

BAB II

TEORI PENUNJANG

Bab ini akan membahas tentang teori penunjang dalam perancangan sistem kendali untuk mengatasi beberapa masalah kestabilan pada saat lepas landas dan *hovering* pesawat tanpa awak berjenis tailsitter. Untuk itu dalam pembahasan dasar teori akan didasarkan terhadap beberapa tinjauan yakni :

1. Tinjauan Teori Sistem Kendali.
2. Tinjauan Perangkat Keras.

2.1 Tinjauan Teori Sistem Kendali

Sistem kendali atau sistem kontrol (*Control system*) adalah suatu alat (kumpulan alat) untuk mengendalikan, memerintah dan mengatur keadaan dari suatu sistem. Istilah-istilah dari sistem kendali atau sistem kontrol adalah :

Plants. *Plant* dapat berupa suatu peralatan atau suatu kelengkapan dari perangkat mesin yang bekerja bersama untuk mengerjakan suatu tujuan tertentu^[3].

Processes. *Process* sebagai suatu kelanjutan operasi atau pengembangan yang ditandai dengan serangkaian perubahan bertahap yang menggantikan satu sama lain dengan cara yang relatif tetap dan mengarahkan pada suatu tujuan^[3]

Systems. *System* merupakan kombinasi dari komponen yang bertindak bersama dan melakukan suatu tujuan^[3].

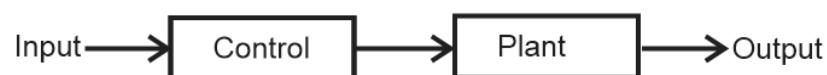
Disturbances. *Disturbance* adalah suatu sinyal yang cenderung mempengaruhi nilai keluaran dari suatu sistem. *Disturbance* yang dihasilkan oleh sistem dinamakan *internal disturbance* sedangkan *disturbance* yang muncul dari luar sistem disebut *external disturbance*^[3].

Feedback Control. *Feedback control* mengartikan pada suatu operasi yang memiliki gangguan dan cenderung mengurangi perbedaan diantara keluaran dan referensi sistem^[3].

Dalam melakukan sebuah penelitian sistem kendali atau sistem kontrol terdapat tiga jenis variabel kendali atau kontrol yaitu variabel manipulasi, variabel respon, dan variabel kontrol. Dimana anantara satu variabel dengan variabel lain akan saling berhubungan, tetapi belum tentu saling mempengaruhi. Variabel manipulasi adalah variabel yang secara sengaja diubah-ubah untuk memperoleh hasil tertentu, dalam penelitian ini yang menjadi variabel manipulasi adalah mekanisme dari pengontrolan pesawat *tailsitter*. Variabel terkontrol adalah besaran yang dapat berubah karena perubahan yang dilakukan pada variabel manipulasi, pada penelitian ini yang menjadi variabel kontrol yaitu kecepatan putaran motor *BLDC*, dan pergerakan motor *servo*. Variabel respon adalah variabel yang mendefinisikan tentang semua hal yang terjadi akibat dari perubahan variabel manipulasi dan variabel kontrol, pada penelitian ini yang menjadi variabel respon adalah *attitude* (sikap) dari pesawat *tailsitter*.

2.1.1 Sistem Kendali *Open loop* dan *Closed loop*

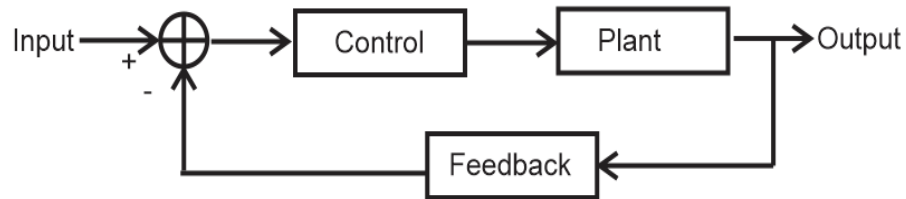
Open loop control system. *Open loop control system* merupakan suatu sistem kontrol yang keluarannya tidak mempunyai pengaruh terhadap aksi kontrol. Pada sistem kontrol loop terbuka tidak terdapat jaringan umpan balik. Dengan kata lain, sistem kontrol loop terbuka keluarannya tidak dapat digunakan sebagai perbandingan umpan balik dengan masukan. Oleh karena itu sistem kontrol loop terbuka hanya dapat digunakan jika hubungan antara masukan dan keluaran sistem diketahui dan tidak terdapat gangguan internal maupun eksternal^[4].



