

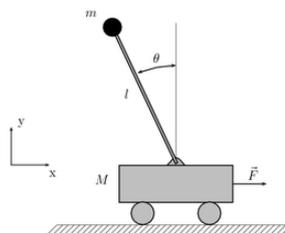
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Robot Keseimbangan (*Balancing Robot*)

Robot keseimbangan (*balancing robot*) beroda dua merupakan suatu robot mobile yang memiliki dua buah roda disisi kanan dan kirinya yang tidak akan seimbang apabila tanpa adanya kontroler. Robot keseimbangan (*balancing robot*) ini merupakan pengembangan dari model pendulum terbalik (*Inverted Pendulum*).

Pendulum terbalik adalah pendulum yang terengsel ke kereta beroda yang dapat bergerak maju dan mundur pada bidang horisontal di sepanjang lintasan. Penerapan konsep pendulum terbalik dalam dunia robotika bisa dilihat pada robot keseimbangan, yaitu robot dengan dua roda yang roda tersebut diasumsikan sebagai kereta beroda dan badan robot diasumsikan sebagai pendulum. Sistem ini tidak stabil karena ketika kereta beroda diberi gangguan dari luar maka pendulum akan jatuh. Ketika pendulum atau *balancing robot*, mempertahankan agar pendulum tidak terjatuh dibutuhkan sebuah kendali suatu kendali khusus.



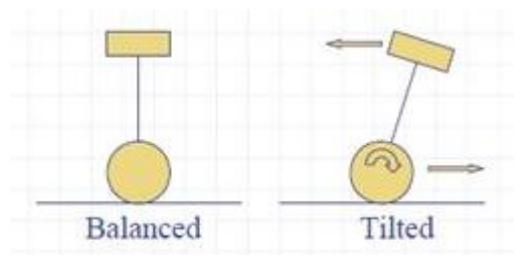
Gambar 2.1 Pendulum Terbalik

(Sumber: http://www.oocities.org/husni_ums/dsk/bandulterbalik.html)

Dalam keadaan diam, pendulum terbalik yang diatur agar pada keadaan awal yang tegak, akan mulai membentuk sudut θ dan lama kelamaan akan jatuh karena adanya gaya gravitasi. Untuk mempertahankan posisi pendulum pada suatu titik, dipertahankan diperlukan sebuah gaya yang dapat menahan pergerakan pendulum. Cara menghasilkan gaya tersebut adalah dengan membuat kereta tersebut maju kearah dengan arah kemana pendulum tersebut condong / akan jatuh.



Kendali yang baik akan membuat pendulum tetap seimbang dengan cara mengendalikan pergerakan poros putar atau kereta beroda dimana pendulum tersebut terpasang. Dasar untuk membuat robot beroda dua dapat seimbang adalah dengan cara mengendalikan roda searah dengan arah jatuhnya bagian atas robot tersebut. Apabila proses tersebut dapat terlaksana maka robot tersebut dapat seimbang.



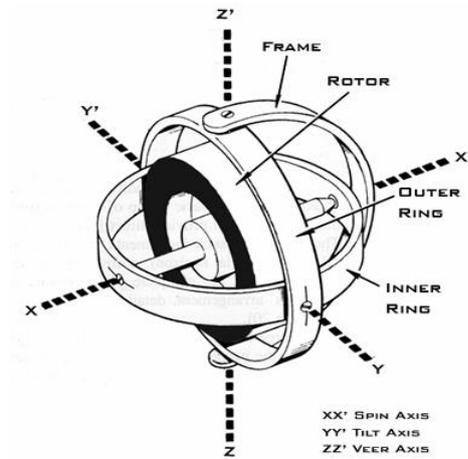
Gambar 2.2 Balancing Robot Beroda Dua Menyeimbangkan Diri

(Sumber: <http://www.instructables.com/id/Self-Balancing-Robot/step2/Physics>)

Saat balancing robot beroda dua condong kedepan atau miring ke kiri seperti gambar, maka tindakan yang perlu dilaksanak adalah motor bergerak searah dengan arah kemiringan yang terjadi, sehingga robot akan kembali tegak lurus dengan permukaan bidang datar.

2.2 Sensor Gyroscope dan Accelerometer

gyroscope atau *Gyro* adalah perangkat untuk mengukur atau mempertahankan orientasi, dengan prinsip ketetapan momentum sudut. Mekanismenya adalah sebuah roda berputar dengan piringan didalamnya yang tetap stabil. Giroskop sering digunakan pada robot atau heli dan alat-alat canggih lainnya. *Gyroscope* adalah berupa sensor gyro untuk menentukan orientasi gerak dengan bertumpu pada roda atau cakram yang berotasi dengan cepat pada sumbu.

