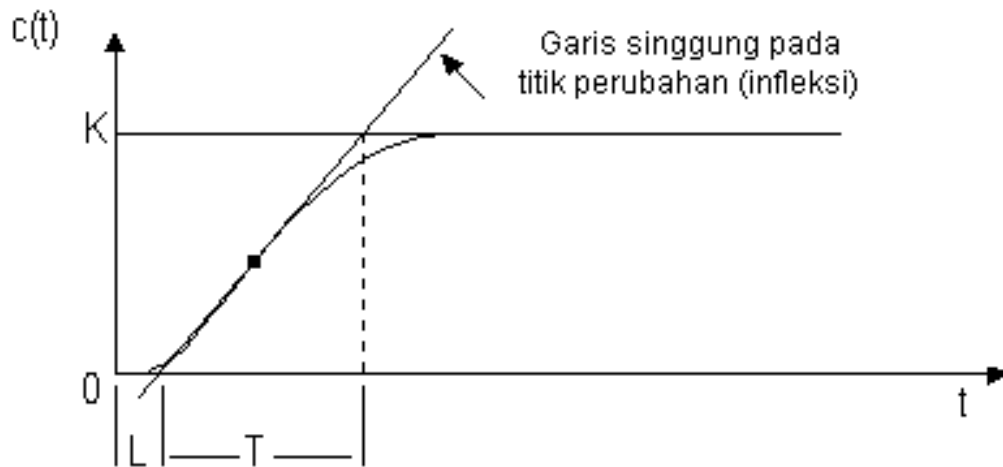


Gambar 2.19. Model kontroler PID [20]

Kontroler proporsional digunakan untuk menurunkan *rise time* dan menghasilkan tegangan *set point*. Sedangkan pada kontroler integral digunakan untuk menjamin tegangan keluaran akan terus menuju ke keadaan *set point* kemudian pada kontroler derivatif memperbaiki respon transien dengan memprediksi error yang akan terjadi. Kontrol derivative hanya berubah saat ada perubahan error sehingga saat error statis kontrol ini tidak akan bereaksi, hal ini pula yang menyebabkan kontroler derivatif tidak dapat dipakai sendiri.[20]

Penentuan parameter konstanta proporsional (k_p), konstanta integral (k_i) dan konstanta derivative (k_d) salah satunya dapat menggunakan metode Nichols-

Ziegler. Metode ini digunakan untuk menentukan nilai K_p , T_i dan T_d berdasarkan pada karakteristik tanggapan peralihan yang diberikan.



Gambar 2.20. Kurva S analisa grafis *Ziegler Nichols*. [20]

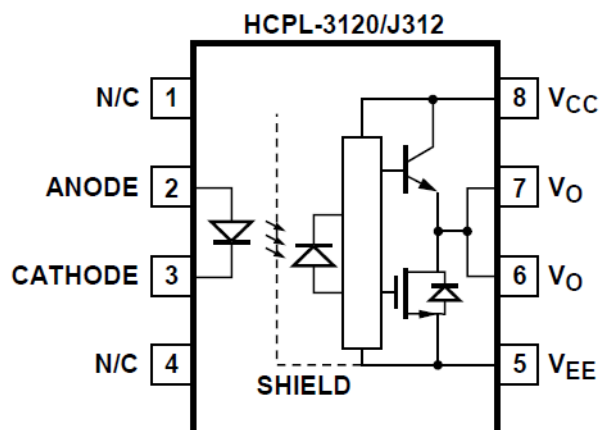
Pada gambar 2.20, aturan perpotongan garis lurus terjadi pada kondisi linier dari kurva S respon sistem. Ketepatan dalam pengambilan perpotongan ini sangatlah penting karena menentukan parameter T dan L akan menjadi acuan dari kontroler. Parameter T dan L adalah parameter waktu respon awal dari kurva S dimana L adalah waktu subtransien sedangkan T adalah waktu transien [19][20]. Setelah parameter L dan T didapatkan maka besaran parameter K_p , T_i dan T_d dapat dilihat pada tabel 2.4 berikut [20]:

Tabel 2.4. Formula Ziegler Nichols. [20]

