

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mobil Listrik

Mobil listrik adalah mobil yang digerakkan dengan motor listrik DC, menggunakan energi listrik yang disimpan dalam baterai atau tempat penyimpanan energi (*Wikipedia.org*). Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan mobil berbahan bakar BBM secara umum. Hal yang paling utama adalah mobil listrik tidak menghasilkan polusi udara, selain itu mobil listrik juga mengurangi efek rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya.

2.1.1 Sejarah Mobil Listrik

Mobil listrik populer pada pertengahan abad ke-19 dan awal abad ke-20, ketika listrik masih dipilih sebagai penggerak utama pada kendaraan. Hal ini disebabkan karena mobil listrik menawarkan kenyamanan dan pengoperasian yang mudah dan tidak dapat dicapai oleh kendaraan-kendaraan berbahan bakar bensin. Perkembangan teknologi dalam pembakaran yang semakin maju, terutama di *Power* yang mengurangi popularitas mobil listrik. Hal ini ditambah dengan kemampuan mobil bensin dapat menempuh jarak yang lebih jauh, pengisian bensin yang lebih cepat, dan infrastruktur pengisian semakin bertambah, ditambah dengan sistem produksi massal yang diterapkan oleh *Ford Motor Company*, membuat harga mobil bensin turun drastis sampai setengah harga mobil listrik. Mobil listrik juga menjadi semakin tidak populer, dan secara total menghilang, terutama di pasar ilegal seperti Amerika Serikat, pada tahun 1930-an. tetapi pada tahun sekarang ini, semakin banyak orang yang sadar akan dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh mobil berbahan bakar bensin, ditambah harga bensin yang mahal dan terus naik, membuat mobil listrik kembali diminati. Mobil listrik jauh lebih ramah lingkungan dari mobil bensin, biaya perawatan lebih murah, ditambah teknologi baterai yang semakin maju. Kekurangannya adalah harga mobil listrik saat ini masih belum terjangkau dalam kalangan menengah kebawah. Mobil listrik



saat ini mulai mendapatkan lagi popularitasnya di beberapa negara di dunia setelah sekian lama menghilang.



Gambar 2.1 Mobil listrik pada tahun 1913

(sumber : http://wikipedia.org/wiki/Mobil_Listrik, diakses terakhir tanggal 15 Juni 2016)

2.1.2 Perkembangan Mobil Listrik

Krisis energi pada tahun 1970-an dan 1980-an menimbulkan kembalinya minat masyarakat akan mobil listrik. Pada awal 1990-an, *California Air Resources Board* (CARB) mulai menekan para pabrikan otomotif untuk mulai membuat mobil yang efisien dalam bahan bakar, rendah emisi, dengan tujuan akhirnya adalah membuat kendaraan emisi nol seperti kendaraan listrik. Sebagai respon, beberapa pabrikan mencoba membuat mobil listrik mereka masing-masing, seperti Chrysler TEVan, truk Pick Up Ford Ranger EV, GM EV1, pikap S10 EV, Hatchback Honda EV Plus, Miniwagon Altra EV, dan Toyota RAV4 EV. Mobil-mobil ini akhirnya ditarik peredarannya di pasar Amerika Serikat.

Resesi ekonomi global pada akhir tahun 2000-an membuat banyak produsen otomotif dunia meninggalkan mobil-mobil SUV yang besar dan boros, dan beralih ke mobil-mobil kecil, hibrida, dan mobil listrik. Perusahaan otomotif asal California, *Tesla Motors*, memulai pengembangan *Tesla Roadster* pada tahun 2004, dan kemudian diluncurkan ke publik pada tahun 2008. Sampai bulan Januari 2011, Tesla telah berhasil menjual 1.500 *Unit Roadster* di 31 negara. Mitsubishi i Miev diluncurkan untuk penggunaan armada di Jepang bulan Juli



2009, dan mulai dijual pada perseorangan pada bulan April 2010. I Miev mulai dijual di Hong Kong bulan Mei 2010, dan Australia mulai Juli 2010.

Penjualan Nissan Leaf di Jepang dan Amerika Serikat dimulai pada bulan Desember 2010, meskipun di awal peluncurannya hanya tersedia di beberapa kawasan saja dengan jumlah yang terbatas pula. Sampai bulan September 2011, mobil-mobil listrik yang dijual di pasaran adalah REVAi, Buddy, Citroën C1 ev'ie, Transit Connect Electric, Mercedes-Benz Vito E-Cell, Smart ED, dan Wheego Whip LiFe.

Sampai pada awal tahun 2012, jumlah kendaraan listrik yang diproduksi massal yang tersedia di dunia masih terbatas. Kebanyakan mobil listrik yang tersedia saat ini adalah kendaraan listrik jarak dekat (*Neighborhood Electric Vehicle*, NEV). *Pike Research* mengestimasi ada sekitar 479.000 NEV di dunia saat ini kendaraan NEV yang paling laris adalah *Global Electric Motorcars* (GEM), yang sampai bulan Desember 2010 telah terjual lebih dari 45.000 unit sejak pertama dijual tahun 1998.

Indonesia tidak ketinggalan mengambil bagian dalam memproduksi mobil listrik. Walaupun masih berupa purwarupa, mobil listrik buatan anak bangsa cukup menjanjikan. Saat ini telah ada 2 model yang diketahui, yaitu Mobil listrik Ahmadi dan Tucuxi. Pada tanggal 20 Mei 2013 dilakukan diuji coba bus listrik untuk APEC 2013 Oktober. Sampai sekarang bus listrik tersebut melayani transportasi publik di Yogya. Tanggal 6 Mei 2014 ITS menorehkan rekor mobil listrik untuk dalam negeri dengan rincian jarak tempuh total 800 km, kecepatan rata-rata 120-130 km/jam serta setiap 8 jam dilakukan pengisian ulang selama 3 jam. Rute yang ditempuh adalah Jakarta–Bandung–Tasikmalaya–Purwokerto–Jogjakarta–Madiun–Surabaya.

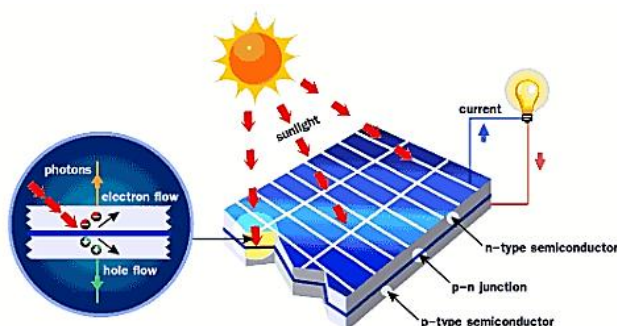


Gambar 2.2 Mobil Listrik PT. PINDAD sebagai pengujian Motor Listrik
(sumber : Dr. Agus Purwadi, *Penelitian dan Pengembangan Mobil Listrik Nasional 2014*)

2.2 Solar Cell

2.2.1 Pengertian Solar Cell (Photovoltaic)

Solar Cell atau panel surya adalah komponen elektronika dengan mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. *Photovoltaic* (PV) adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak *Solar Cell* yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek *Photovoltaic*. *Solar Cell* mulai populer akhir-akhir ini, selain mulai menipisnya cadangan energi fosil dan isu *Global Warming*. Energi yang dihasilkan juga sangat murah karena sumber energi (matahari) bisa didapatkan secara gratis. Skema *Solar Cell* dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Solar Cell

(Sumber : <http://solarsuryaindonesia.com/tenaga-surya>, diakses terakhir tanggal 15 Juni 2016)



2.2.2 Karakteristik *Solar Cell* (*Photovoltaic*)

Solar Cell pada umumnya memiliki ketebalan 0.3 mm, yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub (+) dan kutub (-). Apabila suatu cahaya jatuh pada permukaannya maka pada kedua kutubnya timbul perbedaan tegangan yang tentunya dapat menyalakan lampu, menggerakkan motor listrik yang berdaya DC. Untuk mendapatkan daya yang lebih besar bisa menghubungkan *Solar Cell* secara seri atau paralel tergantung sifat penggunaannya. Prinsip dasar pembuatan *Solar Cell* adalah memanfaatkan efek *Photovoltaic* yakni suatu efek yang dapat merubah langsung cahaya matahari menjadi energi listrik.

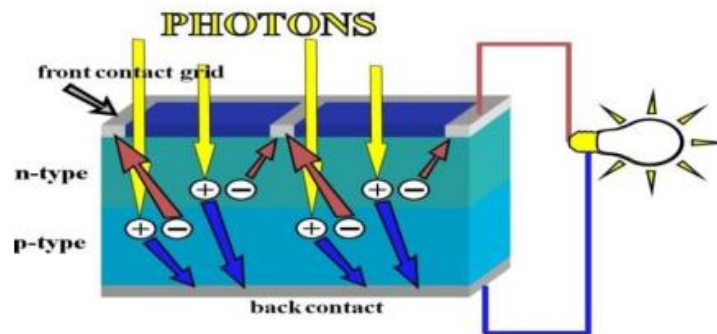
Spesifikasi keseluruhan dari *Solar Cell* yang digunakan adalah:

- Kekuatan daya maksimal : 50 Watt
- Kekuatan arus yang mengalir maksimal : 3.4 Ampere
- Kekuatan tegangan yang mengalir maksimal : 21.4 Volt
- Berat secara fisik : 1.8 Kg
- Ukuran fisik : 130 X 33 X 3 CM
- Tegangan maximum dalam sistem : 600 V
- Kondisi keseluruhan : SM =50
- $E = 1000 \text{ W/m}^2$
- $T_c = 25^{\circ}\text{C}$

(Sumber: Data Sheet Model Photovoltaic Module Siemens. USA)

2.2.3 Prinsip Dasar Teknologi *Solar Cell* (*Photovoltaic*) Dari Bahan Silikon

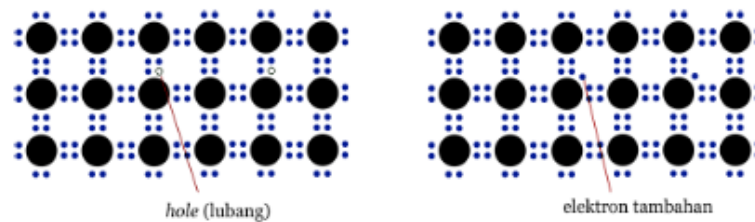
Solar Cell merupakan suatu perangkat semi konduktor yang dapat menghasilkan listrik jika diberikan sejumlah energi cahaya. Proses penghasilan energi listrik terjadi jika pemutusan ikatan elektron pada atom-atom yang tersusun dalam kristal semikonduktor ketika diberikan sejumlah energi. Salah satu bahan semikonduktor yang biasa digunakan sebagai *Solar Cell* adalah kristal *Silicon* (Ady Iswanto : 2008).



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Solar Cell

(Sumber : Ady Iswanto, Staf Divisi Riset 102FM ITB, 2008)

2.2.3.1 Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N



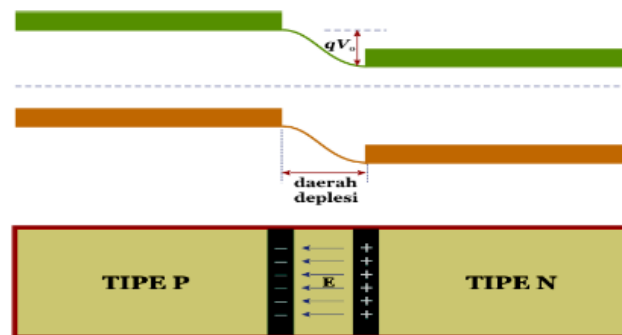
Gambar 2.5 Semikonduktor Tipe-P (Kiri) dan Tipe-N (Kanan)

(Sumber : Ady Iswanto, Staf Divisi Riset 102FM ITB, 2008)

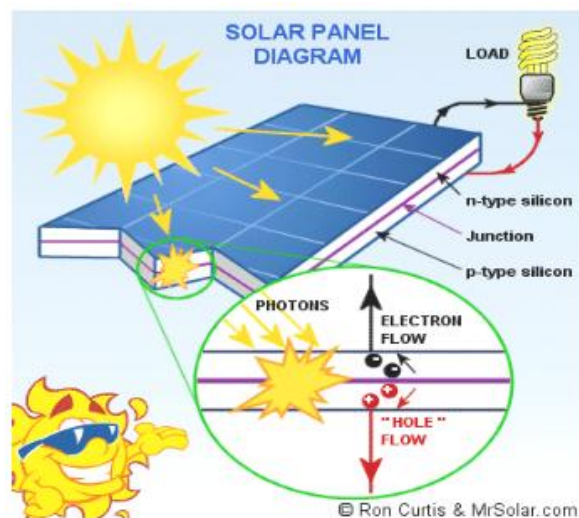
Ketika suatu kristal Silicon ditambahkan dengan unsur golongan kelima, misalnya arsen, maka atom-atom arsen itu akan menempati ruang diantara atom-atom silikon yang mengakibatkan munculnya elektron bebas pada material campuran tersebut. Elektron bebas tersebut berasal dari kelebihan elektron yang dimiliki oleh arsen terhadap lingkungan sekitarnya, dalam hal ini adalah *Silicon*. Semikonduktor jenis ini kemudian diberi nama semikonduktor tipe-n. Hal yang sebaliknya terjadi jika kristal *Silicon* ditambahkan oleh unsur golongan ketiga, misalnya boron, maka kurangnya elektron valensi boron dibandingkan dengan *Silicon* mengakibatkan munculnya *Hole* yang bermuatan positif pada semikonduktor tersebut. Semikonduktor ini dinamakan semikonduktor tipe-p. Adanya tambahan pembawa muatan tersebut mengakibatkan semikonduktor ini

akan lebih banyak menghasilkan pembawa muatan ketika diberikan sejumlah energi tertentu, baik pada semikonduktor tipe-n maupun tipe-p.