Gambar II.1 Diagram Open Loop ^[4]

Closed control system. *Closed control system* atau sistem kontrol loop tertutup merupakan sistem kontrol dimana sinyal keluaran mempunyai pengaruh langsung terhadap sinyal kontrol (aksi kontrol). Pada sistem kontrol loop tertutup

terdapat jaringan umpanbalik (*feedback*) karenanya sistem kontrol loop tertutup seringkali disebut sebagai sistem kontrol umpanbalik. Praktisnya, istilah kontrol loop tertutup dan sistem kontrol umpanbalik dapat saling dipertukarkan penggunaannya^[4].



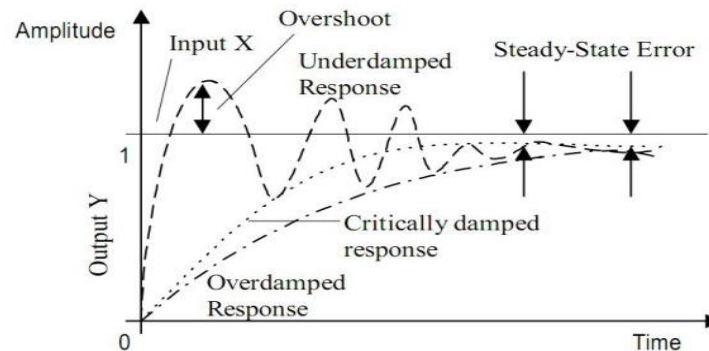
Gambar II.2 Diagram closed loop^[4]

2.1.2 Respon Sistem

Respon sistem adalah perubahan perilaku *output* terhadap sinyal *input*. Respon sistem berupa kurva ini akan menjadi dasar untuk menganalisa kinerja sistem selain menggunakan persamaan/model matematika. Bentuk kurva respon sistem dapat dilihat setelah mendapatkan sinyal *input*. Ada beberapa hal yang menjadi titik penentu respon sistem yaitu :

- *Steady-state error* merupakan perbedaan antara nilai yang diinginkan terhadap nilai yang dihasilkan. Sistem yang diharapkan akan memiliki *steady-state error* sekecil mungkin.
- *Rise time*, t_r merupakan waktu yang diperlukan sistem untuk melakukan kenaikan dari suatu nilai ke nilai lainnya. Untuk sistem yang memiliki redaman cukup (*underdamped*) nilai yang digunakan adalah 0% ke 100%. Sedangkan untuk sistem yang memiliki redaman berlebihan (*overdamped*) digunakan nilai 10% ke 90%. Respon sistem yang dianggap baik memiliki *rise time* yang kecil.
- *Maximum overshoot*, M_p ; *Maximum overshoot* merupakan nilai simpangan maksimum dari nilai puncak respon. Sistem yang stabil tidak memiliki *overshoot* yang besar.

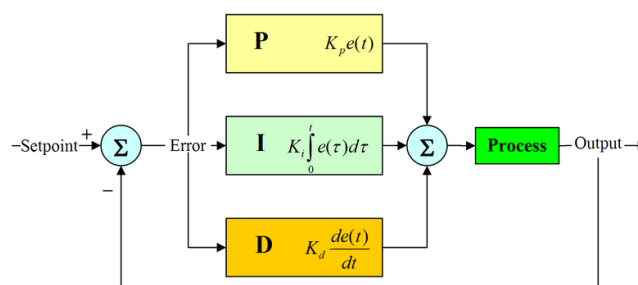
- *Settling time, t_s* ; Settling time merupakan waktu yang diperlukan untuk mencapai dan diam pada nilai akhirnya yang memiliki persentase *steady-state error* sekitar 0,02 atau 0,05. Respon sistem yang dianggap baik memiliki *Settling time* yang kecil.