Tipe Kontroler	K_p	T_i	T_d
P	T/L	~	0
PI	$0.9 T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 T/L$	$2L$	$0.5L$

G. Rangkaian Pemicu *Gate Mosfet (Gate Driver)*

Komponen mosfet pada *Buck converter* agar dapat difungsikan sebagai sakelar maka mosfet harus bekerja pada kondisi saturasinya. Kondisi saturasi mosfet ini dapat dibentuk dengan memberikan tegangan *gate-source* berkisar antara 12 - 15 Volt. Karena tegangan keluaran dari mikrokontroler arduino adalah 5 Volt maka diperlukan rangkaian penguat / pemicu *gate* pada mosfet yang disebut sebagai rangkaian *gate driver*. Pada penelitian ini rangkaian *gate driver* dibuat dengan menggunakan IC HCPL 3120, yang berfungsi menguatkan tegangan *PWM* kontrol arduino dari 5 Volt menjadi tegangan 15 Volt. Konfigurasi pin dari IC HCPL 3120 ini dijelaskan pada gambar 2.21 berikut [18]:



Gambar 2.21. Konfigurasi pin IC HCPL 3120. [18]

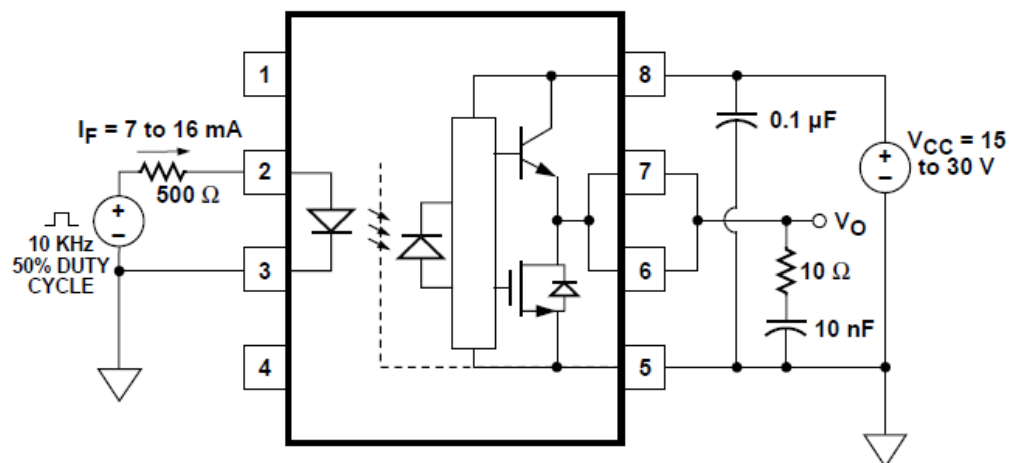
Pada dasarnya IC HCPL adalah IC *Optocoupler* dimana prinsipnya mengkonversi sinyal kontrol menjadi cahaya. Cahaya ini kemudian akan diterima oleh *receiver* (dapat berupa photodiode atau phototransistor) berupa transduser yang menghasilkan tegangan yang lebih besar dengan karakteristik

yang sama dengan tegangan input. Karakteristik dari IC HCPL 3120 ini dijelaskan pada tabel 2.5 berikut [18]:

Tabel 2.5. Tabel kebenaran / karakteristik IC HCPL 3120. [18]

LED	$V_{CC} - V_{EE}$	V_o
OFF	0 – 30 V	LOW
ON	0 – 11 V	LOW
ON	11 – 13.5 V	TRANSITION
ON	13.5 – 30 V	HIGH

Karakteristik dari IC HCPL ini adalah ketika LED ON dengan tegangan catu daya berkisar antara 13.5 – 30 Volt maka tegangan keluaran (V_o) akan HIGH (15 Volt). Dan ketika LED OFF dengan tegangan catu daya berkisar antara 13.5 – 30 Volt maka tegangan keluaran (V_o) akan LOW (0 Volt) [18]. Sistem minimum dari IC HCPL 3120 dijelaskan pada gambar 2.22 dibawah ini:



Gambar 2.22. Sistem minimum IC HCPL 3120. [18]