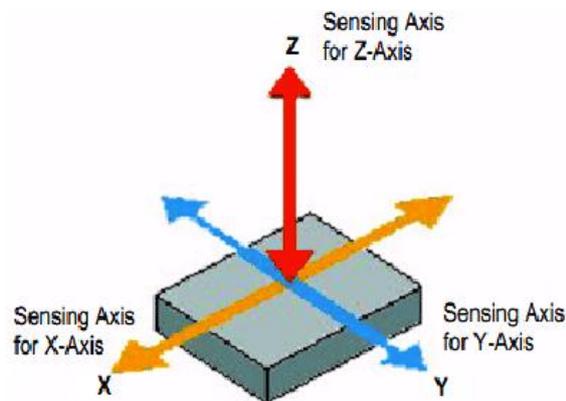


Gambar 2.3 Prinsip Kerja Gyroscope

(Sumber:http://www.dutchops.com/Portfolio_Marcel/Articles/Instruments/Gyroscopic_Instruments/Theory_Gyroscopes.htm)

Gyro sensor bisa mendeteksi gerakan sesuai gravitasi, atau dengan kata lain mendeteksi gerakan pengguna. Sebelum digunakan, sensor *gyroscope* terlebih dahulu dilakukan proses kalibrasi dengan menggunakan bandul. Proses kalibrasi tersebut berfungsi untuk memperoleh nilai faktor kalibrasi. *Gyroscope* memiliki keluaran berupa kecepatan sudut dari arah 3 sumbu yaitu: sumbu x yang nantinya akan menjadi sudut ϕ (kanan dan kiri), sumbu y nantinya menjadi sudut θ (atas dan bawah), dan sumbu z nantinya menjadi sudut ψ (depan dan belakang).

Sensor *Accelerometer* yaitu sebuah transducer yang bekerja untuk mengukur dan mendeteksi adanya percepatan dan getaran akibat gravitasi bumi. Alat sensor ini mampu bekerja untuk mengukur suatu getaran yang terjadi pada benda atau objek tertentu seperti mesin, kendaraan, bangunan, dan lebih hebatnya lagi bisa mengukur getaran di dalam bumi tanpa pengaruh gravitasi bumi.



Gambar 2.4 Prinsip Accelerometer

(Sumber: <http://www.engineersgarage.com/contribution/microcontroller-based-accelerometer-project?page=3>)

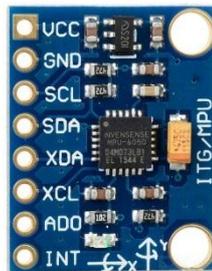
Berdasarkan ilmu Fisika dan Hukum Fisika bahwa bila konduktor digerakan ke medan magnet ataupun sebaliknya, maka yang terjadi adalah akan menimbulkan suatu tegangan induksi pada konduktor yang ada. *Accelerometer* sensor yang diletakan di permukaan bumi itu bisa mendeteksi suatu percepatan $1g$ atau sebuah ukuran gravitasi pada bumi di titik pusat vertical. Untuk pendeteksi bumi pada titik vertical, karena disebabkan adanya pergerakan percepatan dari horizontal, oleh karena itu Sensor *Accelerometer* ini akan mengukur percepatannya pada waktu itu atau secara langsung ketika percepatan itu bergerak secara horizontal.

Karena Sensor *Accelerometer* ini dibuat oleh perusahaan atau pabriknya yang dibuat secara berbeda mulai dari jenis dan spesifikasinya karena alat ini sangat khusus untuk setiap digunakanya. Sekarang pada saat ini, Hampir semua alat ini berpenampilan Digital.

2.3 Modul MPU 6050 6-Axis Gyroscope & Accelerometer Module

MPU-6050 menerapkan teknologi *MotionFusion* dan *run-time calibration firmware* yang menjamin kinerja optimal bagi pengguna. Dengan adanya Digital *Motion Processor* modul ini dapat diintegrasikan dengan magnetometer atau

sensor lainnya lewat antarmuka I²C untuk memproses algoritma gerakan yang kompleks secara internal tanpa membebani kerja mikroprosesor / mikrokontroler utama.



Gambar 2.5 Sensor MPU 6050 Gyroscope dan Accelerometer

(Sumber: <http://www.vcc2gnd.com/sku/MPU-6050>)

Produsen IC ini mendukung pengembangan perangkat keras dan perangkat lunak untuk menggunakan chip ini, antara lain dengan merilis API (*Application Programming Interface*) yang dapat diakses dari situs web resmi *Invensense*..

