

**SKRIPSI**

**PENGENDALI *PROPORTIONAL INTEGRAL* (PI) BERBASIS  
*MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL* (MRAC) UNTUK  
PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DIRECT*  
*CURRENT* (BLDC)**

**Disusun dan diajukan oleh**

**ANDI BAU RESTU WARDANA ARDAM  
D411 16 319**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
MAKASSAR  
2023**

**LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI****PENGENDALI *PROPORTIONAL INTEGRAL (PI)* BERBASIS  
*MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL (MRAC)* UNTUK  
PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR *BRUSHLESS DIRECT  
CURRENT (BLDC)***

Disusun dan diajukan oleh

**ANDI BAU RESTU WARDANA ARDAM**  
**D411 16 319**

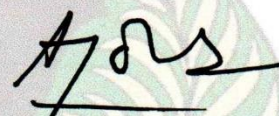
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian  
Studi Program Sarjana Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin  
Pada tanggal 01 Maret 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan  
Menyetujui,

Pembimbing I,

Pembimbing II,



**Dr. Ir. H. Rhiza S. Sadjad, MSEE.**  
NIP. 19570906 198203 1 004



**Dr. Hj. A. Ejah Umraeni Salam, S.T., M.T.**  
NIP. 19720908 199702 2 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Elektro



**Dr. Eng. Ir. Dewiani, M.T.**  
NIP. 19691026 199412 2 001

## PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andi Bau Restu Wardana Ardam  
NIM : D41116319  
Program Studi : Teknik Elektro  
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

***Pengendali  $Proportional\ Integral$  (PI) Berbasis  $Model\ Reference\ Adaptive\ Control$  (MRAC) untuk Pengendalian Kecepatan Motor  $Brushless\ Direct\ Current$  (BLDC)***

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 01 Maret 2023

Yang Menyatakan



Andi Bau Restu Wardana Ardam

## ABSTRAK

**ANDI BAU RESTU WARDANA ARDAM.** *Pengendali Proportional Integral (PI) Berbasis Model Reference Adaptive Control (MRAC) untuk Pengendalian Motor Brushless Direct Current (BLDC).* (dibimbing oleh Rhiza Samsoe'oad Sadjad dan A. Ejah Umraeni S.)

Pada umumnya motor BLDC secara luas digunakan sebagai aplikasi servo/sistem pelacakan posisi atau aplikasi kecepatan variabel dimana memiliki variasi parameter yang berubah-ubah sehingga mempengaruhi respon sistem. Respon sistem yang baik dan presisi kecepatan yang tinggi menjadi hal yang sangat penting sehingga untuk memenuhi performa tersebut dibutuhkan skema pengendalian yang lebih maju. Skema *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) merupakan salah satu metode kendali adaptif yang mana dikembangkan untuk meminimalkan pengaruh perubahan parameter dan gangguan dari luar. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem kendali untuk pengendalian kecepatan motor BLDC dengan menggunakan skema MRAC yang dimodifikasi untuk mengatur adaptasi parameter pengendali PI terhadap perubahan parameter dari *plant* kendalian. Simulasi dilakukan dengan kondisi pemberian *setpoint* yang bervariasi dan dalam kondisi beban yang berubah-ubah, dengan nilai  $\gamma_p = 1$  dan  $\gamma_i = 1$  sebagai laju adaptasi parameter pengendali PI. Berdasarkan hasil simulasi, dapat dibuktikan bahwa performa sistem dengan MRAC lebih baik dibandingkan dengan sistem dengan pengendali PI konvensional.

Kata kunci: *motor BLDC, kecepatan, pengendali PI, MRAC.*

## ABSTRACT

**ANDI BAU RESTU WARDANA ARDAM.** *Proportional Integral (PI) Controller Based on Model Reference Adaptive Control for BLDC Motor Speed Control* (supervised by Rhiza Samsoe' oed Sadjad dan A. Ejah Umraeni S.)

In general, BLDC motors are widely used as servo applications/position tracking systems or variable speed applications which have varying parameter variations that affect system response. Good system response and high speed precision are very important so that to meet this performance a more advanced control scheme is needed. The Model Reference Adaptive Control (MRAC) scheme is one of the adaptive control methods which was developed to minimize the influence of parameter changes and external disturbances. In this research, the modeling of the control system for controlling the speed of a BLDC motor was carried out using a modified MRAC scheme to adjust the adaptation of the PI controller parameters to changes in the parameters of the control plant. The simulation was carried out under varying setpoint conditions and varying load conditions, with the values  $\gamma_p = 1$  and  $\gamma_i = 1$  as the adaptation rate of the PI controller parameters. Based on the simulation results, it can be proven that the performance of the system with MRAC is better than the system with conventional PI controllers.

Keywords: *BLDC motor, speed, PI controller, MRAC*

## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR.....	vii
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR.....	xi
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
1.6 Metode Penelitian.....	3
1.7 Sistematika Penulisan.....	3
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Motor BLDC.....	5
2.2 Model Matematis Motor BLDC.....	7
2.3 Karakteristik Respon Sistem.....	11
2.4 Pengendali PI.....	14
2.5 Pengendali MRAC.....	14
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN.....	17
3.1 Gambaran Umum.....	17
3.2 Diagram Blok Sistem.....	19
3.3 Plant Kendalian.....	19
3.3.1 Spesifikasi Plant Kendalian.....	19
3.3.2 Pemodelan Plant Kendalian.....	20
3.4 Perancangan Pengendali.....	21
3.4.1 Desain Pengendali PI dengan MRAC.....	21
3.4.2 Penentuan Model Referensi.....	23
3.4.3 Penentuan Parameter Kontroler.....	24
3.5 Skenario Pengujian.....	25
3.5.1 Pengujian Kondisi Transien.....	26
3.5.2 Pengujian Variasi Kecepatan.....	26
3.5.3 Pengujian dengan Gangguan.....	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Pencarian Nilai $K_p$ dan $K_i$ .....	27
4.2 Hasil Pengujian Kondisi Transien.....	29
4.2.1 Tanpa Pengendali.....	30
4.2.2 Pengendali PI.....	30
4.2.3 Pengendali PI-MRAC.....	31
4.3 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan.....	33

