



### **Hak cipta dan penggunaan kembali:**

Lisensi ini mengizinkan setiap orang untuk mengubah, memperbaiki, dan membuat ciptaan turunan bukan untuk kepentingan komersial, selama anda mencantumkan nama penulis dan melisensikan ciptaan turunan dengan syarat yang serupa dengan ciptaan asli.

### **Copyright and reuse:**

This license lets you remix, tweak, and build upon work non-commercially, as long as you credit the origin creator and license it on your new creations under the identical terms.

## BAB II

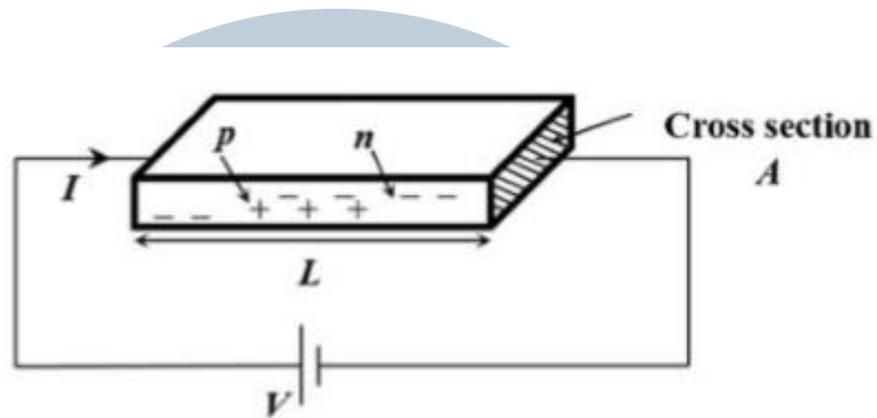
### LANDASAN TEORI

#### 2.1. Sistem *Photovoltaic* (PV)

Panel surya merupakan sebuah alat yang dapat mengonversi energi dari energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui efek *photovoltaic*. Panel surya biasanya terdiri dari banyak sel surya yang dirangkai secara seri dan paralel, kumpulan sel surya tersebut dinamakan modul panel surya.

Efek *photovoltaic* terjadi ketika lapisan panel terkena cahaya matahari, foton akan mengeksitasi elektron ekstra pada lapisan n sehingga elektron bergerak dan meninggalkan *hole* atau tempat bebas, yang kemudian akan diisi oleh elektron lain yang berpindah dari atom lain. Pergerakan elektron dari satu *hole* ke *hole* yang lain menimbulkan arus listrik. Ketika lapisan p dan lapisan n dihubungkan oleh kabel maka elektron yang mengalir dapat digunakan untuk melakukan kerja (Yahyaoui, 2018). Pada Gambar 2.1. terdapat gambar ilustrasi dari sebuah rangkaian PV sederhana.





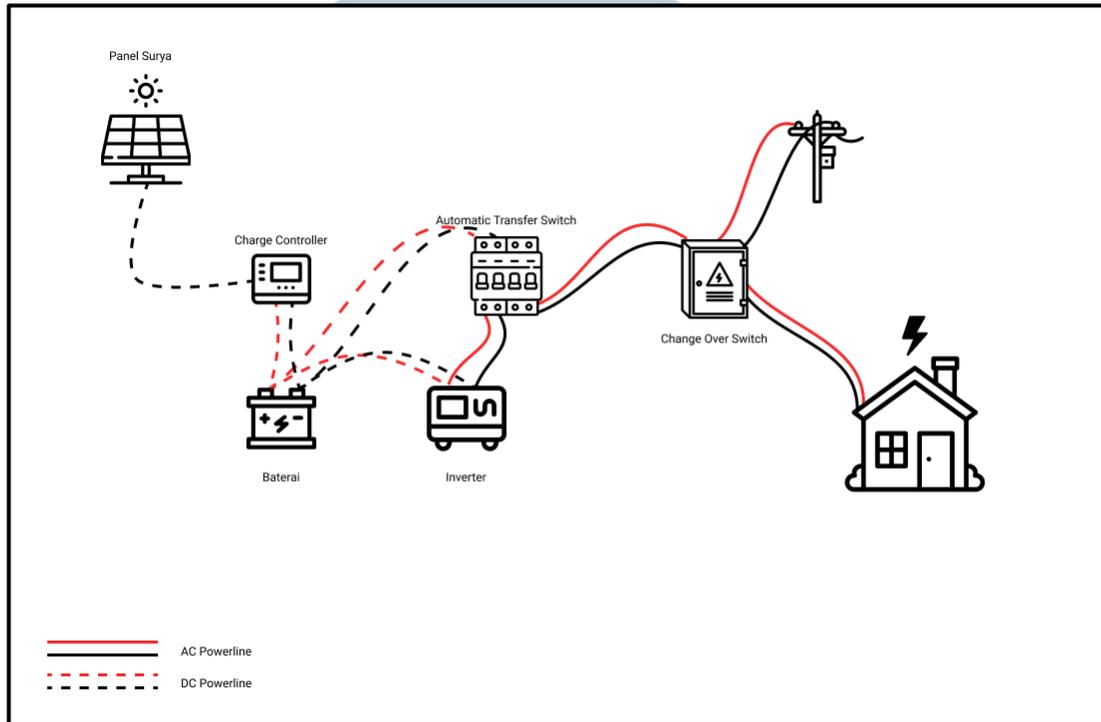
Gambar 2.1. Gambar Rangkaian PV Sederhana.

