

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 lainnya (*wikipedia.org*). Mobil listrik memiliki beberapa kelebihan yang potensial jika dibandingkan dengan mobil berbahan bakar BBM pada umumnya. Hal yang paling utama adalah mobil listrik tidak menghasilkan polusi kendaraan bermotor, selain itu mobil listrik juga mengurangi emisi gas rumah kaca karena tidak membutuhkan bahan bakar fosil sebagai penggerak utamanya dan dikenal dengan mobil ramah lingkungan.

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 yang tidak dapat dicapai oleh kendaraan-kendaraan bermesin bensin saat itu. Perkembangan teknologi pembakaran dalam yang semakin maju, terutama di *starter* listriknya, lambat laun 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 pun menjadi semakin tidak populer, dan secara total menghilang dari pasaran, terutama di pasaran gemuk seperti Amerika Serikat, pada tahun 1930-an. Bagaimanapun juga, pada tahun-tahun belakangan 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 mahal. Mobil listrik saat ini mulai mendapatkan lagi popularitasnya di beberapa negara di dunia setelah sekian lama menghilang.



Gambar 2.1 Thomas Edison dan mobil listriknya tahun 1913

(sumber : http://wikipedia.org/mobil_listrik)

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 respons, beberapa pabrikan mencoba membuat mobil listrik mereka masing-masing, seperti Chrysler TEVan, truk pikap 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. Dua pasar NEV terbesar di dunia pada tahun 2011 adalah Amerika Serikat (14.727 unit) dan Perancis (2.231 unit).

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.

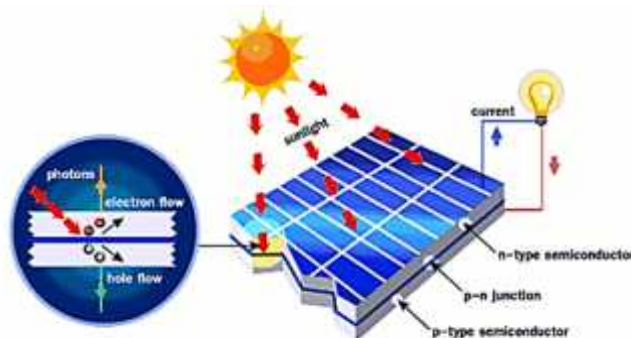


Gambar 2.2 Mobil Listrik PT. PINDAD sebagai pengujian Motor Listrik
(Sumber : Dr. Agus Purwadi, *Penelitian dan Pengembangan Mobil Listrik Nasional 2014*)

2.2 Solar Cell

2.2.1 Pengertian Solar Cell (Photovoltaic)

Solar cell atau panel surya adalah alat untuk 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 sel surya 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*. *Solarcell* 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>)

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.

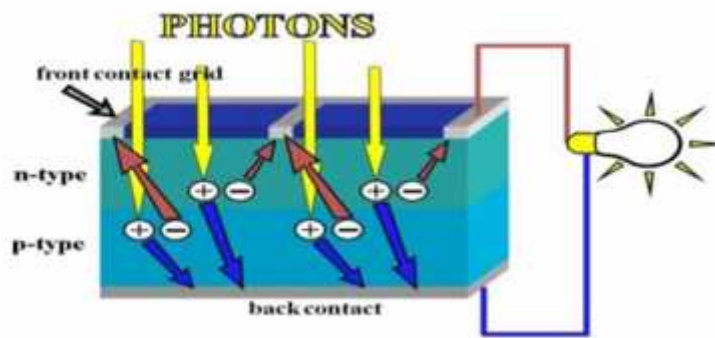
Spesifikasi keseluruhan dari *solar cell* yang digunakan adalah:

- Kekuatan daya maximum : 50 Watt
- Kekuatan arus yang mengalir maximum : 3.4 Ampere
- Kekuatan tegangan yang mengalir maximum : 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 : Datasheet Model Photovoltaic Module Siemens, USA)

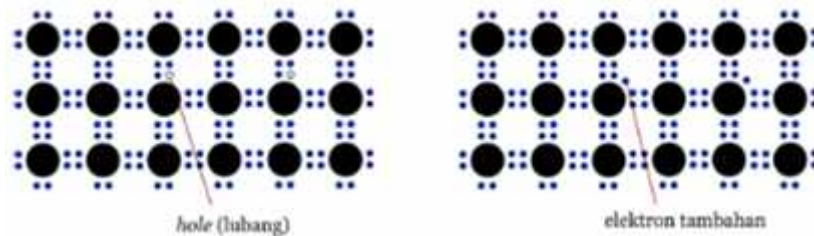
2.2.3 Prinsip Dasar Teknologi Solar Cell (Photovoltaic) Dari Bahan Silikon

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 sel surya adalah kristal silikon (Ady Iswanto : 2008).



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Solar Cell

2.2.3.1 Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N

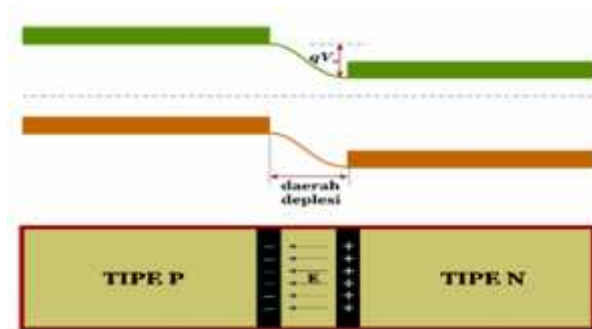


Gambar 2.5 Semikonduktor Tipe-P (Kiri) dan Tipe-N (Kanan)

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

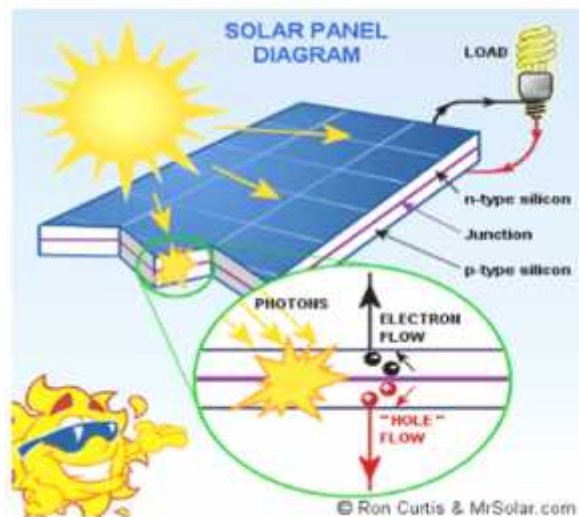
Ketika suatu kristal silikon ditambahkan dengan unsur golongan kelima, misalnya arsen, maka atom-atom arsen itu akan menempati ruang diantara atom-atom silikon yang mengakibatkan munculnya elektron bebas pada material campuran tersebut. Elektron bebas tersebut berasal dari kelebihan elektron yang dimiliki oleh arsen terhadap lingkungan sekitarnya, dalam hal ini adalah silikon. Semikonduktor jenis ini kemudian diberi nama semikonduktor tipe-n. Hal yang sebaliknya terjadi jika kristal silikon ditambahkan oleh unsur golongan ketiga, misalnya boron, maka kurangnya elektron valensi boron dibandingkan dengan silikon 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://solar_cell.com.jpg)