4.3.1 Pengendali PI.....	34
4.3.2 Pengendali PI-MRAC.....	37
4.4 Hasil Pengujian Kondisi Gangguan.....	42
4.4.1 Pengendali PI.....	42
4.4.2 Pengendali PI-MRAC.....	43
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>46</b>
5.1 Kesimpulan.....	46
5.2 Saran.....	46
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>47</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>48</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC.....	6
Gambar 2.2 Skema Perputaran Rotor.....	6
Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC.....	8
Gambar 2.4 Diagram Skematik Motor BLDC .....	8
Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Sederhana Motor BLDC .....	10
Gambar 2.6 Respon Sistem Orde Dua .....	13
Gambar 2.7 Blok Diagram Pengendali PI.....	14
Gambar 2.8 Blok Diagram Pengendali MRAC.....	15
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	18
Gambar 3. 2 Diagram Blok Sistem Pengendalian BLDC dengan MRAC.....	19
Gambar 3.3 Model Simulink Sistem Penggerak Motor BLDC .....	20
Gambar 3. 4 Diagram Blok Sistem Loop Tertutup Orde Dua dengan PI .....	22
Gambar 3.5 Diagram Blok Model Referensi .....	24
Gambar 3.6 Skema Diagram Blok Persamaan Matematis PI-MRAC .....	25
Gambar 4.1 Grafik Pencarian Nilai Kp Terbaik .....	28
Gambar 4.2 Grafik Pencarian Nilai Ki Terbaik .....	29
Gambar 4.3 Grafik Kecepatan Kondisi Transien Tanpa Pengendali .....	30
Gambar 4.4 Grafik Nilai Error Kondisi Transien Tanpa Pengendali.....	30
Gambar 4.5 Grafik Kecepatan Kondisi Transien dengan Pengendali PI.....	31
Gambar 4.6 Grafik Nilai Error Kondisi Transien dengan Pengendali PI .....	31
Gambar 4.7 Grafik Kecepatan Kondisi Transien dengan Pengendali MRAC.....	32
Gambar 4.8 Grafik Nilai Error Kondisi Transien dengan Pengendali MRAC ....	32
Gambar 4.9 Grafik Nilai PI Kondisi Transien dengan Pengendali MRAC .....	33
Gambar 4.10 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 1 dengan Pengendali PI .....	34
Gambar 4.11 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 1 dengan Pengendali PI.....	35
Gambar 4.12 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali PI .....	35
Gambar 4.13 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali PI.....	36
Gambar 4.14 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 3 dengan Pengendali PI .....	36
Gambar 4.15 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 3 dengan Pengendali PI.....	37
Gambar 4.16 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 1 dengan Pengendali MRAC ...	37
Gambar 4.17 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 1 dengan Pengendali MRAC... 38	38
Gambar 4.18 Grafik Nilai PI Kondisi Variasi 1 dengan Pengendali MRAC.....	38
Gambar 4.19 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali MRAC ...	39
Gambar 4.20 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali MRAC... 39	39
Gambar 4.21 Grafik Nilai PI Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali MRAC.....	40
Gambar 4.22 Grafik Kecepatan Kondisi Variasi 2 dengan Pengendali MRAC ...	40
Gambar 4.23 Grafik Nilai Error Kondisi Variasi 3 dengan Pengendali MRAC... 41	41
Gambar 4.24 Grafik Nilai PI Kondisi Variasi 3 dengan Pengendali MRAC.....	41
Gambar 4.25 Grafik Kecepatan Kondisi Gangguan dengan Pengendali PI.....	42
Gambar 4.26 Grafik Nilai Error Kondisi Gangguan dengan Pengendali PI.....	43
Gambar 4.27 Grafik Kecepatan Kondisi Gangguan dengan Pengendali MRAC .	43
Gambar 4.28 Grafik Nilai Error Kondisi Gangguan dengan Pengendali MRAC .	44
Gambar 4.29 Grafik Nilai PI Kondisi Gangguan dengan Pengendali MRAC.....	44



## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Sifat Kestabilan Sistem Orde Dua .....	12
Tabel 3.1 Spesifikasi Motor BLDC .....	20
Tabel 4.1 Perbandingan Hasil Simulasi Kondisi Transien .....	33
Tabel 4.2 Perbandingan Hasil Simulasi Kondisi Variasi Kecepatan .....	42
Tabel 4.3 Perbandingan Hasil Simulasi Kondisi Gangguan .....	45

**DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL**

---

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
BLDC	<i>Brushless Direct Current</i>
MRAC	<i>Model Reference Adaptive Control</i>
PI	<i>Proportional Integral</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
$\gamma$	Koefisien laju adaptasi pengendali pada aturan MIT
$\frac{\partial e}{\partial \theta}$	Turunan sensitivitas pada aturan MIT
$\zeta$	<i>Damping ratio</i> /rasio redaman sistem
$\omega_n$	Frekuensi alami sistem
$^\circ$	Derajat sudut ( <i>degree</i> )
$\pm$	Kurang atau lebih dari

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Simulink Penggerak Motor BLDC .....	48
Lampiran 2 Simulink Pengendalian Motor BLDC dengan Pengendali PI .....	48
Lampiran 3 Simulink Pengendalian Motor BLDC dengan Pengendali MRAC ...	49

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya kepada kami sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan lancar. Penyusunan tugas akhir ini dilakukan dalam rangka pemenuhan salah satu syarat menyelesaikan Program Strata-1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tidak lupa pula kami mengucapkan banyak terima kasih kepada pihak-pihak yang telah meluangkan waktunya untuk membantu selama masa perkuliahan hingga pada proses penyelesaian tugas akhir ini.