Gambar II.3 Kurva respon sistem^[4]

2.1.3 Kontrol PID (Proportional Integral Derivative)

Kontrol *Proportional Integral Derivative* (PID) merupakan salah satu jenis kontrol yang telah umum digunakan pada dunia industri^[1]. Pengontrol PID akan memberikan aksi berdasarkan *error* yang telah diperoleh. *Error* adalah perbedaan dari set point yang telah ditentukan^[5].



Gambar II.4 Diagram Blok PID

Kontrol PID terdapat tiga komponen utama yaitu kontrol P (*Proportional*), kontrol I (*Integral*), dan kontrol D (*Derivative*). Komponen-komponen tersebut bertujuan untuk mempercepat reaksi sebuah sistem, menghilangkan *offset* dan menghasilkan perubahan awal yang besar. Keluaran dari kontroler PID adalah hasil

penjumlahan dari ketiga komponen tersebut. Karakteristik kontroler PID ini dipengaruhi oleh ketiga komponen P, I, dan D, penyetelan nilai setiap konstanta K_p , K_i , dan K_d akan mengakibatkan penonjolan sifat dari masing-masing komponen.

Hubungan sinyal *error* dan sinyal kontrol dapat dinyatakan pada persamaan berikut.

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{I} \int e(t) dt + D \frac{d}{dt} e(t) \right] \quad (1)$$

Kontrol Proportional

Untuk kontrol *Proportional* (P), sinyal kesalahan $e(t)$ merupakan masukan kontrolersedangkan keluaran kontroler adalah sinyal kontrol $u(t)$. Hubungan antara masukan kontroler $e(t)$ dan keluaran kontroler $u(t)$ ^[3].

$$\frac{U(t)}{E(t)} = K_p e(k) \quad (2)$$

dimana K_p adalah penguatan *Proportional*.

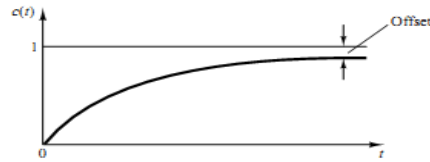
Persamaan tersebut memperlihatkan bahwa kontrol proporsional merupakan pembesaran/amplifikasi dari nilai sinyal *error*. Kontrol proposional menghasilkan beberapa efek dalam sistem kontrol yakni sebagai berikut.

1. Semakin besar nilai K_p maka semakin kecil *rise time* yang dihasilkan.
2. Penggunaan K_p yang berlebihan akan menyebabkan sistem tidak stabil atau berosilasi terhadap titik setpoint.
3. Nilai K_p dapat diset sedemikian sehingga mengurangi *steady state error*, tetapi tidak menghilangkannya.

Kontrol Integral

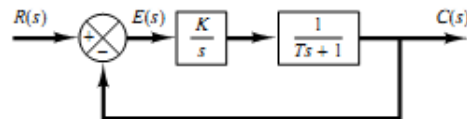
Kontrol Integral berfungsi menghasilkan respon sistem yang memiliki kesalahan nol (*Steady state error* = 0). Jika sebuah pengontrol tidak

memiliki unsur integrator, pengontrol *propotional* tidak mampu menjamin keluaran sistem dengan kesalahan nol.



Gambar II.5 Unit-step response dan offset

Nilai offset menyebabkan sistem tidak dapat diam pada titik referensinya. Kontrol integral digunakan untuk mengeliminasi nilai *offset* pada sistem.