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, electron 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, photon 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 sel surya, 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 sel surya didapat apabila bagian depan (+) sel surya utama dihubungkan dengan bagian belakang (-) sel surya kedua (Owen Bishop : 2004). Hubungan seri dari sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Hubungan Seri

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

Tegangan sel surya dijumlahkan apabila dihubungkan seri satu sama lain.

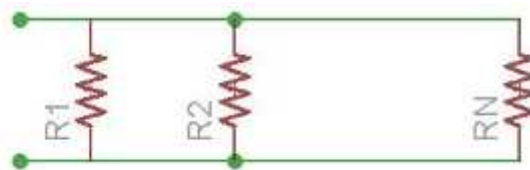
$$U_{\text{total}} = U_1 + U_2 + U_3 + U_n \dots\dots\dots (1)$$

Arus sel surya sama apabila dihubungkan seri satu sama lain.

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

2.2.5.1 Rangkaian Paralel Solar Cell

Rangkaian paralel sel surya didapat terminal kutub positif dan kutub negatif solar cell dihubungkan satu sama lain (Owen Bishop : 2004). Hubungan paralel sel surya dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Hubungan Paralel

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

Tegangan solarcell yang dihubungkan parallel sama dengan satu solar cell.

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

Arus yang timbul dari hubungan ini langsung dijumlahkan.

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

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).

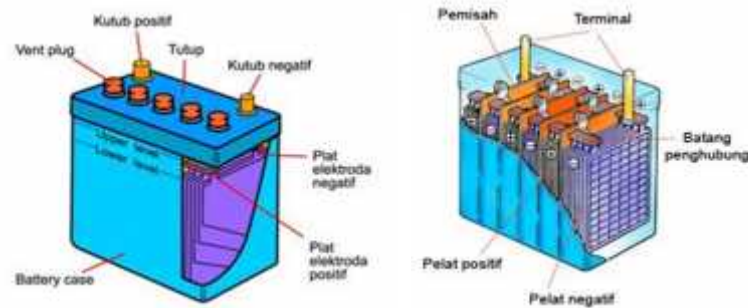
Akan tetapi, tidak seperti elemen primer, elemen sekunder dapat dimuati kembali berulang kali. Elemen sekunder ini lebih dikenal dengan *accu*. Dalam sebuah *accu* berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (bolak-balik) dengan efisiensi yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel 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 menyimpan 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, muncullah arus listrik.



Gambar 2.10 Sel Accu

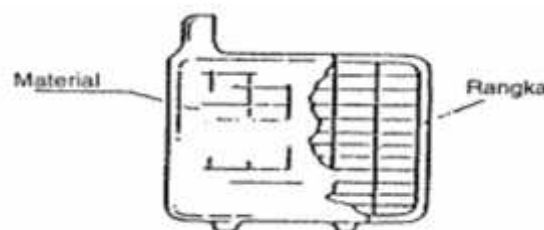
(Sumber : id.m.wikipedia.org/akumulator)

Accu memiliki 2 kutub/terminal, kutub positif dan kutub negatif. Biasanya kutub positif (+) lebih besar dari kutub negatif (-), untuk menghindarkan 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 diisi 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).

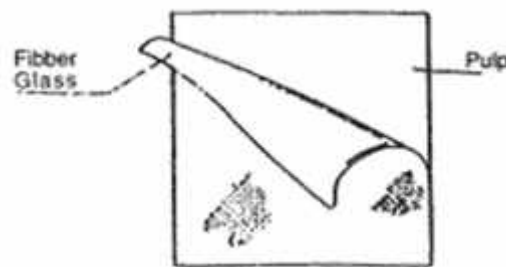


Gambar 2.11 Plat Sel Accu

(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 (*conector*) 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 kedalam sel.

6. Perekat bak dan tutup

Ada dua cara untuk menutup *accu*, yang pertama menggunakan bahan perekat lem, dan yang kedua dengan bantuan panas (*Heat Sealing*). Yang pertama untuk bak *polystyrene* sedang yang kedua untuk bak *polipropylene*.

2.3 Mikrokontroler ATmega32

Mikrokontroler, sebagai suatu terobosan teknologi mikrokontroler dan mikrokomputer, hadir memenuhi kebutuhan pasar (*market need*) dan teknologi baru. Sebagai teknologi baru, yaitu teknologi semikonduktor dengan kandungan transistor yang lebih banyak namun hanya membutuhkan ruang kecil serta dapat diproduksi secara massal (dalam jumlah banyak) sehingga harga menjadi lebih murah (dibandingkan mikroprosesor). Sebagai kebutuhan pasar, mikrokontroler hadir untuk memenuhi selera industri dan para konsumen akan kebutuhan dan keinginan alat-alat bantu dan mainan yang lebih canggih.

2.4.1 Pengertian Mikrokontroler ATmega32

Mikrokontroler ATmega32 merupakan salah satu keluarga dari MCS-51 keluaran Atmel. Jenis Mikrokontroler ini pada prinsipnya dapat digunakan untuk mengolah data per bit ataupun 8 bit secara bersamaan. Pada prinsipnya program pada Mikrokontroler dijalankan bertahap, jadi pada program itu sendiri terdapat beberapa set instruksi dan tiap instruksi itu dijalankan secara bertahap atau berurutan.

2.4.2 Karakteristik Mikrokontroller ATmega32

Beberapa fasilitas yang dimiliki oleh Mikrokontroler ATmega32 adalah sebagai berikut :

- Sebuah Central Processing Unit 8 bit.
- Osilator : Internal dan rangkaian pewaktu.
- RAM internal 128 byte.
- Flash Memory 2 Kbyte.
- Lima buah jalur interupsi (dua buah interupsi eksternal dan tiga buah interupsi internal).
- Empat buah programmable port I/O yang masing – masing terdiri dari delapan buah jalur I/O.
- Sebuah port serial dengan control serial full duplex UART.
- Kemampuan untuk melaksanakan operasi aritmatika dan operasi logika. Kecepatan dalam melaksanakan instruksi per siklus 1 mikrodetik pada frekuensi 12 MHz.