Fitur & Spesifikasi MPU-6050

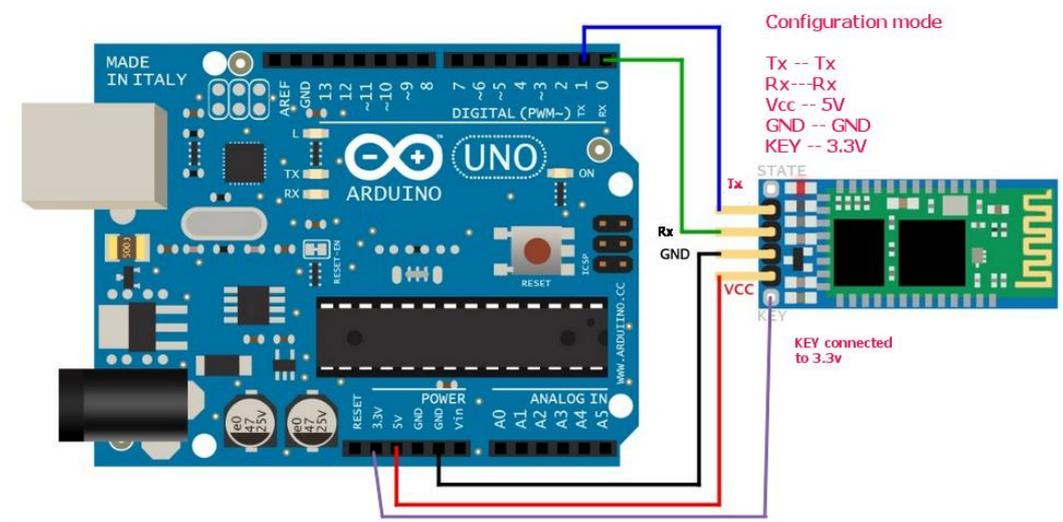
1. Catu daya IC dari 2,375 V ~ 3,46 V namun modul ini sudah dilengkapi dengan LDO / *low drop-out voltage regulator* (untuk pengguna Arduino, Anda dapat menyambungkan pin Vcc dari modul ini dengan pin 5V pada Arduino Anda).
2. Antarmuka kendali dan pengumpulan data lewat protokol I²C berkecepatan tinggi (*Fast Mode*, 400 kHz), pada modul ini sudah dipasangkan *pull-up resistor* 2K2 sehingga Anda bisa menyambungkan pin SDA dan SCL dari modul ini dengan mikrokontroler / Arduino Board tanpa resistor eksternal tambahan.
3. Pilihan rentang skala giroskop: 250° (sensitivitas 13,1), 500° (65,6), 1000° (32,8), 2000° (16,4) per detik; sensitivitas dalam satuan LSB/°/detik
4. Pilihan rentang skala akselerometer: ±2g (sensitivitas 16384), ±4g (8192), ±8g (4096), ±16g (2048); sensitivitas dalam LSB/g.



5. Data keluaran MotionFusion sebanyak 6 atau 9 sumbu dalam format matriks rotasi, quaternion, sudut Euler, atau data mentah (*raw data format*).
6. Memori penampung data (*buffer memory*) sebesar 1 Kb, FIFO (*First-In-First-Out*).
7. Dengan digabungkannya akselerometer dan giroskop dalam satu sirkuit terpadu menyebabkan pendeteksian gerakan menjadi lebih akurat (*reduced settling effects and sensor drift*) karena faktor kesalahan penyesuaian persilangan sumbu antara akselerometer dan giroskop dapat dihilangkan.
8. DMP™ Engine mengambil alih komputasi rumit dari prosesor utama sehingga sistem tidak terbebani kalkulasi yang kompleks (*red*: sebelum adanya IC ini, perancang rangkaian elektronika biasanya menggunakan chip PLD eksternal untuk mengerjakan komputasi semacam ini karena perhitungan matematika dalam kalkulasi gerak sangatlah kompleks dan terlalu membebani kerja mikrokontroler yang biasanya bertenaga terbatas).
9. Tersedia platform pengembangan perangkat lunak MotionApps™ untuk sistem operasi Android, Linux, dan Windows.
10. Algoritma untuk menghitung bias dan kalibrasi kompas sudah terpasang dan siap digunakan, tidak perlu intervensi dari pemakai.
11. Interupsi yang dapat diprogram untuk mendeteksi pengenalan gestur (*gesture recognition*), pergeseran (*panning*), *zooming*, *scrolling*, dan *shake detection*.
12. Konsumsi arus giroskop hanya sebesar 3,6 mA, giroskop + akselerometer hanya 3,8 mA (tenaga penuh, 1 kHz *sample rate*).
13. Moda siaga hemat daya hanya mengkonsumsi arus sebesar 5μA.
14. Dapat menoleransi guncangan hingga 10000g.
15. Modul dengan PCB berkualitas dengan *gold immersion welding* untuk menjamin kualitas.
16. Akses sangat mudah menggunakan pin standar dengan *pitch* 0,1" / 2,54 mm.

