

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian yang Relevan**

##### **Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off Grid Untuk Supply Charge Station**

Andre Setyawan dan Agus Ulinuha

Kebutuhan akan energi listrik terus meningkat seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi, namun ketersediaan pasokan energi belum mampu mengimbangnya. Salah satu sumber energi potensial di Indonesia adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mengingat letak geografisnya yang berada di daerah tropis dengan paparan sinar matahari yang melimpah dan berkesinambungan. Selain itu, penerapan PLTS tidak menimbulkan polusi udara serta bersifat ramah lingkungan karena sumber energinya tidak terbatas. PLTS dapat menjadi alternatif solusi sebagai sumber daya untuk pengisian energi sepeda listrik. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun stasiun pengisian daya sepeda listrik (*charge station*) menggunakan sistem PLTS off-grid. Dalam sistem ini terdapat beberapa komponen utama, antara lain panel surya (*solar cell*), *solar charge controller* (SCC), baterai, dan *inverter*. Sepeda listrik yang digunakan merupakan hasil pengembangan dari penelitian sebelumnya. Stasiun pengisian tenaga surya ini berfungsi sebagai tempat pengisian daya untuk sepeda listrik dengan memanfaatkan energi yang dihasilkan panel surya. Sistem PLTS ini bekerja secara mandiri (*off-grid*) tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Panel surya akan menyerap energi cahaya matahari pada siang hari, kemudian energi tersebut disimpan di dalam baterai melalui proses pengaturan oleh regulator. Energi yang tersimpan kemudian digunakan untuk mengisi baterai sepeda listrik serta mendukung sistem penyewaan sepeda yang terintegrasi..

Kata kunci: Pembangkit Terbarukan, *Solar Charge Station*, Panel Surya, *Off Grid*

## **Sistem *Monitoring* Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dan *Charging Station* Menggunakan ESP 32**

Maheza Restu Pradana

Pada saat ini dalam kehidupan sehari - hari perkembangan teknologi semakin meningkat , Hal tersebut dapat dilihat dari semakin banyaknya pemanfaatan teknologi komunikasi dan informasi dalam memberikan akses kemudahan bagi manusia dalam berbagai aktifitas termasuk bekerja. Dengan semakin banyaknya pilihan teknologi seperti *Handphone* , Laptop dan lain – lain penggunaan alat elektronik tersebut sangat dibutuhkan untuk berkomunikasi dan mencari informasi dalam menjalankan setiap aktivitasnya baik di rumah , kantor maupun tempat umum maka memerlukan energi listrik setiap saat pada saat pengoperasiannya. *Charging station* yang diharapkan sebagai sumber pengisi daya pada baterai alat komunikasi tersebut harus mencari energi alternatif yang dapat diperbaharui yaitu pembangkit listrik tenaga surya, PLTS ini agar kita mengetahui daya yang dihasilkan dan penggunaannya efektif harus dilakukan *monitoring* secara berkala. Oleh itulah dibuat suatu sistem *monitoring* yang dapat digunakan secara *realtime* dan *mobile*. Pada *sample monitoring* yang telah dilakukan selama 3 hari didapatkan hasil Daya input panel surya ini pada *monitoring* sangat bervariasi tergantung dengan kondisi cuaca dan untuk nilai yang paling tinggi sebesar 39,5 Watt pada pukul 12.00 pada tanggal 23 juli 2024 yang digunakan untuk mengisi baterai aki sebesar 32Ah. Yang dapat dimanfaatkan untuk mengisi 2 buah *handphone* , 1 buah laptop dan 1 buah power bank secara bersamaan.

Kata Kunci : *Monitoring*, *charging station*, energi listrik , PLTS , teknologi

## **Sistem Monitoring Plts Berbasis Iot Sebagai Media Pembelajaran**

Bakti Dwi Waluyo, Muhammad Aulia Rahman S., Nelson Sinaga, Ali Akbar Lubis,  
dan Sintya Verina Br Tarigan

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem monitoring pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) berbasis *internet of things* (IoT) sebagai media pembelajaran di Jurusan Pendidikan Teknik Elektro, Universitas Negeri Medan. Sistem yang dinamai EduSolar dirancang dengan kombinasi perangkat keras berupa mikrokontroler arduino uno, sensor arus, tegangan, daya, serta sensor intensitas cahaya, dan memanfaatkan modul Wi-Fi ESP8266 sebagai sarana konektivitas IoT. EduSolar diintegrasikan untuk memantau dan menampilkan parameter utama PLTS secara real-time melalui antarmuka berbasis web. Metodologi pengembangan mengikuti model ADDIE yang meliputi tahap analisis, perancangan, pengembangan, implementasi, dan evaluasi. Hasil validasi menunjukkan tingkat kelayakan 81,28% oleh ahli media dan 80,83% oleh ahli materi. Di samping itu, respons mahasiswa mencapai 78,46%, yang mengindikasikan bahwa sistem layak digunakan sebagai media pembelajaran. Dengan demikian, pengembangan sistem monitoring PLTS berbasis IoT yang diintegrasikan ke dalam proses pembelajaran terbukti efektif dalam meningkatkan pemahaman mahasiswa mengenai teknologi energi surya.

Kata Kunci: Sistem Monitoring PLTS, IoT, Media Pembelajaran, Pembelajaran Interaktif, Energi Surya.

### **2.2 Definisi Sumber Energi**

Sumber energi adalah segala sesuatu yang memiliki kemampuan menghasilkan energi, baik secara langsung maupun melalui proses konversi atau transformasi tertentu. Energi yang dihasilkan dari sumber daya alam dapat dimanfaatkan dalam berbagai aktivitas manusia untuk memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari. Beberapa contoh sumber energi tersebut antara lain sinar matahari, aliran air, dan minyak bumi. Menurut UU No. 30 Tahun 2007, energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja yang dapat berupa panas, cahaya, mekanika, kimia, dan elektromagnetika. Klasifikasi sumber energi terdiri

dari dua yaitu energi fosil atau energi tidak terbarukan dan energi non fosil atau energi terbarukan.[5]

#### 2.2.1 Energi Fosil atau Energi Tidak Terbarukan

Energi fosil atau energi tidak terbarukan merupakan jenis energi yang ketersediaannya di alam terbatas. Secara umum, energi ini dapat dibedakan menjadi dua kategori utama, yaitu bahan bakar fosil dan bahan bakar nuklir. Jenis energi tersebut suatu saat akan habis dan berpotensi menimbulkan dampak negatif terhadap lingkungan. Di Indonesia, pemanfaatan energi fosil seperti batu bara dan minyak bumi masih mendominasi meskipun diketahui memberikan risiko besar terhadap keberlanjutan lingkungan. Sumber energi tidak terbarukan ini tidak dapat diperbaharui dalam waktu singkat, sehingga penggunaannya dapat mengancam keseimbangan ekosistem karena menghasilkan polusi udara, air, maupun tanah yang berdampak serius pada kesehatan manusia serta kualitas hidup. Saat ini, Indonesia memiliki cadangan energi yang terdiri dari minyak bumi dengan jumlah terbatas, gas alam yang relatif cukup, panas bumi dengan potensi besar, serta batu bara yang masih berlimpah.[6]

#### 2.2.2 Energi Non Fosil atau Energi Terbarukan

Energi terbarukan atau non-fosil adalah jenis energi yang berasal dari proses alami dan dapat diperbaharui dalam waktu relatif singkat, sehingga ketersediaannya tidak akan habis. Energi ini dikembangkan sebagai alternatif untuk menggantikan ketergantungan pada energi tak terbarukan yang persediaannya semakin terbatas. Oleh karenanya, Selain memberikan dampak yang kecil terhadap kerusakan lingkungan, energi ini juga memastikan ketersediaan sumber daya yang berkelanjutan untuk masa depan.[7] Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, Indonesia menargetkan pemanfaatan energi baru dan terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 31% pada tahun 2050. Untuk mencapai target tersebut, diperlukan upaya yang konsisten melalui konservasi, diversifikasi, dan intensifikasi energi secara berkelanjutan.[8] Meskipun Indonesia memiliki beragam potensi energi terbarukan, tidak semua jenis dapat dimanfaatkan di wilayah pedesaan maupun daerah terpencil. Oleh karena itu, sumber energi seperti tenaga surya, biomassa,

tenaga air, dan tenaga angin menjadi alternatif yang lebih sesuai untuk memenuhi kebutuhan energi masyarakat di daerah-daerah tersebut.

### 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit yang memanfaatkan energi cahaya matahari untuk diubah menjadi energi listrik menggunakan prinsip *photovoltaic*. Cara kerja prinsip *photovoltaic* yaitu pada saat sinar matahari diserap oleh sel surya, foton dari sinar matahari akan membangkitkan dan membebaskan elektron sehingga mengalir pada semikonduktor tipe n dan p yang menghasilkan arus DC.[9] Pada umumnya, PLTS tersusun atas beberapa bagian utama, yaitu panel surya , *charger controller* , inverter, serta baterai/accu sebagai media penyimpanan energi.[10]

Pembangkit listrik yang memanfaatkan energi surya atau lebih umum dikenal dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) mempunyai beberapa kelebihan yaitu: (11)

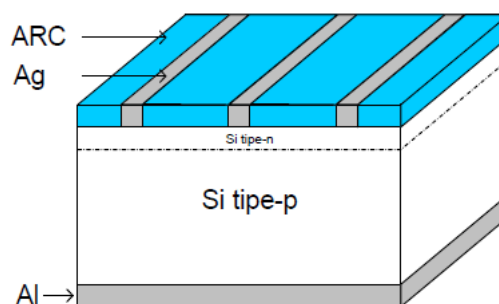
- a. Memanfaatkan sumber energi yang berlimpah dan tidak berbayar.
- b. Bersifat modular, sehingga instalasi dan penambahan kapasitas dapat dilakukan dengan mudah.
- c. Perawatannya sederhana.
- d. Tidak menghasilkan polusi lingkungan.
- e. Dapat beroperasi secara otomatis sehingga cocok diterapkan di daerah terpencil.
- f. Memiliki tingkat keamanan yang cukup tinggi.
- g. Menawarkan keandalan sistem yang terus meningkat.
- h. Mendorong partisipasi masyarakat dalam pengelolaan sistem secara mandiri.
- i. Proses instalasinya tergolong mudah dan praktis.
- j. Memanfaatkan energi matahari yang jumlahnya tidak terbatas.
- k. Tidak menimbulkan emisi karbon dioksida maupun gas buang lainnya.