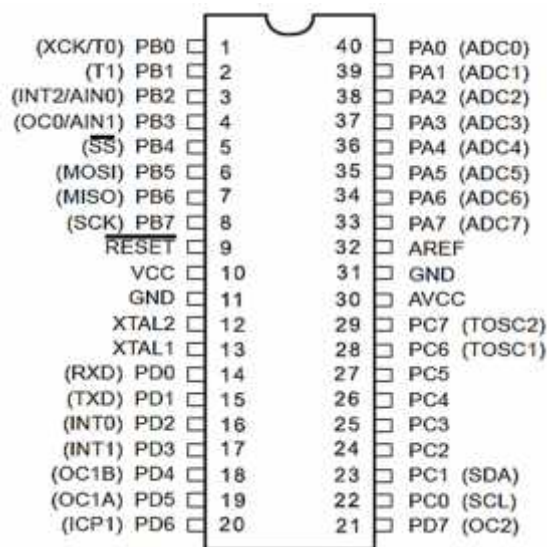
Mikrokontroller ATmega32 hanya memerlukan 3 tambahan kapasitor, 1 resistor dan 1 kristal serta catu daya 5 Volt. Kapasitor 10 mikro-Farad dan resistor 10 K Ω dipakai untuk membentuk rangkaian reset. Dengan adanya rangkaian reset ini ATmega32 otomatis direset begitu rangkaian menerima catu daya. Kristal dengan frekuensi maksimum 24 MHz dan kapasitor 30 pF dipakai untuk melengkapi rangkaian oscilator pembentuk clock yang menentukan kecepatan kerja mikrokontroler. Memori merupakan bagian yang sangat penting pada mikrokontroler. Mikrokontroler memiliki dua macam memori yang sifatnya berbeda. Read Only Memory (ROM) yang isinya tidak berubah meskipun IC kehilangan catu daya. Sesuai dengan keperluannya, dalam susunan MCS-51 memori penyimpanan program ini dinamakan sebagai memori program.

ATmega32 mempunyai enam sumber pembangkit interupsi, dua diantaranya adalah sinyal interupsi yang diumpankan ke kaki INT0 dan INT1. Kedua kaki ini berhimpitan dengan P3.2 dan P3.3 sehingga tidak bisa dipakai sebagai jalur input/output paralel kalau INT0 dan INT1 dipakai untuk menerima

sinyal interupsi. ATmega32 merupakan tipe AVR yang telah dilengkapi dengan 8 saluran ADC internal dengan fidelitas 10 bit. Dalam mode operasinya, ADC ATmega32 dapat dikonfigurasi, baik secara single ended input maupun differential input. Selain itu, ADC ATmega32 memiliki konfigurasi pewaktuan, tegangan referensi, mode operasi, dan kemampuan filter derau yang amat fleksibel, sehingga dengan mudah disesuaikan dengan kebutuhan ADC itu sendiri.

Port1 dan 2, UART, Timer 0, Timer 1 dan sarana lainnya merupakan register yang secara fisik merupakan RAM khusus, yang ditempatkan di *Special Function Register (SFR)*.

Deskripsi pin-pin pada Mikrokontroler ATmega32 :



Gambar 2.13 Konfigurasi IC Mikrokontroler ATmega32

(Sumber: Nugraha, Dhani dkk. Jurnal Tutorial Mikrokontroler ATmega 32, 2011)

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.

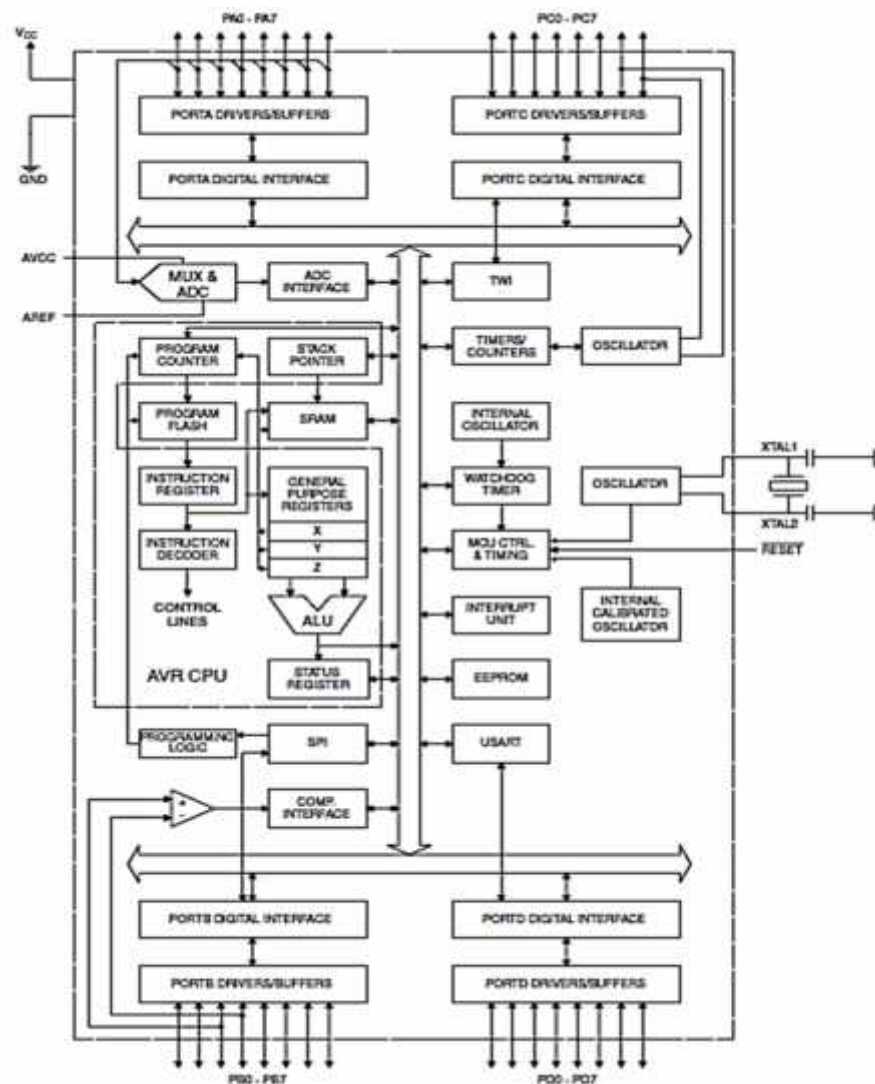
XTAL1 : Input penguat osilator inverting dan input pada rangkaian

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.