Sumber : (Yahyaoui, 2018)

Kinerja dari sel surya sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan (Yahyaoui, 2018). Pencahayaan dan temperatur lingkungan dapat mempengaruhi arus dan tegangan dari sel. Semakin tinggi temperatur sel surya maka tegangan keluaran dari sel surya akan semakin menurun, sedangkan semakin kecil pencahayaan matahari maka arus yang dihasilkan sel akan semakin kecil.

Pada umumnya sistem PV terdiri dari beberapa komponen yaitu panel surya yang bertugas mengonversi energi sinar matahari menjadi energi listrik, *solar inverter* yang berguna untuk mengubah arus DC menjadi arus AC, kabel, *charge controller* sebagai komponen untuk menstabilkan arus dan tegangan dari panel surya sebelum masuk ke inverter.

Terdapat beberapa sistem PV yang memiliki komponen tambahan di dalam BoS yaitu perangkat *transfer switch*. *Transfer switch* berguna untuk mengalihkan sumber energi ke sumber energi cadangan atau sebaliknya. Agar dapat mengalihkan sumber energi pada beban, perangkat ATS dipasang diantara beban dan sumber energi. Gambar 2.2. merupakan bagan yang menggambarkan alur dari sebuah sistem PV dengan perangkat ATS.



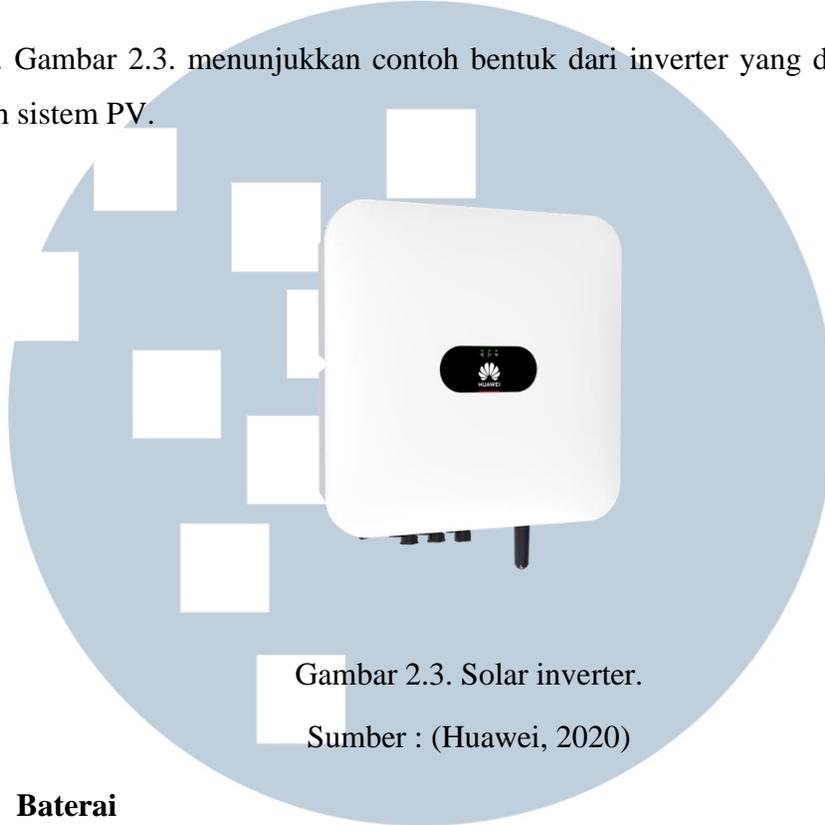
Gambar 2.2. Bagan sebuah sistem PV.