Kami selaku pelaku penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan serta masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kami membuka kesempatan kepada pembaca untuk memberikan kritik dan saran yang membangun untuk perkembangan penelitian ini dan perkembangan diri penulis sendiri. Semoga kesalahan dan kekurangan tersebut dapat menjadi pelajaran bagi kita semua.

Akhir kata, melalui tugas akhir ini kami berharap dapat turut serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta dapat dimanfaatkan untuk kemaslahatan umat. Semoga apa yang telah kita usahakan dapat bernilai ibadah dan mendapatkan berkah dari-Nya.

Gowa, 01 Maret 2023

Andi Bau Restu Wardana Ardam

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Saat ini, motor BLDC (*Brushless Direct Current*) secara bertahap menggantikan penggunaan motor DC konvensional dan motor AC. Hal ini disebabkan karena motor BLDC memiliki performa yang lebih baik, dilihat dari segi efisiensi, perawatan yang rendah, *lifetime*, inersia rotor yang rendah, karakteristik torsi yang lebih baik, memiliki rentang kecepatan yang luas, dan lain-lain. Oleh karena itu, motor BLDC semakin sering digunakan pada aplikasi yang menuntut kinerja yang tinggi dan andal (Ali, 2016).

Pada umumnya motor BLDC secara luas digunakan sebagai aplikasi servo/sistem pelacakan posisi atau aplikasi kecepatan variabel dimana memiliki variasi parameter yang berubah-ubah sehingga mempengaruhi respon sistem (Veeramuthulingam, Ezhilarasi, Ramaswamy, & Muthukumar, 2018).

Respon sistem yang baik dan presisi kecepatan yang tinggi menjadi hal yang sangat penting sehingga untuk memenuhi performa tersebut dibutuhkan algoritma pengendalian yang lebih maju. Skema *Model Reference Adaptive Control* (MRAC) merupakan salah satu metode kendali adaptif yang mana dikembangkan untuk meminimalkan pengaruh perubahan parameter dan gangguan dari luar. Pada skema MRAC, perbedaan antara nilai output plant dan output model referensi diproses melalui suatu algoritma untuk mengubah nilai parameter kontroler sedemikian rupa sehingga respon output plant sama dengan respon output model referensi (Samman, 2016).

Pada penelitian kali ini, dirancang sebuah sistem pengendali MRAC yang dimodifikasi sedemikian rupa. Perancangan pengendali MRAC ini digunakan untuk memperbaiki performa dari motor BLDC saat terjadi gangguan. Pengendali yang sudah dibuat kemudian diaplikasikan pada sebuah model motor BLDC dan disimulasikan menggunakan Matlab Simulink.

Dari uraian masalah tersebut maka penulis mengangkat judul penelitian: “*Pengendali Proportional Integral Berbasis Model Reference Adaptive Control untuk Pengaturan Kecepatan Motor Brushless Direct Current (BLDC)*”.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang tersebut di atas, maka permasalahan yang menjadi objek penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan menggunakan MRAC?
2. Bagaimana pengaruh pengendali MRAC pada sistem kendali kecepatan motor BLDC pada kondisi berbeban?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

1. Menghasilkan model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan menggunakan MRAC.
2. Mengetahui pengaruh pengendali MRAC pada sistem kendali kecepatan motor BLDC pada kondisi berbeban.

## **1.4 Batasan Masalah**

Dalam melaksanakan penelitian ini, permasalahan yang akan dibahas dibatasi dengan ketentuan berikut:

1. Tidak dibahas masalah komutasi motor BLDC.
2. Variabel yang dikendalikan pada penelitian ini adalah kecepatan motor BLDC.
3. Sistem dibuat dalam model simulasi yang dimodelkan pada aplikasi Matlab/Simulink.

## **1.5 Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan kemampuan dalam berpikir dan menambah wawasan terkait tentang penerapan teori yang sebelumnya diperoleh dari mata kuliah.
2. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi pertimbangan dan rujukan untuk penelitian serupa atau dapat dikembangkan lagi.

## **1.6 Metode Penelitian**

Metode penelitian yang digunakan pada penelitian ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. Identifikasi masalah

Merupakan tahap mengumpulkan dan mengidentifikasi masalah yang akan diangkat dengan menentukan latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, dan batasan masalah.

2. Studi Literatur

Studi literatur yaitu mengumpulkan kajian-kajian baik dari buku, internet, artikel, dan sumber pustaka lainnya untuk mendapatkan informasi terkait dengan penelitian sehingga dihasilkan landasan teori yang tepat yang dapat menunjang kegiatan penelitian.

3. Pemodelan dan simulasi

Pemodelan dan simulasi merupakan proses perancangan sistem dalam bentuk bagan kotak sehingga dapat dihasilkan respon dinamik sistem.

4. Analisis Data

Melakukan evaluasi terhadap respon dinamik sistem yang diperoleh dari hasil simulasi.

## **1.7 Sistematika Penulisan**

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini sebagai berikut.

### **BAB I PENDAHULUAN**

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat, metode penelitian, dan sistematika penulisan pada penelitian ini.

### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Bab ini berisi landasan teori yang akan digunakan sebagai penunjang dalam penelitian ini.