Gambar 2.14 Blog Diagram IC ATmega32

(Sumber: Nugraha, Dhani dkk. Jurnal Tutorial Mikrokontroler ATmega 32, 2011)

a. Port A (PA0-PA7)

Port A berfungsi sebagai input analog ke ADC. Port A juga dapat berfungsi sebagai port I/O 8 bit bidirectional, jika ADC tidak digunakan maka port dapat menyediakan resistor pull-up internal (dipilih untuk setiap bit).

b. Port B (PB0-PB7)

Port B merupakan I/O 8 bit bidirectional dengan resistor pull-up internal (dipilih untuk setiap bit).

c. Port C (PC0-PC7)

Port C merupakan I/O 8 bit bidirectional dengan resistor pull-up internal (dipilih untuk setiap bit)

d. Port D (PD0-PD7)

Port D merupakan I/O 8 bit bidirectional dengan resistor pull-up internal (dipilih untuk setiap bit).

2.5 Motor Listrik BLDC (800 Watt 48 Vdc)

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.

2.5.1 Pengertian BLDC Motor

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. Elevich, 2005*).



Gambar 2.15 Konstruksi Motor BLDC

(Sumber: <http://motor-listrik-blcd.jpg>)

2.5.2 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.

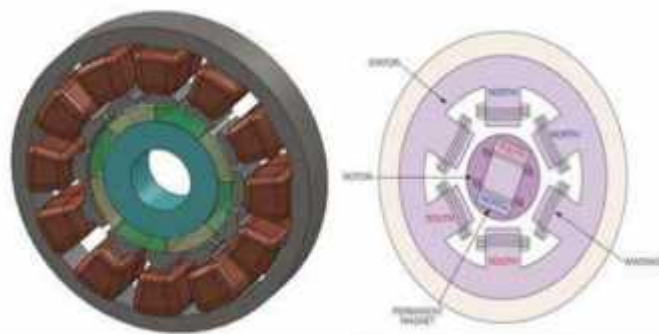
1. Rotor

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 2.16 Penampang Motor BLDC

(Sumber : Muhammad Azzumar, Skripsi UI, 2012)

Belitan stator pada motor DC *brushless* terdiri dari dua jenis, yaitu belitan stator jenis trapezoidal dan jenis sinusoidal. Yang menjadi 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 :

$$\text{EMF balik} = B \cdot N \cdot l \cdot r \cdot \omega \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan :

B = kerapatan medan magnet yang dihasilkan rotor (Tesla)

N = banyaknya lilitan pada belitan stator per fasa

l = panjangnya batang rotor (m)

r = jari-jari dalam motor (m)

ω = kecepatan sudut putaran motor (rad) (dimana $\omega = 2\pi f$)

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 dapat dihitung dengan :

$$T = K_{rms} \cdot \Phi \cdot I \text{ (Nm) (6)}$$

Keterangan :

K_{rms} = tegangan rata-rata konstan (Volt)

Φ = besarnya fluks magnet (Tesla)

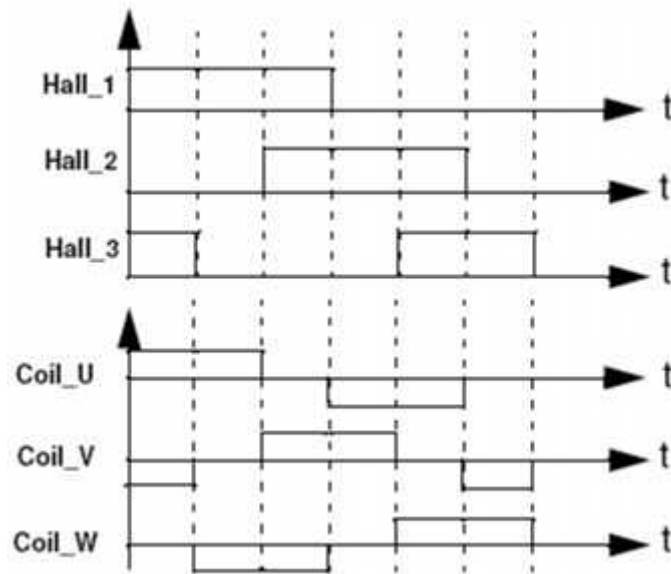
I = besarnya arus (Ampere)

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

1. Hall Sensor

Komutasi dari motor DC *brushless* diatur secara elektronik agar motor dapat berputar, stator harus di-*energize* secara berurutan dan teratur. Sensor hall inilah yang berperan dalam mendeteksi pada bagian rotor mana yang ter-*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 2.17 Sensor Hall Sinyal Untuk Rotasi Kanan

(Sumber : Djodi Antono, Staf Pengajar Politeknik Negeri Semarang, 2012)

2.5.3 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 (B):

$$B = \frac{\mu Ni}{2l} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan :

N = jumlah lilitan

i = arus

l = panjang lilitan

μ = permeabilitas bahan

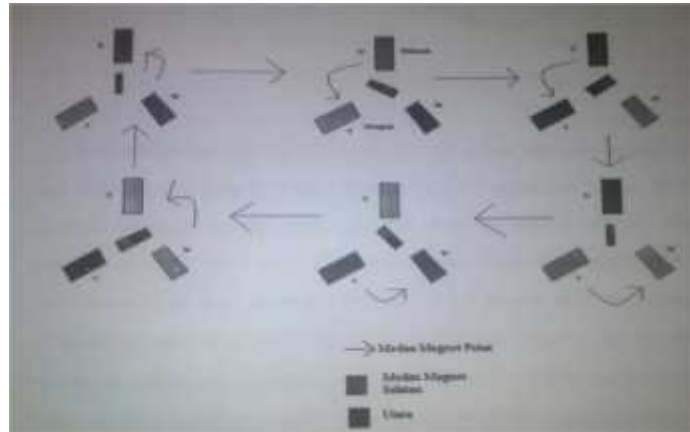
Karena arus yang diberikan berupa arus AC 3 fasa sinusoidal, nilai medan magnet dan polarisasi setiap kumparan akan berubah-ubah setiap saat. Akibat yang ditimbulkan dari adanya perubahan polarisasi dan besar medan magnet tiap kumparan adalah terciptanya medan putar magnet dengan kecepatan :

$$n_s = \frac{120f}{p} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan :

f = frekuensi arus input

p = jumlah pole rotor



Gambar 2.18 Medan Magnet Putar Stator dan Perputaran Rotor

(Sumber : Abe Dharmawan, Skripsi UI, 2009)

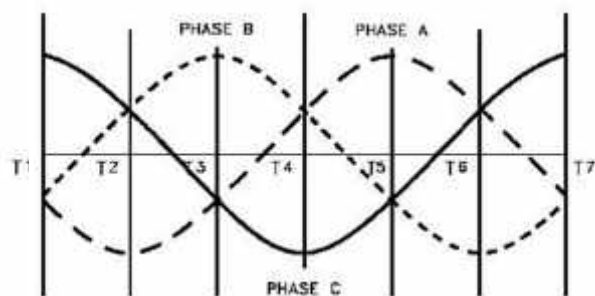
Berdasarkan gambar 2.18, medan putar magnet stator timbul akibat adanya perubahan polaritas pada stator U, V, dan W. Perubahan polaritas ini terjadi akibat adanya arus yang mengalir pada stator berupa arus AC yang memiliki polaritas yang berubah-ubah.