2.2.3.2 Sambungan P-N



Gambar 2.6 Diagram Energi Sambungan P-N Munculnya Daerah Deplesi
(Sumber : Ady Iswanto, Staf Divisi Riset 102FM ITB, 2008)



Gambar 2.7 Struktur *Solar Cell* Silikon p-n Junction.

(Sumber : http://solarcell.com.jpg/struktur_solar_cell, Diakses: 23-02-2015. Jam: 14:00 WIB)

Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n disambungkan maka akan terjadi difusi *hole* dari tipe-p menuju tipe-n dan difusi elektron dari tipe-n menuju tipe-p. Difusi tersebut akan meninggalkan daerah yang lebih positif pada batas tipe-n dan daerah lebih negatif pada batas tipe-p. Adanya perbedaan muatan pada sambungan p-n disebut dengan daerah deplesi akan mengakibatkan munculnya medan listrik yang mampu menghentikan laju difusi selanjutnya. Medan listrik tersebut



mengakibatkan munculnya arus *Drift*. Arus *Drift* yaitu arus yang dihasilkan karena kemunculan medan listrik. Namun arus ini terimbangi oleh arus difusi sehingga secara keseluruhan tidak ada arus listrik yang mengalir pada semikonduktor sambungan p-n tersebut (*Ady Iswanto : 2008*).

Sebagaimana yang kita ketahui bersama, elektron adalah partikel bermuatan yang mampu dipengaruhi oleh medan listrik. kehadiran medan listrik pada elektron dapat mengakibatkan electron bergerak. Hal inilah yang dilakukan pada *Solar Cell* sambungan p-n, yaitu dengan menghasilkan medan listrik pada sambungan p-n agar elektron dapat mengalir akibat kehadiran medan listrik tersebut. Ketika *Junction* disinari, *Proton* yang mempunyai elektron sama atau lebih besar dari lebar pita elektron tersebut akan menyebabkan eksitasi elektron dari pita valensi ke pita konduksi dan akan meninggalkan *Hole* pada pita valensi. Elektron dan *Hole* ini dapat bergerak dalam material sehingga menghasilkan pasangan elektron *Hole*.

Apabila ditempatkan hambatan pada terminal *Solar Cell*, maka elektron dari area-n akan kembali ke area-p sehingga menyebabkan perbedaan potensial dan arus akan mengalir.

2.2.4 Prinsip Dasar Solar Cell (*Photovoltaic*) Dari Bahan Tembaga

Photovoltaic berdasarkan bentuk dibagi dua, yaitu *Photovoltaic* padat dan *Photovoltaic* cair. *Photovoltaic* cair prinsip kerjanya hampir sama dengan prinsip elektrolisis, namun perbedaannya tidak adanya reaksi oksidasi dan reduksi secara bersamaan (redoks) yang terjadi melainkan terjadinya pelepasan elektron saat terjadi penyinaran oleh cahaya matahari dari pita valensi (keadaan dasar) ke pita konduksi (keadaan elektron bebas) yang mengakibatkan terjadinya perbedaan potensial dan akhirnya menimbulkan arus. Pada *Solar Cell* cair dari bahan tembaga terdapat dua buah tembaga yaitu tembaga konduktor dan tembaga semikonduktor. Tembaga semikonduktor akan menghasilkan muatan elektron negatif jika terkena cahaya matahari, sedangkan tembaga konduktor akan menghasilkan muatan elektron positif. Karena adanya perbedaan potensial akhirnya akan menimbulkan arus.



2.2.5 Sistem Instalasi Solar Cell

2.2.5.1 Rangkaian Seri Solar Cell

Hubungan seri suatu *Solar Cell* didapat apabila bagian depan (+) *Solar Cell* utama dihubungkan dengan bagian belakang (-) *Solar Cell* kedua (*Owen Bishop : 2004*). Hubungan seri dari *Solar Cell* dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan Seri

(Sumber : Ady Iswanto, Staf Divisi Riset 102FM ITB, 2008)

Tegangan *Solar Cell* dijumlahkan apabila dihubungkan seri satu sama lain.

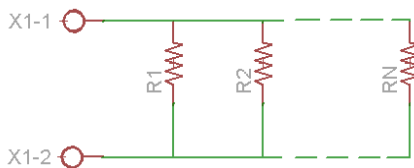
$$U_{total} = U_1 + U_2 + U_3 + U_n \dots \dots \dots (1)$$

Arus *Solar Cell* sama apabila dihubungkan seri satu sama lain.

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = I_n \dots \dots \dots (2)$$

2.2.5.2 Rangkaian Paralel Solar Cell

Rangkaian paralel *Solar Cell* didapat terminal kutub positif dan kutub negatif *Solar Cell* dihubungkan satu sama lain (*Owen Bishop : 2004*). Hubungan paralel *Solar Cell* dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Hubungan Paralel

(Sumber : Ady Iswanto, Staf Divisi Riset 102FM ITB, 2008)

Tegangan *Solar Cell* yang dihubungkan *Parallel* sama dengan satu solar cell.

$$U_{total} = U_1 = U_2 = U_3 = U_n \dots \dots \dots (3)$$

Arus yang timbul dari hubungan ini langsung dijumlahkan.

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + I_n \dots \dots \dots (4)$$



2.3 Accu

Accumulator atau sering disebut *Accu*, adalah salah satu komponen utama dalam kendaraan bermotor, baik mobil atau motor, semua memerlukan *Accu* untuk dapat menghidupkan mesin mobil (mencatu arus pada dinamo stater kendaraan). *Accu* mampu mengubah tenaga kimia menjadi tenaga listrik. Di pasaran saat ini sangat beragam jumlah dan jenis *Accu* yang dapat ditemui. *Accu* untuk mobil biasanya mempunyai tegangan sebesar 12 Volt, sedangkan untuk motor ada tiga jenis tegangan.

12 Volt, 9 volt dan ada juga yang bertegangan 6 Volt. Selain itu juga dapat ditemukan pula *Accu* yang khusus untuk menyalakan *Tape* atau radio dengan tegangan juga yang dapat diatur dengan rentang 3, 6, 9, dan 12 Volt. Tentu saja *Accu* jenis ini dapat dimuati kembali (*Recharge*) apabila muatannya telah berkurang atau habis. Dikenal dua jenis elemen yang merupakan sumber arus searah (DC) dari proses kimiawi, yaitu elemen primer dan elemen sekunder. Elemen primer terdiri dari elemen basah dan elemen kering. Reaksi kimia pada elemen primer yang menyebabkan elektron mengalir dari elektroda negatif (*Katoda*) ke elektroda positif (*Anoda*) tidak dapat dibalik arahnya. Maka jika muatannya habis, maka elemen primer tidak dapat dimuati kembali dan memerlukan penggantian bahan pereaksinya (elemen kering). Sehingga dilihat dari sisi ekonomis elemen primer dapat dikatakan cukup boros. Contoh elemen primer adalah batu baterai (*Dry Cells*).

Allesandro Volta, seorang ilmuwan fisika mengetahui, gaya gerak listrik (ggl) dapat dibangkitkan dua logam yang berbeda dan dipisahkan larutan elektrolit. Volta mendapatkan pasangan logam tembaga (Cu) dan seng (Zn) dapat membangkitkan ggl yang lebih besar dibandingkan pasangan logam lainnya (kelak disebut elemen Volta). Hal ini menjadi prinsip dasar bagi pembuatan dan penggunaan elemen sekunder. Elemen sekunder harus diberi muatan terlebih dahulu sebelum digunakan, yaitu dengan cara mengalirkan arus listrik melaluinya (secara umum dikenal dengan istilah disetrum).

Akan tetapi, tidak seperti elemen primer, elemen sekunder dapat dimuati kembali berulang kali. Elemen sekunder ini lebih dikenal dengan *Accu*.



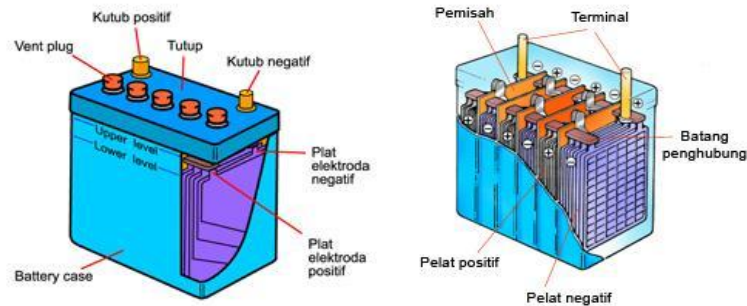
Dalam sebuah *Accu* berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (bolak-balik) dengan efisiensi yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel yaitu di dalam *Accu* saat dipakai berlangsung proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (*Discharging*). Sedangkan saat diisi atau dimuati, terjadi proses tenaga listrik menjadi tenaga kimia (*Charging*).

Jenis *Accu* yang umum digunakan adalah *Accumulator* timbal. Secara fisik *Accu* ini terdiri dari dua kumpulan pelat yang dimasukkan pada larutan asam sulfat encer (H_2SO_4). Larutan elektrolit itu ditempatkan pada wadah atau bejana *Accu* yang terbuat dari bahan ebonit atau gelas. Kedua belah pelat terbuat dari timbal (Pb), dan ketika pertama kali dimuati maka akan terbentuk lapisan timbal dioksida (PbO_2) pada pelat positif. Letak pelat positif dan negatif sangat berdekatan tetapi dibuat untuk tidak saling menyentuh dengan adanya lapisan pemisah yang berfungsi sebagai isolator (bahan penyekat).

2.3.1 Macam dan Cara Kerja *Accu*

Accu yang ada di pasaran ada 2 jenis yaitu *Accu* basah dan *Accu* kering. *Accu* basah media penyimpan arus listrik ini merupakan jenis paling umum digunakan. *Accu* jenis ini masih perlu diberi air *Accu* yang dikenal dengan sebutan *Accu Zuur*. Sedangkan *Accu* kering merupakan jenis *Accu* yang tidak memakai cairan, mirip seperti baterai telepon selular. *Accu* ini tahan terhadap getaran dan suhu rendah (gambar 2.10).

Dalam *Accu* terdapat elemen dan sel untuk penyimpan arus yang mengandung asam sulfat (H_2SO_4). Tiap sel berisikan pelat positif dan pelat negatif. Pada pelat positif terkandung oksid timbal coklat (PbO_2), sedangkan pelat negatif mengandung timbal (Pb). Pelat-pelat ditempatkan pada batang penghubung. Pemisah atau *Separator* menjadi isolasi diantara pelat itu, dibuat agar baterai acid mudah beredar disekeliling pelat. Bila ketiga unsur kimia ini berinteraksi, munculah arus listrik.



