



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Penelitian tugas akhir ini dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian teori serta referensi yang relevan dengan kasus dan permasalahan yang akan diselesaikan, teori dan referensi didapat dari jurnal, paper, buku dan sumber lainnya yang berhubungan dengan Sistem pembangkit listrik *hybrid photovoltaic* dengan *fuel cell* dan yang segala hal yang mendukung dalam penelitian.

Penelitian dengan judul “*A Feasibility Study of Photovoltaic-Fuel Cell Hybrid Energy System*” [7] menjelaskan tentang studi simulasi dari pembangkit listrik *Hybrid* antara *Photovoltaic* dan *Fuel Cell*. Peneliti melakukan menggunakan data sebenarnya dari lapangan, mulai dari *Photovoltaic*, data utilitas listrik, gedung perkantoran serta informasi *Fuel Cell* dengan pengembangan yang sesuai. Pada penelitian ini diungkapkan bahwa kelebihan *Fuel Cell* antara lain memiliki efisiensi yang tinggi, kemampuan proses sangat cepat, keandalan yang tinggi dan biaya perawatan yang rendah, fleksibilitas bahan bakar, fleksibilitas dalam ukuran dan konfigurasi, sumber energi bersih serta proses koogenerasinya sangat baik. Pada penelitian ini dilakukan simulasi terhadap sistem untuk utilitas dan *stand alone operation* dan menghasilkan bahwa *fuel cell* layak dikoordinasikan dengan *photovoltaic* untuk memenuhi beban. Pembangkit listrik *Hybrid* antara *Photovoltaic* dan *Fuel Cell* mampu mengatasi masalah *photovoltaic* dimana memiliki permintaan beban yang tidak stabil. Pembangkit *hybrid* ini juga mampu mengubah fungsi *fuel cell* yang mulanya hanya mengelola hidrogen yang menjadi bahan bakar utama menjadi *fuel cell* yang kini bekerja secara *hybrid* yang mampu mengolah kembali daya sisa. Penelitian ini menyatakan bahwa pembangkit listrik *Hybrid* antara *Photovoltaic* dan *Fuel Cell* mampu menyediakan sumber energi yang handal, terkontrol dan mampu mengatasi perubahan permintaan beban secara halus.

Penelitian dengan judul “*Comparison between Batteries and Fuel Cells for Photovoltaic System Backup*” [5] meneliti tentang perbandingan antara baterai dan *fuel cell* sebagai media penyimpanan daya lebih dari *photovoltaic*. Peneliti melakukan analisa dengan memulai menyebutkan persamaan diantara keduanya yakni sama sama memiliki kecepatan respon beban, hal ini diakibatkan karena keduanya didasarkan atas reaksi kimia. Kemudian keduanya mempunyai modularitas pada produksi, memiliki keandalan sumber



yang tinggi serta fleksibel dalam penempatannya. Namun peneliti mengungkapkan bahwa penyimpanan menggunakan sistem *hybrid* dengan *fuel cell* lebih memiliki keunggulan diantaranya memiliki siklus konversi energi yang lebih singkat, mampu mengatasi perubahan permintaan beban dengan baik, dan tidak memiliki batas waktu pemakaian, selama hidrogen sebagai bahan bakar mengalir maka selama itu pula *fuel cell* dapat beroperasi, dan *fuel cell* mampu menjadi penyimpanan yang baik dalam mengatasi masalah kekhawatiran terhadap iklim dan cuaca.

Penelitian dengan judul “Pengaturan Pergerakan *Solar Cell* berdasarkan Intensitas Cahaya Matahari” [8] meneliti tentang pergerakan photovoltaic yang didasarkan intensitas cahaya kota pekanbaru. Dalam penelitian ini peneliti mengukur intensitas cahaya Kota Pekanbaru selama tanggal 7,8,11,12 dan 13 Juli 2012 serta 4,5,7 Agustus 2012 yang menghasilkan rerata intensitas cahaya sebesar 29678,603 LUX. Hal ini menunjukkan bahwa Kota Pekanbaru memiliki intensitas cahaya yang cukup untuk membangun sistem *photovoltaic*.

Penelitian dengan judul “ Simulasi *Hybrid Power System* Antara *Photovoltaic* Dengan *Fuel Cell* Menggunakan *Fuzzy Logic Controller* “ [9] penelitian ini memodelkan sistem pembangkit listrik *photovoltaic* dan *fuel cell*, nilai masukan solar cell menggunakan intensitas cahaya Shanghai, China dan data pemakaian beban berdasarkan asumsi peneliti saja, kemudian memasang pengendali *fuzzy* sebagai pengatur aliran masuk hidrogen menuju *fuel cell*. Pada penelitian ini dihasilkan model simulasi aplikasi matlab sistem pembangkit listrik *photovoltaic* dan *fuel cell* dengan kondisi beban yang dipenuhi berupa beban DC dan efisiensi konversi *fuel cell* sebesar 79%.

Penelitian dengan judul ” *Matlab/Simulink Simulation of Solar Energy Storage System*” [10] meneliti tentang sistem penyimpanan energi yang dihasilkan oleh sistem pembangkit energi surya. Pada penelitian ini, alur bekerjanya dimulai dari *photovoltaic* yang menghasilkan energi listrik, kemudian dialirkan menuju *electrolyzer*. *Electrolyzer* sebagai media konversi daya menjadi mol hidrogen, lalu hidrogen yang dihasilkan disimpan didalam tabung penyimpanan. Peneliti melakukan pemodelan simulasi bentuk dan alur proses dari sistem penyimpanan. Dimulai dengan melakukan pemodelan *photovoltaic*, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan *electrolyzer* dan pemodelan tabung penyimpanan. Pada penelitian ini menghasilkan model penyimpanan energi surya yang melewati *electrolyzer* dan disimpan pada tabung hidrogen, setelah dilakukan simulasi terhadap model, dihasilkan nilai yang baik sebagai sebuah sistem penyimpanan.



Berdasarkan penelitian sebelumnya pemodelan sistem *hybrid photovoltaic fuel cell* berpotensi dan layak untuk dilanjutkan. Pada penelitian sebelumnya intensitas cahaya matahari yang digunakan sebagai masukan *photovoltaic* berupa intensitas cahaya Kota Sanghai, Cina sehingga tidak sesuai dengan iklim dan cuaca di Indonesia, oleh karenanya pada penelitian ini intensitas cahaya matahari yang digunakan adalah intensitas cahaya Kota Pekanbaru sehingga sistem sesuai dengan iklim dan cuaca di Indonesia.