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN DAN PERANCANGAN**

Bab ini berisi penjelasan mengenai tahapan penelitian secara garis besar dan proses perancangan sistem yang akan dibangun.

**BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Bab ini menampilkan data dan analisis hasil simulasi sistem yang telah dibuat.

**BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Bab ini berisi kesimpulan penelitian ini dan saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya.



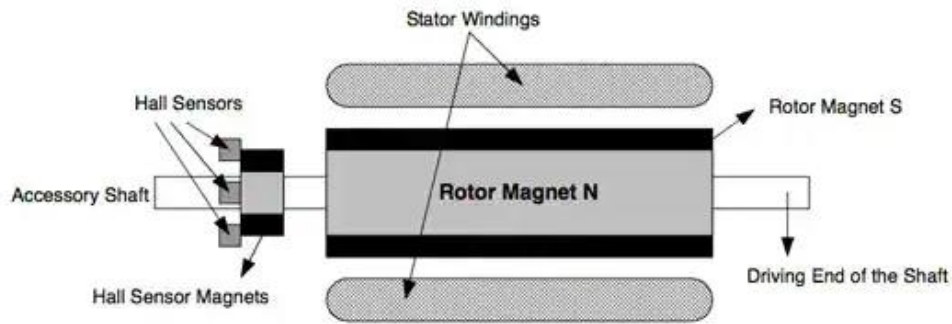
## **BAB 2**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Motor BLDC**

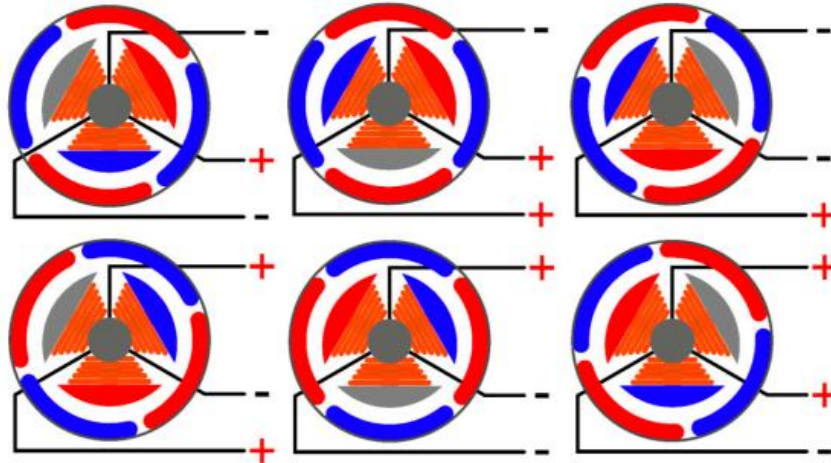
Motor *brushless DC* (BLDC) atau dapat disebut juga dengan motor BLAC merupakan motor yang termasuk dalam jenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM). Perbedaan pemberian nama ini terjadi karena motor BLDC memiliki *back electromotive force* (*back EMF*) yang berbentuk trapezoid sedangkan motor BLAC memiliki *back EMF* yang berbentuk sinusoidal. Walaupun demikian, keduanya memiliki struktur yang sama dan dapat dikendalikan dengan metode *six step*. Dibandingkan dengan motor DC biasa, motor BLDC memiliki biaya perawatan yang lebih rendah dan kecepatan yang tinggi akibat tidak digunakannya sikat sebagai alat komutasi. Dibandingkan dengan motor induksi, motor BLDC memiliki efisiensi yang lebih tinggi karena rotor dan torsi awal yang lebih tinggi karena rotor terbuat dari magnet permanen. Walaupun memiliki kelebihan dibandingkan dengan motor DC dan motor induksi, pengendalian motor BLDC jauh lebih kompleks untuk mengendalikan kecepatan dan torsi yang konstan karena tidak adanya sikat yang menunjang proses komutasi dan harga motor BLDC yang lebih mahal (Alim, 2021).

Secara umum konstruksi motor BLDC memiliki dua bagian utama, yaitu rotor dan stator, pada Gambar 2.1 menunjukkan konstruksi dasar dari motor BLDC. Stator merupakan komponen motor yang tidak bergerak atau statis dan rotor adalah komponen motor yang bergerak. Rotor terdiri atas magnet permanen sedangkan stator terdiri dari kumparan jangkar tiga fasa. Pada umumnya, tiap fasa pada kumparan tersebut saling terpisah  $120^\circ$ . Oleh karena tidak adanya sikat pada motor BLDC untuk menentukan waktu komutasi yang tepat sehingga dihasilkan kecepatan yang konstan, diperlukan tiga buah *hall sensor*. Pada *hall sensor*, waktu komutasi ditentukan dengan cara mendeteksi medan magnet rotor dengan menggunakan tiga buah *hall sensor* untuk mendapatkan enam kombinasi *timing* yang berbeda (Dinansyar, 2016).



Gambar 2.1 Konstruksi Motor BLDC

Motor BLDC dapat bekerja ketika kumparan stator diberikan arus tiga fasa. Akibat adanya arus yang melewati kumparan, maka timbul medan magnet pada inti besi. Agar rotor dapat berputar, polaritas dari kumparan harus diubah setiap saat sehingga menghasilkan medan putar. Medan putar inilah yang akan mengakibatkan rotor yang terdiri dari magnet permanen dapat berputar. Berikut ini adalah skema perputaran rotor pada motor BLDC.