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

### 2.3.1 Sel Surya

Sel surya adalah perangkat yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik. Teknologi Photovoltaic (PV) digunakan untuk melakukan konversi radiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik. Umumnya, PV dikemas dalam bentuk unit yang disebut modul surya. Modul surya terdiri dari sejumlah sel surya yang dapat disusun secara seri maupun paralel. Satu modul surya biasanya tersusun atas 33, 36, hingga 72 sel surya. Modul-modul tersebut disusun menjadi panel surya, dan ketika beberapa panel digabungkan dalam konfigurasi baris dan kolom, akan terbentuk sebuah array. Sel surya itu tersusun dari lapisan tipe-p dan tipe-n, dengan sambungan atau lapisan emitter yang sangat tipis.

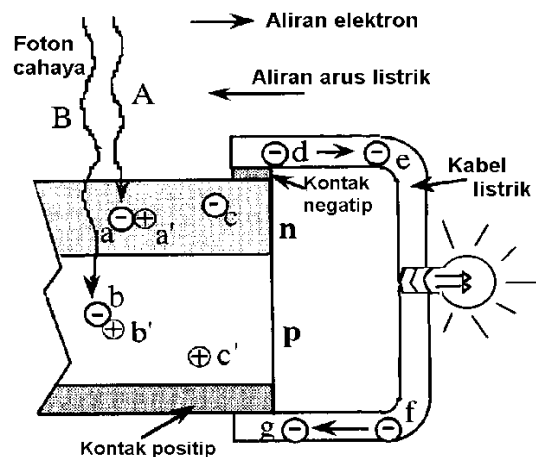


Gambar 2.2 Susunan Sel Surya

Dimana :

- Perangkat ini dilengkapi lapisan antirefleksi (ARC)
- Memiliki kontak depan bermodel grid dari perak (Ag).
- Menggunakan doping fosfor guna pembentukan sambungan p-n.
- ada sisi belakang wafer menggunakan kontak logam aluminium (Al) bersama AgAl.

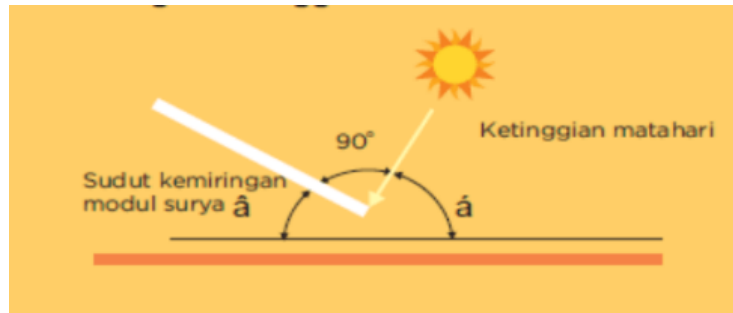
Gambar 2.3 menggambarkan alur sederhana proses pembangkitan energi listrik di dalam sebuah panel surya. Sebuah lampu dikoneksikan pada rangkaian eksternal yang menghubungkan kutub positif dan negatif sel surya. Foton dengan energi beragam memasuki lapisan permukaan semikonduktor tipe-n, lalu menembus hingga mencapai lapisan semikonduktor tipe-p yang lebih tebal pada kedalaman tertentu dari permukaan sel. [11]



Gambar 2.3 Proses Pembangkitan Arus Listrik Pada Sel Surya

Secara umum, panel surya dipasang tetap pada satu arah menghadap matahari. Padahal, bumi mengorbit matahari pada lintasan elips dengan matahari diposisikan sebagai pusatnya. Karena matahari bergerak membentuk sudut yang selalu berubah, maka posisi panel surya yang statis tidak akan memperoleh sinar matahari dengan maksimal. Supaya sinar matahari terserap maksimal, maka sinar matahari harus diusahakan selalu tegak lurus pada permukaan panel surya atau dibantu dengan alat yang bernama *solar*

*tracker*. Dengan solar tracker, posisi panel surya diatur agar selalu berada pada kondisi tegak lurus terhadap arah datangnya sinar matahari. Hubungan modul surya terhadap ketinggian matahari dapat dilihat pada gambar 2.4.

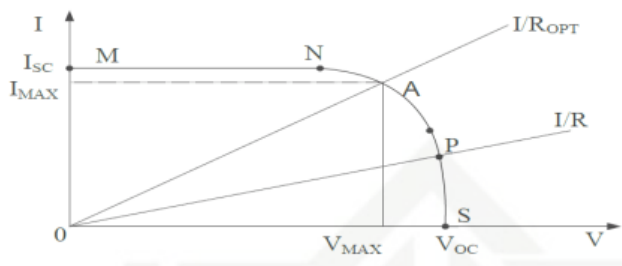


Gambar 2.4 Hubungan modul surya dengan ketinggian matahari

Karakteristik dari sebuah modul panel surya dapat ditentukan melalui beberapa parameter penting, antara lain tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ), faktor pengisian (*Fill Factor*/FF), daya maksimum ( $P_{max}$ ), arus pada daya maksimum ( $I_m$ ), tegangan pada daya maksimum ( $V_m$ ), serta efisiensi ( $\eta$ ).

Hubungan antara tegangan dan arus dari panel surya dapat digambarkan melalui kurva V-I (Voltage-Current Curve). Pada kurva tersebut, terlihat bahwa ketika tegangan dan arus bekerja pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*/MPP), maka daya keluaran panel surya juga berada pada nilai tertinggi (PMPP).

Nilai tegangan pada titik daya maksimum ( $V_{MPP}$ ) umumnya lebih rendah dibandingkan tegangan rangkaian terbuka ( $V_{oc}$ ), sedangkan arus pada titik daya maksimum ( $I_{MPP}$ ) juga lebih kecil daripada arus hubung singkat ( $I_{sc}$ ). [12]

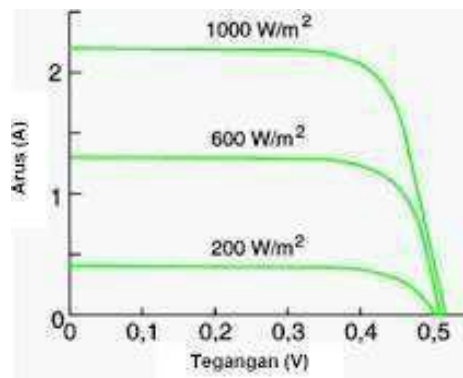


Gambar 2.5 Kurva Karakteristik Arus dan Tegangan Sel Surya



Daya maksimum pada panel surya biasanya disebut daya puncak dan disimbolkan dengan  $m_p$ , di mana arus maksimum ditulis sebagai  $I_{mp}$  dan tegangan maksimum sebagai  $V_{mp}$ . Setiap modul surya memiliki kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) yang dibuat berdasarkan kondisi standar intensitas cahaya dan suhu modul, karena daya keluaran panel surya sangat dipengaruhi oleh dua faktor tersebut.

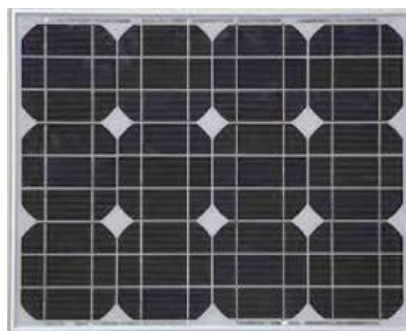
Semakin tinggi intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaan panel, maka arus listrik yang dihasilkan juga meningkat, artinya intensitas cahaya berbanding lurus dengan keluaran arus. Sebaliknya, suhu modul surya memiliki pengaruh terbalik terhadap tegangan keluaran, di mana semakin panas modul, maka tegangan yang dihasilkan akan menurun. Oleh karena itu, kurva standar I-V untuk sebuah modul surya umumnya dibuat pada intensitas cahaya  $1000 \text{ W/m}^2$  dan suhu modul  $25^\circ\text{C}$ . [6]



Gambar 2.6 Pengaruh Tingkat Radiasi Pada I-V Panel Surya

Adapun jenis – jenis dari panel surya yang sering ditemukan di pasaran yaitu : [13]

- a. Monokristalin (*Mono-crystalline*)



Gambar 2.7 Modul Surya Monokristalin

Panel surya monokristalin tersusun dari wafer silikon murni tipis yang diperoleh melalui proses pembentukan kristal tunggal. Proses pemotongan menggunakan teknologi presisi tinggi menghasilkan sel surya dengan ukuran dan bentuk yang seragam, sehingga tingkat efisiensinya lebih tinggi dibandingkan jenis lainnya, yakni sekitar 15% hingga 20%.

Namun, karena bahan baku silikon murni dan proses pembuatannya memerlukan biaya tinggi, maka harga panel monokristalin di pasaran juga relatif lebih mahal. Meskipun begitu, panel surya monokristalin tetap menjadi pilihan unggulan karena efisiensinya yang tinggi, walau tetap memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri.. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan panel surya monokristalin:

Tabel 2.1 Keuntungan dan Kekurangan Monokristalin

| No | Keuntungan                                                                                                                         | Kekurangan                                                                                                                 |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Memiliki tingkat efisiensi tertinggi pada 15 hingga 20%.                                                                           | Monokristalin adalah tipe sel surya dengan harga tertinggi di pasaran, sehingga tidak terjangkau bagi semua kalangan.      |
| 2. | Membutuhkan lebih sedikit ruang dibandingkan dengan jenis lain karena efisiensinya yang tinggi.                                    | Peningkatan temperatur kerap terjadi selama proses kerja, tetapi dampaknya dinilai kecil dibandingkan sel surya tipe lain. |
| 3. | Menurut produsen, sel surya monokristalin memiliki umur pakai terpanjang dengan mayoritas produk dibekali garansi hingga 25 tahun. | Ketika silikon dipotong selama pembuatan, menghasilkan banyak limbah.                                                      |
| 4. | Ketahanan panasnya lebih tinggi jika dibandingkan dengan tipe panel lain.                                                          |                                                                                                                            |

- 
5. Kinerjanya tetap unggul pada intensitas cahaya matahari rendah, sehingga sel surya monokristalin sesuai untuk wilayah yang sering berawan..
- 

b. Polikristalin (*Poly-crystalline*)



Gambar 2.8 Modul Surya *Polikristalin*

Jenis kedua dalam kategori sel surya generasi pertama ialah polikristalin, yang direalisasikan melalui pengirisan blok silikon. Banyak kristal silikon menjadi penyusun utama pada tipe sel ini sehingga proses pembuatan wafernya dapat dilakukan dengan pencetakan dan lebih ekonomis dibandingkan dengan sel monokristalin. Meskipun efisiensinya sedikit lebih rendah, kinerja sel polikristalin telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir.