Kemudian data profil beban pemakaian dihitung berdasarkan peralatan rumah tangga selama 24 jam, hal ini bertujuan agar sistem bekerja secara nyata dan sesuai dengan kondisi aslinya. Penelitian sebelumnya menggunakan *Fuzzy Logic Controller* pada katup penyimpanan hidrogen untuk mengatur aliran *fuel flow rate* hidrogen menuju *fuel cell*, tetapi pada penelitian ini akan dipasang sebuah *PID Controller* untuk mengatur aliran *fuel flow rate* pada katup penyimpanan tabung hidrogen. *PID Controller* digunakan karena memiliki langkah yang mudah dalam perancangannya serta mempunyai 3 pengendali yang saling terintegrasi satu sama lain untuk mengatur ketepatan dan mengurangi *error* pada sistem.

Kemudian akan dilanjutkan dengan penganalisaan hasil daya keluaran *photovoltaic* yang kemudian dialirkan untuk memenuhi beban dan sisanya akan disimpan menuju sistem *fuel cell* sehingga dapat memenuhi beban ketika sistem *photovoltaic* tidak dapat memenuhi beban lagi.

2.2 Radiasi Matahari

Radiasi matahari merupakan pancaran energi yang berasal dari proses thermonuklir yang terjadi di matahari, atau dapat dikatakan sumber utama untuk proses-proses fisika atmosfer yang menentukan keadaan cuaca dan iklim di atmosfer bumi. Radiasi matahari merupakan sumber energi yang cukup penting dalam kehidupan manusia.

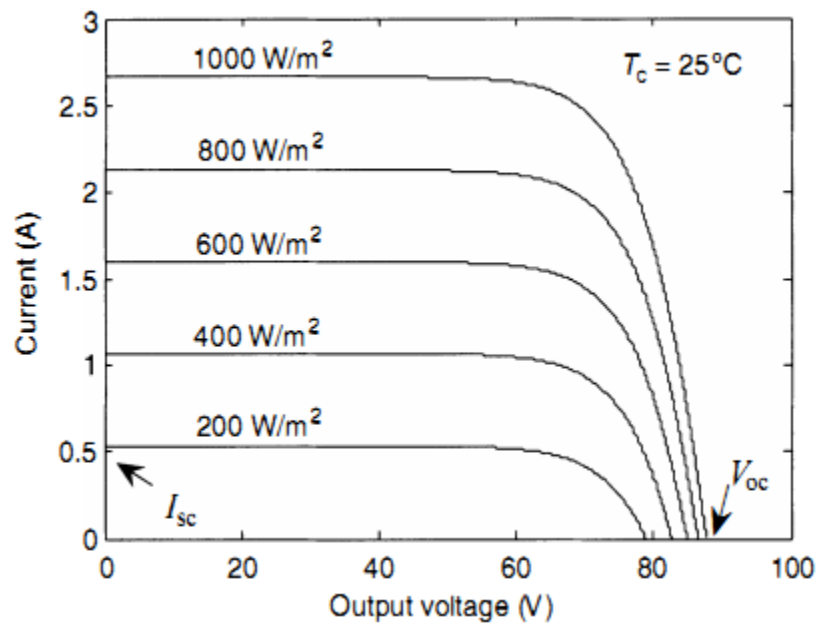
Bantuan cahaya mampu dimanfaatkan untuk berbagai kegiatan manusia selama ini. Salah satunya intensitas cahaya matahari merupakan komponen utama sebagai masukan dari *photovoltaic* yang akan berpengaruh terhadap daya keluaran *photovoltaic*. Semakin menurun nilai intensitas cahaya matahari maka akan menghasilkan nilai daya yang dikeluarkan *photovoltaic* juga rendah.

- Empat istilah standar dalam pencahayaan beserta satuannya antara lain:
- a. Arus cahaya (luminous flux) adalah banyak cahaya yang dipancarkan ke segala arah oleh sebuah sumber cahaya per satuan waktu (biasanya per detik), diukur dengan Lumen.
 - b. Intensitas cahaya (luminous intensity) adalah kuat cahaya yang dikeluarkan oleh sebuah sumber cahaya ke arah tertentu, diukur dengan Candela.
 - c. Iluminan (illuminance) adalah banyak arus cahaya yang datang pada satu unit bidang, diukur dengan Lux atau Lumen/m², sedangkan prosesnya disebut iluminasi (illumination) yaitu datangnya cahaya ke suatu objek.

Untuk menjadi masukan *photovoltaic* diperlukan nilai iradiasi yang memiliki satuan W/m² karena satuan ini yang biasa dipakai dalam data sheet, sedangkan besaran radiasi biasanya digunakan untuk menghitung estimasi daya keluaran pada instalasi sistem.

Untuk mengkonversi nilai *lux* menjadi W/m² tidak ada langkah langsung karena dipengaruhi panjang gelombang dan warna cahaya. Oleh karnanya peru dilakukan percobaan. Namun telah ada konversi berdasarkan penelitian sebelumnya [11] dengan rumusan:

$$1 \text{ lux} = 0.0079 \text{ W/m}^2 \dots\dots\dots(2.1)$$



Gambar 2.1 Pengaruh intensitas cahaya terhadap arus[y]

Pada Gambar 2.1, keluaran arus sangat dipengaruhi oleh nilai radiasi yang masuk ke *photovoltaic*. Arus lebih terpengaruh oleh perubahan radiasi dibanding tegangan. Hal ini sesuai dengan penjelasan cahaya sebagai paket-paket foton. Pada saat intensitas cahaya

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton.

2.3 Photovoltaic

Photovoltaic merupakan perangkat yang mampu merubah sinar matahari menjadi energi listrik dengan adanya efek fotovoltik. Pada *photovoltaic* terdapat dua lapisan semi konduktor yang memiliki muatan yang berbeda. Muatan positif berada pada lapisan atas sedangkan lapisan bawah bermuatan negatif. Bahan photovoltaic umumnya terbuat dari silicon yang apabila terkena cahaya matahari nantinya *photovoltaic* akan memiliki pasangan elektron dan *hole*. Kemudian elektron inilah yang akan mengalir keluar meninggalkan *photovoltaic* yang akan menimbulkan arus listrik. Besarnya arus yang dihasilkan didasarkan pada intensitas cahaya yang diterima oleh *photovoltaic* hal ini dikarenakan semakin besar intensitas cahaya maka semakin banyak pula foton yang didapat sehingga menghasilkan banyaknya pasangan elektron dan hole yang mampu meningkatkan arus.

