



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

Kegiatan penelitian dan perancangan merupakan hasil mengkaji teori-teori yang sudah ada sebelumnya. Seluruh teori yang digunakan kemudian disajikan untuk memperkuat argument penulis dalam penelitian yang dilakukan ini.

Pada BAB ini, berisi tentang bahasan teori penunjang dari berbagai *literature* atau pustaka seperti buku dan *paper* yang mendukung penelitian ini. Teori penunjang pada BAB ini meliputi tentang :

#### 2.1 Penelitian Terkait

Dalam penelitian Tugas Akhir ini dilakukan studi literatur yang merupakan pencarian teori serta referensi yang relevan dengan kasus dan permasalahan yang akan diselesaikan, teori dan referensi didapat dari jurnal, paper, buku dan sumber lainnya.

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam pengendalian kecepatan motor DC ini antara lain: yang pertama mengenai desain kontroler *Fuzzy PID Gain scheduling* untuk pengaturan kecepatan motor DC tanpa sikat. Kelemahan dari penelitian ini yaitu saat sistem diberikan beban didetik 15, kecepatan motor menurun sebesar 1100 rpm. Pengendali membutuhkan waktu 10 detik dari waktu total simulasi 30 detik untuk mengembalikan kestabilan kecepatan motor . Pada penelitian ini juga terdapat overshoot sebesar 2,8 % dan error steady state sebesar 0,056[2].

Penelitian yang kedua mengenai perancang kendali kecepatan motor arus searah menggunakan metode *Root Locus*. Kelemahan pada penelitian ini adalah ketika pengendali diberikan beban sebesar  $K=7$  dan  $K=20$  respon *closed loop* sistem dengan masukan tangga kecepatan sudut yang diinginkan 1 rad/dtk. Pada  $K=7$  sistem mempunyai  $\omega_n=4,59$  rad/dtk,  $K_p=0,7$  dengan karakteristik respon  $\tau=0,22$  dtk,  $t_s=0,87$  dtk, tanpa *over shoot*, namun memiliki *error steady state* sebesar 0,588. Sedangkan untuk  $K=20$ , sistem mempunyai  $\omega_n=7,75$  rad/dtk,  $K_p=2$ , dengan karakteristik respon  $\tau=0,17$  dtk,  $t_s=0,66$  dtk,  $\zeta=0,774$  dan memiliki *over shoot* sebesar 2,14%, dan *error steady state* 0,33[3].

Penelitian yang ketiga mengenai perancangan dan implementasi pengaturan kecepatan Motor *Brushless DC* menggunakan metode *Model Predictive Control*(MPC). Kelemahan dalam



penelitian ini yaitu belum maksimalnya *performance* dari pengendali MPC pada motor DC, dibuktikan bahwa terdapat *over shoot* yang sangat tinggi sebesar 12% dengan diberikan beban pada sistem. Respon sistem sangat lambat dibuktikan dengan memiliki *rise time* sebesar 8 detik dari waktu total simulasi sebesar 15 detik. Pada penelitian ini juga terdapat *error steady state* sebesar 0.98[4].

Penelitian yang keempat mengenai pengaturan kecepatan pada simulator *Parallel Hybrid Electric Vehicle* menggunakan metode *PID-Linear Quadratic Regulator*. Telah dilakukan penelitian pengendalian kecepatan motor DC dengan tiga arus beban yang berbeda yaitu sebesar 0.6 A, 0.7 A, dan 0.8 A dengan menggunakan pengendali *PID* dan *Linear Quadratic Regulator* dimana parameter yang digunakan adalah  $K_p = 3.136$ ,  $K_i = 7,0711$ , dan  $K_d = 0,0173$  telah mampu membantu mengembalikan kecepatan hingga mendekati *set point* pada saat terjadinya pembebanan pada motor DC, namun masih terdapat *error steady state* sebesar 28,8 % [5].

Penelitian selanjutnya mengenai rancang bangun sistem pengendali kecepatan motor DC dengan menggunakan metode pengendali *PID* pada mobil listrik (Zec-01). Kelemahan dari penelitian ini yaitu terdapatnya *over shoot* ketika sistem diberi beban sebesar 150 rpm, dibuktikan dengan terjadinya *over shoot* detik-detik awal pengoperasian sistem sebesar 16% serta *settling time* 18 detik. Ketika sistem diberikan beban yang lebih besar *over shoot* semakin meningkat sebesar 23% serta *settling time* 25 detik dengan berat beban sebesar 200 rpm [6].