Proses pembuatannya dimulai dengan menuangkan silikon cair ke dalam cetakan berbentuk persegi, kemudian dibiarkan hingga mengeras, dipotong menjadi batangan, dan selanjutnya diubah menjadi wafer.

Secara umum, efisiensi sel polikristalin berada pada kisaran 13% hingga 15%, menghasilkan ukuran sel dan modul yang lebih besar dibandingkan sel monokristalin. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan panel surya polikristalin:

Tabel 2.2 Keuntungan dan Kekurangan Polikristalin

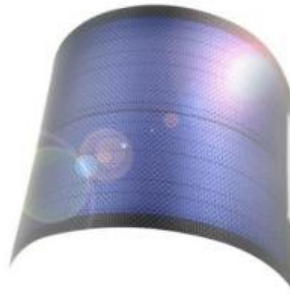
| No | Keuntungan                                                                                                                                                                              | Kekurangan                                                                                                                                                                   |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Memiliki harga yang lebih murah bila dibandingkan dengan jenis monokristalin karena proses pembuatan panel surya polikristalin lebih sederhana sehingga harga jualnya juga lebih murah. | Panel surya polycrystalline memiliki nilai efisiensi 13% hingga 15% dalam mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik yang lebih rendah dibandingkan tipe monokristalin. |
| 2. | Biaya investasi lebih rendah dibandingkan menggunakan monokristalin.                                                                                                                    | Panel surya Polikristalin memerlukan ruang yang lebih besar dalam instalasi atau penempatannya bila dibandingkan dengan jenis monokristalin.                                 |
| 3. | Mempunyai nilai estetika yang lebih baik dengan warna biru cerah.                                                                                                                       | Kinerja dapat menurun pada saat terjadi cuaca panas yang ekstrim dengan penurunan lebih banyak bila dibandingkan dengan jenis monokristalin.                                 |

### c. *Thin Film*

Sel surya *thin film* merupakan panel dengan struktur lapisan tipis berbahan mikrokristalin-silikon dan amorf, berefisiensi modul hingga  $\pm 8,5\%$ . Karena itu, kebutuhan luas permukaan per watt lebih besar dibanding monokristalin maupun polikristalin. Teknologi ini direalisasikan melalui deposisi satu maupun beberapa lapisan material fotovoltaik tipis pada suatu substrat, sehingga cahaya dikonversi menjadi listrik melalui efek fotovoltaik. *Thin-film* tergolong generasi kedua, sangat ringan dan fleksibel, tersusun atas multilapis bahan PV tipis, dan dikenal pula sebagai TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Terdapat berbagai jenis sel surya berlapis tipis (*thin film*) yang dibuat dari beragam material, di mana perbedaan bahan tersebut akan berpengaruh terhadap biaya

produksi dan tingkat efisiensi panel surya. Beberapa tipe thin film yang paling sering digunakan antara lain sebagai berikut :

1. Amorphous Silicon (a-Si)



Gambar 2.9 Panel Surya Thin Film Amorphous

Sel surya berbahan *amorf* (a-Si) merupakan teknologi *thin film* tertua yang diproduksi menggunakan metode penumpukan (*stacking*), yaitu dengan menyusun beberapa lapisan *silikon amorf* untuk membentuk satu sel surya. Teknik ini mampu menghasilkan efisiensi antara 6% hingga 8%. Perangkat panel menunjukkan kemampuan penyerapan multi-spektrum dan berfungsi optimal pada intensitas cahaya redup, disertai karakteristik fleksibel serta ketahanan terhadap retak akibat sifatnya yang dapat ditekuk. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan panel surya *thin film amorphous*:

Tabel 2.3 Keuntungan dan Kekurangan *Thin Film Amorphous*

| No | Keuntungan                                | Kekurangan                                                          |
|----|-------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1. | Ringan.                                   | Mudah kehilangan efisiensi yang membuatnya tidak cocok untuk rumah. |
| 2. | Biaya murah                               |                                                                     |
| 3. | Tersedia panel fleksibel dan ber perekat. |                                                                     |

- 
4. Peningkatan suhu tidak berpengaruh signifikan terhadap produktivitas.
- 

## 2. Panel Surya *Cadmium Telluride* (CdTe)

Sel surya berbasis cadmium telluride (CdTe) merupakan material yang sangat efektif dalam menyerap sekaligus mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik. Fabrikasi lapisan tipis CdTe (*thin film*) umumnya dilakukan melalui deposisi transport uap atau sublimasi jarak dekat. Lapisan penyerap CdTe biasanya ditumpangkan di atas oksida konduktif transparan (TCO) berkualitas tinggi, misalnya oksida timah terdoping fluor ( $\text{SnO}_2:\text{F}$ ). Penyelesaian perangkat dilakukan dengan menambahkan kontak belakang, lazimnya berupa lapisan zinc telluride (ZnTe) yang kemudian dilapisi logam atau pasta karbon, di mana tembaga (Cu) juga dimasukkan pada bagian belakang sel untuk meningkatkan konduktivitas. Panel surya CdTe ini memiliki efisiensi konversi energi sekitar 9%–11%. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan panel surya cadmium *Telluride* (CdTe): [14]

Tabel 2.4 Keuntungan dan Kekurangan *Cadmium Telluride* (CdTe)

| No | Keuntungan                                                                                             | Kekurangan                                                                                                 |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. | Lapisan penyerap sangat bagus dalam mengubah energy.                                                   | Kadmium elemen beracun dalam jumlah besar.                                                                 |
| 2. | Lebih murah dan waktu pengembalian tercepat dibandingkan dengan sel standar dan jejak karbon terkecil. | Telluride merupakan komponen utama dalam manufaktur tetapi memiliki kelemahan dimana sulit untuk ditemukan |

### 3. Panel Surya *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS).



Gambar 2.10

Gambar 2. 10 Panel Surya *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS)

Panel surya *thin-film* CIGS merupakan salah satu teknologi film tipis paling efisien untuk aplikasi fotovoltaik saat ini. Namun pada skala komersial, sel CIGS masih terkendala oleh biaya produksi yang tinggi dan laju deposisi rendah akibat penggunaan teknik deposisi uap fisik yang lazim dalam proses pabrikasinya. Struktur CIGS sendiri tersusun dari lapisan tembaga, indium, gallium, dan diselenida yang ditumpangkan di atas substrat konduktif guna membentuk material semikonduktor yang tangguh. Teknologi *thin film* CIGS dikenal sangat efisien, dengan beberapa hasil pengujian di laboratorium menunjukkan efisiensi lebih dari 20%. Berikut adalah kelebihan dan kekurangan panel surya copper indium gallium selenide (CIGS) : [14]

Tabel 2.5 Keuntungan dan Kekurangan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS)

| No | Keuntungan                                                               | Kekurangan                                              |
|----|--------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1. | Memiliki panel yang tipis dengan efisiensi 10% hingga 12%.               | Sangat mahal untuk diproduksi.                          |
| 2. | Sebagian panel menggunakan bahan seng sebagai pengganti <i>kadmium</i> . | Sebagian besar mengandung <i>kadmium</i> kimia beracun. |

#### 2.3.2 *Charger Controller*

*Charge controller* merupakan salah satu komponen penting pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang dilengkapi dengan penyimpanan energi listrik atau *storage*. Secara fungsional, perangkat mengatur transfer arus searah dari panel

surya ke baterai pada saat charging dan mengontrol aliran arus dari baterai ke beban selama discharging.

Secara umum, fungsi pokok *charge controller* khususnya pada PLTS stand-alone adalah melindungi dan memelihara kondisi baterai agar terhindar dari pengisian berlebih (*overcharge*) maupun pengosongan berlebih (*overdischarge*). Ketika baterai telah mencapai kapasitas maksimum, alat ini akan membatasi atau menghentikan aliran daya dari panel surya dan sebaliknya. Ketika kapasitas baterai mencapai batas minimum (*low state of charge*), charge controller akan memutuskan sambungan beban untuk mencegah kerusakan pada baterai.

*Solar charge controller* (SCC) atau yang sering juga disebut *Battery Charge Regulator* (BCR) merupakan perangkat elektronik daya yang berperan dalam mengoptimalkan proses pengisian baterai dengan mengatur tegangan dan arus sesuai dengan daya yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik serta status pengisian baterai (*State of Charge / SoC*). Untuk sistem dengan kebutuhan daya lebih besar, beberapa SCC dapat dihubungkan secara paralel pada satu bank baterai, sehingga mampu menggabungkan daya dari beberapa modul fotovoltaik guna mencapai arus pengisian yang lebih tinggi dan efisien. [14]



Gambar 2.11 *Charger Controller*

### 2.3.3 Baterai

Baterai merupakan salah satu komponen penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi sebagai penyimpan cadangan energi listrik. Komponen ini bekerja dengan menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk arus searah (DC). Energi yang tersimpan di dalam baterai berperan sebagai sumber daya cadangan (*backup*) yang akan digunakan ketika panel surya tidak dapat



menghasilkan listrik, misalnya pada malam hari atau saat kondisi cuaca mendung. Selain itu, penggunaan baterai juga membantu menjaga stabilitas tegangan keluaran sistem.

Kapasitas energi yang dapat disimpan oleh baterai diukur dalam satuan *ampere-hour* (Ah), yaitu jumlah arus maksimum yang mampu disuplai baterai selama satu jam. Namun, dalam proses pengosongan daya (*discharge*), baterai tidak boleh dikosongkan hingga batas maksimum agar umur pakainya (*lifetime*) tetap panjang dan tidak menurun dari spesifikasi pabrikan. Tingkat pengosongan baterai ini dikenal dengan istilah Depth of Discharge (DOD) yang dinyatakan dalam persentase (%), dan pada umumnya ditetapkan sebesar 80% untuk menjaga kinerja dan keawetan baterai.