Gambar II.6 Kontrol sistem integral

Gambar II.6 menggambarkan suatu sistem yang menggunakan kontrol integral. Kontrol sistem tersebut menggunakan kontroler integral yang dapat dibentuk kedalam bentuk *closed-loop transfer function* menjadi persamaan berikut ini.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s(Ts + 1) + K} \quad (3)$$

dengan

$$\frac{E(s)}{R(s)} = \frac{R(s) - C(s)}{R(s)} = \frac{s(Ts + 1)}{s(Ts + 1) + K} \quad (4)$$

Steady-state error untuk *unit-step response* dapat didapatkan dengan memasukan pada persamaan:

$$e_{ss} = \lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
e_{ss} &= \lim_{s \rightarrow 0} sE(s) \\
&= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s^2(Ts + 1)}{Ts^2 + s + K} \frac{1}{s} \\
&= 0
\end{aligned} \tag{6}$$

Suatu sistem yang menggunakan kontrol integral, nilai keluaran $u(t)$ akan berubah dengan rasio integral terhadap pergerakan sinyal *error* $e(t)$. Hubungan antara sinyal keluaran $u(t)$ dan sinyal *error* $e(t)$ adalah

$$\frac{d}{dt}u(t) = K_i e(t) \text{ atau } u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \tag{7}$$

dalam bentuk diskrit, persamaan ini dapat ditulis menjadi

$$\frac{U(k)}{E(k)} = K_i \sum_{i=1}^k e(i) \Delta t \tag{8}$$

Selain menghilangkan *steady-state error*, pada penggunaannya kontrol integral memberikan beberapa efek lain yakni sebagai berikut.

1. Keluaran kontrol integral membutuhkan selang waktu sehingga dapat memperlambat respon sistem.
2. Penggunaan kontrol integral dapat mempercepat hilangnya *offset*. Namun jika penggunaannya terlalu besar, tingkat osilasi dari keluaran kontrol pun akan bertambah besar.

Kontrol Derivatif

Pada saat kontrol derivatif ditambahkan pada sistem yang menggunakan kontrol proporsional akan menghasilkan kontroler yang memiliki sensitifitas tinggi. Selain itu, kontrol derivatif menggunakan laju perubahan dari sinyal *error* sehingga menghasilkan nilai koreksi yang baik sebelum sinyal kontroler menjadi terlalu besar. Pada suatu sistem yang menggunakan kontroler derivatif, Hubungan antara nilai keluaran $u(t)$ dan sinyal *error* $e(t)$ adalah

$$u(t) = K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{9}$$

dalam bentuk diskrit, persamaan ini dapat dituliskan menjadi

$$\frac{U(k)}{E(k)} = K_d \frac{e(k) - e(k-1)}{\Delta t} \tag{10}$$

Sinyal kontrol ini memiliki karakter untuk mengurangi *steady-state error* meskipun tidak sebesar yang dilakukan oleh kontrol integral.

Dari ketiga komponen tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan, hal ini dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel II.1 Karakteristik PID

Respon <i>Closed Loop</i>	<i>Risetime</i>	<i>Overshoot</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Steady State Error</i>
Proportional (Kp)	Menurun	Meningkat	Perubahan Kecil	Menurun
Integral (Ki)	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
Derivative (Kd))	Perubahan Kecil	Menurun	Menurun	Perubahan Kecil

Parameter-parameter tersebut, tidak bersifat independen, sehingga pada saat salah satu nilai konstantanya diubah, maka mungkin sistem tidak akan bereaksi seperti yang diinginkan. Tabel di atas hanya dipergunakan sebagai pedoman jika akan melakukan perubahan konstanta.

2.2 Tinjauan Perangkat Keras

2.2.1 Mikrokontroler

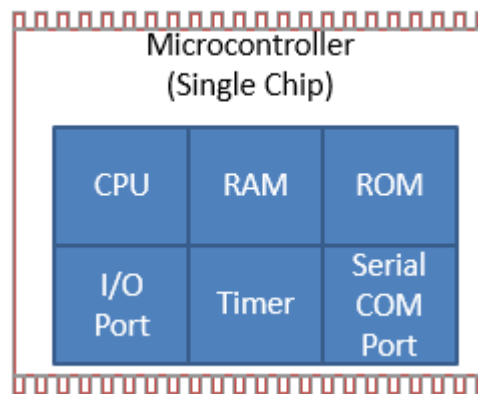
Mikrokontroler merupakan IC (*Integrated Circuit*) mikrokomputer. Mikrokontroler berisikan bagian-bagian utama yaitu CPU (*Central Processing Unit*), RAM (*Random Access Memory*), ROM (*Read Only Memory*), Port I/O (*Input/Output*), Timer, dan Serial COM Port. Mikrokontroler digunakan sebagai pengontrol mesin dengan program yang disimpan pada ROM dan tidak berubah selama program tidak diganti.