Ket :

Phase A = - - - - -

Phase B = - - - - -

Phase C = —————



Gambar 2.19 Tegangan Stator BLDC

(Sumber : Muhammad Azzumar, Skripsi UI, 2012)

Berdasarkan gambar 2.19, ketika stator U diberikan tegangan negatif maka akan timbul medan magnet dengan polaritas negative 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.

2.5.4 Keunggulan BLDC Motor

Brushless DC (BLDC) motor adalah pilihan ideal untuk aplikasi yang memerlukan keandalan yang tinggi, efisiensi tinggi, dan tinggi power-to-volume ratio. 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.

Tabel 2.1 Comparing A BLDC Motor To A Brushes DC Motor

Feature	BLDC Motor	Brushed DC Motor
Commutation	Electronic commutation based on hall position sensors.	Brushed commutation.
Maintenance	Less required due to absence of brushes.	Periodic maintenance is required.
Life	Longer.	Shorter.
Speed/torque characteristics	Flat - Enables operation at all speeds with rated load.	Moderately flat - At higher speeds, brush friction increases, thus reducing useful torque.
Efficiency	High – No voltage drop across brushes.	Moderate.
Output power/frame size	High – Reduced size due to superior thermal characteristics. Because BLDC has the windings on the stator, which is connected to the case, the heat dissipation is better.	Moderate/low – The heat produced by the armature is dissipated in the air gap, thus increasing the temperature in the air gap and limiting specs on the output power/frame size.
Rotor inertia	Low, because it has permanent magnets on the rotor. This	Higher rotor inertia which limits the dynamic characteristics.

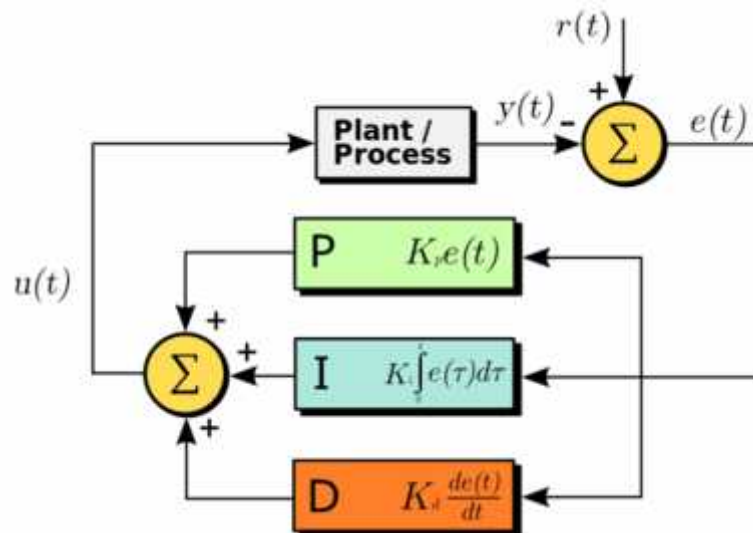
	improves the dynamic response.	
Speed range	Higher – No mechanical limitation imposed by brushes/commutator.	Lower – Mechanical limitations by the brushes.
Electric noise generation	Low.	Arcs in the brushes will generate noise causing EMI in the equipment nearby.
Cost of building	Higher – Since it has permanent magnets, building costs are higher.	Low.
Control	Complex and expensive.	Simple and inexpensive.
Control requirements	A controller is always required to keep the motor running. The same controller can be used for variable speed control.	No controller is required for fixed speed, a controller is required only if variable speed is desired.

Tabel 2.2 Comparing a BLDC Motor to an induction motor

Features	BLDC Motors	AC Induction Motors
Speed / torque characteristics	Flat – Enables operation at all speeds with rated load.	Nonlinear – Lower torque at lower speeds.
Output power / frame size	High – Since it has permanent magnets on the rotor, smaller size can be achieved for a given output power.	Moderate – Since both stator and rotor have windings, the output power to the size is lower than BLDC.
Rotor inertia	Low – Better dynamic characteristics.	High – Poor dynamic characteristics.
Starting current	Rated – No special starter circuit required.	Approximately up to seven times or rated – Starter circuit rating should be carefully selected. Normally uses a star-delta starter.
Control requirements	A controller is always required to keep the motor running. The same controller can be used for variable speed control.	No controller is required for fixed speed, a controller is required only if variable speed is desired.
Slip	No slip is experienced between stator and rotor frequencies.	The rotor runs at a lower frequency than stator by slip frequency and slip increases with load on the motor.

2.6 Pengendali PID

Sistem Kontrol PID (*Proportional–Integral–Derivative controller*) merupakan kontroler untuk menentukan presisi suatu sistem instrumentasi dengan karakteristik adanya umpan balik (*feedback*) pada sistem tersebut (wikipedia.org).



Gambar 2.20 Blok Diagram dari Kontroller PID

(sumber : <http://wikipedia.org>)

Sistem kontrol PID terdiri dari tiga buah cara pengaturan yaitu kontrol P (*Proportional*), D (*Derivative*) dan I (*Integral*), dengan masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan. Dalam implementasinya masing-masing cara dapat bekerja sendiri maupun gabungan diantaranya. Dalam perancangan sistem kontrol PID yang perlu dilakukan adalah mengatur parameter P, I atau D agar tanggapan sinyal keluaran sistem terhadap masukan tertentu sebagaimana yang diinginkan.