2.4 Bluetooth HC-05

Bluetooth modul HC-05 merupakan modul komunikasi serial wireless dengan frekuensi 2.4GHz dengan pilihan koneksi bisa sebagai slave, ataupun sebagai master. Sangat mudah digunakan dengan mikrokontroler untuk membuat aplikasi wireless. Interface yang digunakan adalah serial RXD, TXD, VCC dan GND. Built in LED sebagai indikator koneksi bluetooth.



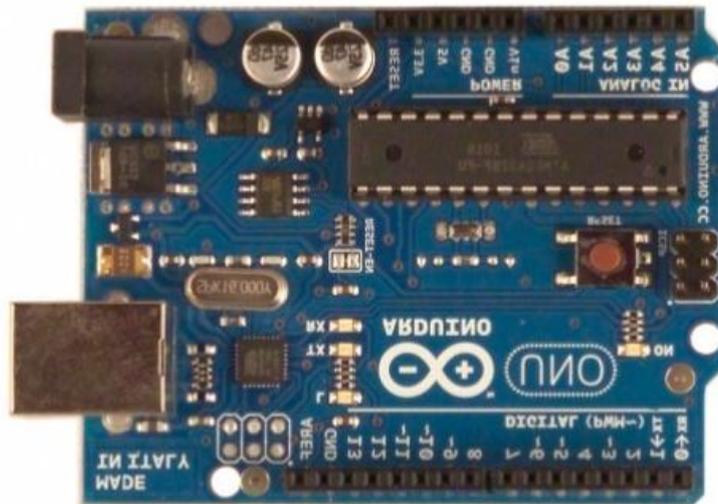
Gambar 2.6 Arduino & Bluetooth HC-05

(sumber: <https://alselectro.wordpress.com/2014/10/21/bluetooth-hc05-how-to-pair-two-modules/>)

Tengangan input antara 3.6 - 6V, jangan menghubungkan dengan sumber dengan sumber daya lebih dari 7V. Arus saat *unpaired* sekitar 30mA dan saat *paired* (terhubung) sebesar 10mA. 4 pin interface 3.3V dapat langsung dihubungkan ke berbagai macam mikrokontroler (khusus Arduino, 8051, 8535, AVR, PIC, ARM, MSP430, etc.). Jarak efektif jangkauan sebesar 10 meter, meskipun dapat mencapai dari 10 meter, namun kualitas koneksi makin berkurang.

2.5 Arduino UNO

Arduino Uno adalah board mikrokontroler berbasis ATmega328. Uno memiliki 14 pin digital input/output (dimana 6 dapat digunakan sebagai output PWM), 6 input analog resonator keramik 16MHz, koneksi USB, jack listrik, header ICSP dan tombol reset.



Gambar 2.7 Arduino UNO

(Sumber : arduino.blogspot.com diakses 20 desember 2016 pk1 14.35 wib)

2.5.1 Spesifikasi Arduino Uno

Tabel 2.1 Spesifikasi Arduino Uno

Chip mikrokontroler	ATmega328
Tegangan operasi	5V
Tegangan input (yang direkomendasikan, via jack DC)	7V - 12V
Tegangan input (limit, via jack DC)	6V - 20V
Digital I/O pin	14 (6 di antaranya menyediakan keluaran PWM)
Analog Input pin	6 buah



Arus DC per pin I/O	40 mA
Arus DC pin 3.3V	50 mA
Memori Flash	32 KB, 0.5 KB telah digunakan untuk bootloader
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Clock speed	16 Mhz
Dimensi	2,7 inc x 2,1 inc
Berat	25 g

2.5.2 Input dan Output (I/O)

Setiap 14 pin digital pada Arduino Uno dapat digunakan sebagai input dan output, menggunakan fungsi `pinmode()`, `digitalWrite()` dan `digitalRead()`. Fungsi-fungsi tersebut beroperasi di tegangan 5 Volt. Setiap pin dapat memberikan atau menerima suatu arus maksimum 40mA dan mempunyai sebuah resistor *pull-up* (terputus secara default) 20-50 kOhm. Selain itu, beberapa pin mempunyai fungsi-fungsi khusus.