- **CPU (*Central Processing Unit*)** CPU (*Central Processing Unit*) pada mikrokontroler berupa mikroprosesor yang berfungsi sebagai otak dari

mikrokontroler. Mikroprocessor adalah peranti yang berfungsi untuk memproses data, yaitu berupa fungsi logika dan aritmatika.

- **RAM (*Random Access Memory*)** RAM (*Random Access Memory*) digunakan sebagai penyimpan data sementara yang berupa register-register.
- **ROM (*Read Only Memory*)** ROM (*Read Only Memory*) digunakan sebagai tempat penyimpanan program. ROM yang banyak dipakai pada mikrokontroler saat ini adalah flash PEROM (*Programmable Erasable ROM*), yang mirip seperti memori pada flash disk, namun bedanya adalah flash PEROM hanya dapat dihapus dan ditulis secara sekaligus. EEPROM biasanya digunakan untuk menyimpan data yang tidak boleh hilang meski catu daya dimatikan. Meski fungsinya mirip EEPROM biasanya lebih sedikit digunakan dibanding RAM karena kecepatan akses EEPROM yang lebih lambat. Contoh penggunaannya adalah penyimpanan data password. atau setting suatu sistem.
- **Port I/O (*Input/Output*)** Peranti antarmuka input/output pada mikrokontroler disebut sebagai port. Pada satu port I/O digital terdiri beberapa pin, biasanya berjumlah 8 atau satu byte, dengan masing-masing pin dapat mentransfer satu bit data biner (logika 0 dan 1) dari/ke mikrokontroler. Selain port I/O digital, pada suatu mikrokontroler juga dapat berkomunikasi dengan peranti lain menggunakan komunikasi serial. Terdapat berbagai standar atau protokol untuk komunikasi serial seperti SPI (*Serial Peripheral Interface*), I2C (*Inter-Integrated Circuit*), UART (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter*) dan USART (*Universal Synchronous- Asynchronous Receiver Transmitter*).
- **Timer (Pencacah)** Timer/counter adalah peranti untuk mencacah sinyal dari *clock* ataupun sinyal dari suatu kejadian. Jika sinyal yang dicacah berasal dari *clock*, maka peranti ini berfungsi sebagai pewaktu. Pewaktu bisa digunakan untuk bermacam-macam kegunaan, misalnya untuk menghasilkan tundaan waktu dan untuk mengukur selang waktu suatu proses.

- **Serial COM Port** Serial COM Port adalah sebuah port komunikasi antara mikrokontroler dengan komputer.



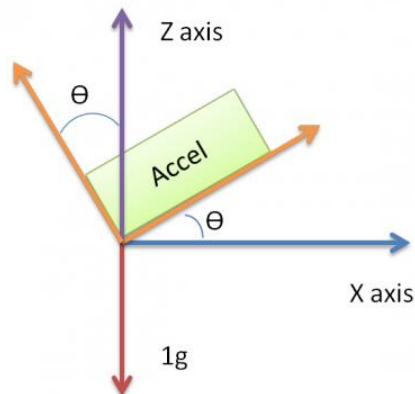
Gambar II.7 Diagram blok mikrokontroler

2.2.2 Sensor Inertia Measurement Unit (IMU)

Sensor IMU (Inertia Measurement Unit) adalah sebuah alat sensing yang digunakan untuk mengukur perubahan inersia yang terjadi pada suatu benda. Perubahan inersia yang dimaksud disini yaitu perubahan sudut, akselerasi dan orientasi suatu benda. Pada umumnya sensor IMU merupakan kombinasi dari sensor *Accelerometer* untuk mengukur perubahan akselerasi, *Gyroscope* untuk mengukur kecepatan atau orientasi sudut dan *Magnetometer* untuk mengukur perubahan orientasi arah.