Gambar 2.12 Baterai

| Battery Type                                | Cost   | Deep Cycle Performance | Maintenance |
|---------------------------------------------|--------|------------------------|-------------|
| <b>Flooded Lead-Acid</b>                    |        |                        |             |
| Lead-Antimony                               | low    | good                   | high        |
| Lead-Calcium Open Vent                      | low    | poor                   | medium      |
| Lead-Calcium Sealed Vent                    | low    | poor                   | low         |
| Lead Antimony/Calcium Hybrid                | medium | good                   | medium      |
| <b>Captive Electrolyte Lead-Acid (VRLA)</b> |        |                        |             |
| Gelled                                      | medium | fair                   | low         |
| Absorbed Glass Mat                          | medium | fair                   | low         |
| <b>Nickel-Cadmium</b>                       |        |                        |             |
| Sintered-Plate                              | high   | good                   | none        |
| Pocket-Plate                                | high   | good                   | medium      |

Gambar 2.13 Jenis dan Karakteristik Baterai Sekunder

Saat ini tersedia berbagai macam tipe dan klasifikasi baterai yang diproduksi dengan desain serta karakteristik kinerja yang berbeda-beda, disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi tertentu. Dalam penerapan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), baterai jenis *lead-acid* merupakan yang paling umum digunakan karena tersedia dalam berbagai kapasitas (Ah), biayanya lebih ekonomis, dan memiliki karakteristik performa yang sesuai dengan kebutuhan sistem.

Sementara itu, pada kondisi ekstrem seperti suhu rendah, biasanya digunakan baterai tipe *nickel-cadmium*, meskipun biaya pengadaannya relatif lebih tinggi (Dunlop, 1997). Secara umum, baterai penyimpan energi listrik dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu baterai primer (*primary battery*) dan baterai sekunder (*secondary battery*).

Baterai primer berfungsi untuk menyimpan dan menyalurkan energi listrik ke beban, namun tidak dapat diisi ulang (*non-rechargeable*), contohnya baterai *carbon-zinc* dan *lithium*, sehingga tidak digunakan dalam sistem PLTS.

Sebaliknya, baterai sekunder memiliki kemampuan menyimpan energi listrik, menyalurkannya ke beban, dan diisi ulang kembali (*rechargeable*). Jenis baterai ini yang umumnya digunakan dalam sistem PLTS, karena memiliki karakteristik dan performa yang sesuai untuk mendukung penyimpanan serta pemanfaatan energi surya secara optimal, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.13. [13]

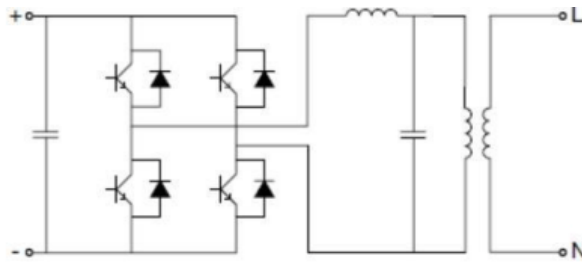
#### 2.3.4 Inverter

Pada sistem PLTS, *inverter* berperan penting dalam pengkondisian daya listrik (*power conditioning*) serta mengatur sistem kontrol. Fungsinya ialah mengonversi arus searah (DC) dari modul surya menjadi arus bolak-balik (AC) sekaligus memastikan kualitas daya sebelum disalurkan ke beban atau ke jaringan listrik utama.

Pada penerapannya, *inverter* satu fasa umumnya digunakan pada sistem dengan kapasitas beban kecil, sedangkan inverter tiga fasa digunakan untuk sistem berdaya besar yang terhubung langsung dengan jaringan listrik utilitas (seperti PLN).

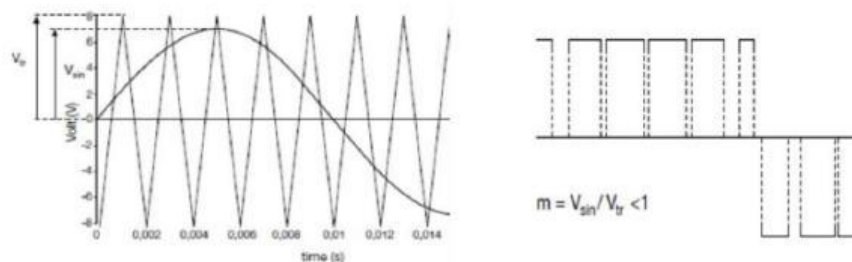


Gambar 2.14 *Inverter*



Gambar 2.15 Skema Prinsip Kerja Inverter Satu Fasa

Guna menghasilkan gelombang keluaran yang sinusoidal, digunakan metode PWM (pulse width modulation) yang ditampilkan pada Gambar 2.15. Dengan teknik ini, parameter pensaklaran dapat diatur agar frekuensi serta nilai r.m.s./rata-rata gelombang keluaran tercapai secara tepat.



Gambar 2. 16 Prinsip Kerja Teknologi PWM

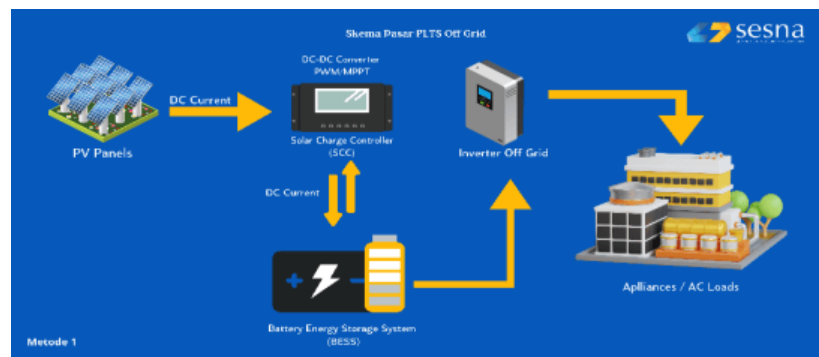
Dilihat dari kebutuhan kinerjanya, inverter yang digunakan pada sistem PLTS mandiri (*stand-alone*) dan sistem PLTS terhubung jaringan (*grid-connected*) memiliki karakteristik serta spesifikasi yang berbeda sesuai dengan fungsi dan tujuan penggunaannya, antara lain :

- a. Pada sistem PLTS *stand-alone*, inverter harus mampu menyediakan tegangan AC yang stabil meskipun terjadi perubahan daya keluaran dari panel surya maupun fluktuasi beban yang digunakan.
- b. Pada sistem PLTS *grid-connected*, inverter berfungsi untuk mensinkronkan tegangan dan frekuensi dengan jaringan listrik utama, sehingga dapat mengoptimalkan serta memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya agar sesuai dengan tegangan jaringan. [13]

## 2.4 Jenis – Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

### 2.4.1 Sistem PLTS *Off-Grid*

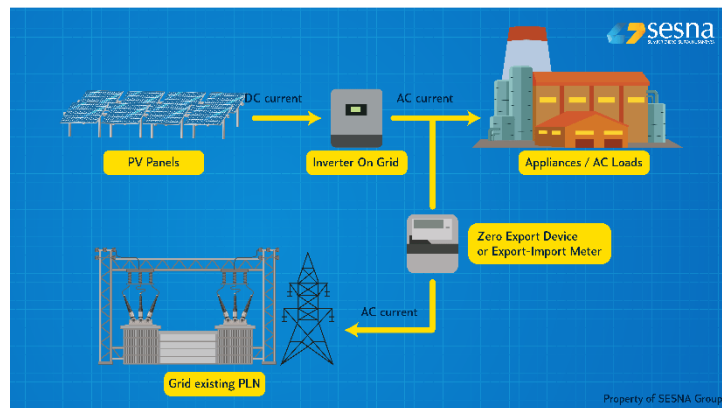
Sistem *off-grid* adalah jenis PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) yang banyak diterapkan di wilayah pedesaan atau daerah terpencil yang belum mendapatkan akses ke jaringan listrik utama. Sistem ini kerap disebut *stand alone PV system*, yakni pembangkit listrik mandiri yang sepenuhnya mengandalkan energi surya sebagai sumber utama. Melalui konfigurasi panel fotovoltaik, sistem *off-grid* mampu menghasilkan dan menyalurkan energi listrik sesuai kebutuhan pengguna tanpa ketergantungan pada jaringan listrik umum. Ilustrasi sistem *off-grid* ditampilkan pada Gambar 2.17.:



Gambar 2.17 Skema Sistem *Off-Grid*

### 2.4.2 Sistem PLTS *On-Grid*

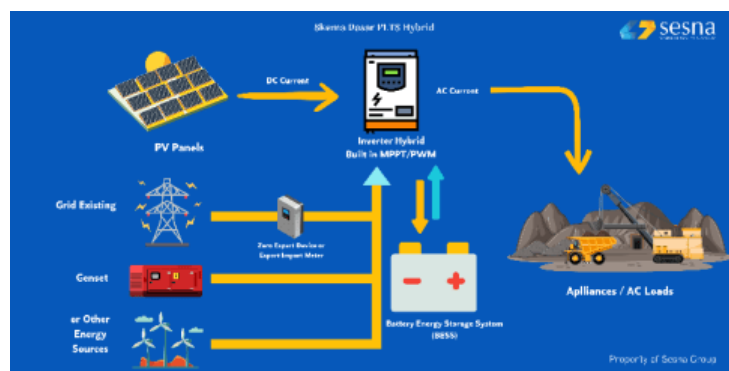
Sistem *on-grid* atau yang dikenal juga dengan istilah *grid-tie system* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang memanfaatkan panel surya untuk menghasilkan energi listrik yang bersih, ramah lingkungan, dan tanpa emisi. Sistem ini tetap terhubung dengan jaringan listrik utama (PLN) sehingga energi yang dihasilkan dari panel surya dapat digunakan secara optimal untuk memenuhi kebutuhan listrik pengguna. Dengan penerapan sistem *on-grid*, konsumsi listrik dari jaringan utama dapat berkurang secara signifikan, sehingga membantu menurunkan biaya tagihan listrik bulanan serta memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan bagi pemiliknya. Berikut skema sistem *on-grid* seperti terlihat pada gambar 2.18 di bawah ini:



Gambar 2.18 Skema Sistem *On-Grid*

### 2.4.3 Sistem PLTS *Hybrid*

Sistem *hybrid* adalah kombinasi antara sistem *off-grid* dan *on-grid*, di mana proses pembangkitan energinya serupa dengan sistem *on-grid*, namun tetap dilengkapi dengan baterai sebagai media penyimpanan daya. Kehadiran baterai ini memungkinkan sistem untuk terus beroperasi dan menyediakan cadangan pasokan listrik ketika terjadi pemadaman. Secara umum, istilah *hybrid* digunakan untuk menggambarkan sistem yang memanfaatkan dua atau lebih sumber energi, seperti tenaga surya, angin, atau genset. Skema dari sistem *hybrid* dapat dilihat pada gambar berikut 2.19 di bawah ini:



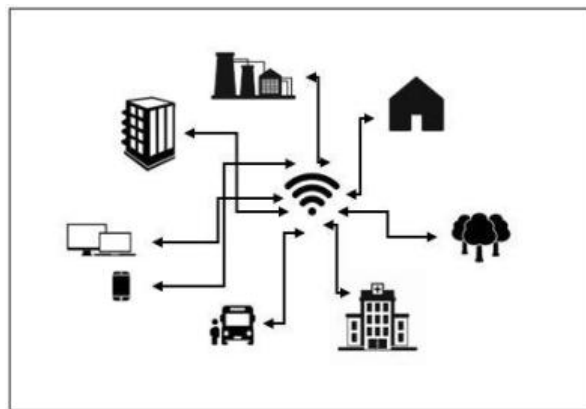
Gambar 2.19 Skema Sistem *Hybrid*

## 2.5 Internet Of Things (IoT)

Menurut Prof. Widjojo Adi Prakoso, Guru Besar Fakultas Teknik Universitas Indonesia dalam (Budiyanto et al.2021), istilah *things* pada konsep *internet of things* (IoT) merujuk pada berbagai benda yang mampu terhubung ke jaringan internet maupun

perangkat lain, baik melalui koneksi kabel maupun nirkabel seperti satelit, jaringan seluler, *wi-fi*, dan *bluetooth*.