## 2.2. Inverter

Inverter merupakan rangkaian yang dapat merubah arus listrik dari DC (*direct current*) menjadi AC (*alternate current*). Inverter tidak dapat menghasilkan daya, daya yang dihasilkan oleh inverter merupakan daya dari sumber DC (Horowitz & Hill, 2015).

Inverter yang digunakan pada sebuah sistem *photovoltaic* biasa disebut dengan *solar inverter*. *Solar inverter* digunakan untuk merubah arus listrik dari panel surya yang berupa arus DC menjadi arus listrik AC untuk digunakan perangkat elektronik. Solar inverter dibagi menjadi dua tipe berdasarkan koneksinya ke *grid*, secara terhubung dengan *grid* (*grid-tie*) atau tidak terhubung dengan *grid* (*off-grid*). Solar inverter memiliki beberapa fungsi yang tidak dimiliki oleh inverter biasa, yaitu *maximum power point tracking* (MPPT) dan pelindung *anti-islanding* (Manias N,

2017). Gambar 2.3. menunjukkan contoh bentuk dari inverter yang digunakan pada sebuah sistem PV.



Gambar 2.3. Solar inverter.

Sumber : (Huawei, 2020)

### 2.3. Baterai

Baterai merupakan sebuah alat yang dapat digunakan untuk menyimpan energi khususnya energi listrik. Baterai menkonversi energi kimia menjadi energi listrik menggunakan efek redoks. Pada dasarnya sebuah baterai terdiri dari dua elektroda dengan material berbeda yang dipisahkan oleh elektrolit. Elektroda berbentuk plat dengan material metal bersifat konduktor. Saat kedua elektroda berkontak dengan elektrolit maka akan ada tegangan sirkuit terbuka (OCV). Ketika kedua elektroda tersebut disambungkan melalui sebuah beban, maka OCV akan mengakibatkan elektron bergerak dari elektroda negatif ke positif sehingga menghasilkan arus listrik (Crompton, 2000).

Baterai memiliki dua jenis yaitu *primary (disposable)* dan *secondary (rechargeable)*. Baterai jenis *primary* bisa dikatakan merupakan baterai sekali pakai, sedangkan baterai berjenis *secondary* adalah baterai yang dapat diisi ulang.

Setiap baterai memiliki kapasitas daya, kapasitas daya sendiri merupakan besarnya energi yang dapat disimpan oleh baterai tersebut. Kapasitas daya pada baterai dinyatakan dalam satuan *Watt-hours* (Wh). Wh merupakan besarnya daya yang dapat diberikan oleh baterai dalam jangka satu jam. Rumus 2.1. merupakan cara perhitungan kapasitas daya dari sebuah baterai (Crompton, 2000).

$$\text{Kapasitas Daya} = V(\text{volt}) \times I (\text{ampere}) \times \text{waktu (jam)} \quad (2.1.)$$

Besarnya arus yang dapat dialirkan dari sebuah baterai cenderung terbatas. *C-rate* digunakan untuk mengetahui berapa besar arus baterai saat berada dalam kondisi dicas atau *discharged*. *C-rate* didapatkan dengan membagi arus casa tau *discharge* dari baterai dengan kapasitas daya dari baterai, seperti yang ditunjukkan pada Rumus 2.2 (Crompton, 2000).

$$C - rate = \frac{I}{P} \quad (2.2.)$$

P = Kapasitas daya dari sebuah baterai (Ah)

I = Arus cas atau *discharge* dari baterai (Ampere)

C-rate = C-rate dari sebuah baterai

Perhitungan kapasitas dari baterai yang digunakan dalam sebuah sistem PV memiliki perbedaan, perhitungan kapasitas baterai dari sistem PV mempergunakan variabel penerangan matahari dan daya puncak yang dihasilkan oleh sebuah sistem PV (Smets, 2016). Perhitungan tersebut digunakan untuk mencari besar kapasitas baterai yang dibutuhkan oleh sebuah sistem PV agar energi yang dikonversi dapat disimpan sepenuhnya. Rumus 2.3. merupakan perhitungan yang digunakan untuk kapasitas baterai yang dibutuhkan di sistem PV (Radhi, 2019).