Gambar 2.10 Sel Accu

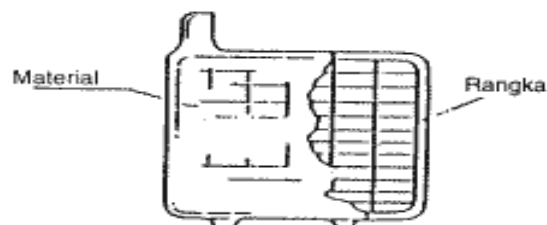
(Sumber: id.m.wikipedia.org/akumulator, diakses terakhir tanggal 16 Juni 2016)

Accu memiliki 2 kutub/terminal, kutub positif dan kutub negatif. Biasanya kutub positif (+) lebih besar dari kutub negatif (-), untuk menghindari kelalaian bila *Accu* hendak dihubungkan dengan kabel-kabelnya. Pada *Accu* terdapat batas minimum dan maksimum tinggi permukaan air *Accu* untuk masing-masing sel. Bila permukaan air *Accu* di bawah level minimum akan merusak fungsi sel *Accu*. Jika air *Accu* melebihi level maksimum, mengakibatkan air *Accu* menjadi panas dan meluap keluar melalui tutup sel.

2.3.2 Konstruksi *Accu*

1. Plat positif dan negatif

Plat positif dan plat negatif merupakan komponen utama suatu *Accu*. Kualitas plat sangat menentukan kualitas suatu *Accu*, plat-plat tersebut terdiri dari rangka yang terbuat dari paduan timbal antimon yang di isi dengan suatu bahan aktif. Bahan aktif pada plat positif adalah timbal peroksida yang berwarna coklat, sedang pada plat negatif adalah spons - timbal yang berwarna abu abu (gambar 2.11).

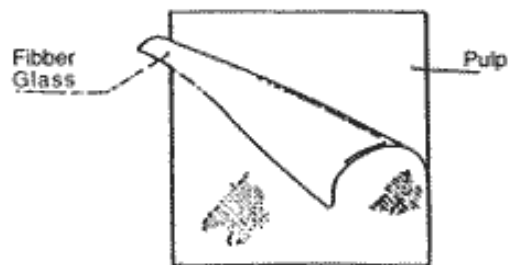
Gambar 2.11 Plat Sel *Accu*

(Sumber: Daryanto, bab 5 Pengetahuan Baterai Mobil, Bumi Aksara 2006)



2. Separator dan lapisan serat gelas

Antara plat positif dan plat negatif disisipkan lembaran separator yang terbuat dari serat *Cellulosa* yang diperkuat dengan resin. Lembaran lapisan serat gelas dipakai untuk melindungi bahan aktif dari plat positif, karena timbal peroksida mempunyai daya kohesi yang lebih rendah dan mudah rontok jika dibandingkan dengan bahan aktif dari plat negatif. Jadi fungsi lapisan serat gelas disini adalah untuk memperpanjang umur plat positif agar dapat mengimbangi plat negatif, selain itu lapisan serat gelas juga berfungsi melindungi separator (gambar 2.12).



Gambar 2.12 Lapisan Serat Gelas

(Sumber: Daryanto, bab 5 Pengetahuan Baterai Mobil, Bumi Aksara 2006)

3. Elektrolit

Cairan elektrolit yang dipakai untuk mengisi *Accu* adalah larutan encer asam sulfat yang tidak berwarna dan tidak berbau. Elektrolit ini cukup kuat untuk merusak pakaian. Untuk cairan pengisi *Accu* dipakai elektrolit dengan berat jenis 1.260 pada 20°C.

4. Penghubung antara sel dan terminal

Accu 12 volt mempunyai 6 sel, sedang *Accu* 6 volt mempunyai 3 sel. Sel merupakan unit dasar suatu *Accu* dengan tegangan sebesar 2 volt. Penghubung sel (*Connector*) menghubungkan sel sel secara seri. Penghubung sel ini terbuat dari paduan timbal antimon. Ada dua cara penghubung sel - sel tersebut. Yang pertama melalui atas dinding penyekat dan yang kedua melalui (menembus) dinding penyekat. Terminal terdapat pada kedua sel ujung (pinggir), satu bertanda positif (+) dan yang lain negatif (-). Melalui kedua terminal ini listrik dialirkan penghubung antara sel dan terminal.



5. Sumbat

Sumbat dipasang pada lubang untuk mengisi elektrolit pada tutup *Accu*, biasanya terbuat dari plastik. Sumbat pada *Accu* motor tidak mempunyai lubang udara. Gas yang terbentuk dalam *Accu* disalurkan melalui slang plastik/karet. Uap asam akan tertahan pada ruang kecil pada tutup *Accu*, kemudian asamnya dikembalikan ke dalam sel.

6. Perakatan bak dan tutup

Ada dua cara untuk menutup *Accu*, yang pertama menggunakan bahan perekat lem, dan yang kedua dengan bantuan panas (*Heat Sealing*). Pertama untuk bak *Polystyrene* sedang yang kedua untuk bak *Polipropylene*.

2.4 Mikrokontroler

Mikrokontroler adalah sebuah sistem komputer fungsional dalam sebuah chip. Di dalamnya terkandung sebuah inti prosesor, memori (sejumlah kecil RAM, memori program, atau keduanya), dan perlengkapan input output. Mikrokontroler merupakan komputer didalam chip yang digunakan untuk mengontrol peralatan elektronik, yang menekankan efisiensi dan efektifitas biaya. Secara harfiahnya bisa disebut “pengendali kecil” dimana sebuah sistem elektronik yang sebelumnya banyak memerlukan komponen-komponen pendukung seperti IC TTL dan CMOS dapat direduksi/diperkecil dan akhirnya terpusat serta dikendalikan oleh mikrokontroler ini.

Agar sebuah mikrokontroler dapat berfungsi, maka mikrokontroler tersebut memerlukan komponen eksternal yang kemudian disebut dengan sistem minimum. Untuk membuat sistem minimum paling tidak dibutuhkan sistem clock dan reset, walaupun pada beberapa mikrokontroler sudah menyediakan sistem clock internal, sehingga tanpa rangkaian eksternal pun mikrokontroler sudah beroperasi. Yang dimaksud dengan sistem minimum adalah sebuah rangkaian mikrokontroler yang sudah dapat digunakan untuk menjalankan sebuah aplikasi. Sebuah IC mikrokontroler tidak akan berarti bila hanya berdiri sendiri.



2.4.1 Mikrokontroler ATmega328

ATmega328 adalah mikrokontroler keluaran dari atmel yang mempunyai arsitektur RISC (Reduce Instruction Set Computer) yang dimana setiap proses eksekusi data lebih cepat dari pada arsitektur CISC (Completed Instruction Set Computer).

Mikrokontroler ini memiliki beberapa fitur antara lain :

- 130 macam instruksi yang hampir semuanya dieksekusi dalam satu siklus *clock*.
- 32 x 8-bit register serba guna.
- Kecepatan mencapai 16 MIPS dengan clock 16 MHz.
- 32 KB *Flash memory* dan pada arduino memiliki *bootloader* yang menggunakan 2 KB dari flash memori sebagai *bootloader*.
- Memiliki *EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memory)* sebesar 1KB sebagai tempat penyimpanan data semi permanent karena *EEPROM* tetap dapat menyimpan data meskipun catu daya dimatikan.
- Memiliki *SRAM (Static Random Access Memory)* sebesar 2KB.
- Memiliki pin I/O digital sebanyak 14 pin 6 diantaranya *PWM (Pulse Width Modulation)* output.
- *Master / Slave SPI Serial interface*.

Mikrokontroler ATmega 328 memiliki arsitektur Harvard, yaitu memisahkan memori untuk kode program dan memori untuk data sehingga dapat memaksimalkan kerja dan *parallelism*. Instruksi – instruksi dalam memori program dieksekusi dalam satu alur tunggal, dimana pada saat satu instruksi dikerjakan instruksi berikutnya sudah diambil dari memori program. Konsep inilah yang memungkinkan instruksi – instruksi dapat dieksekusi dalam setiap satu siklus clock. 32 x 8-bit register serba guna digunakan untuk mendukung operasi pada ALU (*Arithmetic Logic unit*) yang dapat dilakukan dalam satu siklus. 6 dari register serbaguna ini dapat digunakan sebagai 3 buah register

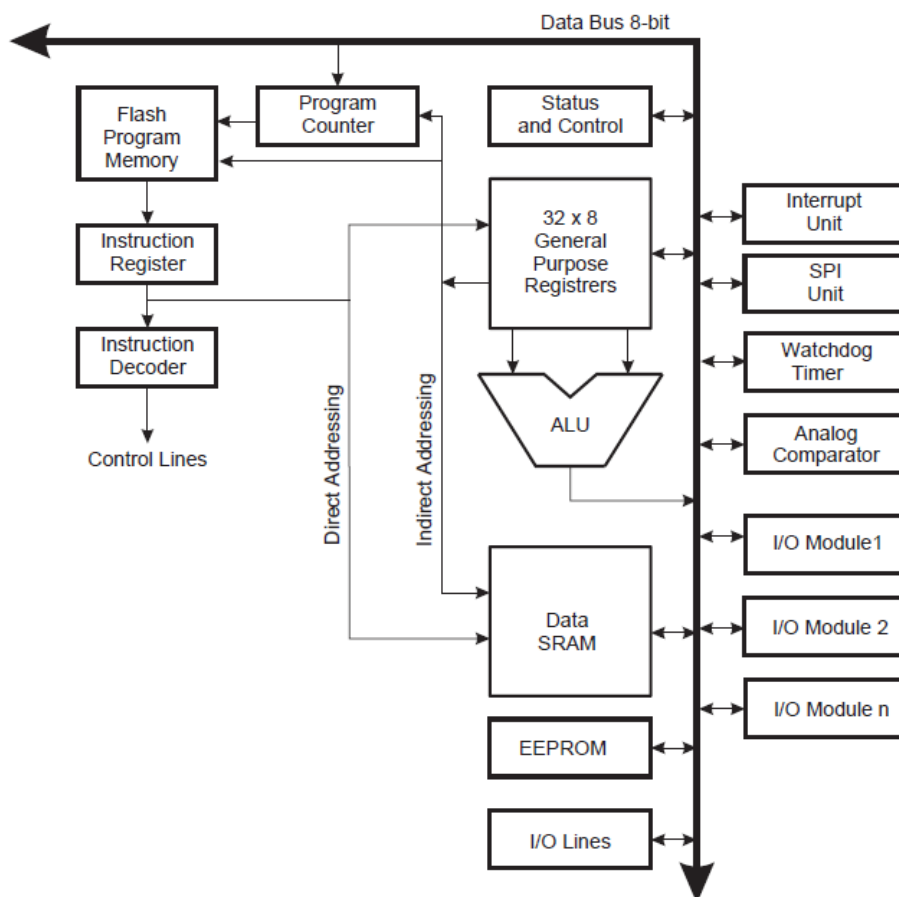


pointer 16-bit pada mode pengalamatan tidak langsung untuk mengambil data pada ruang memori data.

Ketiga register pointer 16-bit ini disebut dengan register X (gabungan R26 dan R27), register Y (gabungan R28 dan R29), dan register Z (gabungan R30 dan R31). Hampir semua instruksi AVR memiliki format 16-bit. Setiap alamat memori program terdiri dari instruksi 16-bit atau 32-bit.

Selain register serba guna di atas, terdapat register lain yang terpetakan dengan teknik *memory mapped I/O* selebar 64 byte. Beberapa register ini digunakan untuk fungsi khusus antara lain sebagai register control Timer/Counter, Interupsi, ADC, USART, SPI, EEPROM, dan fungsi I/O lainnya. Register – register ini menempati memori pada alamat 0x20h – 0x5Fh.

Berikut ini adalah tampilan arsitektur Mikrokontroler ATmega 328.