Secara umum bentuk persamaan pengontrol PID dapat dinyatakan oleh persamaan berikut:

$$mv(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan :

$mv(t)$ = *manipulated variable* keluaran dari pengontrol PID

K_p = penguatan proporsional

T_i = waktu integral

T_d = waktu derivatif

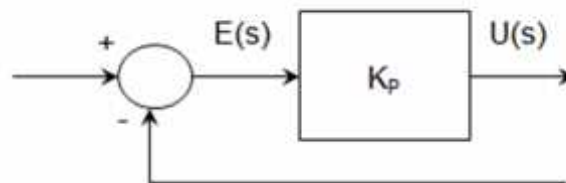
$e(t)$ = *error* (*setpoint* – keluaran)

Tabel 2.3 Hubungan antara K_p , K_i , dan K_d

Parameter	Rise Time	Overshoot	Settling Time	Steady-state error	Stability
K_p	Decrease	Increase	Small change	Decrease	Degrade
K_i	Decrease	Increase	Decrease	Eliminate	Degrade
K_d	Minor change	Decrease	Increase	No effect	Improve if K_d small

2.6.1 Kontrol Proporsional

Kontroler proporsional memiliki keluaran yang sebanding/proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya) (Sharon, 1992, 19). Secara lebih sederhana dapat dikatakan, bahwa keluaran kontroler proporsional merupakan perkalian antara konstanta proporsional dengan masukannya. Perubahan pada sinyal masukan akan segera menyebabkan sistem secara langsung mengubah keluarannya sebesar konstanta pengalinya.



Gambar 2.21 Blok Diagram Kontrol Proportional

Gambar 2.21 menunjukkan blok diagram yang menggambarkan hubungan antara besaran setting, besaran aktual dengan besaran keluaran kontroler

proporsional. Sinyal kesalahan (error) merupakan selisih antara besaran setting dengan besaran aktualnya. Selisih ini akan mempengaruhi controller, untuk mengeluarkan sinyal positif (mempercepat pencapaian harga setting) atau negatif (memperlambat tercapainya harga yang diinginkan).

Secara matematis, pengontrol P dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan :

$u(t)$ = nilai output

K_p = Kontrol proporsional

$e(t)$ = nilai error

K_p merupakan suatu bilangan yang menyatakan penguatan proporsional dari pengontrol P. Istilah yang lazim digunakan adalah *Proportional Band* (PB). Sedangkan $e(t)$ merupakan besarnya kesalahan yang terjadi pada waktu t . Sinyal kesalahan tersebut diakibatkan oleh selisih antara *setpoint* (besaran yang diinginkan) dengan keluaran aktual proses. Sinyal kesalahan tersebut akan mempengaruhi aksi pengontrol dalam mengeluarkan sinyal kontrol untuk menggerakkan aktuator.

Pengaruh komponen K_p adalah memperkecil konstanta waktu sehingga sistem menjadi lebih sensitif dan mempunyai respons yang lebih cepat. Dengan mengubah-ubah besaran K_p , maka akan mempengaruhi *offset* atau *steady state error*. Harga K_p yang besar akan menyebabkan *offset* semakin kecil. Akan tetapi disisi lain, pengontrol P tidak akan melakukan aksi kontrolnya apabila tidak ada sinyal kesalahan $e(t)$. Hal ini dapat terlihat dari persamaan diatas, yang menunjukkan bahwa pengontrol P akan selalu memerlukan sinyal kesalahan untuk menghasilkan sinyal kontrol $u(t)$.

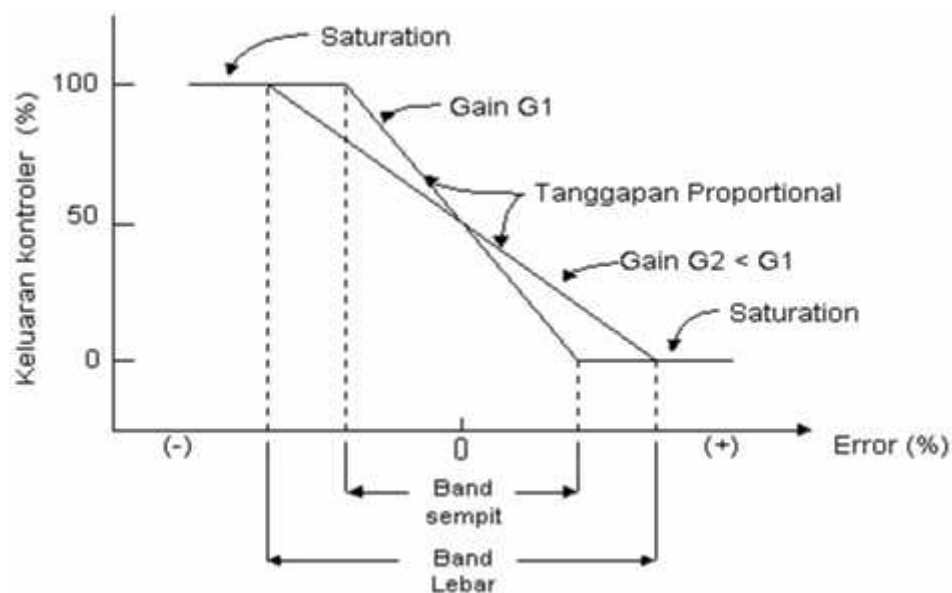
Kontroler proporsional memiliki 2 parameter, pita proporsional (*proportional band*) dan konstanta proporsional. Daerah kerja controller efektif

dicerminkan oleh Pita proporsional (Gunterus, 1994, 6-24), sedangkan konstanta proporsional menunjukkan nilai faktor penguatan terhadap sinyal kesalahan, K_p .

Hubungan antara pita proporsional (PB) dengan konstanta proporsional (K_p) ditunjukkan secara prosentasi oleh persamaan berikut:

$$PB = \frac{1}{K_p} \times 100 \% \dots\dots\dots (11)$$

Gambar 2.22 menunjukkan grafik hubungan antara PB, keluaran kontroler dan kesalahan yang merupakan masukan controller. Ketika konstanta proporsional bertambah semakin tinggi, pita proporsional menunjukkan penurunan yang semakin kecil, sehingga lingkup kerja yang dikuatkan akan semakin sempit (Johnson, 1988, 372).



Gambar 2.22 Proportional band dari kontroler proporsional tergantung pada penguatan.