$$CB = \left[ \frac{E_{load}}{\eta_{inv} \times V_B \times DOD} \right] \times DOA \quad (2.3.)$$

CB = Kapasitas penyimpanan baterai (Ampere-hour)

$V_b$  = Tegangan baterai

$E_{load}$  = Tegangan keluaran yang dibutuhkan (Wh / hari)

$\eta_{inv}$  = Efisiensi inverter

DOD = Presentase kapasitas baterai yang telah dilepas muatannya (%)

DOA (*Day of Autonomy*) = Jumlah hari tanpa penyinaran matahari ke panel surya

#### **2.4. Automatic Transfer Switch (ATS)**

*Transfer Switch* merupakan perangkat yang dapat memindahkan antara dua atau lebih aliran listrik. Terdapat dua jenis transfer berdasarkan pengoperasiannya yaitu, *Manual Transfer Switch (MTS)* dan *Automatic Transfer Switch (ATS)*. ATS memiliki keunggulan dari pada MTS, yaitu dapat mengalihkan sumber listrik secara otomatis. ATS sering ditemui terpasang dekat dengan generator cadangan, sehingga generator dapat memberikan listrik cadangan ketika terjadi kegagalan pada *grid* utama (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Wayne Beaty, 2012).

*Transfer Switch* terdiri dari rangkaian *relay* atau *contactor* yang terhubung antara dua sumber listrik (atau lebih) dan beban. ATS memiliki komponen tambahan berupa sensor untuk menerima masukan dan pengendali untuk mengolah masukan dan mengendalikan *relay* (United State of America Patent No. 8,222,548 B2, 2012).

Berdasarkan pengolahan masukan, perangkat ATS dibagi menjadi dua, yaitu perangkat ATS analog dan perangkat ATS digital. Perangkat ATS analog adalah perangkat ATS yang pengalihannya dikendalikan oleh sebuah *integrated circuit (IC)*

sedangkan perangkat ATS digital adalah perangkat ATS yang pengalihannya dikendalikan oleh sebuah pengendali mikro yang telah diprogram.

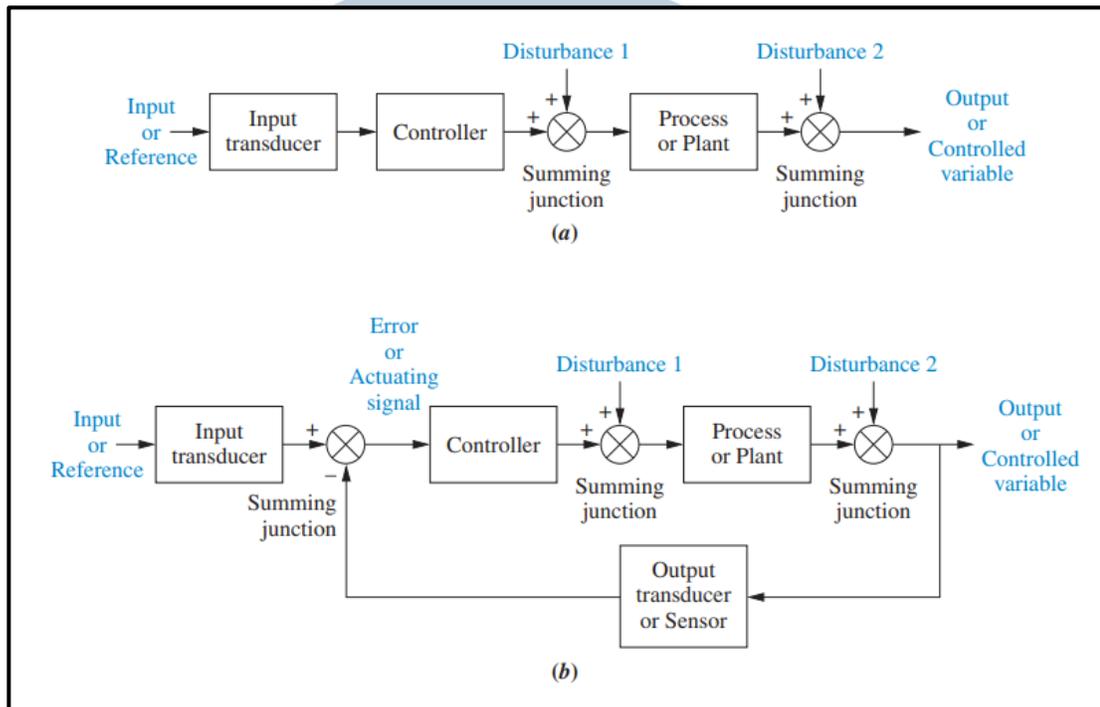
Salah satu contoh aplikasi dari perangkat ATS analog yang sering ditemukan adalah *uninterruptable power supply* (UPS), UPS membaca tegangan menggunakan IC, saat terjadinya kegagalan IC akan memberi perintah kepada *switch actuator* untuk mengalihkan sumber energi AC utama ke sumber energi AC lain atau sumber energi DC (baterai) (United States of America Patent No. 5,939,799, 2016).