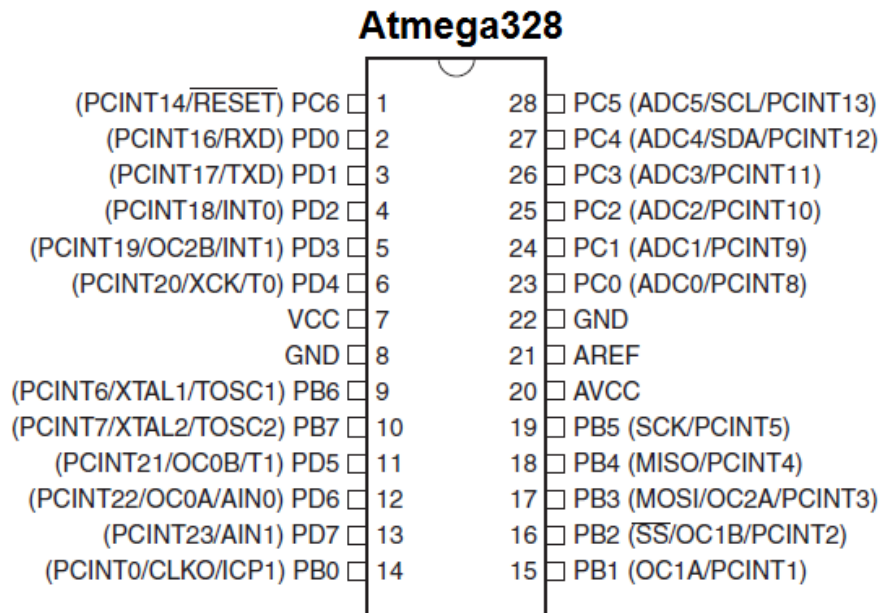
Gambar 2.13 Arsitektur Mikrokontroler ATmega328

(sumber : cources.cs.washington.edu, diakses 19 juli 2016)



2.4.1.1 Konfigurasi Pin ATmega328

Berikut deskripsi pin-pin pada ATmega328:



Gambar 2.14 Konfigurasi Pin ATmega 328

(sumber : [http:// learningabaoutelectronics.com/Articles/Atmega328-pinout.php](http://learningabaoutelectronics.com/Articles/Atmega328-pinout.php), diakses tanggal 19 juli 2016)

Penjelasan Pin:

VCC : Tegangan Supply (5 volt)

GND : Ground

RESET : Input reset level rendah pada pin ini selama lebih dari panjang pulsa minimum akan menghasilkan reset, walaupun clock sedang berjalan.

XTAL1 : Input penguat osilator inverting dan input pada rangkaian operasi clock internal.

XTAL2 : Output dari penguat osilator inverting.

AVCC : Pin tegangan supply untuk port A dan ADC. Pin ini harus dihubungkan ke VCC walaupun ADC tidak digunakan, maka pin ini harus dihubungkan ke VCC melalui low pass filter.



AREF : Pin referensi tegangan analaog untuk ADC.

Berikut konfigurasi masing-masing port pada ATmega 328:

Tabel 2.1 Konfigurasi Port B ATmega328

Port Pin	Alternate Functions
PB7	XTAL2 (Chip Clock Oscillator pin 2) TOSC2 (Timer Oscillator pin 2) PCINT7 (Pin Change Interrupt 7)
PB6	XTAL1 (Chip Clock Oscillator pin 1 or External clock input) TOSC1 (Timer Oscillator pin 1) PCINT6 (Pin Change Interrupt 6)
PB5	SCK (SPI Bus Master clock Input) PCINT5 (Pin Change Interrupt 5)
PB4	MISO (SPI Bus Master Input/Slave Output) PCINT4 (Pin Change Interrupt 4)
PB3	MOSI (SPI Bus Master Output/Slave Input) OC2A (Timer/Counter2 Output Compare Match A Output) PCINT3 (Pin Change Interrupt 3)
PB2	\overline{SS} (SPI Bus Master Slave select) OC1B (Timer/Counter1 Output Compare Match B Output) PCINT2 (Pin Change Interrupt 2)
PB1	OC1A (Timer/Counter1 Output Compare Match A Output) PCINT1 (Pin Change Interrupt 1)
PB0	ICP1 (Timer/Counter1 Input Capture Input) CLKO (Divided System Clock Output) PCINT0 (Pin Change Interrupt 0)

Tabel 2.2 Konfigurasi Port C ATmega328

Port Pin	Alternate Function
PC6	\overline{RESET} (Reset pin) PCINT14 (Pin Change Interrupt 14)
PC5	ADC5 (ADC Input Channel 5) SCL (2-wire Serial Bus Clock Line) PCINT13 (Pin Change Interrupt 13)
PC4	ADC4 (ADC Input Channel 4) SDA (2-wire Serial Bus Data Input/Output Line) PCINT12 (Pin Change Interrupt 12)
PC3	ADC3 (ADC Input Channel 3) PCINT11 (Pin Change Interrupt 11)
PC2	ADC2 (ADC Input Channel 2) PCINT10 (Pin Change Interrupt 10)



PC1	ADC1 (ADC Input Channel 1) PCINT9 (Pin Change Interrupt 9)
PC0	ADC0 (ADC Input Channel 0) PCINT8 (Pin Change Interrupt 8)

Tabel 2.3 Konfigurasi Port D ATmega328

Port Pin	Alternate Function
PD7	AIN1 (Analog Comparator Negative Input) PCINT23 (Pin Change Interrupt 23)
PD6	AIN0 (Analog Comparator Positive Input) OC0A (Timer/Counter0 Output Compare Match A Output) PCINT22 (Pin Change Interrupt 22)
PD5	T1 (Timer/Counter 1 External Counter Input) OC0B (Timer/Counter0 Output Compare Match B Output) PCINT21 (Pin Change Interrupt 21)
PD4	XCK (USART External Clock Input/Output) T0 (Timer/Counter 0 External Counter Input) PCINT20 (Pin Change Interrupt 20)
PD3	INT1 (External Interrupt 1 Input) OC2B (Timer/Counter2 Output Compare Match B Output) PCINT19 (Pin Change Interrupt 19)
PD2	INT0 (External Interrupt 0 Input) PCINT18 (Pin Change Interrupt 18)
PD1	TXD (USART Output Pin) PCINT17 (Pin Change Interrupt 17)
PD0	RXD (USART Input Pin) PCINT16 (Pin Change Interrupt 16)

2.5 Arduino Uno

Uno Arduino adalah board berbasis mikrokontroler pada ATmega328. *Board* ini memiliki 14 digital input / output pin (dimana 6 pin dapat digunakan sebagai *output PWM*), 6 input *analog*, 16 MHz *osilator* kristal, koneksi USB, jack listrik tombol reset. Pin-pin ini berisi semua yang diperlukan untuk mendukung mikrokontroler, hanya terhubung ke komputer dengan kabel USB atau sumber tegangan bisa didapat dari adaptor AC-DC atau baterai untuk menggunakannya.



2.5.1 Fitur Board Arduino Uno

Board *Arduino Uno* memiliki fitur-fitur baru sebagai berikut :

- 1,0 pinout: tambah SDA dan SCL pin yang dekat ke pin aref dan dua pin baru lainnya ditempatkan dekat ke pin RESET, dengan IO REF yang memungkinkan sebagai *buffer* untuk beradaptasi dengan tegangan yang disediakan dari board sistem. Pengembangannya, sistem akan lebih kompatibel dengan *Prosesor* yang menggunakan AVR, yang beroperasi dengan 5V dan dengan *Arduino Karena* yang beroperasi dengan 3.3V. Yang kedua adalah pin tidak terhubung, yang disediakan untuk tujuan pengembangannya.



Gambar 2.15 Board *Arduino Uno*

Tabel 2.4 Deskripsi *Arduino Uno R3*

<i>Mikrokontroller</i>	Atmega 328
<i>Operasi Voltage</i>	5V
<i>Input Voltage</i>	7-12 V (Rekomendasi)
<i>Input Voltage</i>	6-20 V (limits)
I/O	14 pin (6 pin untuk PWM)
Arus	50 mA
Flash Memory	32KB
Bootloader	SRAM 2 KB
EEPROM	1 KB
Kecepatan	16 hz



2.5.2 Catu Daya

Arduino Uno dapat diaktifkan melalui koneksi USB atau dengan catu daya eksternal. Sumber listrik dipilih secara otomatis. Eksternal (non- USB) daya dapat datang baik dari AC-DC adaptor atau baterai. Adaptor ini dapat dihubungkan dengan cara menghubungkannya *plug* pusat-positif 2.1mm ke dalam board colokan listrik. Lead dari baterai dapat dimasukkan ke dalam *header* pin Gnd dan Vin dari konektor *Power*.

Board dapat beroperasi pada pasokan daya dari 6 - 20 volt. Jika diberikan dengan kurang dari 7V, bagaimanapun, pin 5V dapat menyuplai kurang dari 5 volt dan *board* mungkin tidak stabil. Jika menggunakan lebih dari 12V, regulator tegangan bisa panas dan merusak *board*. Rentang yang dianjurkan adalah 7 - 12 volt.

Pin catu daya adalah sebagai berikut:

- VIN. Tegangan input ke *board* Arduino ketika menggunakan sumber daya eksternal (sebagai lawan dari 5 volt dari koneksi USB atau sumber daya lainnya diatur). Anda dapat menyediakan tegangan melalui pin ini, atau, jika memasok tegangan melalui colokan listrik, mengaksesnya melalui pin ini.
- 5V. Catu daya diatur digunakan untuk daya mikrokontroler dan komponen lainnya di *board*. Hal ini dapat terjadi baik dari VIN melalui regulator on- board, atau diberikan oleh USB .
- 3,3 volt pasokan yang dihasilkan oleh regulator on-board. Menarik arus maksimum adalah 50 mA.
- GND

2.5.3 Memory

ATmega328 ini memiliki 32 KB dengan 0,5 KB digunakan untuk *loading file*. Ia juga memiliki 2 KB dari SRAM dan 1 KB dari EEPROM



EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*, ditulis pula dengan E2PROM) adalah sejenis chip memori tidak terhapus yang digunakan dalam komputer dan peralatan elektronik lain untuk menyimpan sejumlah konfigurasi data pada alat elektronik tersebut yang tetap harus terjaga meskipun sumber daya diputuskan, seperti tabel kalibrasi atau konfigurasi perangkat.

Pengembangan EEPROM lebih lanjut menghasilkan bentuk yang lebih spesifik, seperti *Flash Memory*. *Flash Memory* lebih ekonomis daripada perangkat EEPROM tradisional, sehingga banyak dipakai dalam perangkat keras yang mampu menyimpan data statik yang lebih banyak (seperti USB *Flashdrive*).

Kelebihan utama dari EEPROM dibandingkan EPROM adalah ia dapat dihapus per blok data tergantung alamat yang diinginkan untuk dihapus secara elektrik. Sementara EPROM tidak bisa dihapus per blok data tetapi keseluruhannya terhapus dan menghapus datanya dengan sinar *ultraviolet*. Jika RAM tidak memiliki batasan dalam hal baca tulis memori, maka EEPROM sebaliknya. Beberapa jenis EEPROM keluaran pertama hanya dapat dihapus dan ditulis ulang (*erase-rewrite*) sebanyak 100 kali sedangkan model terbaru bisa sampai 100.000 kali.

2.5.4 Input & Output

Masing-masing dari 14 pin digital pada Uno dapat digunakan sebagai input atau output, menggunakan fungsi `pinMode()`, `digitalWrite()`, dan `digitalRead()`. Mereka beroperasi di 5 volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima maksimum 40 mA dan memiliki resistor pull-up internal dari 20-50 K Ω . Selain itu, beberapa pin memiliki fungsi khusus:

- Serial: 0 (RX) dan 1 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan mengirimkan (TX) data TTL serial. Pin ini terhubung ke pin yang sesuai dari chip ATmega8U2 USB-to-Serial TTL.
- Eksternal Interupsi: 2 dan 3. Pin ini dapat dikonfigurasi untuk memicu interupsi pada nilai yang rendah, tepi naik atau jatuh, atau



perubahan nilai. Lihat `attachInterrupt ()` fungsi untuk rincian.

- PWM: 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Menyediakan 8-bit output PWM dengan `analogWrite ()` fungsi.
- SPI: 10 (SS), 11 (mosi), 12 (MISO), 13 (SCK). Pin ini mendukung komunikasi SPI menggunakan perpustakaan SPI.
- LED: 13. Ada built-in LED terhubung ke pin digital 13. Ketika pin adalah nilai TINGGI, LED menyala, ketika pin adalah RENDAH, itu off.

Uno memiliki 6 input analog, diberi label A0 melalui A5, masing-masing menyediakan 10 bit resolusi yaitu 1024 nilai yang berbeda. Secara default sistem mengukur dari tanah sampai 5 volt.

- TWI: A4 atau SDA pin dan A5 atau SCL pin. Mendukung komunikasi TWI
- Aref. Referensi tegangan untuk input analog. Digunakan dengan `analogReference ()`.
- Reset.

2.5.5 Komunikasi

Uno Arduino memiliki sejumlah fasilitas untuk berkomunikasi dengan komputer, Arduino lain, atau mikrokontroler lain. ATmega328 ini menyediakan UART TTL (5V) komunikasi serial, yang tersedia pada pin digital 0 (RX) dan 1 (TX). Sebuah ATmega16U2 pada saluran *board* ini komunikasi serial melalui USB dan muncul sebagai com port virtual untuk perangkat lunak pada komputer. *Firmware* Arduino menggunakan USB *driver* standar COM, dan tidak ada *driver* eksternal yang dibutuhkan. Namun, pada Windows, file. Inf diperlukan. Perangkat lunak Arduino termasuk monitor serial yang memungkinkan data sederhana yang akan dikirim ke *board* Arduino. RX dan TX LED di *board* akan berkedip ketika data sedang dikirim melalui chip USB-to-serial dan koneksi USB ke komputer. ATmega328 ini juga mendukung komunikasi I2C (TWI) dan SPI. Fungsi ini digunakan untuk melakukan komunikasi interface pada sistem.