Photovoltaic biasanya terdiri dalam jumlah banyak yang saling terhubung, ini disebut sebagai Modul, kemudian Modul disusun secara paralel atau seri, sesuai dengan kebutuhan (peningkatan arus atau peningkatan tegangan) dan susunan modul disebut sebagai *array*.

2.3.1 Jenis photovoltaic

Sel surya mengalami beberapa tipe yang ditentukan berdasarkan kegunaan, material dan performa. Beberapa jenis sel surya akan di jelaskan sebagai berikut:

a. Crystalline Cells

1. Monocrystalline

Jenis ini terdiri dari irisan tipis batangan kristal. Memiliki harga yang lebih mahal dibanding jenis *polycrystalline* karena memiliki efisiensi yang lebih besar sekitar 15 - 20%. Kelemahan dari sel surya tipe *monocrystalline* adalah potongan dari setiap sel suryanya berupa segi 6, 8 atau bulat. Apabila disusun bersama sel surya yang lainnya akan membentuk ruang kosong. Hal ini akan mengurangi kerapatan sel surya yang apabila disusun pada skala besar menimbulkan ruang sisa tidak berguna yang cukup banyak.

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

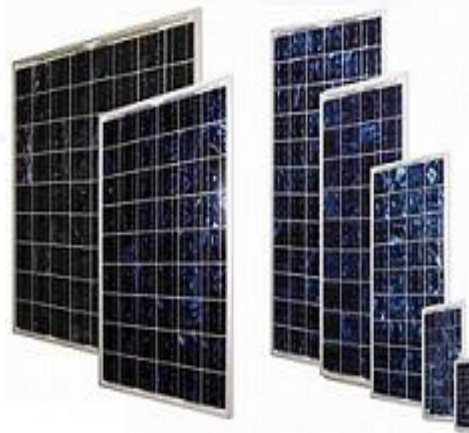


Gambar 2.2 *Monocrystalline*[13]

2. *Polycrystalline*

Jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur kemudian dituang dalam cetakan yang umumnya berbentuk persegi. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis *monocrystalline* untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Akan tetapi dengan potongan yang berbentuk persegi, *polycrystalline* dapat disusun lebih rapat daripada *monocrystalline*, sehingga mengurangi ruang – ruang kosong antar sel surya. Selain itu, *Polycrystalline* mempunyai toleransi terhadap suhu yang rendah. Sehingga, dalam performanya, *Polycrystalline* tidak menyerap panas dan suhu permukaan *Polycrystalline* tidak panas dan dapat tetap bekerja secara maksimal.

Namun jenis ini hanya memiliki efisiensi sebesar 13-16%.



Gambar 2.3 *Polycrystalline*[13]



b. *Thin Layer (FILM) Cells*

Merupakan panel surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokrystal-silicon dan Amorphous dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt daya yang dihasilkan lebih besar daripada monokrystal & polykrystal. Jenis sel surya ini mempunyai kerapatan atom yang rendah, sehingga mudah dibentuk dan dikembangkan ke berbagai macam ukuran dan potongan dan secara umum dapat diproduksi dengan biaya yang lebih murah. Sel surya ini dibuat dengan menambahkan satu atau beberapa lapisan tipis ke dalam lapisan dasar. Sel surya jenis ini sangat tipis sehingga ringan dan fleksibel. Oleh sebab itu sering disebut juga sebagai TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang ditera setara.

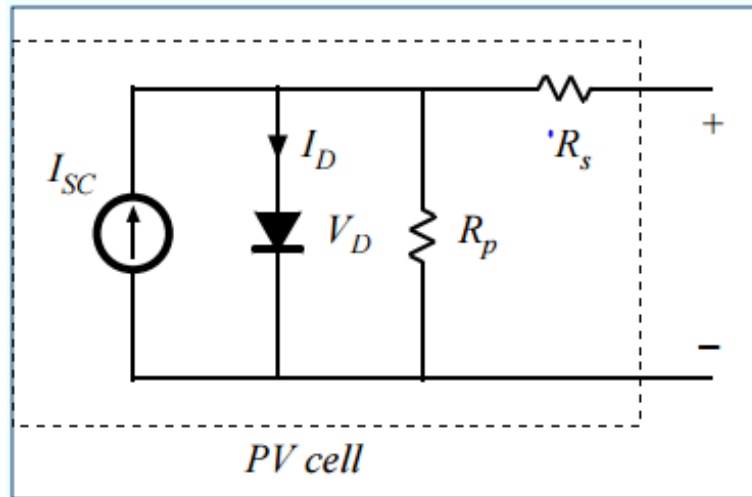
2.3.2 *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*

Posisi titik daya maksimum pada karakteristik *photovoltaic* pembangkit sangat bergantung pada radiasi matahari. Hal ini digunakan untuk mengatur tegangan operasi aktual dan arus dari generator *photovoltaic* sehingga daya yang sebenarnya mendekati nilai optimum. Pengoperasian generator *photovoltaic* di perusahaan MPP melibatkan pencocokan impedansi dari beban itu dari generator. Untuk tujuan ini, perangkat elektronik, biasanya unit pendingin listrik, mampu melakukan fungsi MPPT yang harus terhubung antara *photovoltaic* generator dan beban. Oleh karena itu, pelacakan dari MPP hanya berarti, jika komponen untuk pengolahan yang tersedia dan pelacakan titik kerja tidak membawa kerugian energi tambahan dan dengan tambahan biaya kecil. Banyak teknik yang berbeda telah dikembangkan untuk menyediakan pelacakan daya maksimum generator. Teknik ini dapat diklasifikasikan sebagai metode langsung atau tidak langsung. Metode langsung didasarkan pada algoritma pencarian untuk menentukan maksimum dari kurva daya tanpa gangguan dari operasi normal dari generator PV. Untuk titik kerja tertentu, tegangan yang sesuai diubah sekitar dengan selisih tertentu. Akibatnya, jika daya output menjadi lebih besar dari nilai terakhir dihitung, maka arah pencarian dipertahankan untuk langkah berikutnya. Jika tidak, itu akan bergeser ke arah yang berlawanan. Metode tidak langsung menggunakan sinyal luar untuk memperkirakan MPP. Sinyal luar tersebut dapat diberikan dengan mengukur radiasi matahari, suhu modul, hubungan pendek arus,

atau tegangan rangkaian terbuka dari sel referensi *photovoltaic*. Satu set parameter fisik harus diberikan, dan set point MPP berasal dari sinyal dipantau.