Secara prinsip, IoT merupakan pemanfaatan teknologi internet untuk menciptakan sistem cerdas (*smart system*) yang memungkinkan suatu objek atau perangkat berinteraksi dengan objek atau perangkat lainnya. Melalui konektivitas ini, setiap perangkat dapat saling mengenali, berkomunikasi, serta melakukan pertukaran data dan informasi secara otomatis dan terintegrasi. [15]



Gambar 2.20 Konsep Dasar *Internet Of Things (IoT)*

Adapun fungsi dasar dari Internet of Things adalah :

1. *Tagging* yaitu merupakan proses pemberian identitas atau label pada data yang telah dikumpulkan sebelumnya. Tahapan ini bertujuan untuk memudahkan proses pengelompokan, pengorganisasian, dan pencarian data di tahap berikutnya.
2. *Monitoring* adalah kegiatan pemantauan secara berkala terhadap seluruh aktivitas sistem, guna memastikan tidak terdapat aktivitas mencurigakan atau tidak dikenal setelah proses pelabelan (*tagging*) dilakukan.
3. *Tracking* adalah tahapan ini mencakup proses pelacakan posisi atau keberadaan data, baik dalam sistem maupun jaringan, agar pergerakan data dapat diketahui dan dikendalikan dengan baik.

4. *Control* adalah tindakan pengendalian terhadap kondisi tertentu melalui mekanisme pengaturan atau otomatisasi sistem, dengan tujuan menjaga agar sistem tetap beroperasi sesuai parameter yang diinginkan.
5. Analisis adalah tahap ini dilakukan dengan cara mengolah dan menafsirkan data yang telah diperoleh untuk menemukan solusi atas suatu permasalahan, serta memberikan umpan balik atau informasi tambahan bagi pengguna.

Dengan segala keunggulan dan kecanggihan yang dimiliki oleh Internet of Things besar manfaat yang dapat dirasakan oleh penggunanya yaitu :

1. Efisiensi

Penerapan teknologi Internet of Things (IoT) mampu meningkatkan efisiensi kerja dengan cara menyederhanakan proses yang sebelumnya membutuhkan waktu dan tenaga lebih besar. Melalui sistem otomatisasi dan konektivitas antarperangkat, tugas-tugas yang kompleks dapat diselesaikan dengan lebih cepat, tepat, dan hemat sumber daya.

2. Efektivitas

Teknologi IoT memberikan kemampuan untuk melakukan pengendalian dan pemantauan dari jarak jauh secara real time. Sebagai contoh, pengguna dapat mengakses sistem keamanan rumah berupa CCTV melalui smartphone meskipun berada jauh dari lokasi, sehingga aktivitas dapat berlangsung lebih efektif tanpa harus hadir secara fisik.

3. Produktivitas

*Internet of Things* (IoT) dapat diintegrasikan sebagai sistem kendali dan pemantauan dalam organisasi atau perusahaan. Dengan dukungan sensor dan konektivitas data, pihak manajemen dapat memantau aktivitas, presensi, serta kinerja karyawan secara langsung. Hal ini berimplikasi pada peningkatan kualitas dan produktivitas kerja secara keseluruhan

#### 4. Keamanan

Dalam aspek keamanan, *internet of things* berperan penting sebagai sistem pemantauan dan deteksi dini. Implementasinya meliputi sistem keamanan rumah berbasis internet, proteksi data komputer, serta sistem peringatan dini terhadap potensi bahaya seperti kebakaran dan bencana alam, yang semuanya dapat diakses secara daring.

#### 5. Konektivitas

Salah satu karakteristik utama dari IoT adalah kemampuannya dalam membangun koneksi dan komunikasi antarperangkat. Dengan adanya konektivitas ini, berbagai perangkat dapat saling bertukar informasi dan bekerja secara sinkron, sehingga menciptakan sistem yang lebih responsif dan terintegrasi.

#### 6. Hemat

Pemanfaatan teknologi IoT juga berdampak pada efisiensi biaya operasional. Melalui sistem otomatisasi dan pengawasan jarak jauh, perusahaan dapat mengurangi kebutuhan tenaga kerja serta meminimalkan penggunaan sumber daya, sehingga menghasilkan penghematan finansial yang signifikan dalam jangka panjang.

#### 7. Fleksibel

*Internet of Things* memiliki fleksibilitas tinggi dalam mengikuti kemajuan teknologi, sehingga mampu beradaptasi dengan cepat terhadap berbagai perubahan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang.

#### 8. Visibilitas

Penerapan teknologi *internet of things* dalam aktivitas sehari-hari memungkinkan proses pengambilan keputusan terhadap suatu permasalahan menjadi lebih terpantau dengan baik dan menghasilkan solusi yang lebih tepat.

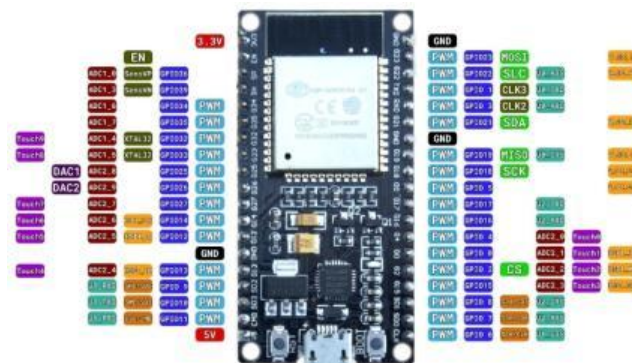


## 9. Akurat

Pemanfaatan *internet of things* dalam proses pengambilan keputusan membuat hasilnya lebih akurat, tepat, hati-hati, serta dapat mengurangi terjadinya kesalahan manusia.

### 2.6 Nodemcu ESP32

NodeMCU ESP32 merupakan mikrokontroler yang menawarkan fitur lebih lengkap dibandingkan Arduino maupun NodeMCU ESP8266. Modul ini memiliki jumlah pin dan port yang lebih banyak, sehingga mampu mendukung penggunaan berbagai perangkat dalam sebuah sistem yang membutuhkan banyak jalur koneksi. Selain itu, ESP32 dirancang dengan konsumsi daya rendah serta biaya yang efisien, dilengkapi dengan konektivitas WiFi berkecepatan tinggi dan Bluetooth Low Energy dengan dua mode operasi. Berkat integrasi fitur tersebut, pengguna tidak lagi memerlukan perangkat tambahan untuk koneksi, sehingga dapat menghemat biaya sekaligus meminimalkan kebutuhan ruang. Bentuk fisik serta spesifikasi NodeMCU ESP32 dapat dilihat pada Gambar 2.21. [16]



Gambar 2.21 NodeMCU ESP32

### 2.7 Sensor PZEM 0170

perangkat pengukur listrik yang dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler maupun komputer melalui antarmuka serial UART. Untuk pertukaran data, modul ini memanfaatkan protokol komunikasi Modbus RTU, yaitu standar komunikasi serial yang banyak digunakan dalam sistem kendali industri untuk mengirimkan maupun menerima

data secara andal. Pada proses komunikasi, modul PZEM-017 memiliki alamat slave bawaan (default address) yang digunakan sebagai identitas dalam jaringan Modbus. Data yang dibutuhkan, seperti informasi tegangan, arus, daya, ataupun energi, dapat diakses dengan cara mengirimkan instruksi tertentu sesuai format protokol Modbus RTU.

Dalam penerapannya, berbagai jenis mikrokontroler seperti Arduino, ESP8266, maupun ESP32 dapat digunakan untuk menghubungkan dan membaca data dari modul ini. Untuk mempermudah implementasi, telah tersedia library Modbus RTU yang mendukung banyak platform mikrokontroler, sehingga proses pemrograman menjadi lebih sederhana tanpa harus menulis protokol dari awal. Dengan kombinasi ini, PZEM-017 dapat digunakan secara efisien untuk keperluan monitoring energi listrik berbasis mikrokontroler. [17]

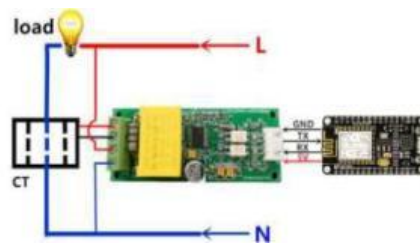


Gambar 2.22 Wiring PZEM 0170

## 2.8 Sensor PZEM 004T

PZEM-004T adalah modul sensor yang berfungsi untuk melakukan pengukuran parameter listrik AC seperti tegangan, arus, perbedaan fasa antara arus dan tegangan, serta frekuensi. Sensor ini digolongkan sebagai smart sensor karena mampu melakukan perhitungan langsung terhadap gelombang arus dan tegangan, sehingga output yang diberikan berupa nilai arus dan tegangan yang sudah terproses. Alat ini memiliki kemampuan pengukuran arus hingga 100A dengan rentang tegangan 80V sampai dengan 260V, resolusi pengukuran terkecil 0,02A, akurasi kelas 1 (sekitar 1%), serta frekuensi operasi 45 sampai dengan 65 Hz. Selain itu, sensor ini dilengkapi dengan memori

penyimpanan berbasis *electrically erasable programmable read-only memory* (EEPROM), yang memungkinkan data konsumsi daya disimpan pada beberapa alamat memori 16-bit dan dapat dihapus melalui komunikasi *universal asynchronous receiver/transmitter* (UART). Salah satu fitur penting lainnya adalah *over power alarm*, yaitu kemampuan memberikan peringatan atau perubahan pada alamat *register* ketika daya aktif yang terukur telah melampaui batas maksimum yang ditentukan pengguna.[18]



Gambar 2.23 Wiring PZEM 004T

Rangkaian pengkabelan PZEM-004T ke beban dilakukan dengan cara yang sama seperti pada proses pengukuran arus dan tegangan. Modul ini dilengkapi dengan dua pasang terminal, di mana masing-masing digunakan untuk menangkap sinyal *sinusoidal* dari tegangan dan dari arus. Sinyal tersebut kemudian diteruskan melalui *transduser* menuju *analog to digital converter* (ADC) internal yang ada pada sensor pintar ini. Setelah diubah menjadi data digital, informasi tersebut diproses lebih lanjut untuk memperoleh nilai *root mean square* (rms) arus maupun tegangan. Selain itu, PZEM-004T juga mampu mendeteksi sudut fasa serta frekuensi.