Beberapa pin memiliki fungsi khusus :

1. Serial: 0 (RX) dan 1 (TX). Digunakan untuk menerima (RX) dan memancarkan (TX) serial data TTL (Transistor-Transistor Logic). Kedua pin ini dihubungkan ke pin-pin yang sesuai dari chip Serial Atmega8U2 USB-ke-TTL.
2. External Interrupts: 2 dan 3. Pin-pin ini dapat dikonfigurasi untuk dipicu sebuah interrupt (gangguan) pada sebuah nilai rendah, suatu kenaikan atau penurunan yang besar, atau suatu perubahan nilai. Lihat fungsi `attachInterrupt` untuk lebih jelasnya.
3. PWM: 3, 5, 6, 9, 10, dan 11. Memberikan 8-bit PWM output dengan fungsi `analogWrite`.



4. SPI: 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Pin-pin ini mensupport komunikasi SPI menggunakan SPI library.
5. LED: 13. Ada sebuah LED yang terpasang, terhubung ke pin digital 13. Ketika pin bernilai HIGH LED menyala, ketika pin bernilai LOW LED mati.

Arduino UNO mempunyai 6 input analog, diberi label A0 sampai A5, setiapnya memberikan 10 bit resolusi (contohnya 1024 nilai yang berbeda). Secara default, 6 input analog tersebut mengukur dari ground sampai tegangan 5 Volt, dengan itu mungkin untuk mengganti batas atas dari rangenya dengan menggunakan pin AREF dan fungsi `analogReference()`. Di sisi lain, beberapa pin mempunyai fungsi spesial:

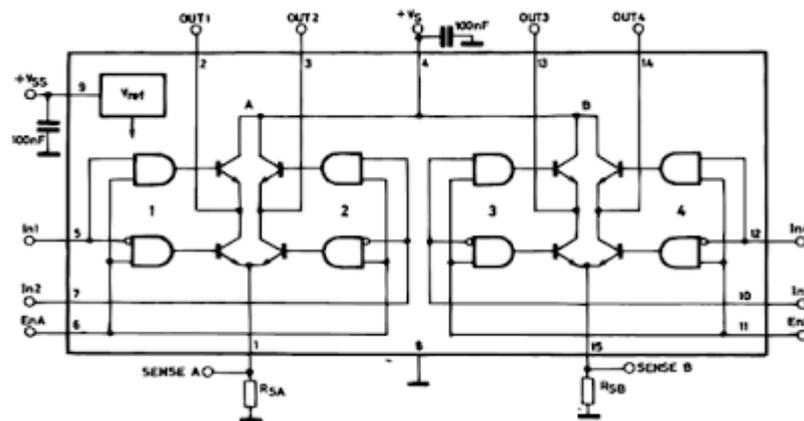
- TWI: pin A4 atau SDA dan pin A5 atau SCL. Mensupport komunikasi TWI dengan menggunakan Wire library

Ada sepasang pin lainnya pada board:

- a) AREF. Referensi tegangan untuk input analog. Digunakan dengan `analogReference()`.
- b) Reset. Membawa saluran ini LOW untuk mereset mikrokontroler. Secara khusus, digunakan untuk menambahkan sebuah tombol reset untuk melindungi yang memblock sesuatu pada board.

2.6 Driver motor L298P

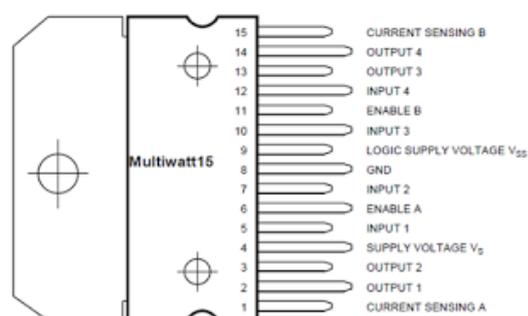
Di dalam IC L298P, telah terkandung 2 buah rangkaian H-bridge yang siap digunakan untuk mengendalikan putaran motor .