Gambar 2.2 Skema Perputaran Rotor

Pada Gambar 2.2 di atas menunjukkan skema perputaran rotor pada motor dengan arah searah jarum jam. Dapat dilihat pada gambar tersebut polaritas kumparan pada tiap fasa berubah-ubah. Skema pengoperasian ini disebut skema *six step commutation* karena perubahan polaritas kumparan berubah dalam enam tahap sehingga menghasilkan satu putaran penuh. Ketika kumparan stator diberi tegangan

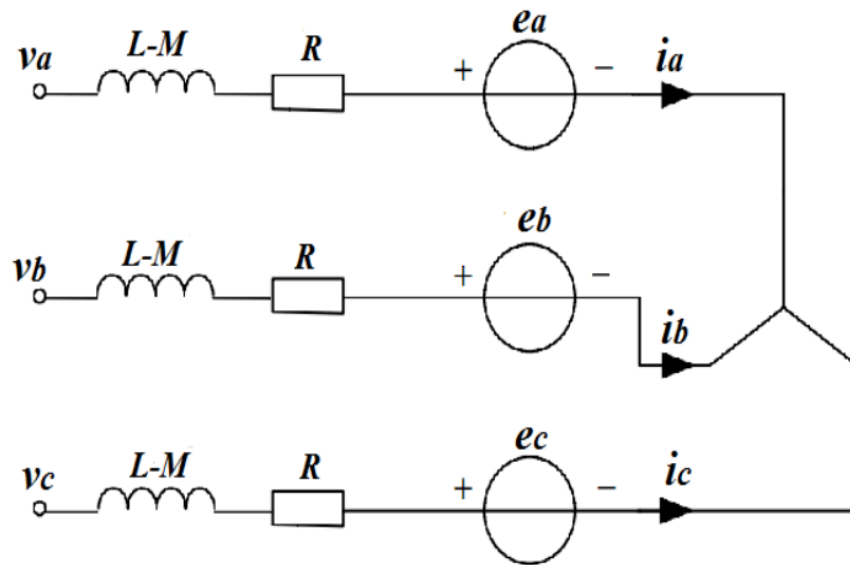
positif, inti besi akan menghasilkan kutub utara sehingga mengakibatkan kutub selatan magnet permanen pada rotor bergerak. Begitu pula sebaliknya, ketika kumparan stator diberi tegangan negatif, inti besi akan menghasilkan kutub selatan sehingga mengakibatkan kutub utara magnet permanen pada rotor bergerak. Pola ini akan terus berulang hingga menyebabkan motor berputar. Untuk memutar rotor pada kecepatan konstan, polaritas kumparan tiap fasa diubah dengan frekuensi yang konstan pula (Masood, Wang, Ali, & Babar, 2017).

Jika diperhatikan secara seksama, terlihat bahwa satu putaran elektrik menghasilkan setengah putaran mekanik. Hal ini ditentukan berdasarkan jumlah pasang kutub pada rotor sehingga menghasilkan hubungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned} & \textit{putaran mekanik} \\ &= \frac{2}{\textit{jumlah pasang kutub}} \times \textit{putaran elektrik} \quad (2.1) \end{aligned}$$

## 2.2 Model Matematis Motor BLDC

Persamaan model motor BLDC dibangun dari persamaan tegangan, persamaan torsi dan persamaan gerak. Stator motor BLDC umumnya memiliki tiga belitan seperti motor induksi. Persamaan (2.2) sampai (2.10) merepresentasikan model dinamik motor BLDC. Persamaan ini didasarkan bahwa stator memiliki lilitan yang terhubung Y, rotor bagian dalam merupakan tipe *non salient pole*, tiga hall sensor ditempatkan secara simetris dengan interval 120 derajat. Gambar 2.3 merupakan rangkaian ekuivalen dari komponen elektrik motor BLDC (Ali, 2016).



Gambar 2.3 Rangkaian Ekuivalen Motor BLDC

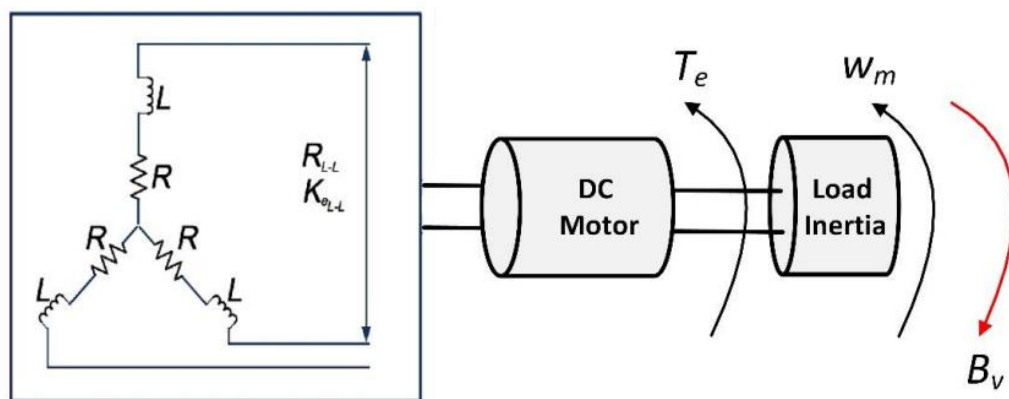
Berdasarkan hukum Kirchoff tegangan tiap fasa pada rangkaian kumparan jangkar motor BLDC di atas adalah:

$$v_{ab}(t) = R(i_a - i_b) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + (e_a - e_b) \quad (2.2)$$

$$v_{bc}(t) = R(i_b - i_c) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + (e_b - e_c) \quad (2.3)$$

$$v_{ca}(t) = R(i_c - i_a) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + (e_c - e_a) \quad (2.4)$$

Torsi listrik dan mekanisme *back emf* motor BLDC sama dengan motor DC tradisional dengan sikat, sehingga metode analisis yang sama dapat diadopsi seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.4 (Ali, 2016).