2.3.3 Pemodelan Matematis *Photovoltaic*

Pemodelan matematis *photovoltaic* didasarkan dari alur sirkuit yang terapat pada gambar 2.5, pemodelannya dijelaskan sebagai berikut :



Gambar 2.4 Model sirkui *photovoltaic*[14]

Berdasarkan *Khircoff Current Law*, maka[14] :

$$I_{SC} - I_D - I_{SC} - \frac{V_D}{R_p} - I_{PV} = 0 \dots\dots\dots (2.2)$$

Berdasarkan karakteristik dioda :

$$I_D = I_o (e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1) \dots\dots\dots (2.3)$$

Berdasarkan *Khircoff Voltage Law*, maka :

$$V_{PCell} = V_D - R_s I_{PV} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$V_{PV} = N_s V_{PVCELL} \dots\dots\dots (2.5)$$

$$V_{DBYPASS} = V_r \ln \left(\frac{I_{bypass}}{I_o} + 1 \right) \dots\dots\dots (2.6)$$

$$Efisiensi = \frac{P_{Output}}{P_{Input}} \times 100\% \dots\dots\dots (2.7)$$

2.4 Fuel Cell

2.4.1 Sejarah perkembangan *fuel cell*

Prinsip *fuel cell* ditemukan oleh William Robert Grove pada tahun 1839. Pengembangan teknis dari *fuel cell* mulai tak lama setelah Perang Dunia II ketika Francis T. Bacon dari Cambridge, Inggris, berhasil mengembangkan *fuel cell* tekanan tinggi.



Selanjutnya *Alkaline Fuel Cell* (AFC) dan *proton exchange membrane fuel cells* (PEMFC) dikembangkan untuk program ruang (Gemini, Apollo, Space-lab). Pada awal 1970-an, perkembangan *phosphoric acid fuel cells* (PAFC), *high temperature molten carbonate* (MCFC), dan *solid oxide fuel cells* (SOFC). PEMFC tidak diselidiki dengan upaya signifikan sebelum akhir 1970-an. Kegiatan ini diintensifkan, terutama oleh Ballard, Siemens, H Power, *International Fuel cell* dan beberapa universitas di AS dan pusat penelitian, hasil analisis menghasilkan secara penongkatan signifikan *Membrane Electrode Assemblies* (MEA). Oleh karena itu, berat dan biaya PEMFC dapat dikurangi secara drastis dan kinerja mereka meningkat secara dramatis. Pembangkit listrik komersial pertama untuk PEMFC mulai beroperasi pada tahun 1992 dengan 200kW PC25TM. Dengan terbentuknya *Partnership for a New Generation of Vehicles* (PNGV) oleh Chrysler, Ford, General Motors dan Pemerintah AS pada tahun 1993, fokus baru ditetapkan pada aplikasi transportasi *fuel cell*. Tujuan mereka adalah jumlah yang lebih rendah dari sumber daya untuk jarak yang lebih jauh dengan emisi yang lebih sedikit[15].

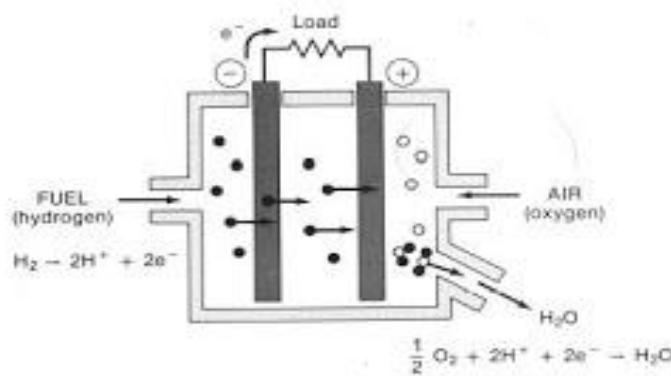
2.4.2 Prinsip Dasar Fuel Cell

Fuel cell bekerja berdasar prinsip pembakaran elektrokimia, listrik yang dihasilkan oleh *fuel cell* berdasarkan hidrogen yang dialirkan menuju *fuel cell*. *Fuel cell* memproduksi listrik dari penyediaan bahan bakar hidrogen dan oksigen dari luar. Reaktan yang biasanya digunakan dalam sebuah sel bahan bakar adalah hidrogen di sisi anode dan oksigen di sisi katoda. Aliran reaktan mengalir masuk dan produk dari reaktan mengalir keluar. Sehingga operasi jangka panjang dapat terus menerus dilakukan selama aliran tersebut dapat dijaga kelangsungannya. Pada anoda akan dialirkan hidrogen secara berkesinambungan dan pada katoda dialirkan oksigen, pengaliran ini dilakukan secara terpisah. Karena pengaruh katalisator pada elektroda, maka molekul-molekul dari gas yang dialirkan akan berubah menjadi ion. Reaksi pada anoda menghasilkan elektron yang bebas, sedang pada katoda elektron yang bebas akan diikat.

Elektron-elektron bebas yang terjadi harus dialirkan keluar melalui penghantar menuju ke anoda, agar proses elektrokimia dapat berlangsung. Panas yang timbul dari hasil reaksi kimia harus terus menerus dibuang, agar energi listrik dapat terbentuk secara kontinyu.

Hak Cipta Diindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 2.5 Skema *Fuel Cell*[16]

Reaksi kimia pada *fuel cell*[16]



Pada anoda hidrogen di oksidasi menjadi proton:



Setiap molekul H^2 terpecah menjadi dua atom H^+ (proton), sedang setiap atom hidrogen melepaskan elektronnya. Proton ini akan bergerak menuju katoda melewati membran. Elektron yang terbentuk akan menghasilkan arus listrik kalau dihubungkan dengan penghantar listrik menuju katoda.