Dapat disimpulkan bahwa masalah yang terjadi pada motor DC sebenarnya adalah pada saat sistem diberikan beban sistem mengalami penurunan kecepatan dan untuk kembali stabil memerlukan waktu yang sangat lama. Dengan ini akan dipilih MRAC sebagai pengendali kecepatan motor DC pada saat dibebani, agar sistem dapat mengendalikan penurunan kecepatan dan mengembalikan kecepatan sehingga menjadi stabil dan juga mencapai *set point* yang diinginkan

MRAC merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter kontroler diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada *error* yang merupakan selisih antara keluaran sistem dengan keluaran model referensi [7]. Dibuktikan dengan penelitian yang telah dilakukan



mengenai perancangan kontroler PI dengan teknik MRAC untuk pengaturan *level* pada *coupled tanks*, pada penelitian ini menyatakan bahwa sistem pengaturan level dengan kontroler MRAC PI dapat melakukan regulasi yaitu menjaga nilai level sesuai dengan nilai referensi baik saat keadaan normal maupun saat terjadi pembebanan. Hal ini ditunjukkan oleh nilai error steady state yang mendekati nol di kedua tangki saat keadaan tanpa pembebanan. Pada saat terjadi pembebanan, nilai RMSE berada pada nilai 0,1% untuk tangki 1 dan 0,01% untuk tangki2. Nilai gain adaptasi terbaik  $\gamma_i$  dan  $\gamma_p$  adalah masing-masing 1 dan 0,5[8].

Penelitian selanjutnya mengenai disain dan implementasi control PID Model Reference Adaptive Control untuk *automatic safe landing* pada pesawat UAV *Quadcopter*. Menyatakan bahwa ketika terjadi perubahan parameter pada *plant*, kontroler mampu memperbaiki respon agar tetap dapat mengikuti model referensinya dan dalam mengatasi gangguan metode adaptasi MRAC memiliki kemampuan yang baik dilihat dari waktu yang dibutuhkan yang relatif singkat. Dibuktikan dengan spesifikasi performansi sistem pengendalian dengan kontroler PID-MRAC pada hasil implementasi adalah  $\tau = 1.125s$ ,  $\tau_s = 2.25$ ,  $\tau_r = 3.31$  dan  $\tau_d = 2.79$  dan waktu *steady state* yaitu 1.575s[9].

Penelitian selanjutnya juga dilakukan mengenai aplikasi Metode Model Reference Adaptive Control (MRAC) pada *plant* pengaturan *level* cairan berbasis Mikrokontroler ATMEGA 8535. Pada penelitian ini juga membuktikan bahwa metode adaptif MRAC kestabilan Lyapunov ini mempunyai kemampuan mengikuti model yang baik terhadap perubahan referensi naik dan referensi turun pada *gain* adaptasi 0,01 dan 0,1. Sistem kontrol adaptif MRAC kestabilan Lyapunov mempunyai kemampuan beradaptasi terhadap gangguan, sehingga respon sistem tetap kembali mengikuti referensi masukan ketika dikenai gangguan[7].

Penelitian selanjutnya juga dilakukan mengenai perancangan *fuzzy modified model reference adaptive control* untuk pengaturan kecepatan motor arus searah tanpa sikat. Pada penelitian ini membuktikan bahwa MRAC mempunyai kemampuan mengembalikan kestabilan sistem pada saat dibebankan, dibuktikan bahwa pada saat sistem diberi beban di detik ke 3, sistem telah stabil kembali di detik ke 5 dari waktu simulasi sebanyak 20 detik. Dan juga memiliki *rise time* yang kecil sebesar 2,948[10]. Penelitian selanjutnya juga dilakukan mengenai perancangan dan implementasi pengaturan kecepatan motor tiga fasa pada mesin sentrifugal





menggunakan metode *model refrence adaptive control* (MRAC). Pada penelitian ini sistem memiliki respon yang baik, dibuktikan dengan nilai error steady state sebesar 0.79%, dan *time rise* sebesar , dan tidak memiliki *over shoot*. Pada saat diberi beban maksimal di detik 60 terjadi *error steady state* namun dapat dikendalikan agar stabil di detik ke 100 dari waktu total simulasi 200 detik[11].

Penelitian selanjutnya mengenai *desain kontrol pid* untuk mengatur kecepatan motor dc pada *electrical continuously variable transmission* (ecvt). Penelitian ini membuktikan bawa repon sistem baik dengan analisa *time respon* Xp pada kontrol *close loop* PID diperoleh pada bukaan *throttle valve* 0% - 70% dengan *time settling* maksimum sebesar 4.9 detik dan *time raising* maksimum sebesar 2.7 detik. 2. *Error* sistem CVT berdasarkan simulasi MATLAB berdasarkan bukaan pedal gas antara 0% sampai 70%. Sehingga *error* rata – rata hasil simulasi MATLAB sebesar 8.8 rad/s atau 3.22% 3. Hasil yang terbaik pada kontrol PID diperoleh pada nilai  $K_p = 1.85$ ,  $K_i = 0.03$ ,  $K_d = 3$ [12].