Dengan kemampuan tersebut, sensor ini dapat menghasilkan keluaran berupa daya aktif karena telah memiliki parameter rms dari arus, tegangan, serta beda fasa di antara keduanya. Untuk membaca data hasil perhitungan, diperlukan komunikasi melalui *universal asynchronous receiver/transmitter* (UART) dengan level logika *transistor-transistor logic* (TTL). NodeMCU menjadi salah satu perangkat yang mudah digunakan karena sudah mendukung UART TTL secara bawaan. Selain NodeMCU, PZEM-004T juga dapat dihubungkan dengan berbagai jenis mikrokontroler maupun komputer menggunakan jalur komunikasi USB atau RS-232 dengan bantuan konverter TTL ke USB atau TTL ke RS-232.

## 2.9 Solid State Relay

*Solid State Relay* (SSR) merupakan komponen saklar berbasis elektronik yang bekerja tanpa menggunakan komponen mekanis yang bergerak, berbeda dengan relay elektromekanis yang masih mengandalkan kontak fisik dalam proses kerjanya. SSR menjalankan fungsi yang setara dengan relai elektromekanis, namun kumparan dan kontakannya digantikan oleh komponen semikonduktor. Perangkat ini bekerja dengan prinsip *optocoupler*, sehingga bagian kontrol dan beban terisolasi secara optik. Karena tidak memiliki bagian bergerak/kontak, SSR tidak memicu percikan antar kontak dan tidak terjadi arcing meski arus beban tinggi.



Gambar 2.24 Modul *Solid State Relay*

*Solid State Relay* (SSR) merupakan perangkat yang dapat dibuat untuk mengendalikan arus baik AC maupun DC dengan memanfaatkan komponen seperti *thyristor*, *TRIAC*, atau transistor sebagai pengganti kontak mekanis tipe *normally open* (NO). Pada modul SSR biasanya telah ditambahkan rangkaian *zero-cross* serta *snubber circuit* guna meningkatkan keandalan dan perlindungan. Selain itu, modul ini juga memiliki sejumlah fitur bawaan yang mendukung kinerjanya sebagai berikut: [19]

- Tipe SSR: OMRON 1565E G3MB-202P
- Tegangan masukan: 5V DC (160MA)
- Arus beban maksimum : AC100A
- Tegangan sinyal kontrol input: 240 VAC 50/60Hz
- (*low level* 0-2.5V, *relay OFF*)
- (*high level* 3-5V, *relay ON*)

## 2.10 Ubec (*Universal Battery Eliminated Circuit*)

*Battery Eliminated Circuit* (BEC) atau *Universal Battery Eliminated Circuit* (UBEC) merupakan salah satu perangkat elektronika yang berfungsi sebagai penurun tegangan (*step-down converter*). Perangkat ini mampu mengubah tegangan input yang relatif tinggi, misalnya 6–23 VDC, menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah yaitu 5 V atau 6 VDC sesuai dengan kebutuhan. Pemilihan tegangan keluaran pada UBEC biasanya diatur melalui jumper yang terdapat pada unit. Gambar 2.25 menunjukkan komponen ubec.

BEC banyak digunakan pada perangkat *remote control* (RC) seperti pesawat maupun helikopter RC. Hal ini dikarenakan sejumlah komponen penting, seperti *receiver remote control*, *flight controller*, dan modul pendukung lainnya hanya membutuhkan suplai tegangan sebesar 5 V. Sementara itu, tegangan dari baterai bergantung pada jumlah sel yang dimiliki, misalnya 1 sel = 3,7 V, 2 sel = 7,4 V, dan 3 sel = 11,1 V, sehingga tidak dapat langsung digunakan tanpa adanya penyesuaian.

Dengan demikian, keberadaan BEC atau UBEC sangat penting untuk memastikan bahwa setiap komponen pada sistem RC maupun sistem elektronik lainnya menerima tegangan sesuai dengan spesifikasi yang dipersyaratkan. Selain itu, penggunaan BEC juga dapat meningkatkan efisiensi serta menjaga stabilitas sistem dengan mencegah terjadinya kerusakan akibat ketidaksesuaian tegangan input.[20]



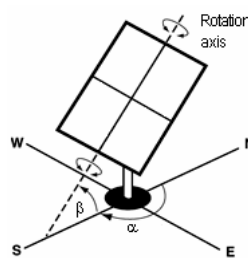
Gambar 2. 25 Ubec

### 2.11 Solar Tracker Single Axis

*Solar Tracker* adalah perangkat yang mengarahkan panel surya mengikuti pergerakan/posisi matahari. Penggunaan sistem pelacak matahari (*solar tracker*) dimaksudkan untuk memaksimalkan penerimaan energi dari cahaya matahari terhadap panel surya, tujuannya agar posisi panel surya selalu tegak lurus terhadap matahari, sehingga didapatkan daya maksimum sepanjang hari dari panel surya. [21]

Menurut Tudorache & Kreindler (2010), sistem *solar tracker* dapat dibedakan ke dalam beberapa jenis berdasarkan sejumlah kriteria. Klasifikasi awal dilakukan menurut jumlah sumbu putar, sehingga solar tracker terbagi menjadi satu sumbu dan dua sumbu. Mengingat keberadaan aktuator dan sistem kendali yang berbiaya relatif tinggi, *single axis solar tracker* dipandang sebagai opsi yang paling efisien untuk diaplikasikan pada panel surya berukuran kecil.. Pada umumnya, jenis ini memiliki pengaturan sudut elevasi secara manual pada sumbu tambahan, yang biasanya hanya disesuaikan dalam periode tertentu sepanjang tahun. [22]

Dalam penerapannya, sistem *solar tracker single axis* memanfaatkan rangka penopang panel surya yang digerakkan oleh motor listrik, sehingga posisi panel dapat terus mengikuti arah pergerakan matahari. Mekanisme ini membuat permukaan panel selalu berada pada orientasi optimal terhadap sinar matahari, seperti yang digambarkan pada ilustrasi Gambar 2. 26



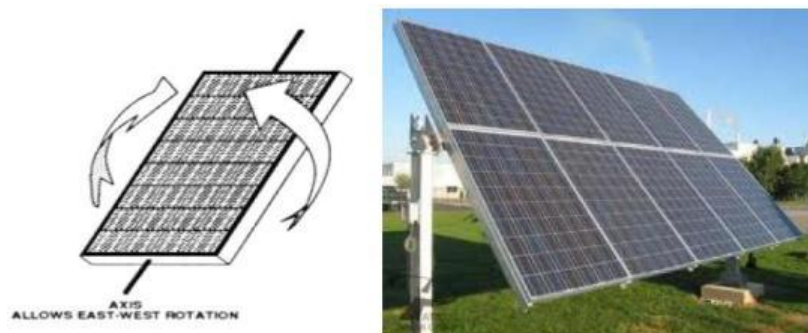
Gambar 2.26 Konsep *Solar Tracker Single Axis*

Sistem *solar tracker* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan arah orientasinya. Dari sudut pandang ini, terdapat dua kategori utama yaitu: pertama, sistem dengan orientasi panel surya yang mengikuti perhitungan lintasan matahari secara teoritis, dan

kedua, sistem dengan orientasi langsung (*online*) yang menyesuaikan posisi panel sesuai intensitas cahaya matahari yang diterimanya secara *real-time*.

Menurut Dhanabar R. & Bharathi V. (2013), sistem solar tracker satu sumbu dapat dibagi menjadi tiga jenis yaitu horizontal, vertikal, dan miring. Pada jenis horizontal, poros perputaran dipasang sejajar dengan tanah, sementara permukaan modul ditempatkan paralel terhadap sumbu tersebut. Untuk tipe vertikal, sumbu rotasi tegak lurus terhadap tanah, dan modul surya dipasang dengan sudut tertentu mengikuti sumbu rotasi. Sedangkan pada tipe miring, posisi poros berada di antara orientasi horizontal dan vertikal, dengan permukaan modul tetap paralel terhadap sumbu rotasi sebagaimana pada tipe horizontal.

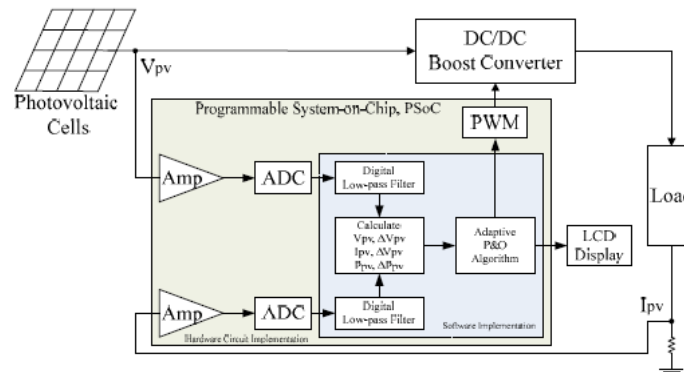
Sistem pelacak satu sumbu umumnya memanfaatkan dua buah sensor LDR (Light Dependent Resistor) yang dipasang di sisi panel surya. Perbedaan intensitas cahaya yang diterima kedua sensor akan menentukan arah gerakan panel. LDR yang terkena cahaya lebih banyak menghasilkan sinyal lebih kuat, kemudian diteruskan ke pengendali. Selanjutnya, pengendali menginstruksikan motor untuk memutar panel ke posisi yang sejajar dengan arah datangnya sinar matahari paling maksimal.