Molekul oksigen akan bergabung dengan empat elektron, menjadi ion oksigen yang bermuatan negatif untuk selanjutnya bergabung lagi dengan proton yang mengalir dari anoda. Setiap ion oksigen akan melepaskan kedua muatan negatifnya dan bergabung dengan dua proton, sehingga terjadi oksidasi menjadi air.

2.4.3 Jenis jenis *Fuel Cell*

Ada bermacam-macam jenis *fuel cell*. Jenis *fuel cell* tergantung dari elektrolitnya.

Berikut ini adalah macam-macam *fuel cell* yaitu[15]:

- a. *Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)*. *Fuel cell* jenis ini menggunakan membran sebagai elektrolitnya dan bahan bakarnya adalah hidrogen. Daerah kerjanya berkisar antara 30oC – 100oC. *Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell* adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energy kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

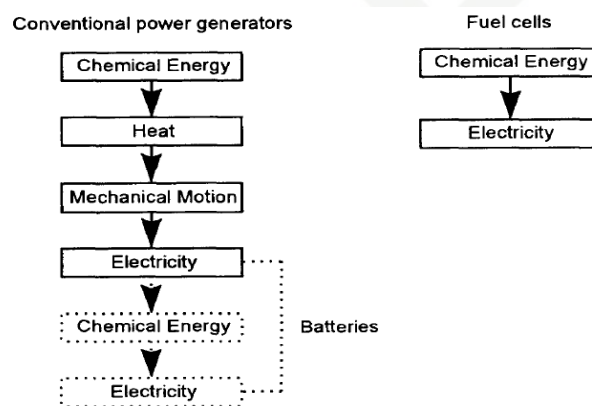
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- b. *Direct Methanol Fuel Cell* (DMFC). Sama seperti PEMFC, DMFC menggunakan membran sebagai elektrolitnya tetapi menggunakan methanol sebagai bahan bakarnya. Daerah kerjanya berkisar antara 20oC – 90oC.
- c. *Phosphoric Acid Fuel Cell* (PAFC). *Fuel cell* jenis ini menggunakan phosphoric acid cair sebagai elektrolitnya dan bahan bakarnya adalah hidrogen. Daerah kerjanya kirakira 200oC.
- d. *Molten Carbonate Fuel Cell* (MCFC). *Fuel cell* jenis ini menggunakan molten dengan campuran lithium, sodium dan potassium carbonate sebagai elektrolitnya dan bahan bakarnya adalah hidrogen. MCFC bekerja pada temperatur tinggi kirakira 650oC.
- e. *Solid Oxide Fuel Cell* (SOFC). *Fuel cell* jenis ini menggunakan bahan keramik sebagai elektrolitnya dan bahan bakarnya adalah hidrogen. Daerah kerjanya berkisar antara 500oC – 1000oC.

2.4.4 Keunggulan *Fuel Cell* sebagai media penyimpanan

Berdasarkan penelitian sebelumnya[4] maka terdapat beberapa keunggulan *fuel cell* sebagai penyimpanan daya lebih pada *photovoltaic* , diantaranya :

- a. Perbandingan ketika proses konversi energi, baterai harus melalui proses pertukaran panas dan energi mekanik atau Siklus Carnot. Sedangkan *Fuel cell* dapat langsung merubah dari proses energi kimia menuju energi listrik. Perbandingan siklus dapat dilihat pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Proses konversi energi[4]

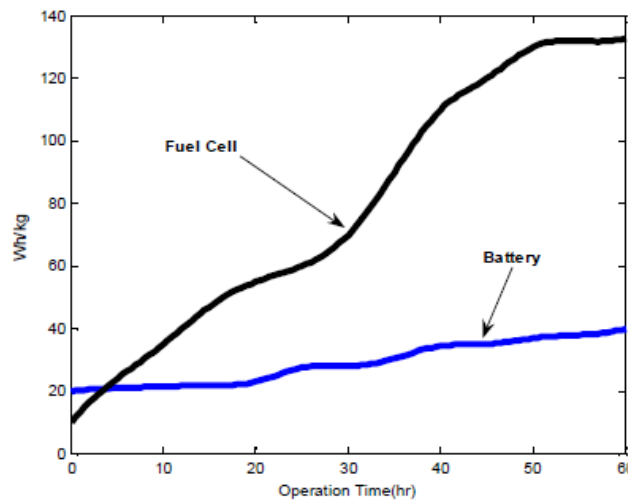
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

- b. *Fuel cell* mampu menjaga tingkat efisiensi tetap tinggi meskipun pada kondisi beban yang berubah ubah baik seketika tinggi atau langsung menurun drastis. *Fuel cell* mampu mengatasi masalah permintaan listrik yang tidak konstan.
- c. Baterai memerlukan waktu untuk melakukan pengisian ketika kondisi baterai kosong, hal ini menyebabkan adanya penurunan elektroda dalam baterai. Letak penyimpanan bahan bakar pada sistem *fuel cell* tidak terletak pada dalam *fuel cell* sehingga tidak menurunkan kualitas kerja *fuel cell* . Perbandingannya dapat terlihat pada gambar 2.7.

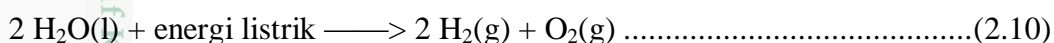


Gambar 2.7 Kepadatan energi pada *fuel cell* dan *baterai*

- d. Tidak perlu keraguan lagi untuk memilih kapasitas baterai, karena takut apabila memilih kapasitas terlalu besar yang berguna pada hari tertentu saja. Atau memilih kapasitas kecil, namun nantinya akan kekurangan diketika *photovoltaic* hanya teraliri sedikit cahaya selama beberapa hari

2.5 Elektrolyzer

Elektrolisis merupakan proses kimia yang mengubah energi listrik menjadi energi kimia. Komponen yang terpenting dari proses elektrolisis ini adalah elektrode dan larutan elektrolit. Pembentukan mol hidrogen dapat dilakukan dengan adanya pengaliran arus listrik pada elektrolyzer . Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut[9]:



Sebuah *electrolyzer* air terdiri dari beberapa sel *electrolyzer* dihubungkan secara seri. Menurut hukum Faraday, tingkat produksi hidrogen dalam sel *electrolyzer* berbanding lurus dengan tingkat transfer elektron pada elektroda, yang setara dengan arus listrik di sirkuit.

$$n_{H_2} = \frac{n_F \cdot n_c \cdot i_e}{F} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