Gambar 2.8 Diagram Blok IC L298P

(Sumber: <http://www.robotics-university.com/2015/01/driver-motor-dcmp-menggunakan-ic-1298.html>)

Di dalam data-sheet-nya, IC L298P dapat bekerja dengan tegangan catu hingga 46 volt DC dan memiliki arus (DC) kerja maksimal hingga 4 Ampere. Dengan spesifikasi tersebut, IC L298P sudah dapat digunakan dalam mengendalikan putaran motor dengan arus kerja hingga 4 Ampere. IC L298P memiliki 15 kaki yang memiliki fungsi tersendiri. Konfigurasi kaki-kaki IC L298P dapat kita lihat pada gambar 2.8 berikut ini, sedangkan keterangan fungsi untuk setiap kakinya dapat dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2.9 Konfigurasi Pin IC L298P

(Sumber: <http://www.robotics-university.com/2015/01/driver-motor-dcmp-menggunakan-ic-1298.html>)



Tabel 2.2 Keterangan Fungsi Kaki/Pin IC L298P

Pin	Nama Pin	Pin	Nama Pin
1	Current Sensing A	9	Vss (Tegangan Supply IC)
2	Output 1	10	Input 3
3	Output 2	11	Enable B
4	Vs (Tegangan Supply Motor)	12	Input 4
5	Input 1	13	Output 3
6	Enable A	14	Output 4
7	Input 2	15	Current Sensing B
8	GND		

Tabel 2.3 Data Karakter Elektronis IC L298P

Parameter	Simbol	Nilai
Tegangan <i>Supply</i>	Vs	50 V
Tegangan <i>Supply Logic</i>	Vss	7 V
Tegangan <i>Input Enable</i>	Vi, Ven	0,3 – 7 V
Arus Output Puncak (<i>non repetitive, t = 100µs</i>)	Io	3 A
Arus <i>Output Puncak (repetitive 80% on, -20% off, t on = 10ms)</i>	Io	2,5 A
Arus <i>Output Puncak (DC operation)</i>	Io	2 A
Tenganan Sensing (<i>Tcase = 75°C</i>)	Vsens	-1 – 2,3 V
Total Disipasi Daya	Ptot	25 W
Suhu Operasi (<i>Junction</i>)	Top	-25 - 130°C
Suhu <i>Storage & Junction</i>	Tstg, Tj	-40 – 150°C



2.7 Motor DC

Motor listrik merupakan perangkat elektromagnetis yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik ini digunakan untuk, misalnya memutar impeller pompa, fan atau blower, menggerakkan kompresor, mengangkat bahan, dll. Motor listrik digunakan juga di rumah (mixer, bor listrik, fan angin) dan di industri. Motor listrik kadangkala disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri.

Motor DC adalah motor listrik yang memerlukan suplai tegangan arus searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi gerak mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Motor arus searah, sebagaimana namanya, menggunakan arus langsung yang tidak langsung/direct-unidirectional.

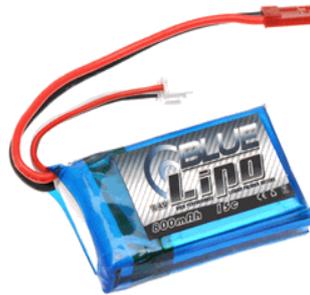
2.7.1 Prinsip Kerja Motor DC

Cara kerja dari Dc motor ini sangat sederhana, yaitu apabila terdapat arus yang melewati suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya. Jika kawat yang membawa arus dibengkokkan menjadi sebuah lingkaran / *loop*, maka kedua sisi *loop*, yaitu pada sudut kanan medan magnet, akan mendapatkan gaya pada arah yang berlawanan. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar / *torque* untuk memutar kumparan. Motor-motor memiliki beberapa *loop* pada dinamanya untuk memberikan tenaga putaran yang lebih seragam dan medan magnetnya dihasilkan oleh susunan elektromagnetik yang disebut kumparan medan.

2.8 Battery

Baterai (*Battery*) adalah sebuah alat yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi Listrik yang dapat digunakan oleh suatu perangkat elektronik. Hampir semua perangkat elektronik yang portabel seperti *Handphone*, Laptop, Senter, ataupun *Remote Control* menggunakan Baterai

sebagai sumber listriknya. Dengan adanya Baterai, kita tidak perlu menyambungkan kabel listrik untuk dapat mengaktifkan perangkat elektronik kita sehingga dapat dengan mudah dibawa kemana-mana. Dalam kehidupan kita sehari-hari, kita dapat menemui dua jenis Baterai yaitu Baterai yang hanya dapat dipakai sekali saja (Single Use) dan Baterai yang dapat di isi ulang (Rechargeable).