Pengaruh pada sistem :

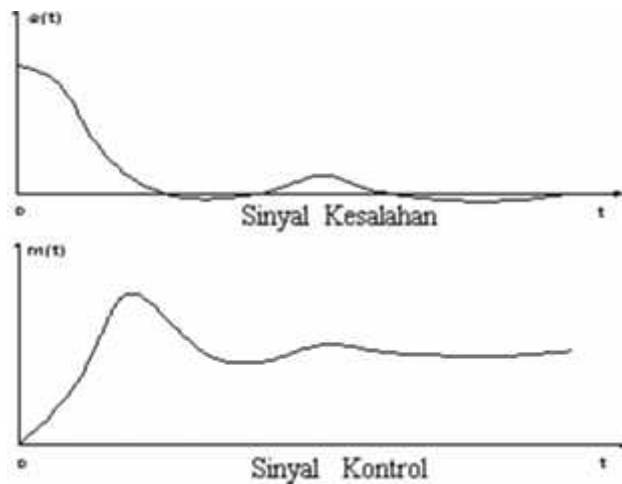
- Menambah atau mengurangi kestabilan
- Dapat memperbaiki respon transien khususnya : *rise time, settling time*
- Mengurangi (bukan menghilangkan) *Error steady state* (E_{ss})
- Untuk menghilangkan E_{ss} , dibutuhkan K_p besar, yang akan membuat sistem lebih tidak stabil
- Kontroler Proporsional memberi pengaruh langsung (sebanding) pada error
- Semakin besar error, semakin besar sinyal kendali yang dihasilkan kontroler

2.6.2 Kontrol Integral

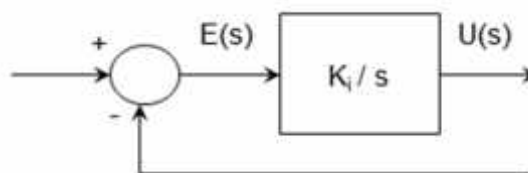
Pengontrol integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan keadaan mantap nol (*Error Steady State* = 0). Jika sebuah pengontrol tidak memiliki unsur integrator, pengontrol proporsional tidak mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan keadaan mantapnya nol.

Kontroler integral memiliki karakteristik seperti halnya sebuah integral. Keluaran controller sangat dipengaruhi oleh perubahan yang sebanding dengan nilai sinyal kesalahan (Rusli, 18, 1997). Keluaran kontroler ini merupakan jumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan.

Sinyal keluaran kontroler integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan penggerak- lihat konsep numerik. Sinyal keluaran akan berharga sama dengan harga sebelumnya ketika sinyal kesalahan berharga nol. Gambar 2.23 [Ogata, 1997, 236] menunjukkan contoh sinyal kesalahan yang disulutkan ke dalam controller integral dan keluaran controller integral terhadap perubahan sinyal kesalahan tersebut.



Gambar 2.23 Kurva sinyal kesalahan



Gambar 2.24 Blok Diagram Kontrol Integral

Secara matematis, pengontrol P dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \dots\dots\dots (12)$$

Keterangan :

$u(t)$ = nilai output

K_i = Kontrol integral

$e(t)$ = nilai error

Jika $G(s)$ adalah kontrol I maka u dapat dinyatakan sebagai $u(t) = [integrale(t)dT] K_i$ dengan K_i adalah konstanta Integral, dan dari persamaan diatas, $G(s)$ dapat dinyatakan sebagai $u = Kd.[deltae / deltat]$ Jika $e(t)$ mendekati konstan (bukan nol) maka $u(t)$ akan menjadi sangat besar sehingga diharapkan dapat memperbaiki error. Jika $e(t)$ mendekati nol maka efek kontrol I ini semakin kecil.

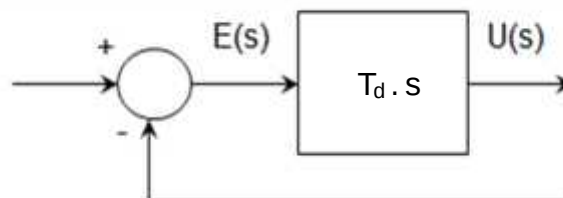
Kontrol I dapat memperbaiki sekaligus menghilangkan respon steady-state, namun pemilihan K_i yang tidak tepat dapat menyebabkan respon transien yang tinggi sehingga dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Pemilihan K_i yang sangat tinggi justru dapat menyebabkan output berosilasi karena menambah orde sistem

Pengaruh pada sistem :

- Menghilangkan *Error Steady State* (E_{ss})
- Respon lebih lambat (dibanding P)
- Dapat menimbulkan ketidakstabilan (karena menambah orde sistem)
- Perubahan sinyal kontrol sebanding dengan perubahan error
- Semakin besar error, semakin cepat sinyal kontrol bertambah/berubah

2.6.3 Kontrol Derivatif

Keluaran pengontrol diferensial memiliki sifat seperti halnya suatu operasi derivatif. Perubahan yang mendadak pada masukan pengontrol akan mengakibatkan perubahan yang sangat besar dan cepat. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran pengontrol juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal masukan berubah mendadak dan menaik (berbentuk fungsi *step*), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi *ramp*), keluarannya justru merupakan fungsi *step* yang besar magnitudenya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta K_d .



Gambar 2.25 Blok Diagram Kontrol Derivatif

Sinyal kontrol u yang dihasilkan oleh kontrol D dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$u(t) = K_d \cdot \frac{e(t)}{dt} \dots\dots\dots (13)$$

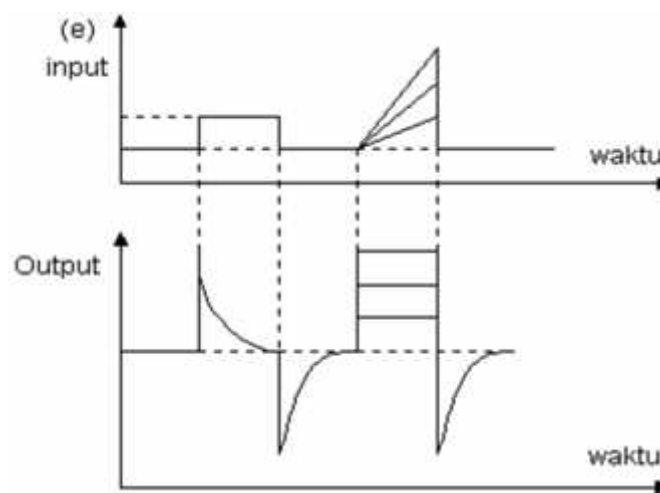
Keterangan :

$u(t)$ = nilai output

K_d = Kontrol derivatif

$e(t)$ = nilai error

Dari persamaan di atas, nampak bahwa sifat dari kontrol D ini dalam konteks "kecepatan" atau rate dari error. Dengan sifat ini ia dapat digunakan untuk memperbaiki respon transien dengan memprediksi error yang akan terjadi. Kontrol Derivative hanya berubah saat ada perubahan error sehingga saat error statis kontrol ini tidak akan bereaksi, hal ini pula yang menyebabkan kontroler derivatif tidak dapat dipakai sendiri.