- n_{H_2} adalah kecepatan produksi hidrogen, mole per sekon (mol/s)
- ηF adalah efisiensi Faraday
- n_c adalah banyaknya *cell* yang terhubung seri
- F adalah konstanta faraday
- i_e adalah arus *electrolyzer*

2.6 Tabung Penyimpanan Hidrogen

2.6.1 Jenis Tabung Penyimpanan Hidrogen

1. Tabung penyimpanan hidrogen terkompresi

Metode yang paling umum dan banyak digunakan untuk menyimpan hidrogen dalam bentuk terkompresi. Khusus tangki tekanan biasanya terbuat dari baja atau aluminium; diproduksi menjadi cukup tebal. Namun, lain Pendekatan penyimpanan hidrogen dikompresi dalam gua-gua bumi atas tanah; memanfaatkan rongga tersebut, jumlah besar Hidrogen dapat disimpan pada berbagai tekanan l dengan bentuk geologi. Keuntungan utamanya adalah bahwa kebocoran hampir nol, tetapi ada banyak parameter yang harus diambil dalam sehingga penyimpanan yang dapat mungkin. Di antara semua teknologi penyimpanan, Hidrogen gas terkompresi memiliki sejarah terpanjang dan harga termurah. Sangat cocok untuk *Electrolyzer* juga, karena kebanyakan dari mereka (sel bipolar) menghasilkan hidrogen pada tekanan tinggi dan tidak ada tambahan Mekanisme ini diperlukan agar prosedur penyimpanan akan selesai.

2. Penyimpanan hidrogen secara cair

Hidrogen cair pada $-253 \text{ }^\circ \text{C}$ (pada tekanan atmosfer), sehingga cara yang efisien dan hemat energi penyimpanan hidrogen cair namun membutuhkan teknik isolasi yang rumit. Pada keadaan alami ini memiliki nilai kepadatan energi volumetrik dari sekitar 2.760 kWh / m³ dan itulah mengapa telah digunakan sebagai bahan bakar dalam teknologi ruang angkasa selama beberapa tahun .

Keuntungan utama dari metode ini adalah risiko berkurang dibandingkan dengan gas terkompresi, sejumlah besar energi (sekitar 20-30% dari kandungan energi Hidrogen ini) harus digunakan untuk mencapai pencairan sekalipun.

3. Penyimpanan hidrogen Metal

Metode ini didasarkan pada Hidrogen kimia yang mengikat oleh beberapa logam hidrida, logam atau paduan yang bereaksi dengan hidrogen menghasilkan panas. Reaksi reversibel dapat dilakukan jika jumlah yang tepat energi panas diberikan, sehingga hidrida logam dan hidrogen diproduksi kembali lagi. Karakteristik utama dari prosedur ini adalah reaksi eksoterm yang berlangsung di penyimpanan dan satu endotermik ketika Hidrogen dilepaskan. Itu berarti bahwa masalah manajemen panas tertentu timbul pada proses penyimpanan dan energi ekstra harus dikeluarkan pada tahap kedua. Namun, pasokan panas mungkin tidak seperti masalah jika pemanfaatan energi panas dari komponen lain dari sistem secara keseluruhan dibuat; jika sejumlah kecil energi yang diberikan pada awalnya dan sel bahan bakar mulai beroperasi, panas co-produksi dapat memberikan aliran kontinu Hidrogen tanpa energi ekstra yang dikeluarkan. Ini cara penyimpanan masih belum menguntungkan untuk sistem terutama karena biaya tinggi dan seumur hidup terbatas (jauh lebih rendah dari tangki gas terkompresi).

2.6.2 Pemodelan matematis tabung penyimpanan

Seperti yang dijelaskan diatas, tangki terkompresi lebih banyak digunakan. Berdasarkan pada hukum ideal gas, persamaan tekanan pada sebuah tabung penyimpanan yaitu :

$$PV = nRT \dots\dots\dots (2.12)$$

P adalah tekanan di dalam tabung

R adalah konstanta gas

T adalah suhu operasi

V adalah volume

n adalah jumlah mol hidrogen

2.7 Proportional Integral Derivative (PID) Controller

Untuk pengaturan sistem kendali terdapat bermacam-macam tipe *controller* yang digunakan agar sistem mampu bekerja dengan baik dan mampu memenuhi kebutuhan sistem sehingga sistem dapat bekerja lebih baik. Pemasangan *controller* sangatlah mempengaruhi hal ini, pemilihan *controller* yang tepat dan sesuai akan mampu

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
 1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

memaksimalkan proses dari sistem tersebut. Untuk memasang sebuah *controller* juga diperlukan perancangan yang baik sehingga parameter parameter untuk *controller* sesuai dan tepat hingga *controller* mampu bekerja dengan baik.

PID Controller merupakan suatu pengendali otomatis yang terdiri atas 3 gabungan pengendali yaitu *Proporsional, Integral, dan Derivative*. *PID Controller* merupakan pengendali berumpanbalik yang paling populer di dunia industri yang dimanfaatkan dengan baik pada beberapa aplikasi. Hal ini dikarenakan *PID Controller* memiliki kemampuan yang baik mengatasi *error* dan lebih mudah perancangannya dibandingkan dengan pengendali lainnya.

PID Controller akan dipasangkan pada ujung tabung katup penyimpanan hidrogen, *PID Controller* akan mengatur aliran dari hidrogen menuju *fuel cell*. Hal ini bertujuan untuk mengatur nilai *fuel flow rate* menuju *fuel cell* sehingga hidrogen dapat mengalir sesuai kebutuhan daya.

Pengendali proporsional (K_p) akan memberikan efek mengurangi waktu naik, tetapi tidak menghapus *error steady state*. Pengendali integral (K_i) akan memberikan efek menghapus *error steady state* tetapi berakibat buruk saat menanggapi respon. Pengendali derivatif (K_d) berdampak pada meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi kesalahan keadaan tunak dan menaikkan respon transien . Hubungan dari ketiga aksi pengendali tersebut ditunjukkan pada Table 2.1.

2.7.1 Pemilihan Parameter PID

Tuning atau penalaan parameter P, I, dan D merupakan hal krusial dalam desain pengendali PID. Untuk itu perlu dilakukan penalaan terhadap parameter tersebut. Metode penalaan parameter pengendali yang digunakan adalah metode uji coba atau Metode *Heuristik* Yaitu dengan mengkombinasikan antara parameter pengendali hingga didapatkan respon yang memuaskan.