2.2.2.1 Sensor Accelerometer

Sensor Accelerometer adalah perangkat yang dapat mengukur akselerasi pada arah tertentu berdasarkan gravitasi. Pada kasus *Accelerometer 3 axis*, pada dasarnya bisa mengukur akselerasi dalam 3 arah secara bersamaan. Dalam kebanyakan kasus akselerasi diukur dengan *g-force*, yang pada dasarnya akselerasi itu seperti berat. Tentunya di permukaan bumi dan dalam kondisi tidak bergerak sensor akan bernilai 1G. sensor *Accelerometer* juga dapat difungsikan untuk mengukur kemiringan suatu benda dengan memanfaatkan gaya gravitasi bumi.



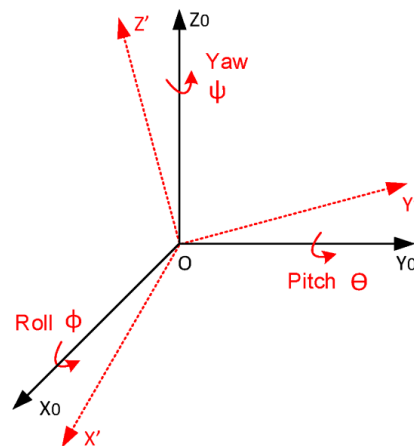
Gambar II.8 Sumbu Akselerometer

2.2.2.2 Sensor Gyroscope

Giroskop digunakan untuk mengukur orientasi berdasarkan prinsip momentum sudut. Giroskop mengukur kecepatan sudut kerangka acuan inersia. Sudut orientasi berupa gerak *roll*, *pitch*, dan *yaw* didapatkan dengan mengintegrasikan kecepatan sudut. Sehingga hasil giroskop adalah percepatan sudut.

Gyroscope berbeda dengan *Accelerometer*. *Accelerometer* mengukur gerakan linear berdasarkan gravitasi. Akselerometer dapat memberikan pengukuran sudut kemiringan (*tilt*) akurat ketika suatu sistem dalam keadaan diam (*statis*). Saat sistem berotasi atau bergerak, akselerometer tidak dapat mengikuti pergerakan yang cepat dikarenakan responnya lambat dan memiliki noise, sehingga tidak dapat digunakan untuk pengukuran sudut orientasi dalam kendaraan udara.

Keluaran *Gyroscope* berupa data kecepatan sudut. Kecepatan sudut adalah besaran vektor yang menyatakan frekuensi sudut suatu benda terhadap sumbu putarnya. Satuan untuk kecepatan sudut adalah radian per detik.

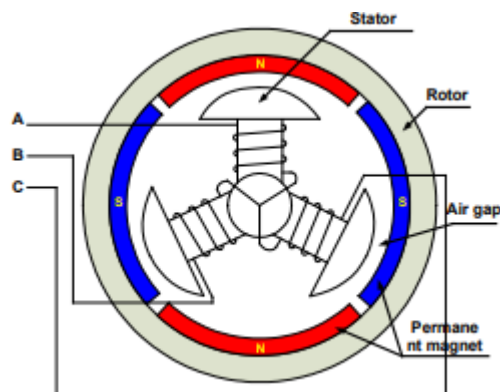


Gambar II.9 Sumbu Giroskop

2.2.3 Aktuator

2.2.3.1 Motor *Brushless* DC

Motor *brushless* adalah sebuah motor yang ditenagai oleh tegangan searah atau DC (*Direct Current*). Ada dua bagian utama pada motor burshless yaitu *Strator* berupa liminasi yang diberi lilitan dan memiliki keularan dalam 3 fasa, dan *Rotor* merupakan bagian yang memiliki magnet berkutub.