Gambar 2. 27 Sistem *Solar Tracker Single Axis* Berdasarkan Orientasi

Pada sistem ini, arah datangnya cahaya matahari dideteksi menggunakan sel surya itu sendiri sebagai sensor. Tegangan VPV dan arus keluaran IPV dari sel surya terlebih dahulu diperkuat hingga setara level masukan, lalu dikirim ke pengolah digital (menggunakan chip PSOC). Kedua sinyal tersebut kemudian diambil sampelnya oleh dua ADC 12-bit terpisah dan dikonversi menjadi data digital. Setelah itu, noise frekuensi tinggi disaring memakai filter digital IIR agar diperoleh sinyal asli VVP dan IVP. Data

ini selanjutnya diproses dengan algoritma perturbation *adaptive* yang menghasilkan *duty cycle* untuk PWM 16-bit guna menggerakkan motor DC.



Gambar 2.28 Susunan Model Sistem *Solar Tracker* Satu Sumbu

## 2.12 Motor Driver BTS 7960

BTS7960 merupakan modul jembatan-H arus tinggi yang telah terintegrasi penuh dan dirancang khusus untuk aplikasi pengendali motor. Modul ini menyediakan antarmuka yang sederhana dengan mikrokontroler karena dilengkapi IC *driver* internal yang mendukung input level logika, fitur penginderaan arus untuk keperluan diagnosis, pengaturan slew rate, pembangkitan dead time, serta perlindungan terhadap berbagai kondisi abnormal seperti suhu berlebih, tegangan lebih, tegangan kurang, arus lebih, hingga arus hubung singkat. Dengan spesifikasi tersebut, BTS7960 menjadi solusi yang efisien dan hemat biaya untuk sistem penggerak motor PWM arus tinggi yang membutuhkan proteksi, sekaligus hadir dalam ukuran modul yang relatif kecil.[23]

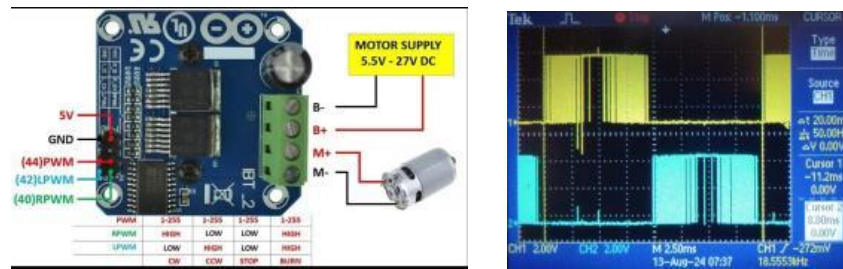
Dalam praktik penggunaannya, BTS7960 umumnya dihubungkan dengan konfigurasi pin R\_EN (pin-3) dan L\_EN (pin-4) yang selalu diaktifkan, sehingga proses pengendalian motor hanya dilakukan melalui sinyal masukan RPWM (pin-1) dan LPWM (pin-2). Berdasarkan datasheet yang diterbitkan oleh *Infineon Technologies AG* sebagai produsen IC ini, disajikan tabel kebenaran BTS7960 yang menunjukkan karakteristik kerjanya. Dari data tersebut dapat dipahami bahwa implementasi sketch dengan empat kanal, seperti yang digunakan pada *driver* motor lain, tidak dapat diterapkan pada BTS7960. Hal ini karena transistor pada bagian *High-Side Switch* (HSS) dan *Low-Side*



*Switch* (LSS) tidak dapat dikendalikan secara terpisah sebagaimana pada *driver* L298 atau EGS-002. HSS dan LSS bekerja sebagai pasangan komplemen, sehingga sinyal kendali yang digunakan harus bersifat saling melengkapi antara sisi kanan dan sisi kiri rangkaian jembatan-H. Dengan demikian, hanya terdapat dua input utama, masing-masing berupa kombinasi sinyal SPWM dengan sinyal dasar 50 Hz. Bentuk sinyal SPWM untuk BTS7960 terlihat pada gambar 2.29

Tabel 2.6 Kebenaran IC BTS 7960

| Device State                                  | Inputs |    | Outputs |     |    | Mode                                       |
|-----------------------------------------------|--------|----|---------|-----|----|--------------------------------------------|
|                                               | INH    | IN | HSS     | LSS | IS |                                            |
| Normal Operation                              | 0      | X  | OFF     | OFF | 0  | Stand by mode                              |
|                                               | 1      | 0  | OFF     | ON  | 0  | LSS active                                 |
|                                               | 1      | 1  | ON      | OFF | CS | HSS active                                 |
| Over Voltage (OV)                             | X      | X  | ON      | OFF | 1  | Shut down of LSS,<br>HSS active            |
|                                               |        |    |         |     |    | Error detected                             |
| Under Voltage (UV)                            | X      | X  | OFF     | OFF | 0  | UV lockout                                 |
| Overtemperatur or short circuit of HSS or LSS | 0      | X  | OFF     | OFF | 0  | Stand by mode,<br>reset of latch           |
|                                               | 1      | X  | OFF     | OFF | 1  | Shut down with<br>latch, error<br>detected |
| Current limitation mode                       | 1      | 1  | OFF     | ON  | 1  | Switched mode,<br>error detected           |
|                                               | 1      | 0  | ON      | OFF | 1  | Switched mode,<br>error detected           |

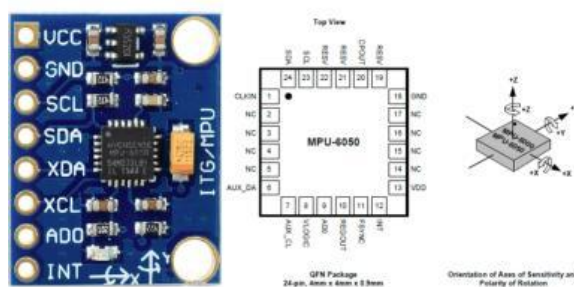


Gambar 2.29 Motor *Driver* BTS 7960 dan Bentuk Sinyal Kontrol SPWM

### 2.13 Sensor MPU6050

Modul sensor MPU6050 merupakan perangkat inersial yang menggabungkan fungsi *gyroscope* dan *accelerometer*. Sensor ini beroperasi dengan catu daya sebesar 3,3 VDC, yang dalam sistem ini dipasok melalui keluaran dari papan kontrol arduino nano. Prinsip kerjanya didasarkan pada teknologi MEMS (*Microelectromechanical Systems*) dengan menggunakan *capacitive sensor* sebagai elemen utama untuk mendeteksi orientasi atau posisi.

Sinyal kapasitif yang terbentuk akan melewati tahapan penguatan, pengkondisian sinyal, dan demodulasi hingga akhirnya dikonversi menjadi besaran listrik berupa tegangan. Tegangan analog tersebut kemudian diproses oleh *analog-to-digital converter* (ADC) 16-bit pada masing-masing sumbu *gyroscope* maupun *accelerometer*, sehingga menghasilkan sinyal digital yang dapat dibaca oleh sistem. Namun, dalam implementasi ini, data yang digunakan hanya berasal dari hasil pengukuran *accelerometer*. [24]



Gambar 2.30 Sensor MPU6050

Untuk komunikasi data maupun konfigurasi, MPU6050 memanfaatkan protokol *inter-integrated circuit* (I2C). Sensor ini juga menyediakan pengaturan skala pengukuran, di mana pada sistem yang digunakan ditetapkan rentang  $\pm 2g$ . Dengan demikian, nilai percepatan gravitasi yang terukur berada dalam kisaran  $-2g$  hingga  $+2g$ . Pada gambar

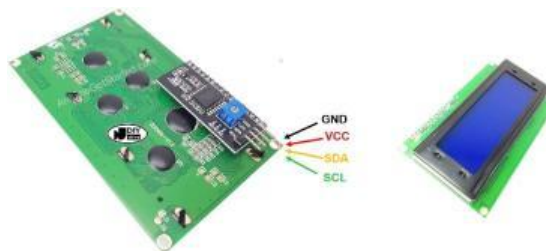
2.30 ditampilkan bentuk fisik dari modul sensor MPU6050, sementara pengaturan rentang skala ditunjukkan pada tabel 2.7.

Tabel 2.7 Rentang Skala Sensor MPU6050

| AFS_SEL | Rentang Skala<br>Penuh<br><i>Accelerometer</i> | Sensitivitas<br>LSB | Rentang<br>Skala Penuh<br><i>Gyroscope</i> | Sensitivitas<br>LSB |
|---------|------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| 0       | $\pm 2g$                                       | 16384 LSB/g         | $\pm 250$ o/s                              | 131 LSB/ o/s        |
| 1       | $\pm 4g$                                       | 8192 LSB/g          | $\pm 500$ o/s                              | 65.5 LSB/ o/s       |
| 2       | $\pm 8g$                                       | 4096 LSB/g          | $\pm 1000$ o/s                             | 32.6 LSB/ o/s       |
| 3       | $\pm 16g$                                      | 2048 LSB/g          | $\pm 2000$ o/s                             | 16.4 LSB/ o/s       |

## 2.14 LCD

*Liquid Crystal Display* (LCD) adalah perangkat penampil yang bekerja dengan memanfaatkan kristal cair sebagai elemen utama untuk menampilkan informasi. Teknologi LCD saat ini telah banyak diaplikasikan pada berbagai perangkat elektronik, seperti televisi, kalkulator, hingga layar komputer. Dalam penelitian ini digunakan LCD berukuran 20x4 karakter yang dilengkapi dengan chip modul I2C untuk memudahkan proses pemrograman. Penggunaan modul I2C memungkinkan efisiensi pada pemakaian pin Arduino, karena hanya membutuhkan empat pin saja, yaitu SCL, SDA, VCC, dan GND, sehingga lebih praktis dibandingkan dengan metode koneksi konvensional. [25]



Gambar 2.31 LCD 20x4 I2C

### 2.15 Aplikasi *Blynk*

*Blynk* merupakan sebuah aplikasi berbasis iOS dan android yang dirancang untuk mengendalikan perangkat mikrokontroler seperti arduino, nodemcu, raspberry pi, serta perangkat sejenis lainnya melalui jaringan internet. Dengan aplikasi ini, pengguna dapat melakukan berbagai fungsi antara lain mengontrol perangkat keras, menampilkan serta memantau data sensor, menyimpan data, hingga melakukan proses visualisasi secara *real-time*.