Hubungan dari ketiga aksi pengendali tersebut ditunjukkan pada Table 2.1

Tabel 2.1. Hubungan antara kendali P, I, dan D.[17]

Respon lup tertutup	Waktu naik	<i>Overshoot</i>	Waktu turun	Kesalahan keadaan tunak
K_p	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
K_i	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
K_d	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

2.7.2 Pengendali PID Metode *Heuristik*

Metode *Heuristik* merupakan sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba *heuristik* adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode *heuristik* ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan. Untuk perancangan sistem pengendalian PID dilakukan pencarian nilai besarnya K_p , T_i , dan T_d . Maka pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, dengan penalaan (*Heuristic Method*):

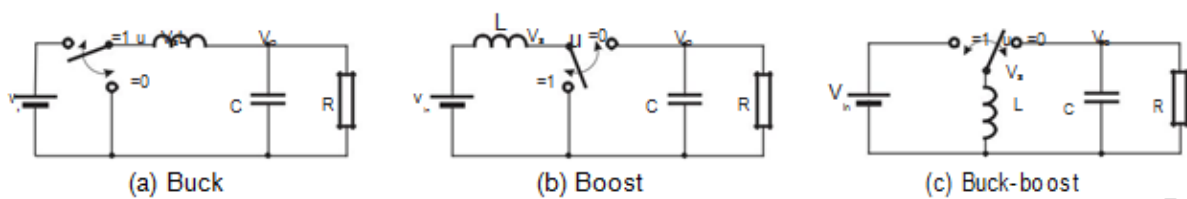
1. Penalaan parameter pengendali dimulai dengan hanya menggunakan pengendali P,
2. kemudian baru ditambahkan pengendali I.
3. dan terakhir ditambahkan dengan pengendali D.

Pemberian nilai parameter disesuaikan dengan karakteristik respon sistem yang diperoleh.[18]

2.8 DC – DC Converter

Dalam rekayasa elektronik, DC ke DC converter adalah sebuah sirkuit listrik yang mengubah sumber DC dari satu tingkat tegangan ketinggian lainnya. Hal ini digunakan untuk meratakan tegangan dan untuk perlindungan listrik dari tegangan lebih

Ada tiga jenis *DC-DC converter*, *buck*, *boost* dan *buck-boost*. *Buck* digunakan untuk mengurangi tegangan output, sementara *boost* dapat meningkatkan tegangan keluaran. Dalam *buck-boost*, tegangan keluaran dapat dipertahankan, lebih tinggi atau lebih rendah dari sumber tetapi dalam polaritas yang berlawanan. Bentuk paling sederhana dari konverter ini secara skematis digambarkan dalam Gambar 2.8[9].



Gambar 2.8 Model Converter (a) buck, (b) boost and (c) buck-boost[9]

Pemodelan matematis dari *converter* dijelaskan oleh penelitian sebelumnya [9] sebagai berikut:

Model *buck converter*

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{v_c}{R} - i_o \dots \dots \dots (2.13)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uv_{in} - v_c \dots \dots \dots (2.14)$$



Model *boost converter*

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1 - u)i_L - \frac{v_c}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.15)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - (1 - u)v_c \dots\dots\dots (2.16)$$

Model *buck - boost converter*

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1 - u)i_L - \frac{v_c}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.17)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uv_{in} - (1 - u)v_c \dots\dots\dots (2.18)$$

Dalam kasus umum, R_L dan R_c dapat ditambahkan ke model di atas.

Model *buck converter* dengan penambahan R_L dan R_c

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{v_o}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.19)$$

$$v_o = v_c + R_c C \frac{dv_c}{dt} \dots\dots\dots (2.20)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uv_{in} - v_o - R_L i_L \dots\dots\dots (2.21)$$

Masukkan persamaan (2.20) ke persamaan (2.19)

$$C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{v_c}{R} + \frac{R_c}{R} C \frac{dv_c}{dt} - i_o \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\left(1 + \frac{R_c}{R}\right) C \frac{dv_c}{dt} = i_L - \frac{v_c}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.23)$$

$$v_o = \frac{Rv_c}{R+R_c} + \frac{RR_c}{R+R_c} (i_L - i_o) \dots\dots\dots (2.24)$$

sehingga :

$$C \frac{dv_c}{dt} = \frac{R_c}{R+R_c} (i_L - \frac{v_c}{R} - i_o) \dots\dots\dots (2.25)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uv_{in} - \frac{Rv_c}{R+R_c} - \left(R_L + \frac{RR_c}{R+R_c}\right) i_L + \frac{RR_c i_o}{R+R_c} \dots\dots\dots (2.26)$$

$$v_o = \frac{Rv_c}{R+R_c} + \frac{RR_c}{R+R_c} (i_L - i_o) \dots\dots\dots (2.27)$$

Model *boost converter* dengan penambahan R_L dan R_c

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1 - u)i_L - \frac{v_o}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.28)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - (1 - u)v_c - R_L i_L \dots\dots\dots (2.29)$$

$$v_o = \frac{Rv_c}{R+R_c} + \frac{RR_c}{R+R_c} ((1 - u)i_L - i_o) \dots\dots\dots (2.30)$$

Model *buck - boost converter* dengan penambahan R_L dan R_c

$$C \frac{dv_c}{dt} = (1 - u)i_L - \frac{v_o}{R} - i_o \dots\dots\dots (2.31)$$

$$L \frac{di_L}{dt} = uv_{in} - (1 - u)v_o - R_L i_L \dots\dots\dots (2.32)$$

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

© Hak Milik UIN Suska Riau



$$v_o = \frac{Rv_c}{R+R_c} + \frac{RR_c}{R+R_c} ((1-u)i_L - i_o) \dots\dots\dots (2.33)$$