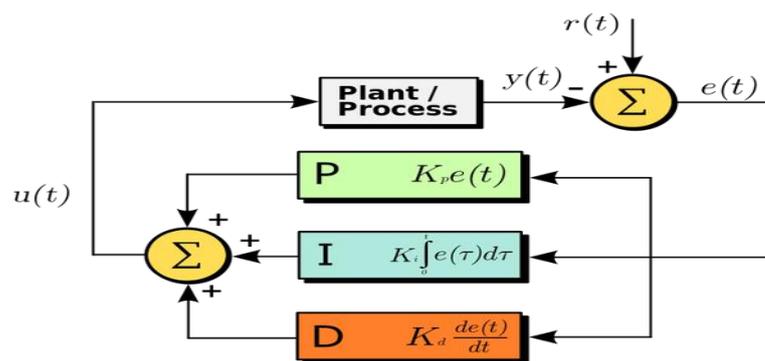


Gambar 2.10 Battery

(<http://www.hobbypartz.com/83p-800mah-2s1p-74-15c.html>)

2.9 Kontrol Proporsional Integral Derivatif (PID)

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



Gambar 2.11 Blok Diagram kontrol PID

(Sumber: <https://putraekapermana.wordpress.com/2013/11/21/pid>)



Adapun persamaan Pengontrol PID adalah :

$$mv(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

Keterangan :

$mv(t)$ = output dari pengontrol PID atau *Manipulated Variable*

K_p = konstanta Proporsional

T_i = konstanta Integral

T_d = konstanta Derivatif

$e(t)$ = error (selisih antara set point dengan level aktual)

Persamaan Pengontrol PID diatas dapat juga dituliskan sebagai berikut :

$$mv(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan :

$$K_i = K_p \times \frac{1}{T_i} \text{ dan } K_d = K_p \times T_d$$

Untuk lebih memaksimalkan kerja pengontrol diperlukan nilai batas minimum dan maksimum yang akan membatasi nilai *Manipulated Variable* yang dihasilkan.

Komponen kontrol PID ini terdiri dari tiga jenis yaitu Proportional, Integratif dan Derivatif. Ketiganya dapat dipakai bersamaan maupun sendiri-sendiri tergantung dari respon yang kita inginkan terhadap suatu plant.



2.9.1 Kontrol Proporsional

Kontrol P jika $G(s) = k_p$, dengan k adalah konstanta. Jika $u = G(s) \cdot e$ maka $u = K_p \cdot e$ dengan K_p adalah Konstanta Proporsional. K_p berlaku sebagai Gain (penguat) saja tanpa memberikan efek dinamik kepada kinerja kontroler. Penggunaan kontrol P memiliki berbagai keterbatasan karena sifat kontrol yang tidak dinamik ini. Walaupun demikian dalam aplikasi-aplikasi dasar yang sederhana kontrol P ini cukup mampu untuk memperbaiki respon transien khususnya rise time dan settling time. Pengontrol proporsional memiliki keluaran yang sebanding/proporsional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya).

Ciri-ciri pengontrol proporsional :

1. Jika nilai K_p kecil, pengontrol proporsional hanya mampu melakukan koreksi kesalahan yang kecil, sehingga akan menghasilkan respon sistem yang lambat (menambah rise time).
2. Jika nilai K_p dinaikkan, respon/tanggapan sistem akan semakin cepat mencapai keadaan mantapnya (mengurangi rise time).
3. Namun jika nilai K_p diperbesar sehingga mencapai harga yang berlebihan, akan mengakibatkan sistem bekerja tidak stabil atau respon sistem akan berosilasi.
4. Nilai K_p dapat diset sedemikian sehingga mengurangi steady state error, tetapi tidak menghilangkannya.

2.9.2 Kontrol Integratif

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.



Jika $G(s)$ adalah kontrol I maka u dapat dinyatakan sebagai $u(t) = [\text{integral } e(t)dt]K_i$ dengan K_i adalah konstanta Integral, dan dari persamaan di atas, $G(s)$ dapat dinyatakan sebagai $u = K_i \cdot [\Delta e / \Delta t]$ 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 system

Keluaran pengontrol ini merupakan hasil penjumlahan yang terus menerus dari perubahan masukannya. Jika sinyal kesalahan tidak mengalami perubahan, maka keluaran akan menjaga keadaan seperti sebelum terjadinya perubahan masukan. Sinyal keluaran pengontrol integral merupakan luas bidang yang dibentuk oleh kurva kesalahan / error.

Ciri-ciri pengontrol integral :

1. Keluaran pengontrol integral membutuhkan selang waktu tertentu, sehingga pengontrol integral cenderung memperlambat respon.
2. Ketika sinyal kesalahan berharga nol, keluaran pengontrol akan bertahan pada nilai sebelumnya.
3. Jika sinyal kesalahan tidak berharga nol, keluaran akan menunjukkan kenaikan atau penurunan yang dipengaruhi oleh besarnya sinyal kesalahan dan nilai K_i .
4. Konstanta integral K_i yang berharga besar akan mempercepat hilangnya offset. Tetapi semakin besar nilai konstanta K_i akan mengakibatkan peningkatan osilasi dari sinyal keluaran pengontrol.