Perangkat ATS digital memiliki kendali mikro atau *programmable logic control* (PLC) sebagai otak dari perangkat yang berguna untuk mengolah masukan dan mengirim perintah sesuai dengan kondisi ke aktuator. Perangkat ATS digital banyak ditemukan pada sebuah sistem kelistrikan bangunan yang memiliki generator cadangan (Dugan, McGranaghan, Santoso, & Wayne Beaty, 2012).

## 2.5. Sistem Kendali

Sistem kendali terdiri dari sub sistem dan proses (*plant*) yang dirangkai sebagaimana agar mendapatkan keluaran yang diinginkan dengan masukan yang sudah ditentukan. Dengan bantuan sistem kendali manusia dapat menggerakkan peralatan berat dengan presisi. Sistem kendali memiliki beberapa alasan untuk diimplementasi yaitu, amplifikasi daya, memudahkan pengendalian jarak jauh, memudahkan bentuk masukan, dan mengurangi gangguan lingkungan terhadap keluaran (S. Nise, 2015).

Sistem kendali sendiri dapat dikategorikan menjadi dua jenis, yaitu *open-loop* dan *closed-loop*. Sistem kendali *open-loop* merupakan sistem kendali dimana keluaran dari sistem tidak mempengaruhi masukan. Sistem kendali *closed-loop* atau sistem kendali umpan balik dapat mempertahankan kondisi keluaran yang diinginkan dengan membandingkan dengan kondisi aktual. Perbandingan tersebut digunakan untuk membuat keluaran sesuai dengan kondisi keluaran yang diinginkan (S. Nise, 2015). Gambar 2.4. merupakan diagram blok dari sistem kendali *open-loop* dan *closed-loop*.



Gambar 2.4. Diagram blok sistem kendali : **a.** sistem open-loop; **b.** sistem close-loop

Sumber : (S. Nise, 2015)

Perangkat ATS menggunakan sistem kendali umpan balik. Sistem kendali digunakan untuk mengendalikan sebuah aktuator yaitu *relay* dengan masukan berupa tegangan dari sebuah baterai.

## 2.6. Papan Pengendali Mikro Arduino

Papan Arduino adalah piranti lunak yang bersifat *open-source*. Papan yang berada dibawah lisensi *Creative Common Attribution Share-Alike 2.5* ini memiliki keunggulan berupa kemudahan untuk mengunggah program ke dalam memori. Papan Arduino biasanya terdiri dari pengendali mikro AVR Atmel 8-bit. Papan dapat disambungkan ke komputer menggunakan USB-B dan diprogram menggunakan piranti lunak Arduino (Arduino, 2020).

## 2.7. Relay

*Relay* merupakan perangkat *switch* yang dijalankan secara elektrikal. *Relay* memungkinkan untuk mengkatifkan perangkat elektronik yang bekerja dengan arus besar dengan menggunakan perangkat elektronik yang memiliki arus yang lebih kecil. Seperti transistor, *relay* dapat digunakan sebagai *switch* atau sebagai *amplifier* (Horowitz & Hill, 2015).

*Relay* memiliki beberapa jenis yang dibagi berdasarkan cara kerja *relay* tersebut. Beberapa jenis yang sering ditemukan di industri adalah *Electromechanical Relay* (EMR) dan *Solid State Relay* (SSR) (Gurevich, 2005). Pada Gambar 2.5. merupakan tampak dari salah satu *relay* EMR.



Gambar 2.5. Tampak modul relay EMR

Sumber : (Songle Relay)

## 2.8. Sensor Tegangan

Sensor tegangan adalah sensor yang berguna untuk menghitung dan mengamati tegangan pada sebuah benda. Sensor tegangan dapat membaca tegangan AC maupun tegangan DC. Masukan dari sensor dapat berupa tegangan sedangkan keluaran dari

sensor dapat berupa sinyal analog, sinyal arus, dll (Texas Instrument, 2015). Pada Gambar 2.6. merupakan foto contoh dari salah satu modul sensor tegangan berseri INA219.