2.9 Sistem Pembangkit Listrik Hybrid

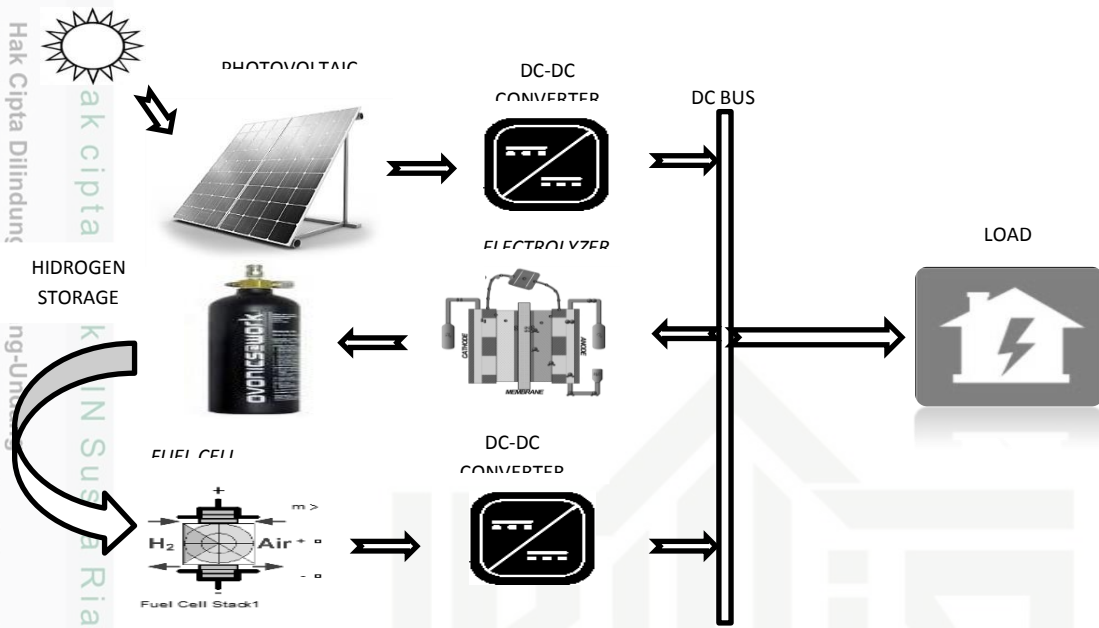
Sistem Pembangkit Listrik Hybrid adalah suatu sistem pembangkit listrik yang memadukan beberapa jenis pembangkit listrik, pada umumnya antara pembangkit listrik berbasis BBM dengan pembangkit listrik berbasis energi terbarukan. Merupakan solusi untuk mengatasi krisis BBM dan ketiadaan listrik di daerah terpencil, pulau-pulau kecil dan pada daerah perkotaan. Umumnya terdiri atas: modul foto voltaik, turbin angin, generator diesel, baterai, dan peralatan kontrol yang terintegrasi.

Tujuan sistem *hybrid* adalah mengkombinasikan keunggulan dari setiap pembangkit sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. Mampu menghasilkan daya listrik secara efisien pada berbagai kondisi pembebanan Untuk mengetahui unjuk kerja sistem pembangkit hibrida ini, hal – hal yang perlu dipertimbangkan antara lain: karakteristik beban pemakaian dan karakteristik pembangkitan daya khususnya dengan memperhatikan potensi energi alam yang ingin dikembangkan berikut karakteristik kondisi alam itu sendiri, seperti pergantian siang malam, musim dan sebagainya.

Pada penelitian ini akan dibangun sistem *Hybrid* antara *photovoltaic* dan *fuel cell*. Intensitas cahaya dalam satu hari yang dihitung perjam menjadi masukan utama yang akan mempengaruhi nilai keluaran daya *photovoltaic*, semakin besar nilai intensitas cahaya maka semakin besar pula daya *photovoltaic* yang dihasilkan dan begitu pula sebaliknya. Setelah melalui *photovoltaic* , daya akan dialirkan menuju *boost DC-DC converter* guna menaikkan tegangan.

Setelah tegangan naik dan stabil maka dialirkan menuju *DC Bus*, kemudian apabila beban membutuhkan daya akan dialirkan menuju inverter guna merubah type arus dari arus DC menjadi arus AC, lalu apabila daya *photovoltaic* lebih dari beban maka daya sisa tersebut dialirkan menuju *electrolyzer*.

Electrolyzer akan mengubah daya tersebut melalui proses elektrolisis menjadi mol hidrogen, mol ini kemudian akan dialirkan menuju tabung hidrogen untuk disimpan, kemudian apabila *photovoltaic* tidak memiliki daya yang dapat disalurkan menuju beban, maka hidrogen yang tersimpan akan dialirkan menuju *fuel cell*, kemudian *fuel cell* akan merubah hidrogen menjadi energi listrik.



Gambar 2.9 Diagram Sistem *Hybrid photovoltaic fuel cell*[9]

Daya yang dihasilkan yang kemudian daya yang dihasilkan *fuel cell* tersebut dialirkan menuju *Boost DC-DC Converter* untuk menurunkan tegangan, lalu selanjutnya dialirkan menuju inverter untuk memenuhi kekurangan beban tersebut. Data beban yang menjadi masukan merupakan hasil akumulasi data pemakaian rumah tangga selama 24 jam yang didasarkan dari pemakaian alat alat listrik yang terdapat dalam rumah tangga.

2.10 Software Matlab R2011b

Matlab (Matrix Laboratory) merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dikembangkan oleh MathWorks dan dikhususkan untuk komputasi numerik, visualisasi, dan pemrograman. Dengan memanfaatkan Matlab, pengguna dapat melakukan analisis data, mengembangkan algoritma, dan membuat model maupun aplikasi. Bahasa, *tools*, dan fungsi-fungsi *built-in* akan memudahkan pengguna untuk mengeksplorasi berbagai pendekatan dan memperoleh solusi dengan lebih cepat dibandingkan apabila menggunakan *spreadsheets* atau bahasa pemrograman tradisional, seperti C/C++ atau Java™.

Pada penelitian ini akan menggunakan simulink modelling Matlab dan memanfaatkan *simulink browser* untuk membangun *plant* yang didasarkan pada pemodelan matematis. Pemodelan *photovoltaic*, *boost DC-DC converter*, *electrolyzer*, *tabung hidrogen* dan *buck DC-DC converter* akan dimodelkan didalam *subsystem* begitu juga dengan katup, namun pada katup akan dipasang *controler* yang terdapat pada

simulink browser. Untuk *fuel cell* akan langsung diambil pada *simulink browser*, karena pada aplikasi sudah tersedia model *fuel cell* yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan hingga dapat langsung digunakan.

Untuk masukan , akan digunakan komponen *signal builder* yang akan dimasukkan nilai dataintensitas cahaya dan juga beban yang akan dibutuhkan.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