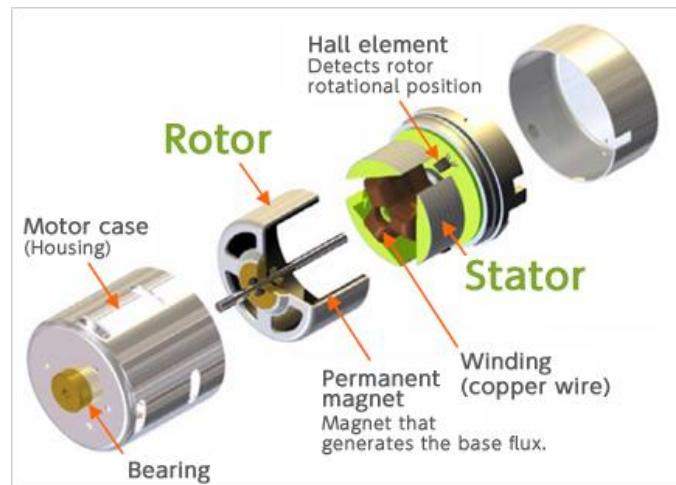
2.6 Motor Listrik BLDC (*Brush Less Direct Current Motor*)

Motor arus searah adalah sebuah motor yang membutuhkan tegangan dc untuk menjalankannya. Pada umumnya motor jenis ini menggunakan sikat dan mengoperasikannya sangat mudah tinggal dihubungkan dengan *Battery* sehingga motor langsung berputar. Jenis motor ini memerlukan perawatan pada sikatnya serta banyak terjadi rugi tegangan pada sikat. Sehingga pada era sekarang ini motor DC dikembangkan tanpa menggunakan sikat yang dikenal dengan Motor BLDC (*Brush Less Direct Current Motor*). Motor ini dipilih karena efisiensi yang tinggi, suaranya halus, ukuran kompak, keandalan yang tinggi dan perawatan yang rendah. Motor ini lebih disukai untuk berbagai aplikasi, namun kebanyakan dari mereka memerlukan kontrol tanpa sensor. Pengoperasian motor BLDC membutuhkan sensor posisi rotor untuk mengendalikan arusnya.

2.6.1 Pengertian Motor BLDC

BLDC Motor (*Brush Less Direct Current Motor*) adalah suatu jenis motor sinkron, artinya medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar di frekuensi yang sama. BLDC motor tidak mengalami slip, tidak seperti yang terjadi pada motor induksi biasa. Motor jenis ini mempunyai permanen magnet pada bagian rotor sedangkan elektro-magnet pada bagian statornya. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian sederhana (*Simpel Computer System*), maka kita dapat merubah arus di elektro-magnet ketika bagian rotornya berputar.

Dalam hal ini, motor BLDC setara dengan motor DC dengan komutator terbalik, di mana magnet berputar sedangkan konduktor tetap diam. Dalam komutator motor DC, polaritas ini diubah oleh komutator dan sikat. Namun, dalam *Brushless* motor DC, pembalikan polaritas dilakukan oleh transistor *Switching* untuk mensinkronkan dengan posisi rotor. Oleh karena itu, BLDC motor sering menggabungkan baik posisi sensor internal atau eksternal untuk merasakan posisi rotor yang sebenarnya, atau posisi dapat dideteksi tanpa sensor (*Leonard N. Elevation, 2005*).



Gambar 2.16 Konstruksi Motor BLDC

(Sumber: <http://motor-listrik-blcd.jpg>, diakses tanggal 16 Juni 2016)

2.6.2 Konstruksi BLDC Motor

Setiap motor BLDC memiliki dua bagian utama, rotor (bagian berputar) dan stator (bagian stasioner). Bagian penting lainnya dari motor adalah gulungan stator dan magnet rotor.

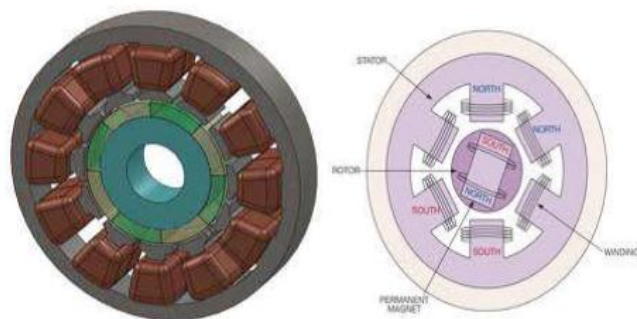
1. Rotor

Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC *Brushless* bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *Brushes* (sikat) yang terhubung pada dua buah motor hingga delapan pasang kutub magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling direkatkan menggunakan semacam “*Epoxy*” dan tidak ada *Brushes*-nya.

Rotor dibuat dari magnet tetap dan dapat desain dari dua sampai delapan kutub magnet utara (N) atau selatan (S). Material magnetis yang bagus sangat diperlukan untuk mendapatkan kerapatan medan magnet yang bagus pula. Biasanya magnet ferrit yang dipakai untuk membuat magnet tetap, tetapi material ini mempunyai kekurangan yaitu *Flux Density* yang rendah untuk ukuran volume material yang diperlukan untuk membentuk rotor.

2. Stator

Stator adalah bagian pada motor yang diam/statis dimana fungsinya adalah sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Pada motor DC *Brushless* statornya terdiri dari 12 belitan (elektromagnet) yang bekerja secara elektromagnetik dimana stator pada motor DC *Brushless* terhubung dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol sedangkan pada motor DC konvensional statornya terdiri dari dua buah kutub magnet permanen.



Gambar 2.17 Penampang Motor BLDC

(Sumber: Azzumar Muhammad, *Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI*, 2012)

Belitan stator pada motor DC *brushless* terdiri dari dua jenis, yaitu belitan stator jenis *Trapezoidal* dan jenis *Sinusoidal*. Dasar perbedaan kedua jenis belitan stator tersebut terletak pada hubungan antara koil dan belitan stator yang bertujuan untuk memberikan EMF (*Electro Motive Force*) balik yang berbeda.

EMF balik adalah tegangan balik yang dihasilkan oleh belitan motor BLDC ketika motor BLDC tersebut berputar yang memiliki polaritas tegangan berlawanan arahnya dengan tegangan sumber yang dibangkitkan. Besarnya EMF balik dipengaruhi oleh kecepatan sudut putaran motor (ω), medan magnet yang dihasilkan rotor (B), dan banyaknya lilitan pada belitan stator (N) sehingga besarnya EMF balik dapat dihitung dengan persamaan:

Ketika motor BLDC sudah dibuat, jumlah lilitan pada stator dan besarnya medan magnet yang dihasilkan nilainya sudah dibuat konstan sehingga yang mempengaruhi besarnya EMF balik adalah besarnya kecepatan sudut yang dihasilkan motor, semakin besar kecepatan sudut yang dihasilkan. Perubahan



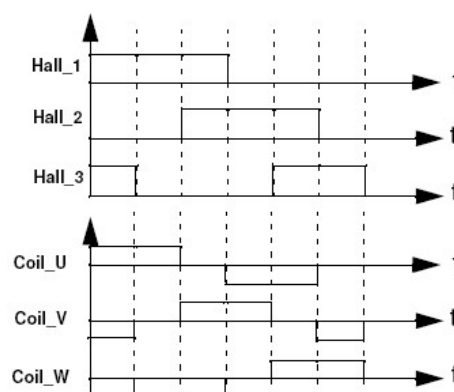
besarnya EMF balik ini mempengaruhi torsi motor BLDC, apabila kecepatan motor yang dihasilkan lebih besar dari tegangan potensial pada belitan stator sehingga arus yang mengalir pada stator akan turun dan torsi pun akan ikut turun, sebagaimana rumus torsi pada BLDC motor menurut persamaan diatas bahwa besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

Karena berbanding lurus dengan faktor-faktor lain yang mempengaruhi torsi, maka kenaikan dan penurunan arus sangat berpengaruh pada besarnya torsi yang dihasilkan motor BLDC.

3. Sensor Hall

Komutasi dari motor DC *Brushless* diatur secara elektronik agar motor dapat berputar, stator harus *Energize* secara berurutan dan teratur. Sensor hall inilah yang berperan dalam mendeteksi pada bagian rotor mana yang *Energize* oleh fluks magnet sehingga proses komutasi yang berbeda (enam step komutasi) dapat dilakukan oleh stator dengan tepat karena sensor hall ini dipasang menempel pada stator.

Untuk estimasi posisi rotor, motor ini dilengkapi dengan tiga sensor hall yang ditempatkan setiap 120° L. Dengan sensor ini, ada 6 komutasi yang mungkin berbeda. Pergantian *Fase Power Supply* tergantung pada nilai-nilai sensor hall dengan perubahan kumparan.



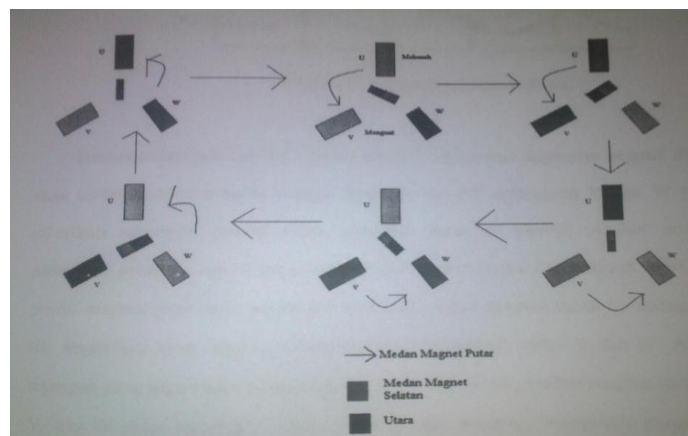
Gambar 2.18 Sensor Hall Sinyal Untuk Rotasi Kanan

(Sumber: Azzumar Muhammad, Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI, 2012)

2.6.3 Prinsip Kerja BLDC Motor

Motor BLDC ini dapat bekerja ketika stator yang terbuat dari kumparan diberikan arus 3 fasa. Akibat arus yang melewati kumparan pada stator timbul medan magnet.

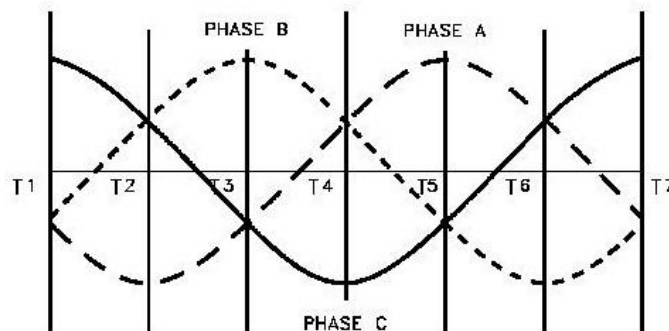
Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan :



Gambar 2.19 Medan Magnet Putar Stator dan Perputaran Rotor

(Sumber: Azzumar Muhammad, Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI, 2012)

Berdasarkan gambar 2.19, medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator berupa arus AC yang memiliki polaritas yang berubah-ubah.



Gambar 2.20 Tegangan Stator BLDC

(Sumber: Azzumar Muhammad, Jurnal Permodelan dan simulasi BLDC motor UI, 2012)



Berdasarkan gambar 2.20, ketika stator U diberikan tegangan Negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negatif sedangkan V dan W yang diberikan tegangan positif akan memiliki polaritas positif. Akibat adanya perbedaan polaritas antara medan magnet kumparan stator dan magnet rotor, sisi positif magnet rotor akan berputar mendekati medan magnet stator U, sedangkan sisi negatifnya akan berputar mengikuti medan magnet stator V dan W. Akibat tegangan yang digunakan berupa tegangan AC *Sinusoidal*, medan magnet stator U, V, dan W akan berubah-ubah polaritas dan besarnya mengikuti perubahan tegangan sinusoidal AC. Ketika U dan V memiliki medan magnet negatif akibat mendapatkan tegangan negatif dan W memiliki medan magnet positif akibat tegangan positif, magnet permanen rotor akan berputar menuju ke polaritas yang bersesuaian yakni bagian negatif akan berputar menuju medan magnet stator W dan sebaliknya bagian positif akan berputar menuju medan magnet stator U dan V. Selanjutnya ketika V memiliki medan magnet negatif dan U serta W memiliki medan magnet positif, bagian positif bagian positif magnet permanen akan berputar menuju V dan bagian negatif akan menuju U dari kumparan W. Karena tegangan AC sinusoidal yang digunakan berlangsung secara kontinu, proses perubahan polaritas tegangan pada stator ini akan terjadi secara terus menerus sehingga menciptakan medan putar magnet stator dan magnet permanen rotor akan berputar mengikuti medan putar magnet stator ini. Hal inilah yang menyebabkan rotor pada BLDC dapat berputar.