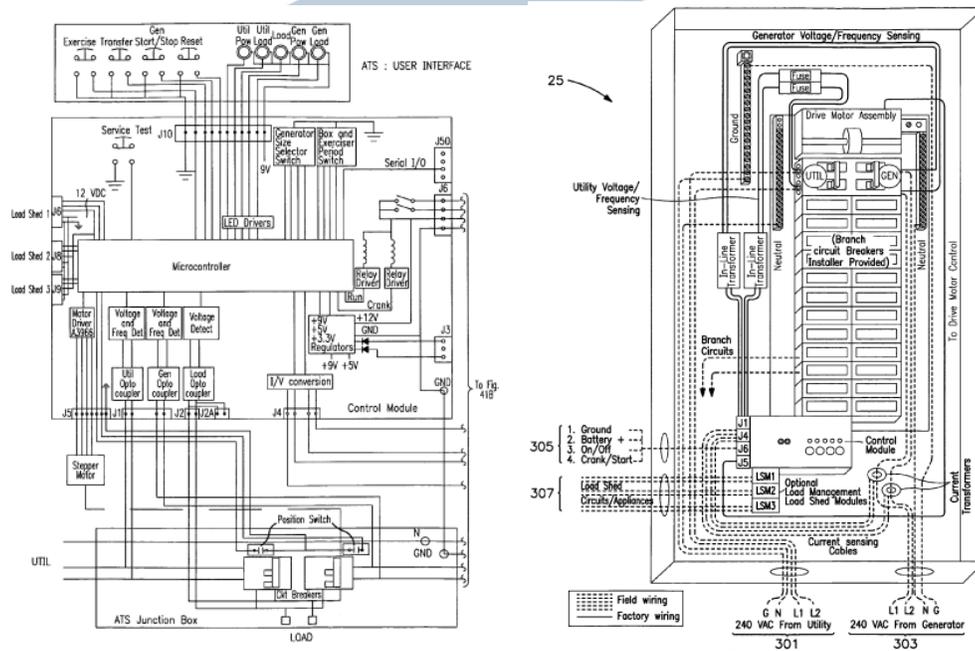


Gambar 2.6. Tampak dari Modul Sensor Tegangan INA219

Sumber : (Antratek, n.d.)

## 2.9. Perangkat Pendahulu

ATS sudah diimplementasikan di berbagai sistem kelistrikan untuk mempermudah pemindahan sumber energi listrik. ATS biasanya digunakan pada sebuah sistem kelistrikan bangunan yang menggunakan generator yang berbahan bakar diesel, bensin, atau gas. Salah satu dari bentuk ATS yang digunakan untuk sistem generator *internal combustion* adalah patent US8,222,548 B2 yang berjudul Automatic Transfer Switch. Secara garis besar, ATS bekerja dengan membaca arus dari listrik utama, jika arus listrik menghilang atau terjadi mati listrik (*trip*), pengendali mikro yang terdapat di dalam ATS akan mengirimkan sinyal ke *relay* untuk memindahkan sumber energi listrik ke sumber energi cadangan. Gambar 2.7. merupakan gambar dari rangkaian dan komponen dari ATS yang terdapat pada paten (United State of America Patent No. 8,222,548 B2, 2012).



Gambar 2.7. Tampak rangkaian ATS (kiri), Tampak komponen dari ATS (kanan).

Sumber : (United State of America Patent No. 8,222,548 B2, 2012)

Selain aplikasinya sebagai pemindah sumber energi generator cadangan, ATS merupakan rangkaian inti pada sebuah UPS seperti yang telah dijelaskan pada sub bab 2.4. ATS yang terdapat di dalam UPS memiliki kesamaan secara konsep kerja dengan perangkat ATS pada Gambar 2.7. Perbedaan dari keduanya hanyalah skala ATS untuk UPS yang lebih kecil dan ATS untuk UPS berbentuk analog yang dikendalikan oleh sebuah IC sedangkan ATS pada Gambar 2.7. merupakan ATS dengan pengendali mikro. Perangkat ATS analog menggunakan banyak komponen yang membuat skematik dari rangkaian lebih rumit (United States of America Patent No. 5,939,799, 2016).