Sistem *blynk* terdiri atas tiga komponen utama yaitu aplikasi, *server*, dan *library*. Pada sistem ini, *blynk server* berperan penting dalam mengatur serta mengelola komunikasi antara smartphone dan perangkat keras yang digunakan. Sementara itu, *library blynk* membantu mikrokontroler agar dapat berinteraksi dengan *server* dan aplikasi secara lebih mudah.

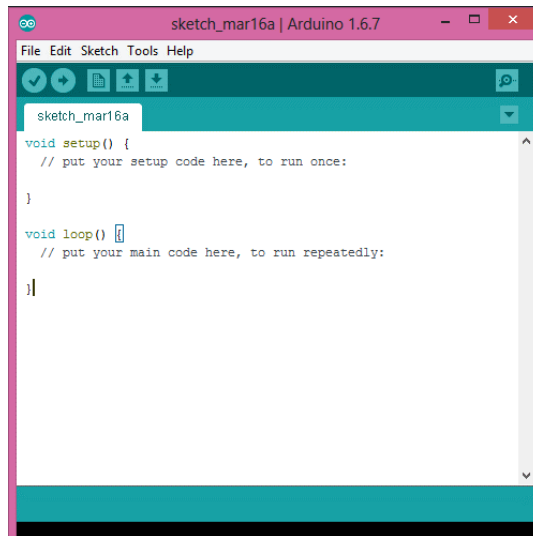
Aplikasi *blynk* juga menyediakan beragam *widget* yang memudahkan pengguna dalam membangun tampilan antarmuka sesuai kebutuhan seperti *button*, *value display*, *history graph*, *twitter*, hingga *email*. Keunggulan lainnya adalah *blynk* tidak terbatas pada satu jenis mikrokontroler tertentu, namun tetap memerlukan dukungan dari perangkat keras yang sesuai. Sebagai contoh, pada NodeMCU yang berbasis chip ESP8266 atau ESP32, koneksi internet dapat dilakukan melalui jaringan *wifi*, sehingga perangkat dapat terhubung dengan *blynk* dan berfungsi secara online. Dengan cara ini, *blynk* menjadi solusi praktis untuk mengembangkan berbagai aplikasi *Internet of Things* (IoT). [6]

### 2.16 Arduino IDE

Arduino IDE merupakan software utama yang berfungsi sebagai media pemrograman papan Arduino melalui komputer. Kata IDE sendiri merupakan akronim dari *Integrated Development Environment*, yang berarti sebuah lingkungan pengembangan terintegrasi. Dalam hal ini, Arduino IDE menyediakan fasilitas lengkap mulai dari penulisan kode program, kompilasi, hingga proses unggah (*upload*) ke mikrokontroler.

Perangkat lunak ini dibangun menggunakan bahasa pemrograman *Java*, dengan dukungan pustaka (*library*) berbasis C/C++ yang mempermudah pengguna dalam mengakses fungsi dasar arduino seperti pengendalian *input*, *output*, maupun komunikasi

antar perangkat. Keberadaan library tersebut menjadikan pemrograman lebih praktis karena banyak fungsi sudah tersedia dan siap dipakai.

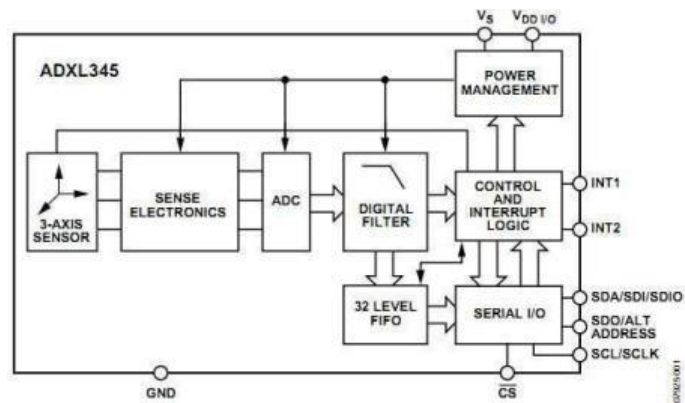


Gambar 2.32 Program Arduino IDE

Pada papan Arduino, terdapat IC mikrokontroler yang dilengkapi dengan *bootloader*. Bootloader ini berfungsi sebagai penghubung atau penerjemah antara komputer dengan mikrokontroler, sehingga program yang ditulis di Arduino IDE dapat dikompilasi dan dimengerti oleh perangkat keras. Hal ini penting karena mikrokontroler secara langsung tidak dapat memahami bahasa pemrograman tingkat tinggi. Oleh sebab itu, diperlukan *compiler* untuk mengubah kode program yang ditulis manusia menjadi instruksi biner (*machine code*) yang bisa dipahami dan dieksekusi oleh mikrokontroler. [26]

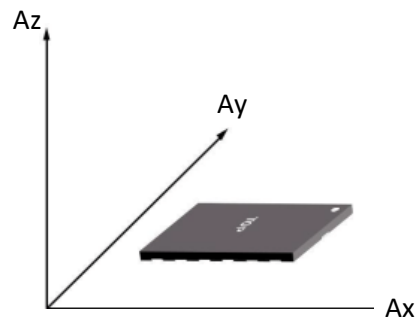
### 2.17 Sensor Accelerometer ADXL 345

Sensor percepatan yang mampu mengukur percepatan linier dalam tiga sumbu (x, y dan z). Sensor ini memiliki resolusi tinggi (hingga 13-bit) pada sensitivitas tertingginya. ADXL345 memiliki pilihan range pengukuran dari  $\pm 2g$  hingga  $\pm 16g$ , dimana  $1g$  merupakan satu satuan percepatan rata-rata gravitasi bumi yaitu sebesar  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Gambar 2.33 merupakan blok diagram ADXL 345 :

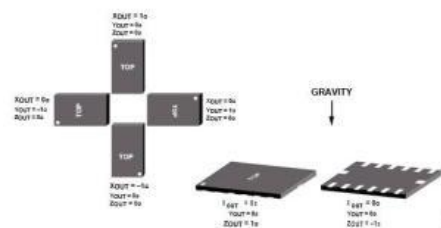


Gambar 2.33 Diagram Blok Accelerometer ADXL345

Dari diagram blok ADXL345 diketahui bahwa dalam *accelerometer* ADXL345 sudah terdapat ADC dan digital filter sehingga ADXL345 merupakan sensor percepatan yang menggunakan antarmuka digital yaitu dengan komunikasi I2C atau SPI. Dalam penelitian ini menggunakan antarmuka I2C sebagai sarana komunikasinya. Berikut ini akan dijelaskan mengenai sistematika kerja ADXL345, termasuk diantaranya orientasi terhadap sumbu kartesian, konfigurasi pin, serta karakteristik dan spesifikasi ADXL345.

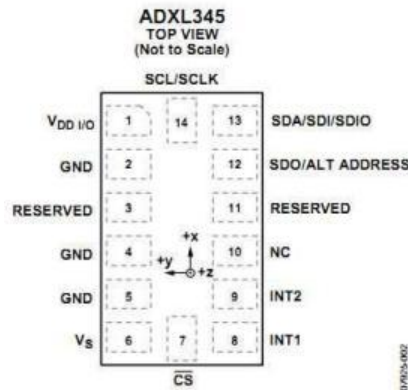


Gambar 2.34 Sensitivitas Akselerasi Tiap Sumbu



Gambar 2.35 Respon Output Dan Orientasi Terhadap Gravitasi Sensor Accelerometer

Dari kedua gambar di atas, kita dapat mengetahui orientasi dan juga karakteristik output ADXL345 terhadap ketiga sumbu (x, y dan z) sehingga dapat dijadikan acuan pada penelitian ini. Saat posisi salah satu sumbu bertolak belakang dengan arah gaya gravitasi, maka output sumbu itu akan sekitar  $\pm 1g$  atau setara  $\pm 9,8 \text{ m/s}^2$ .



Gambar 2. 36 Konfigurasi Pin Accelerometer ADXL345

| Parameter                            | Kondisi Pengujian             | Min     | Typ       | Max      | Satuan                |
|--------------------------------------|-------------------------------|---------|-----------|----------|-----------------------|
| Jangkauan pengukuran                 | Dipilih oleh user             | $\pm 2$ |           | $\pm 16$ | G                     |
| Ketidaklinieran                      | Persentase pada full Scale    |         | $\pm 0.5$ |          | %                     |
| Resolusi sensor                      | $\pm 2g$ , full resolution    |         | 10        |          | Bits                  |
|                                      | $\pm 4g$ , full resolution    |         | 11        |          | Bits                  |
|                                      | $\pm 8g$ , full resolution    |         | 12        |          | Bits                  |
|                                      | $\pm 16g$ , full resolution   |         | 13        |          | Bits                  |
| Sensitivitas                         | $\pm 2g$ , 10-bit Resolution  | 230     | 256       | 282      | LSB/g                 |
|                                      | $\pm 4g$ , 10-bit Resolution  | 115     | 128       | 141      | LSB/g                 |
|                                      | $\pm 8g$ , 10-bit Resolution  | 57      | 64        | 71       | LSB/g                 |
|                                      | $\pm 16g$ , 10-bit Resolution | 29      | 32        | 35       | LSB/g                 |
| Output data rate (ODR)               | Dipilih oleh user             | 0,1     |           | 3200     | Hz                    |
| Tegangan operasi                     |                               | 2       | 2,5       | 3,6      | V                     |
|                                      |                               |         |           |          |                       |
| Arus catu                            | $ODR \geq 100\text{Hz}$       |         | 140       |          | $\mu\text{A}$         |
|                                      | $ODR < 10\text{Hz}$           |         | 30        |          | $\mu\text{A}$         |
| Perubahan Sensitivitas terhadap suhu |                               |         | 0,01      |          | $\%/^{\circ}\text{C}$ |
| Suhu pengoperasian                   |                               | -40     |           | 85       | $^{\circ}\text{C}$    |

Gambar 2. 37 Spesifikasi Accelerometer ADXL345

Sensitivitas adalah salah satu faktor yang harus diperhatikan, karena akan sangat menentukan respon dari sistem itu sendiri. Pada saat dioperasikan pada range terendah yaitu  $\pm 2g$ , sensitivitas dari *accelerometer* ADXL345 ini adalah sebesar 256 LSB/g yang berarti percepatan 1 gravitasi sebanding dengan keluaran data sebesar 256. Sedangkan apabila dioperasikan pada *range* tertinggi yaitu  $\pm 16g$ , sensitivitas *accelerometer* ADXL345 ini berkurang hingga menjadi 32 LSB/g.