2.9.2 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 factor konstanta K_d .

Sinyal kontrol u yang dihasilkan oleh kontrol D dapat dinyatakan sebagai $G(s)=s.K_d$ 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 Derivative tidak dapat dipakai sendiri

Ciri-ciri pengontrol derivatif :

1. Pengontrol tidak dapat menghasilkan keluaran jika tidak ada perubahan pada masukannya (berupa perubahan sinyal kesalahan)
2. Jika sinyal kesalahan berubah terhadap waktu, maka keluaran yang dihasilkan pengontrol tergantung pada nilai K_d dan laju perubahan sinyal kesalahan.
3. Pengontrol diferensial mempunyai suatu karakter untuk mendahului, sehingga pengontrol ini dapat menghasilkan koreksi yang signifikan sebelum pembangkit kesalahan menjadi sangat besar. Jadi pengontrol diferensial dapat mengantisipasi pembangkit kesalahan, memberikan aksi yang bersifat korektif dan cenderung meningkatkan stabilitas sistem.



4. Dengan meningkatkan nilai K_d , dapat meningkatkan stabilitas sistem dan mengurangi *overshoot*.

Berdasarkan karakteristik pengontrol ini, pengontrol diferensial umumnya dipakai untuk mempercepat respon awal suatu sistem, tetapi tidak memperkecil kesalahan pada keadaan tunaknya. Kerja pengontrol diferensial hanyalah efektif pada lingkup yang sempit, yaitu pada periode peralihan. Oleh sebab itu pengontrol diferensial tidak pernah digunakan tanpa ada kontroler lainnya.

Tabel 2.4 Efek Pengontrol PID Pada Sistem Loop Tertutup

Respon Lup Tertutup	Rise Time	Overshoot	Sending Time	Steady State Error
Proporsional	Menurunkan	Meningkatkan	Perubahan Kecil	Menurunkan/Mengurangi
Integral	Menurunkan	Meningkatkan	Meningkatkan	Mengeliminasi
Derivatif	Perubahan Kecil	menurunkan	Menurunkan	Perubahan Kecil

Setiap kekurangan dan kelebihan dari masing-masing pengontrol P, I dan D dapat saling menutupi dengan menggabungkan ketiganya secara paralel menjadi pengontrol proporsional plus integral plus diferensial (pengontrol PID). Elemen-elemen pengontrol P, I dan D masing-masing secara keseluruhan bertujuan :

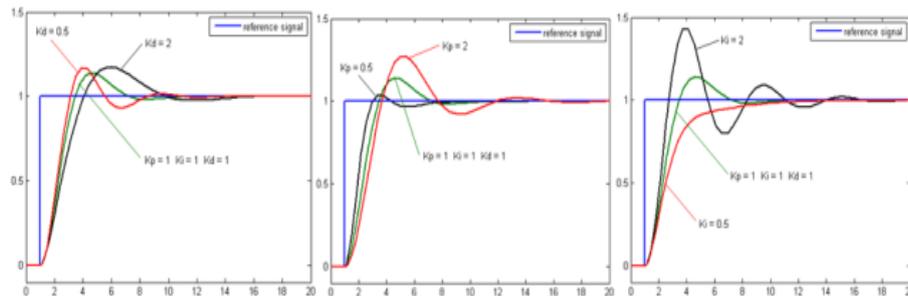
1. mempercepat reaksi sebuah sistem mencapai *set point*-nya
2. menghilangkan *offset*
3. menghasilkan perubahan awal yang besar dan mengurangi *overshoot*.

Karakteristik pengontrol PID sangat dipengaruhi oleh kontribusi besar dari ketiga parameter P, I dan D. Penyetelan konstanta K_p , K_i dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing elemen. Satu atau dua dari



ketiga konstanta tersebut dapat disetel lebih menonjol dibanding yang lain. Konstanta yang menonjol itulah akan memberikan kontribusi pengaruh pada respon sistem secara keseluruhan.

Adapun beberapa grafik dapat menunjukkan bagaimana respon dari sistem terhadap perubahan K_p , K_i dan K_d sebagai berikut :



Gambar 2.12 Grafik Respon Perubahan K_p , K_i & K_d

(Sumber: <https://putraekapermana.wordpress.com/2013/11/21/pid>)

Sistem pengendalian dibutuhkan untuk memperbaiki tanggapan sistem dinamik agar didapat sinyal keluaran seperti yang diinginkan. Sistem kendali yang baik mempunyai tanggapan yang baik terhadap sinyal masukan yang beragam.