ATS pada sistem PV biasanya terdapat pada sebuah inverter yang memiliki fitur tersebut namun ada beberapa sistem PV yang memiliki sebuah panel listrik yang khusus digunakan untuk ATS.

Selain dari dua bentuk ATS, telah ada di pasaran sebuah modul ATS terpisah yang dapat digunakan untuk sebuah sistem PV atau sistem turbin angin. Perangkat bernama ATS-11KW buatan MOES merupakan salah satu perangkat ATS yang terpisah dari inverter dan modular sehingga mudah untuk dipasang pada sebuah sistem PV. Namun, harga perangkat berkisar 103 USD atau Rp. 1,453,772 yang tercantum di dalam website Amazon masih dihitung cukup tinggi untuk masyarakat menengah kebawah (Amazon, n.d.). Tabel 2.1. menunjukkan spesifikasi dari ATS-11KW yang diambil langsung dari halaman *website* manufaktur (Mobile Solar Panel, 2019).

Tabel 2.1. Spesifikasi perangkat ATS-11KW.

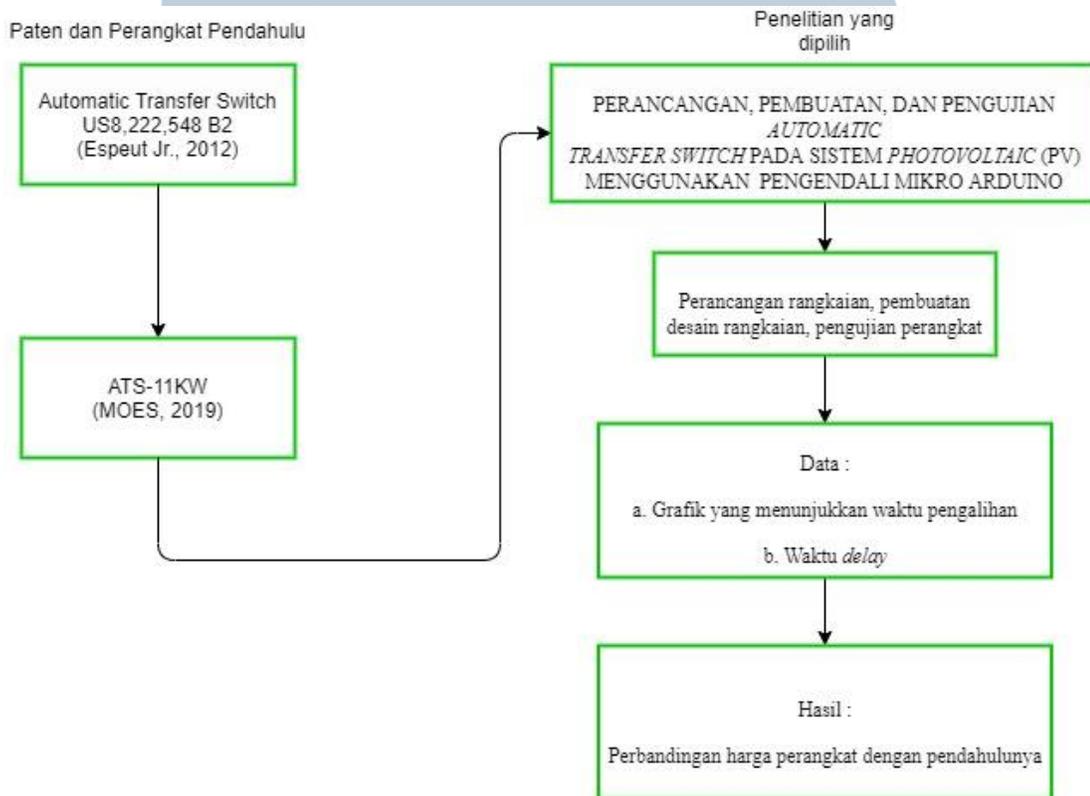
Parameter	Nilai
Rated Power	5500W
Input Voltage	120 VAC / 220 - 240 VAC
Output Voltage	120 VAC / 220 – 240 VAC
Transfer Time	10ms
System Voltage	12 / 24 / 48
Dimensi	19 x 17 x 7,25 cm

Sumber : (Mobile Solar Panel, 2019)

## 2.10. Kerangka Penelitian

Gambar berikut merupakan bagan yang menjelaskan kerangka penelitian. Hal yang pertama dilakukan adalah melakukan pengamatan paten mengenai *Automatic Transfer Switch*. Setelah itu, dilakukan pencarian produk yang sudah ada di pasaran, dalam penelitian ini produk tersebut adalah ATS-11KW buatan MOES. Berikutnya adalah pemilihan judul berdasarkan kelemahan pendahulu yaitu segi harga.