2.6.4 Keunggulan BLDC Motor

Brushless DC (BLDC) motor adalah pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan keandalan yang tinggi, efisiensi tinggi, dan tinggi *Power-To-Volume* rasio. Secara umum, motor BLDC dianggap motor performa tinggi yang mampu memberikan jumlah besar torsi pada rentang kecepatan yang luas. Berikut adalah beberapa kelebihan BLDC motor dibandingkan motor jenis lainnya :

- *High Speed Operation*, sebuah motor BLDC dapat beroperasi pada kecepatan di atas 10.000 rpm dalam kondisi dimuat dan dibongkar.



- Responsif dan percepatan cepat, rotor BLDC motor memiliki inersia rotor rendah, yang memungkinkan mereka untuk mempercepat, mengurangi kecepatan, dan membalik arah dengan cepat.
- *High Power Density*, BLDC motor memiliki torsi berjalan tertinggi per inci kubik setiap motor DC.
- Keandalan tinggi, BLDC motor tidak memiliki sikat, yang berarti mereka lebih handal dan memiliki harapan hidup lebih dari 10.000 jam. Hal ini menghasilkan lebih sedikit kasus penggantian atau perbaikan secara keseluruhan.

2.7 Sensor Optocoupler

Optocoupler adalah suatu piranti yang terdiri dari 2 bagian yaitu *Transmitter* dan *Receiver*, yaitu antara bagian cahaya dengan bagian deteksi sumber cahaya terpisah. Biasanya optocoupler digunakan sebagai saklar elektrik, yang bekerja secara otomatis.

Pada dasarnya Optocoupler adalah suatu komponen penghubung (*Coupling*) yang bekerja berdasarkan pemicu dari cahaya optic. Optocoupler terdiri dari dua bagian yaitu:

1. Pada *Transmitter* dibangun dari sebuah LED inframerah. Jika dibandingkan dengan menggunakan LED biasa, LED inframerah memiliki ketahanan yang lebih baik. Cahaya yang dipancarkan oleh LED inframerah tidak terlihat oleh mata telanjang.
2. Pada bagian *Receiver* dibangun dengan dasar komponen *Photodiode*. *Photodiode* merupakan suatu transistor yang peka terhadap tenaga cahaya. Suatu sumber cahaya menghasilkan energi panas, begitu pula dengan spektrum inframerah. Karena spektrum inframerah mempunyai efek panas yang lebih besar dari cahaya tampak, maka *Photodiode* lebih peka untuk menangkap radiasi dari sinar inframerah.

Oleh karena itu Optocoupler dapat dikatakan sebagai gabungan dari LED inframerah dengan fototransistor yang terbungkus menjadi satu chips. Cahaya inframerah termasuk dalam gelombang elektromagnetik yang tidak tampak oleh



mata telanjang. Sinar ini tidak tampak oleh mata karena mempunyai panjang gelombang, berkas cahaya yang terlalu panjang bagi tanggapan mata manusia. Sinar infra merah mempunyai daerah frekuensi 1×10^{12} Hz sampai dengan 1×10^{14} GHz atau daerah frekuensi dengan panjang gelombang $1 \mu\text{m} - 1\text{mm}$.

LED infra merah ini merupakan komponen elektronika yang memancarkan cahaya inframerah dengan konsumsi daya sangat kecil. Jika diberi bias maju, LED inframerah yang terdapat pada optocoupler akan mengeluarkan panjang gelombang sekitar 0,9 mikrometer.

Proses terjadinya pancaran cahaya pada LED infra merah dalam optocoupler adalah sebagai berikut. Saat dioda menghantarkan arus, elektron lepas dari ikatannya karena memerlukan tenaga dari catu daya listrik. Setelah elektron lepas, banyak elektron yang bergabung dengan lubang yang ada di sekitarnya (memasuki lubang lain yang kosong). Pada saat masuk lubang yang lain, elektron melepaskan tenaga yang akan diradiasikan dalam bentuk cahaya, sehingga dioda akan menyala atau memancarkan cahaya pada saat dilewati arus. Cahaya inframerah yang terdapat pada optocoupler tidak perlu lensa untuk memfokuskan cahaya karena dalam satu chip mempunyai jarak yang dekat dengan penerimanya. Pada optocoupler yang bertugas sebagai penerima cahaya inframerah adalah fototransistor. Fototransistor merupakan komponen elektronika yang berfungsi sebagai detektor cahaya inframerah. Detektor cahaya ini mengubah efek cahaya menjadi sinyal listrik, oleh sebab itu fototransistor termasuk dalam golongan detektor optik.

Fototransistor memiliki sambungan kolektor-basis yang besar dengan cahaya inframerah, karena cahaya ini dapat membangkitkan pasangan lubang elektron. Dengan diberi bias maju, cahaya yang masuk akan menimbulkan arus pada kolektor.

Fototransistor memiliki bahan utama yaitu germanium atau silikon yang sama dengan bahan pembuat transistor. Tipe fototransistor juga sama dengan transistor pada umumnya yaitu PNP dan NPN. Perbedaan transistor dengan fototransistor hanya terletak pada dindingnya yang memungkinkan cahaya



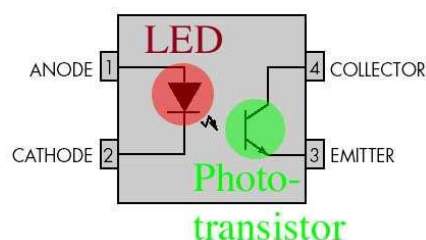
inframerah mengaktifkan daerah basis, sedangkan transistor biasa ditempatkan pada dinding logam yang tertutup.

Ditinjau dari penggunaannya, fisik optocoupler dapat berbentuk bermacam-macam. Bila hanya digunakan untuk mengisolasi level tegangan atau data pada sisi *Transmitter* dan sisi *Receiver*, maka optocoupler ini biasanya dibuat dalam bentuk solid (tidak ada ruang antara LED dan *Photodiode*). Sehingga sinyal listrik yang ada pada input dan output akan terisolasi. Dengan kata lain optocoupler ini digunakan sebagai optoisolator jenis IC.

Prinsip kerja dari optocoupler adalah :

- Jika antara *Photodiode* dan LED terhalang maka *Photodiode* tersebut akan off sehingga output dari kolektor akan berlogika high.
- Sebaliknya jika antara *Photodiode* dan LED tidak terhalang maka *Photodiode* dan LED tidak terhalang maka *Photodiode* tersebut akan on sehingga outputnya akan berlogika low.

Sebagai piranti elektronika yang berfungsi sebagai pemisah antara rangkaian power dengan rangkaian kontrol. Komponen ini merupakan salah satu jenis komponen yang memanfaatkan sinar sebagai pemicu on/off-nya. Opto berarti *optic* dan *coupler* berarti pemicu. Sehingga bisa diartikan bahwa optocoupler merupakan suatu komponen yang bekerja berdasarkan picu cahaya optic *optocoupler* termasuk dalam sensor, dimana terdiri dari dua bagian yaitu *Transmitter* dan *Receiver*. Dasar rangkaian dapat ditunjukkan seperti pada gambar dibawah ini:



Gambar 2.21 *Optocoupler*

(Sumber : <http://en.wikipedia.org/wiki/Optocoupler> di akses Juni 2016)



Sebagai pemancar atau *Transmitter* dibangun dari sebuah led inframerah untuk mendapatkan ketahanan yang lebih baik daripada menggunakan led biasa. Sensor ini bisa digunakan sebagai isolator dari rangkaian tegangan rendah kerangkaian tegangan tinggi. Selain itu juga bisa dipakai sebagai pendeteksi adanya penghalang antara *Transmitter* dan *Receiver* dengan memberi ruang uji dibagian tengah antara led dengan photo transistor. Penggunaan ini bisa diterapkan untuk mendeteksi putaran motor atau mendeteksi lubang penanda disket pada disk drive computer. Tapi pada alat yang penulis buat optocoupler untuk mendeteksi putaran.

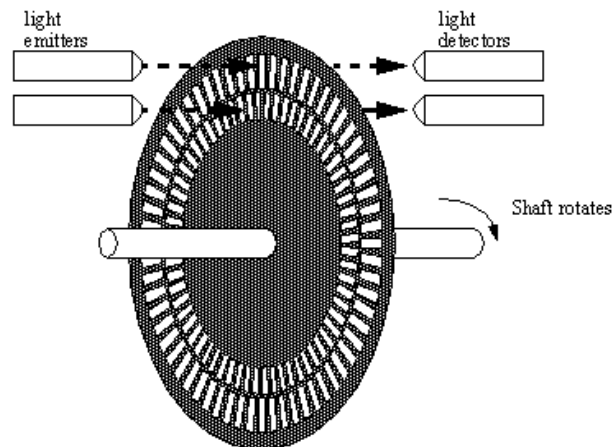
Penggunaan dari optocoupler tergantung dari kebutuhannya. Ada berbagai macam bentuk, jenis, dan type. Seperti MOC 3040 atau 3020, 4N25 atau 4N33 dan sebagainya. Pada umumnya semua jenis optocoupler pada lembar datanya mampu dibebani tegangan sampai 7500 Volt tanpa terjadi kerusakan atau kebocoran. Biasanya dipasaran optocoupler tersedianya dengan type 4NXX atau MOC XXXX dengan X adalah angka part valuenya. Untuk type 4N25 ini mempunyai tegangan isolasi sebesar 2500 Volt dengan kemampuan maksimal led dialiri arus *forward* sebesar 80 mA. Namun besarnya arus led yang digunakan berkisar antara 15mA - 30 mA dan untuk menghubungkannya dengan tegangan +5 Volt diperlukan tahanan sekitar 1K ohm.

2.8 Rotary Encoder

Rotary encoder atau *Shaft Encoder* adalah suatu perangkat elektromekanik yang digunakan untuk mengkonversi perpindahan angular dari suatu poros menjadi kode-kode analog ataupun digital. Terdapat dua jenis utama dari *Rotary Encoder*, yaitu tipe absolut dan tipe *incremental*. *Absolute Rotary Encoder* menghasilkan kode yang unik untuk tiap-tiap posisi sudut poros tertentu, sedangkan *Incremental Rotary Encoder* menghasilkan kode-kode yang bisa diterjemahkan sebagai jarak perpindahan sudut relatif terhadap posisi awal. Dalam tugas akhir ini yang digunakan adalah *Rotary Encoder* tipe *Incremental* karena pertimbangan biaya yang murah untuk kecermatan pembacaan yang cukup baik.



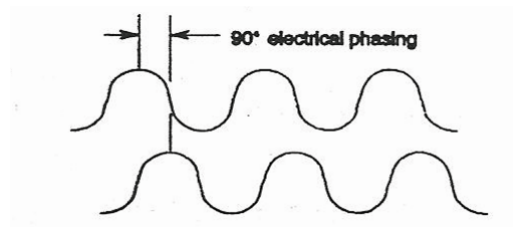
Incremental Encoder bekerja dengan cara menerjemahkan putaran poros *Encoder* tersebut menjadi sinar cahaya terputus-putus yang selanjutnya diolah menjadi bentuk pulsa-pulsa listrik. Sinar cahaya terputus-putus tersebut dihasilkan dari konstruksi gabungan sumber cahaya, *Glass Disk*, dan photosensor seperti pada gambar 2.21.



Gambar 2.22 Contoh skema konstruksi bagian dalam *Incremental Rotary Encoder*

(Sumber : http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Rotary_Encoder di akses Juni 2016)

Konstruksi berpasangan seperti gambar di atas akan menghasilkan dua buah sinyal sinusoidal seperti pada gambar 2.23. Perbedaan fasa sebesar 90 derajat diperoleh dengan cara mengatur posisi relatif diantara kedua photosensor yang ada.