Gambar 2.4 Diagram Skematik Motor BLDC

Berdasarkan hukum *Newton*, persamaan gerak rotasi pada motor BLDC adalah sebagai berikut.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m + T_L \quad (2.5)$$

Dimana torsi listrik dan *back emf* dapat ditulis dengan:

$$e_a = \frac{K_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (2.6)$$

$$e_b = \frac{K_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.7)$$

$$e_c = \frac{K_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.8)$$

$$T_e = \frac{K_t}{2} \left[ F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (2.9)$$

Dapat dilihat pada persamaan di atas, persamaan *back emf* motor BLDC merupakan fungsi sudut rotor. Fungsi ini akan membentuk karakteristik *back emf* motor BLDC yang berbentuk trapezoid. Berikut merupakan fungsi sudut rotor motor BLDC.

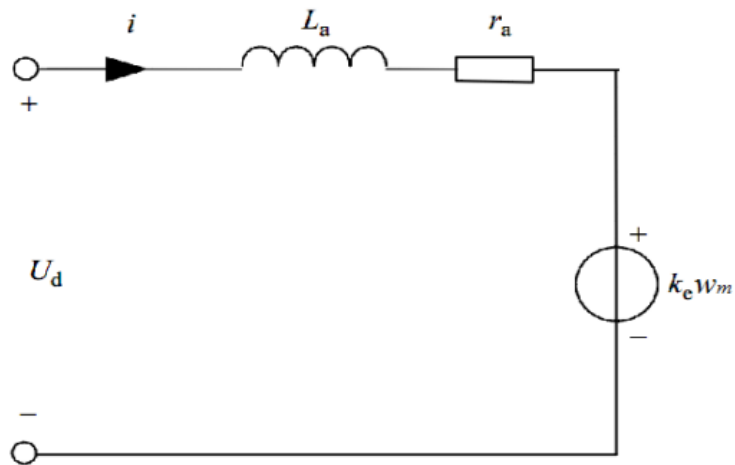
$$F(\theta_e) = \left\{ \begin{array}{ll} 1 & 0 \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e \leq \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{3} \\ -1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e \leq 2\pi \end{array} \right\} \quad (2.10)$$

Keterangan:

- $B_v$  : koefisien gesekan ( $Nms/rad$ )
- $K_e$  : konstanta tegangan *back emf* ( $Vs/rad$ )
- $K_t$  : konstanta torsi ( $Nm/A$ )
- $T_L$  : torsi beban ( $Nm$ )
- $T_e$  : torsi listrik ( $Nm$ )
- $e, e_b, e_c$  : tegangan *back emf* fasa ( $V$ )
- $i_a, i_b, i_c$  : arus fasa ( $A$ )

- $v_a, v_b, v_c$  : tegangan *line to line* (V)  
 $\theta_e$  : sudut elektrik rotor ( $\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$ )  
 $\theta_m$  : sudut rotor ( $^\circ$ )  
 $\omega_m$  : kecepatan putaran motor (*rad/s*)  
 $J$  : momen inersia ( $Nms^2/rad$ )  
 $P$  : jumlah pasang kutub  
 $L$  : induktansi fasa (H)  
 $R$  : resistansi fasa ( $\Omega$ )

Berdasarkan pada gambar dan gambar. Apabila terdapat dua fasa yang tereksitasi, baik AB, BC atau CA, maka rangkaian ekuivalen yang telah disederhanakan dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut (Xiang & Zhen-qiang, 2017).



Gambar 2.5 Rangkaian Ekuivalen Sederhana Motor BLDC

$$i_a = -i_b = i \quad (2.11)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{di_b}{dt} = \frac{di}{dt} \quad (2.12)$$

$$v_{ab} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2.13)$$

$$v_{ab} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2.14)$$

$$\therefore e_a = -e_b \quad (2.15)$$

$$v_{ab} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e_a \quad (2.16)$$

$$U_d = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_e \omega_m \quad (2.17)$$

$$K_t i = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m + T_L \quad (2.18)$$

$$i = \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m + \frac{T_L}{K_t} \quad (2.19)$$

Diasumsikan  $T_L = 0$

$$i = \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \quad (2.20)$$

Substitusi persamaan (2.20) pada persamaan (2.17)

$$U_d = r_a \left( \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + L_a \frac{d}{dt} \left( \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + K_e \omega_m \quad (2.21)$$

$$U_d = \frac{L_a J}{K_t} \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \frac{r_a J + L_a B_v}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{r_a B_v + K_t K_e}{K_t} \omega_m \quad (2.22)$$

Keterangan:

$U_d$  : tegangan DC

$r_a$  : resistansi jangkar,  $r_a = 2R$

$L_a$  : induktansi jangkar,  $L_a = 2(L - M)$

$i$  : arus jangkar

$M$  : mutual induktansi, asumsi  $M = 0$

Fungsi transfer motor BLDC dapat diperoleh dengan melakukan transformasi Laplace pada persamaan (2.22),

$$G_u(s) = \frac{\omega_m(s)}{U_d(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_t K_e)} \quad (2.23)$$

### 2.3 Karakteristik Respon Sistem

Sistem orde dua mempunyai fungsi alih dengan pangkat  $s$  tertinggi dua. Biasanya dinyatakan dalam fungsi alih berikut (Oppenheim & Verghese, 2016),

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2.24)$$

Adapun  $\zeta$  menyatakan *damping ratio*, yang menunjukkan seberapa besar redaman atau hambatan pada sistem. Sementara itu, parameter  $\omega_n$  menyatakan frekuensi alami sistem. Hal ini berarti sistem berosilasi dengan frekuensi  $\omega_n$  (dengan amplituda osilasi tetap terhadap waktu) jika *damping ratio* bernilai nol. Dari persamaan di atas, lokasi dua buah *pole*  $p_1$  dan  $p_2$  dapat ditentukan melalui,

$$p_1 = -\zeta\omega_n + \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.25)$$

$$p_2 = -\zeta\omega_n - \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad (2.26)$$