Gambar 2.26 Kurva Waktu Hubungan Input-Output Kontroler Diferensial

Gambar 2.26 menyatakan hubungan antara sinyal masukan dengan sinyal keluaran kontroler diferensial. Ketika masukannya tidak mengalami perubahan, keluaran kontroler juga tidak mengalami perubahan, sedangkan apabila sinyal

masukan berubah mendadak dan menaik (berbentuk fungsi *step*), keluaran menghasilkan sinyal berbentuk impuls. Jika sinyal masukan berubah naik secara perlahan (fungsi *ramp*), keluarannya justru merupakan fungsi *step* yang besar magnitudnya sangat dipengaruhi oleh kecepatan naik dari fungsi *ramp* dan faktor konstanta diferensialnya T_d (Guterus, 1994, 8-4).

Pengaruh pada sistem :

- Memberikan efek redaman pada sistem yang berosilasi, sehingga bisa memperbesar pemberian nilai K_p
- Memperbaiki respon transien, karena memberikan aksi saat ada perubahan error
- D hanya berubah saat ada perubahan error, sehingga saat ada error statis D tidak beraksi, sehingga D tidak boleh digunakan sendiri
- Besarnya sinyal kontrol sebanding dengan perubahan error (Δe)
- Semakin cepat error berubah, semakin besar aksi kontrol yang ditimbulkan

2.6.4 Langkah-Langkah Membuat Sinyal Kontrol

Untuk mendapatkan aksi kontrol yang baik diperlukan langkah coba-coba dengan kombinasi antara P, I dan D sampai ditemukan nilai K_p , K_i dan K_d seperti yang diinginkan.

1. Memahami cara kerja sistem,
2. Mencari model sistem dinamik dalam persamaan differensial,
3. Mendapatkan fungsi alih sistem dengan Transformasi Laplace,
4. Memberikan aksi pengontrolan dengan menentukan konstanta K_p , K_i dan K_d ,
5. Menggabungkan fungsi alih yang sudah didapatkan dengan jenis aksi pengontrolan,
6. Menguji sistem dengan sinyal masukan fungsi langkah, fungsi undak dan impuls ke dalam fungsi alih yang baru,
7. Melakukan Transformasi Laplace balik untuk mendapatkan fungsi dalam kawasan waktu,
8. Menggambar tanggapan sistem dalam kawasan waktu

2.7 Sensor Arus ACS712

ACS712 adalah sensor arus yang bekerja berdasarkan efek medan. Sensor arus ini dapat digunakan untuk mengukur arus AC atau DC. Modul sensor ini telah dilengkapi dengan rangkaian penguat operasional, sehingga sensitivitas pengukuran arusnya meningkat dan dapat mengukur perubahan arus yang kecil. Sensor ini digunakan pada aplikasi-aplikasi di bidang industri, komersial, maupun komunikasi. Contoh aplikasinya antara lain untuk sensor kontrol motor, deteksi dan manajemen penggunaan daya, sensor untuk catu daya tersaklar, sensor proteksi terhadap arus lebih, dan lain sebagainya.

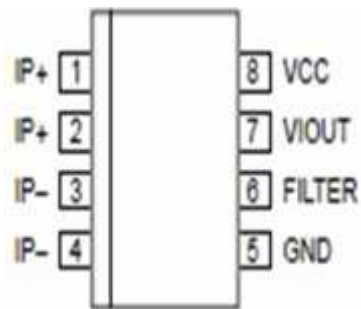
Berikut ini adalah karakteristik dari sensor arus ACS712 :

- Memiliki sinyal analog dengan sinyal-gangguan rendah (*low-noise*)
- Ber-*bandwidth* 80 kHz
- Total output error 1.5% pada $T_a = 25^{\circ}\text{C}$
- Memiliki resistansi dalam $1.2\text{ m}\Omega$
- Tegangan sumber operasi tunggal 5.0V
- Sensitivitas keluaran: 66 sd 185 mV/A
- Tegangan keluaran proporsional terhadap arus AC ataupun DC
- Fabrikasi kalibrasi
- Tegangan *offset* keluaran yang sangat stabil
- Hysteresis akibat medan magnet mendekati nol
- Rasio keluaran sesuai tegangan sumber



Gambar 2.27 Kemasan dari IC ACS712

(sumber : <http://depokinstruments.com>)



Gambar 2.28 Konfigurasi Pin dari IC ACS712

(sumber : <http://depokinstruments.com>)

Tabel 2.4 dibawah ini menunjukkan konfigurasi tiap-tiap pin pada IC ACS712 beserta fungsinya.

Tabel 2.4 Konfigurasi Pin Sensor ACS712

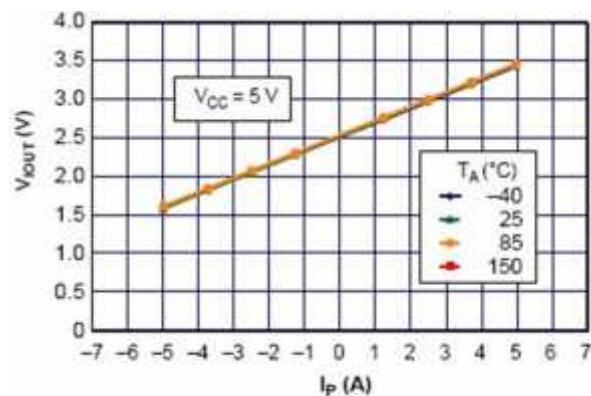
Pin Sensor ACS712	Fungsi
IP +	Terminal yang mendeteksi arus, terdapat sekring di dalamnya
IP -	Terminal yang mendeteksi arus, terdapat sekring di dalamnya
GND	Terminal sinyal <i>ground</i>
FILTER	Terminal untuk kapasitor eksternal yang berfungsi sebagai pembatas <i>bandwith</i>
VIout	Terminal keluaran sinyal analog
Vcc	Terminal masukan catu daya

Berikut adalah tabel pembacaan dari berbagai tipe IC ACS712 terhadap jangkauan dan sensitivitas pada masing-masing IC ACS712.

Tabel 2.5 Tipe-tipe IC ACS712

Part Number	Ta (°C)	Jangkauan	Sensitivitas (mV/A)
ACS712ELCTR-05B-T	-40 to 85	±5	185
ACS712ELCTR-20A-T	-40 to 85	±20	100
ACS712ELCTR-30A-T	-40 to 85	±30	66

Pada saat tidak ada arus yang terdeteksi, maka keluaran sensor adalah 2,5 V. Dan saat arus mengalir dari IP+ ke IP-, maka keluaran akan $>2,5$ V. Sedangkan ketika arus listrik mengalir terbalik dari IP- ke IP+, maka keluaran akan $<2,5$ V. Berikut adalah grafik perbandingan tegangan keluaran terhadap arus listrik.



Gambar 2.29 Grafik Tegangan Keluaran Sensor ACS712 Terhadap Arus Listrik

(sumber : <http://depokinstruments.com>)