Dilakukannya proses perancangan, pembuatan, dan pengujian guna mendapatkan data yang akan diolah untuk mendapatkan hasil dari penelitian. Hasil dari penelitian ini berupa perbandingan harga dengan perangkat pendahulu. Gambar 2.8. merupakan bagan yang menunjukkan alur kerangka penelitian.

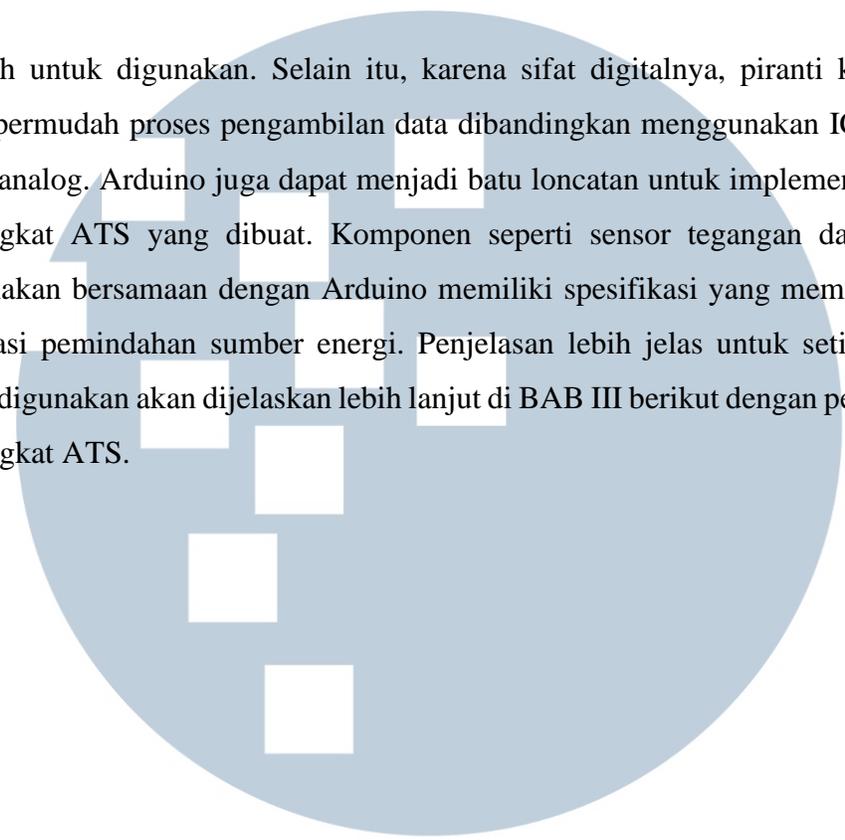


Gambar 2.8. Bagan kerangka penelitian.

## 2.11. Hipotesis

Tambahan biaya sebesar Rp 1,453,772 untuk sebuah fitur ATS membuat calon pengguna atau pengguna sistem PV berskala kecil untuk berpikir dua kali memakainya. Penulis menganggap bahwa biaya perangkat ATS dapat dibuat lebih murah. Hal tersebut dapat digapai dengan menggunakan papan kendali Arduino sebagai kendali perangkat ATS. Harga papan kendali Arduino yang terbilang cukup terjangkau serta

mudah untuk digunakan. Selain itu, karena sifat digitalnya, piranti keras Arduino mempermudah proses pengambilan data dibandingkan menggunakan IC seperti pada ATS analog. Arduino juga dapat menjadi batu loncatan untuk implementasi IoT pada perangkat ATS yang dibuat. Komponen seperti sensor tegangan dan *relay* yang digunakan bersamaan dengan Arduino memiliki spesifikasi yang memumpuni untuk aplikasi pemindahan sumber energi. Penjelasan lebih jelas untuk setiap komponen yang digunakan akan dijelaskan lebih lanjut di BAB III berikut dengan perannya dalam perangkat ATS.

A large, light blue watermark logo of UMN is centered in the background of the page. It consists of a circle containing a stylized grid pattern of squares and lines, resembling a circuit board or a digital grid.

# UMMN

UNIVERSITAS  
MULTIMEDIA  
NUSANTARA