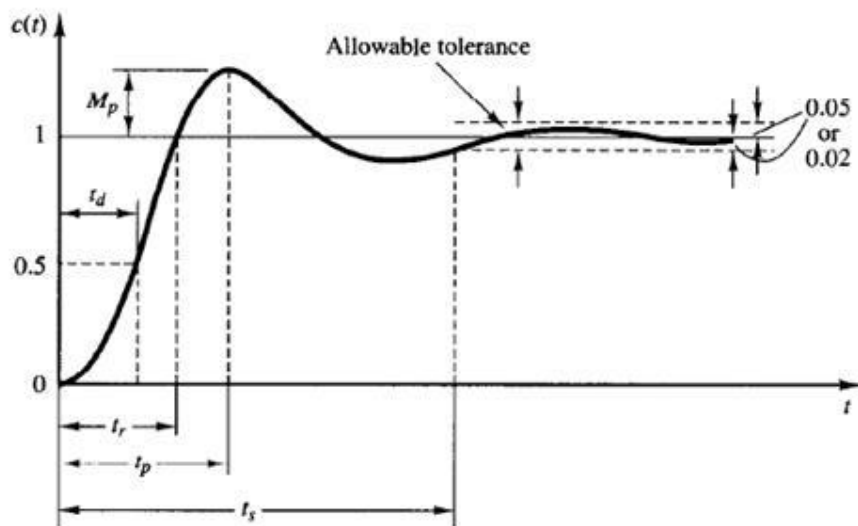
Besarnya nilai *damping ratio* menentukan lokasi pole serta sifat sistem. Pada sistem yang stabil, sifat sistem terbagi menjadi *underdamped*, *overdamped*, dan *critically damped* (Oppenheim & Verghese, 2016).

Tabel 2.1 Sifat Kestabilan Sistem Orde Dua

<i>Damping ratio</i>	Sifat sistem	Respon	Lokasi Pole
$0 < \zeta < 1$	<i>Underdamped</i>	Sistem menuju keadaan mantap dengan berosilasi, dimana amplituda osilasi terhadap waktu perlahan mengecil, dan akhirnya menuju nol	Sepasang pole berkonjugasi kompleks $p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$
$\zeta > 1$	<i>Overdamped</i>	Sistem menuju keadaan mantap tanpa osilasi (fungsi eksponensial)	Dua buah pole riil $p_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$
$\zeta = 1$	<i>Critically damped</i>	Sistem menuju keadaan mantap secepat mungkin tanpa osilasi (fungsi eksponensial)	Dua buah pole riil pada posisi yang sama $p_1 = p_2 = -\zeta\omega_n$

Karakteristik kinerja suatu sistem pengendalian dicirikan oleh tanggapan transien terhadap masukan sinyal uji. Adapun indeks kinerja dalam domain waktu yang digunakan untuk mengukur performa dari suatu sistem pengendalian adalah sebagai berikut (Ogata, 2010):





Gambar 2.6 Respon Sistem Orde Dua

1. Waktu tunda (*delay time*)  $t_d$  : adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk mencapai setengah (50%) dari nilai akhir untuk waktu yang pertama.
2. Waktu naik (*rise time*)  $t_r$ : adalah waktu yang diperlukan oleh tanggapan untuk naik dari 10% menjadi 90%, 5% menjadi 95%, atau 0% menjadi 100% dari nilai akhir yang digunakan. Pada sistem atas redaman (*overdamped*) waktu naik yang biasa digunakan adalah 10% menjadi 90%.
3. Waktu puncak (*peak time*)  $t_p$ : adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak pertama *overshoot*.
4. Maksimum (persen) *overshoot* ( $M_p$ ) : adalah nilai puncak kurva tanggapan yang diukur dari nilai akhir tanggapan atau nilai *set point*. Biasanya didefinisikan dalam persentase:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\%$$

5. Waktu tunak (*settling time*)  $t_s$  : adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai nilai akhir dari tanggapan dan tetap berada pada nilai tersebut dalam range persentase tertentu dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%).

Dalam perancangan sistem pengendalian, karakteristik kinerja yang diinginkan oleh sistem tersebut harus dispesifikasikan dalam bentuk domain waktu.

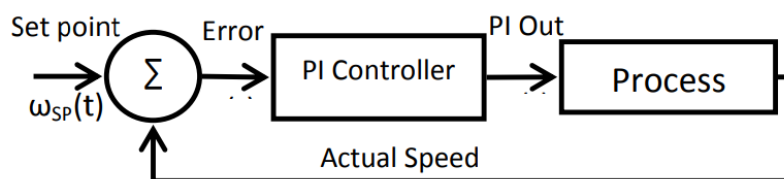
Pada umumnya, spesifikasi ini diberikan untuk tanggapan fungsi unit-step yang dianggap bisa mewakili kinerja sistem secara keseluruhan.