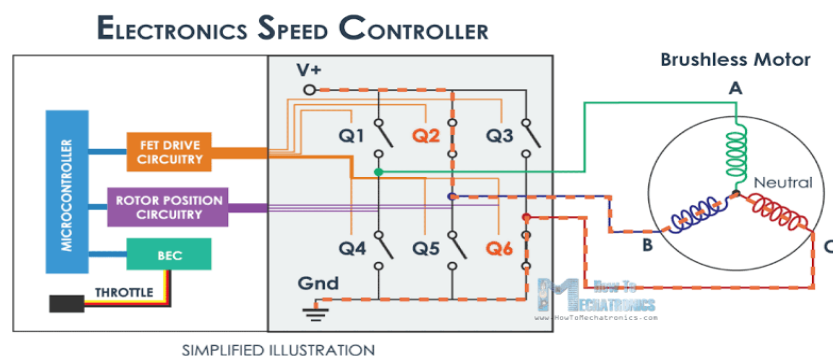
Gambar II.10 Rangkaian brushless motor

Sesuai dengan namanya cara kerja motor jenis ini tidak menggunakan *brush* atau plat lempeng untuk mengalirkan tegangan layak nya *brushed motor*. Tetapi

memanfaatkan 3 fasa untuk proses perubahan arah pergerakan kemagnetan pada rotor.

2.2.3.2 Elektronik Speed Controller (ESC)

Electronic Speed Control(ESC) adalah sirkuit elektronik yang bertujuan untuk mengatur perubahan kecepatan motor, arah putaran motor bahkan dapat sebagai pengerem. Penggunaan motor *Brushless* sebagai motor pendorong mengharuskan penggunaan *driver* pengontrol kecepatan motor berupa ESC. ESC mengandalkan kecepatan *switch* pada transistor untuk mengatur kecepatan motor *brushless*. Jenis transistor yang biasa digunakan pada ESC berupa *field effect transistor*(FET). Sinyal masukan pada ESC pada umumnya berupa PWM 50 Hz dengan varias pulsa 1 m/s hingga 2 m/s.



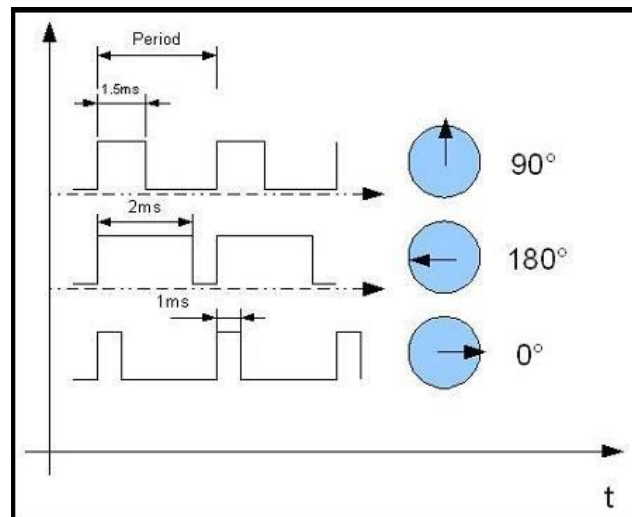
Gambar II.11 Skema Electronic speed control (ESC)

2.2.3.3 Motor Servo

Motor Servo adalah jenis motor DC yang tersusun dari motor DC, *gearbox*, dan potensiometer. Motor servo dalam wahana terbang digunakan untuk sistem aktuatur pada *Aileron*, *Elevator* dan *Rudder*. Motor servo terintegrasi dengan *flight controller*, untuk dapat bergerak motor servo memerlukan tegangan dan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk kendali motor servo tersebut. Sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) yang didapat servo dari *flight controller* merupakan pengolahan data semua sensor yang diolah dan dikeluarkan dalam bentuk sinyal

Pulse Width Modulation (PWM) agar servo bergerak. Motor servo memiliki banyak jenis tergantung dari torsi atau daya angkat yang dihasilkan oleh motor servo.

Cara kerja dari motor servo bergantung pada nilai yang dihasilkan oleh komponen potensiometer yang akan diubah oleh komponen ADC menjadi data digital. Data tersebut akan dibandingkan dengan sinyal masukan oleh komparator. Hasil perbandingan komparator akan menjadi penentu arah pergerakan motor. Sinyal masukan pada motor servo hampir sama seperti pada *Electronic Speed Control(ESC)*. Hanya saja, pada ESC terjadi perubahan kecepatan motor sedangkan pada motor servo terjadi perubahan sudut.



Gambar II.12 Lebar pulsa motor servo