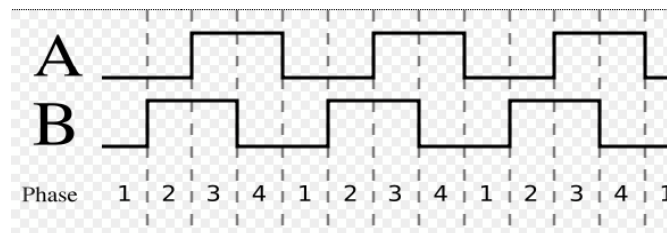


Gambar 2.23 Output sinusoidal dari dua buah photosensor

(Sumber : http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Rotary_Encoder, di akses juni 2016)



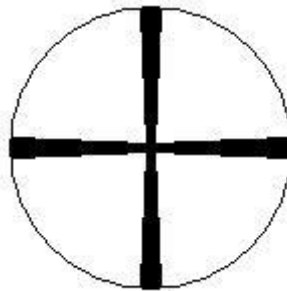
Sinyal tersebut kemudian diubah oleh suatu rangkaian Schmitt Trigger menjadi bentuk pulsa. Gabungan kedua pulsa, yang disebut pulsa A dan B ini kemudian digolongkan ke dalam empat kondisi seperti pada gambar 2.23, sehingga disebut *quadrature outputs*..



Gambar 2.24 Quadrature outputs

(Sumber : http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Rotary_Encoder, di akses juni 2016).

2.8.1 Logika Perhitungan RPM



Gambar 2.25 Piringan Encoder 4 Lubang

(Sumber: <http://encoder-4-lubang.jpg>, diakses tanggal 20 Juni 2016)

Encoder yang digunakan adalah tipe piringan yang menggunakan lubang atau garis hitam-putih, banyaknya lubang adalah 4 buah lubang maka 1 putaran = 4 lubang.

Kasus 1: Interupsi eksternal mendeteksi 2400 lubang dalam waktu 1 menit yang berarti :

1 menit terdeteksi 2400 lubang (Clock lubang), maka
 $2400 / 4 = 600$ putaran atau 600 RPM

Kasus 2: Interupsi eksternal mendeteksi 1800 lubang dalam waktu 30 detik yang berarti :

30 detik = $30/60 = 0,5$ menit



$1800 / 4 = 450$ putaran dalam 30 detik, maka

$450 / 0,5 = 900$ RPM

Kasus 3: Interupsi eksternal mendeteksi 60 lubang dalam waktu 200 mS yang berarti :

$200 \text{ mS} = 200 / 60000 = 0,0033333$ menit

$60 / 4 = 15$ putaran dalam 200 mS, maka

$15 / 0,0033333 = 4500,045$ RPM

Kasus 4: Interupsi eksternal mendeteksi 100 lubang dalam waktu 1 S yang berarti:

$1 \text{ S} = 1 / 60 = 0,016667$ menit

$100 / 4 = 25$ putaran dalam 1 S, maka

$25 / 0,016667 = 1.499,97$ RPM

Berikut adalah rumus Konversi Rpm ke Kecepatan (Km/jam) :

Kecepatan (Km/jam) = Kecepatan (RPM) x Keliling piringan *encoder* x
60/1000

Keterangan :

Rpm = *Revolutions per minute*

Keliling piringan *encoder* = $2\pi r$

$2\pi = 6.28$

r = Jari- jari piringan Encoder

2.9 LCD (*Liquid Crystal Display*)

LCD (*Liquid Crystal Display*) merupakan komponen yang dapat menampilkan suatu nilai hasil sensor, menampilkan teks, atau menampilkan menu pada aplikasi mikrokontroler. LCD yang akan digunakan adalah jenis LCD M1632, yang merupakan modul LCD dengan tampilan 16x2 baris dengan konsumsi daya rendah. Modul tersebut dilengkapi dengan mikrokontroler yang didesain khusus untuk mengendalikan LCD.



2.9.1 Memori LCD

Yang menjadi pengendali LCD adalah mikrokontroler HD44780 yang memiliki CGROM (*Character Generator Read Only Memory*), CGRAM (*Character Generator Random Access Memory*), dan DDRAM (*Display Data Random Access Memory*).

Berikut ini merupakan bagian-bagian dari LCD M1632:

a. DDRAM

DDRAM merupakan memori tempat karakter yang ditampilkan berada. Contoh, untuk karakter 'L' atau 4CH yang ditulis pada alamat 00, karakter tersebut akan tampil pada baris pertama dan kolom pertama pada LCD. Apabila karakter tersebut ditulis pada alamat 40, maka karakter tersebut akan tampil pada baris kedua kolom pertama dari LCD.

b. CGRAM

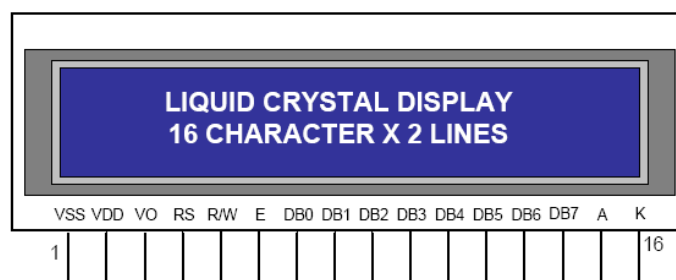
CGRAM merupakan memori untuk membuat bentuk karakter yang dapat diubah-ubah sesuai keinginan. Karakter yang disimpan di CGRAM akan hilang apabila tidak ada *power supply*, karena memori RAM bersifat tidak permanen.

c. CGROM

Merupakan memori yang menyimpan karakter-karakter yang sudah permanen ada di dalam LCD, sehingga tidak dapat diubah-ubah lagi bentuknya oleh pengguna. Namun karena ROM bersifat permanen, pola karakter tersebut tidak akan hilang saat tidak ada catuan daya.

2.9.2 Konfigurasi Pin LCD 16 x 2

LCD memiliki 16 kaki pin yang memiliki fungsi masing-masing sebagaimana yang dijelaskan pada tabel 2.5.



Gambar 2.26 Konfigurasi Pin LCD 16 Karakter x 2 Baris



Tabel 2.5 Konfigurasi Pin LCD

Pin No.	Symbol	Level	Description
1	VSS	0V	Ground
2	VDD	5V	Supply voltage for logic
3	VO	(Variable)	Operating voltage for LCD
4	RS	H/L	H : Data, L : Instruction code
5	R/W	H/L	H : Read, L : Write
6	E	H, H->L	Chip Enable signal
7	DB0	H/L	Data bit 0
8	DB1	H/L	Data bit 1
9	DB2	H/L	Data bit 2
10	DB3	H/L	Data bit 3
11	DB4	H/L	Data bit 4
12	DB5	H/L	Data bit 5
13	DB6	H/L	Data bit 6
14	DB7	H/L	Data bit 7
15	A	4,2 – 4,6 V	LED +
16	K	0V	LED -

2.9.3 Register LCD

HD44780 memiliki dua buah register yang aksesnya diatur menggunakan kaki RS. Pada saat RS berlogika 0, yang diakses adalah register perintah. Saat RS berlogika 1, yang diakses adalah register data.

2.9.3.1 Register Perintah

Register yang berisi perintah-perintah dari mikrokontroler ke HD44780 pada saat proses penulisan data atau tempat status dari HD44780 dapat dibaca pada saat pembacaan data.

1) Penulisan Data ke Register Perintah

Penulisan data ke register perintah dilakukan dengan tujuan mengatur tampilan LCD, inisialisasi, dan mengatur *Address Counter* maupun *Address Data*. Kondisi RS dengan logika 0 berarti terjadi akses data ke register perintah. RW berlogika 0 berarti proses penulisan data akan dilakukan.

Pada Mode 4 bit *interface*, data dikirimkan secara terpisah. Nibble tinggi (bit7 sampai bit4) dikirimkan terlebih dahulu dengan diawali pulsa logika 1 pada E Clock. Kemudian, nibble rendah (bit3 sampai bit0) dikirimkan dengan diawali pulsa logika 1 pada E Clock. Pada Mode 8 bit *interface*,



I/D	:	1 = increment	0 = decrement
S	:	1 = display bergeser bergeser	0 = display tidak bergeser
S/C	:	1 = display shift	0 = geser cursor
R/L	:	1 = geser kiri	0 = geser kanan
DL	:	1 = 8 bit	0 = 4 bit
N	:	1 = 2 baris	0 = 1 baris
F	:	1 = 5x10	0 = 5x8
D	:	1 = display ON	0 = display OFF
C	:	1 = cursor ON	0 = cursor OFF
B	:	1 = blinking ON	0 = blinking OFF

2.9.3.2 Register Data

Register Data ialah register untuk menuliskan atau membaca data dari atau ke DDRAM. Penulisan data pada register akan menempatkan data tersebut ke DDRAM sesuai dengan alamat yang telah diatur sebelumnya.

1) Penulisan Data ke Register Data

Penulisan data ke register data dilakukan mengirimkan data yang akan ditampilkan di LCD. Kondisi RS dengan logika 1 berarti terjadi akses ke register data. RW berlogika 0 berarti proses penulisan data akan dilakukan.

Pada mode 4 bit *interface*, data dikirimkan secara terpisah. Nibble tinggi (bit7 sampai bit4) dikirimkan terlebih dahulu dengan diawali pulsa logika 1 pada E Clock. Kemudian, nibble rendah (bit3 sampai bit0) dikirimkan dengan diawali pulsa logika 1 pada E Clock. Pada mode 8 bit *interface*, proses penulisan dapat langsung dilakukan sekaligus 8 bit (bit7 ... bit0) dan diawali pulsa logika 1 pada E Clock.

2) Pembacaan Data dari Register Data

Pembacaan data pada register data biasanya dilakukan untuk membaca kembali data yang telah ditampilkan di LCD. RS diberi logika 1 untuk akses ke register data, dan R/W diberi logika 1 agar terjadi proses pembacaan data.

Pada mode 4 bit *interface*, pembacaan 4 bit nibble tinggi diawali pulsa logika 1 pada E Clock dan kemudian 4 bit nibble rendah dengan



diawali pulsa logika 1 pada E Clock. Untuk mode 8 bit *interface*, pembacaan dapat dilakukan langsung (8 bit), dengan diawali sebuah pulsa logika 1 pada E Clock.

2.10 *Operational Amplifier (Op-Amp)*

Operasional amplifier yang lebih dikenal dengan nama Op-Amp sebagai kependekan dan namanya, merupakan komponen elektronik yang kegunaannya sangat banyak. Ukuran Op-Amp sangat kecil yaitu sebesar kuku jari kita, memudahkan dalam perancangan-perancangan piranti elektronik yang pada saat ini cenderung memimmalkan ukuran.

Isi dan sebuah Op-Amp terdiri dan puluhan transistor, resistor dan kapasitor yang dikemas dalam suatu rangkaian terpadu, sehingga Op-Amp dapat disebut juga rangkaian terpadu (IC = Integrated Circuit). Dimana fungsinya adalah mewakili suatu rangkian tertentu sehingga membentuk suatu rangkaian yang kompak.

Pada umumnya keunggulan IC ini tidak mudah terganggu oleh pengaruh suhu ataupun kesalahan kecil karena bahan dan IC tersebut. Penguatan (gain) yang besar mempunyai input yang besar pula sehingga output-nya benimpedansi rendah.

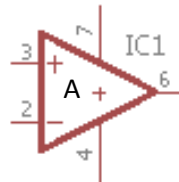
Di dalam prakteknya, Op-Amp tidak dapat digunakan tanpa adanya komponen lain seperti resistor, kapasitor, dioda atau komponen lain. Untuk dapat memahami penggunaan Op-Amp ini diperlukan adanya suatu kemampuan menganalisa rangkaian listrik. Semakin banyak kemampuan kita menganalisa rangkaian listrik, semakin luas kita dapat menetapkan penggunaan Op-Amp.

2.10.1 *Pengertian Dan Prinsip Dasar Operational Amplifier*

Op - Amp adalah suatu penguat gandengan langsung yang memperkuat sinyal arus searah (DC) atau tegangan yang berubah-ubah terhadap satuan waktu. Penguatan yang tinggi dilengkapi dengan umpan balik untuk



mengendalikan karakteristiknya secara menyeluruh. Simbol dan Op-Amp tampak pada Gambar 2.27.