## 2.4 Pengendali PI

Pengendali PI merupakan pengendali yang sudah digunakan secara luas diberbagai bidang khususnya pada bidang industri. Pengendali PI bertugas untuk mengurangi eror antara suatu variabel proses dengan nilai *set point* yang diberikan dengan mengkalkulasi sinyal eror tersebut lalu memberikan suatu sinyal usaha yang dapat mengurangi eror. Pada pengendali PI, terdapat dua komponen pengendali yang digunakan yaitu komponen *proportional* dan komponen *integral*. Komponen *proporsional* mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai eror saat ini. Sedangkan komponen integral mempengaruhi keluaran pengendali berdasarkan nilai eror sebelumnya. Pengendali PI kemudian menjumlahkan hasil kalkulasi dari setiap komponen tersebut sehingga menghasilkan usaha (S. & Kuncheria, 2013). Berikut ini adalah persamaan pengendali PI.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2.27)$$

dimana  $u(t)$  adalah keluaran pengendali PI,  $K_p$  adalah *proportional gain*,  $K_i$  adalah *integral gain*, dan  $e(t)$  adalah eror. Blok diagram berikut ini menggambarkan proses kerja pengendali PI. 8



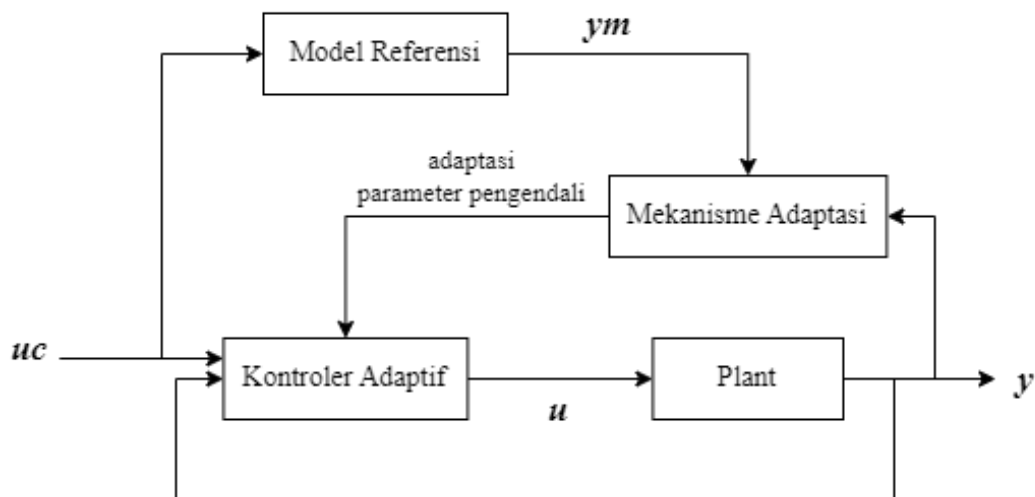
Gambar 2.7 Blok Diagram Pengendali PI

## 2.5 Pengendali MRAC

Model Reference Adaptif Control (biasa disingkat MRAC) atau kendali adaptif model acuan merupakan salah satu model struktur kendali adaptif yang paling banyak digunakan. Dalam aplikasinya, kendali ini digunakan untuk memaksakan respon dari sebuah sistem agar mengikuti karakteristik model acuan yang dipilih, yang mana model acuan tersebut memiliki kinerja yang lebih baik

daripada sistem yang dikendalikan itu sendiri. Mekanisme pemaksaan perilaku tersebut berlangsung melalui proses adaptasi oleh sebuah algoritma adaptasi untuk menentukan aturan kendali adaptif (Mekha, 2018) (Samman, 2016).

Diagram blok sistem *Model Reference Adaptif Control* ditunjukkan pada Gambar 2.8. Dapat dilihat secara umum sistem ini memiliki tiga blok utama yaitu blok model referensi, blok pengendali adaptif dan blok mekanisme adaptasi. Blok model referensi berupa persamaan matematis untuk menentukan respon yang diinginkan dari sistem kontrol adaptif, blok ini menerima sinyal masukan dari set point  $uc$  dan memberikan sinyal keluaran  $ym$  yang memiliki perilaku atau tanggapan sesuai dengan sifat-sifat yang diharapkan. Blok mekanisme adaptasi merupakan Hubungan matematis yang menyatakan perubahan parameter yang harus disesuaikan untuk menjaga kesalahan pelacakan sekecil mungkin, yang mana blok ini memperoleh sinyal dari keluaran model plant dan model referensi, mekanisme ini selanjutnya akan menghitung parameter kontroler dan mengumpulkannya ke kontroler. Selanjutnya kontroler ini akan menghasilkan sinyal kontrol untuk mengendalikan plant (Samman, 2016).



Gambar 2.8 Blok Diagram Pengendali MRAC

Mekanisme adaptasi pada model adaptif dapat menggunakan aturan MIT, dimana skema penyesuaian parameternya disebut juga dengan metode pendekatan gradien. Dalam aturan MIT dimisalkan sebuah loop tertutup memiliki sebuah parameter  $\theta$  yang dapat diatur, ditujukan untuk membuat error ( $e$ ) antara output

plant ( $y$ ) dan output model referensi ( $y_m$ ) mendekati nol. Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi biaya pada persamaan di bawah (Munadi, Akbar, Naniwa, & Taniai, 2016):

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \quad (2.28)$$

dimana,

$$e = y - y_m \quad (2.29)$$

Untuk membuat  $J$  sekecil mungkin, maka dilakukan perubahan parameter kendali  $\theta$  dalam arah negatif terhadap gradien  $J$

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (2.30)$$

Persamaan (2.30) di atas merupakan persamaan aturan MIT. Koefisien  $\gamma$  adalah koefisien laju adaptasi. Turunan parsial  $\frac{\partial e}{\partial \theta}$  disebut juga “turunan sensitivitas” yang menunjukkan sensitivitas kesalahan terhadap perubahan parameter yang berubah secara adaptif. Jika dianggap bahwa perubahan parameter lebih lambat daripada variabel lain dalam sistem, maka turunan  $\frac{\partial e}{\partial \theta}$  dapat dievaluasi dengan anggapan bahwa  $\theta$  adalah konstan (Mekha, 2018).