Gambar 2.27 Simbol Operasional Amplifier

A adalah penguat tegangan tanpa beban, dimana harga ini adalah tegangan yang kita dapatkan bila tidak ada beban yang dihubungkan pada keluaran. Tegangan masuk (V_1 dan V_2) dan tegangan keluaran (V_o) dihitung terhadap jalur tanah. Sumber tegangan (V_{cc}) yang diperlukan oleh Op-Amp ada dua macam, yaitu sumber tegangan positif ($+V_{cc}$) dan sumber tegangan negatif ($-V_{cc}$). Hal ini ditujukan agar Op-Amp dapat memperkuat tegangan yang positif maupun negatif, begitu juga pada bagian *output-nya* di mana tegangan dapat berharga positif maupun negatif.

Semua jenis Op-Amp mempunyai tiga buah bagian, yaitu penguat diferensial berimpedansi *input* tinggi, tingkat penguat sinyal dan output berimpedansi rendah.

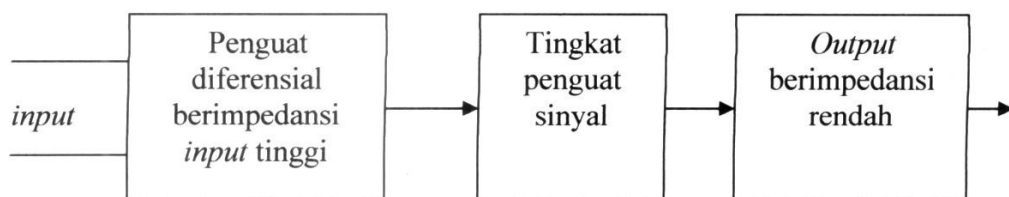
Tampak pada Gambar 2.28 pada penguat diferensial berimpedansi *input* tinggi memiliki tingkat stabilitas yang cukup tinggi (*low drift*), dan jangkauan *band (band width)* yang cukup lebar.

Apabila sebuah penguat diferensial yang mempunyai dua buah *input* yaitu *input inverting* (-) dan *input non inverting* (+), maka penguat ini akan berfungsi membandingkan dua sinyal yang dimasukkan ke dalam *input – input* nya. Sinyal yang keluar dari tingkat ini besarnya akan sebanding dengan perbedaan atau diferensial antara kedua sinyal yang masuk tadi. Tetapi bila kedua sinyal itu nol, maka *output-nya* nol juga. Polaritas kedua sinyal apabila sama maka *output-nya* akan sebanding dengan selisih dari kedua sinyal



tersebut. Sebaliknya jika kedua sinyal itu berlawanan polaritasnya maka *output*-nya pun akan sebanding dengan jumlahnya. Bila salah satu *input*-nya nol (tidak ada sinyal) maka *output* akan sebanding dengan sinyal yang dimasukkan pada salah satu *input*-nya.

Tingkat penguat berfungsi memperkuat sinyal yang keluar dan penguat diferensial sebesar mungkin (kira-kira 100.000 kali). Sedangkan output berimpedansi rendah berfungsi mengisolasi tingkat penguat ini agar tidak dipengaruhi adanya beban dan menghasilkan daya pendorong.



Gambar 2.28 Bagian – Bagian dari Op-Amp

2.10.2 Karakteristik Operasional *Amplifier*

Secara teoritis Op-Amp adalah penguat yang mempunyai sifat-sifat atau karakteristik seperti penguat ideal. Tentunya apabila kita menyebutkan sebuah penguat ideal, maka komponen ini harus mempunyai karakteristik sebagai berikut :

- Faktor penguat A_v (*open loop gain*) tak terhingga artinya jika ada perubahan sedikit saja pada bagian *input*-nya maka akan menghasilkan perubahan yang sangat besar pada *output*-nya.
- Bila *input*-nya sama dengan nol maka *output*-nya juga nol
- Impedansi *input* tak terhingga artinya *input*-nya tidak akan menarik daya dan tingkat sebelumnya, sehingga yang diperlukan hanya perubahan tegangan saja.



- Impedansi pada bagian *output*-nya sangat rendah atau nol, artinya tegangan *output*-nya akan tetap walaupun impedansi beban hampir nol.
- Lebar *band width* tidak terhingga artinya penguat dan DC sama frekwensi tak terhingga tetap sama.
- Rise time sama dengan nol, artinya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai harga puncak pada sinyal *output* akan sama dengan pada sinyal *input*.
- Tidak peka terhadap perubahan tegangan sumber atau perubahan suhu (tidak ada drift).

Mengingat bahwa bahan – bahan yang dipergunakan untuk membuat IC OpAmp kemampuannya terbatas, seperti halnya benda-benda lainnya yang terdapat di alam ini, maka pada kenyataannya sebuah Op-Amp tidaklah tepat seperti penguat yang ideal. Sebuah Op-Amp hanyalah sebuah penguat yang agak mendekati penguat ideal karena pada umumnya :

- Faktor penguat A_v (*open loop gain*) walaupun cukup besar tetapi terbatas kira-kira 100.000 kali.
- Bila harga pada *input*-nya nol, maka *output*-nya belum tentu tepat nol tetapi mungkin sedikit lebih atau kurang
- Walaupun impedansi *input*-nya relatif cukup tinggi, tetapi terbatas hanya beberapa ratus kilo Ohm saja.
- Sedangkan harga impedansi pada *output*-nya yang relatif rendah juga terbatas berkisar hanya beberapa puluh sampai ratus Ohm saja.
- *Rise time*-nya tidak nol.

2.10.3 Rangkaian Penguat *Non-Linier*

Penguat operasional non linier adalah sejenis rangkaian penguat yang bentuk sinyalnya berbeda dengan bentuk sinyal masukannya.

2.10.3.1 Komparator

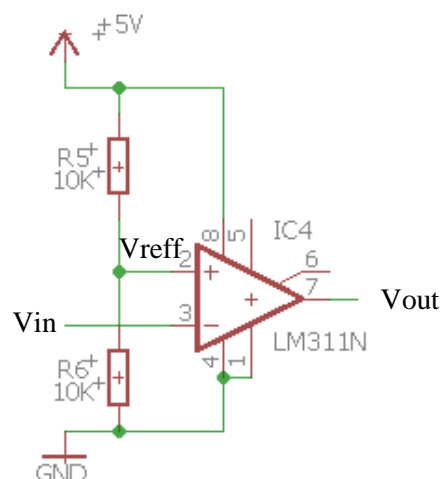
Kita sering membandingkan tegangan yang satu dengan yang lain untuk melihat tegangan mana yang lebih besar. Kita hanya memerlukan jawaban ya atau tidak saja, sebab sebuah pembandingan



(komparator) dapat menjawab pertanyaan tersebut. Sebuah komparator adalah rangkaian dengan dua tegangan masuk tak membalik dan membalik, dan satu tegangan keluaran. Bila tegangan tak membalik lebih besar dan pada tegangan membalik, maka komparator menghasilkan tegangan keluaran yang tinggi, begitu pula bila sebaliknya.

Rangkaian dasar Op-Amp sebagai komparator tampak pada Gambar 2.29 dimana Op-Amp dipasang tanpa tahanan umpan balik. Bila masukan membalik dihubungkan dengan *ground*, maka tegangan masukan akan kecil, sehingga sudah dapat membuat Op-Amp menjadi penuh.

Titik perpindahan atau titik ambang dan sebuah komparator ialah harga tegangan masuk pada saat keluaran beralih keadaan misalnya dan rendah ke tinggi atau sebaliknya. Pada titik perpindahan barharga nol, karena pada saat tegangan masuk inilah keluaran berubah keadaan. Bila V_{in} lebih besar dan pada titik perpindahan, maka keluarannya akan tinggi pula, tapi bila V_{in} lebih kecil dan pada titik perpindahan maka keluarannya akan rendah. Rangkaian semacam ini sering disebut sebagai detektor melintas nol (*zero crossing detector*).



Gambar 2.29 Komparator



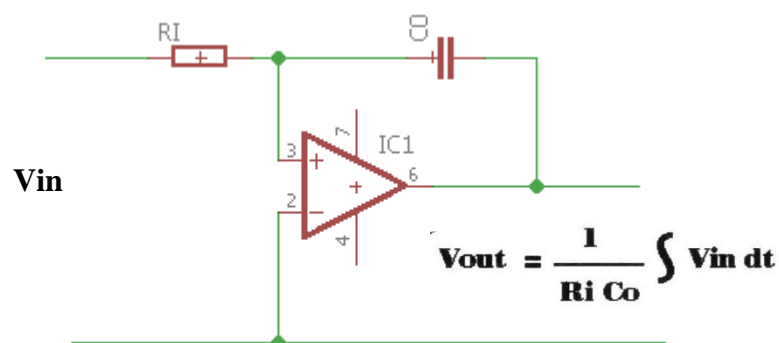
Komparator jenis lain adalah komparator window atau pembanding jendela, digunakan untuk membandingkan tegangan yang masuk melebihi suatu batas ambang tertentu dan mendeteksi kapan tegangan masuk ada diantara dua harga batas. Ini disebut juga sebagai detektor berujung ganda.

Pada rangkain ini dipasang dua buah dioda yang berfungsi untuk menyeleksi tegangan mana yang dapat masuk ke masukan Op-Amp. Bila tegangan masuk sama dengan nol, maka salah satu dioda akan mati atau off. Karena masukan tak membalik dijepit sebesar satu tegangan, dioda yang dimasuki tegangan masukan tak membalik akan berharga tinggi, sedangkan masukan membalik berharga rendah dan tegangan kesalahannya negatif serta keluaran pembanding rendah.

2.10.3.2 Integrator

Integrator adalah sebuah rangkaian yang menyelenggarakan operasi integrasi secara matematik, karenanya dapat menghasilkan tegangan keluaran yang sebanding dengan integrasi masukannya.

Pemakaian yang umum ialah menggunakan tegangan masuk tetap untuk menghasilkan tegangan keluar berbentuk lereng. Sebuah lereng ialah tegangan yang mendaki atau menurun secara linier. Misalkan jika kita menggerakkan 741C dengan undakan tegangan, maka keluarannya dengan laju slew 0,5 volt/detik, berarti tegangan keluarannya berubah sebesar 0,5 volt setiap satu mikrodetik.



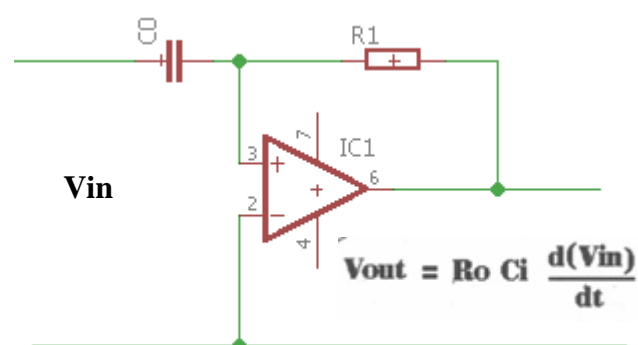
Gambar 2.30 Integrator



Pada Gambar 2.30 digambarkan sebuah integrator yang dibangun dengan sebuah Op-Amp, sebuah tahanan dan sebuah kapasitor. Masukan yang lazim pada sebuah integrator adalah pulsa persegi, dimana V_{in} diterapkan pada ujung kiri tahanan R, karena adanya *ground* semu, arus masuk berharga tetap. Sehingga hampir semua arus ini mengalir ke kapasitor, menyebabkan muatan pada kapasitor naik secara linier. Karena adanya pembalik fasa pada Op-Amp, maka tegangan keluarnya berbentuk lereng negatif. Pada ujung perioda pulsa tegangan masuk kembali ke nol, arus pengisian kapasitor berhenti. Ini menimbulkan tegangan keluar masih tetap pada tingkat negatif.

2.10.3.2 Diferensiator

Diferensiator adalah rangkaian yang melakukan operasi secara matematik, dan menghasilkan tegangan keluar yang sebanding dengan kemiringan tegangan masuknya. Umumnya diferensiator digunakan untuk mendeteksi tepi mendahului dan tepi ketinggalan dan sebuah pulsa persegi atau menghasilkan keluaran persegi dan masukan lereng.



Gambar 2.31 Diferensiator

Gambar 2.31 menunjukkan sebuah rangkaian diferensiator OpAmp. Perhatikanlah kemiripannya dengan integrator Op-Amp, di mana perbedaannya terletak pada tahanan dan kapasitornya yang saling



Politeknik Negeri Sriwijaya

berpindah tempat. Bila tegangan masuk berubah maka kapasitor diisi atau dikosongkan. Karena adanya *ground* semu, arus kapasitor mengalir melalui tahanan umpan balik yang menghasilkan tegangan yang setara dengan kemiringan dan tegangan masuk.