Berdasarkan pengujian MRAC pada sistem motor DC, ternyata respon yang dihasilkan masih belum bagus. Terbukti dengan *rise time* yang lambat, dan *error* yang masih besar. Sehingga pengendali MRAC dapat dipadukan dengan pengendali PID, karena pengendali PID dapat memperbaiki respon waktu dan mengurai *error* [8][9]. Diharapkan dengan adanya *Proportional* (P) respon sistem menjadi lebih cepat, *Integral* (I) mengurangi *error*, dan *Derivative* (D) mengurangi *overshoot* dari respon sistem, agar dapat mencapai respon kestabilan yang diinginkan.

Berdasarkan studi literatur dan hasil penelitian, akan dirancang pengendali MRAC untuk mengendalikan posisi pada sistem *magnetic levitation ball* dipadukan dengan pengendali PID, agar kekurangan respon sebelumnya dapat diperbaiki

## 2.2 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



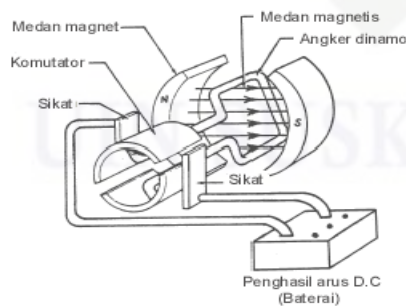
disebut “kuda kerja” nya industri sebab diperkirakan bahwa motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri[13].

Motor DC memerlukan suplai tegangan yang searah pada kumparan medan untuk diubah menjadi energi mekanik. Kumparan medan pada motor dc disebut stator (bagian yang tidak berputar) dan kumparan jangkar disebut rotor (bagian yang berputar). Jika terjadi putaran pada kumparan jangkar dalam pada medan magnet, maka akan timbul tegangan (GGL) yang berubah-ubah arah pada setiap setengah putaran, sehingga merupakan tegangan bolak-balik. Prinsip kerja dari arus searah adalah membalik fasa dari gelombang yang mempunyai nilai positif dengan menggunakan komutator, dengan demikian arus yang berbalik arah dengan kumparan jangkar yang berputar dalam medan magnet. Bentuk motor paling sederhana memiliki kumparan satu lilitan yang bisa berputar bebas di antara kutub-kutub magnet permanen..

Penggunaan motor arus searah akhir-akhir ini mengalami perkembangan, khususnya dalam pemakaiannya sebagai motor penggerak. Motor arus searah digunakan secara luas pada berbagai motor penggerak dan pengangkut dengan kecepatan yang bervariasi yang membutuhkan respon dinamis dan keadaan *steady-state*. Motor arus searah mempunyai pengaturan yang sangat mudah dilakukan dalam berbagai kecepatan dan beban yang bervariasi. Itu sebabnya motor arus searah digunakan pada berbagai aplikasi tersebut. Pengaturan kecepatan pada motor arus searah dapat dilakukan dengan memperbesar atau memperkecil arus yang mengalir pada jangkar menggunakan sebuah tahanan.

**2.2.1 Konstruksi Motor DC**

Gambar di bawah ini merupakan konstruksi dari Motor DC.



Gambar 2.1 Motor D.C Sederhana.[13]

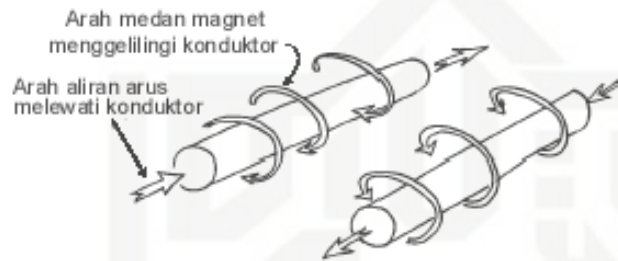
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
 Dilarang menjiplak atau menyalin dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.  
 2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



Catu tegangan dc dari baterai menuju ke lilitan melalui sikat yang menyentuh komutator, dua segmen yang terhubung dengan dua ujung lilitan. Kumparan satu lilitan pada gambar di atas disebut angker dinamo. Angker dinamo adalah sebutan untuk komponen yang berputar di antara medan magnet.

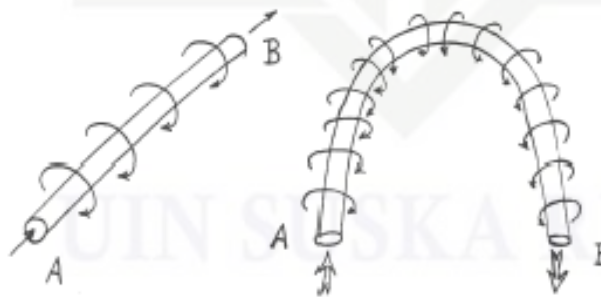
### 2.2.2 Prinsip Kerja Motor DC

Jika arus lewat pada suatu konduktor, timbul medan magnet di sekitar konduktor. Arah medan magnet ditentukan oleh arah aliran arus pada konduktor.



Gambar 2.2 Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor.[13]

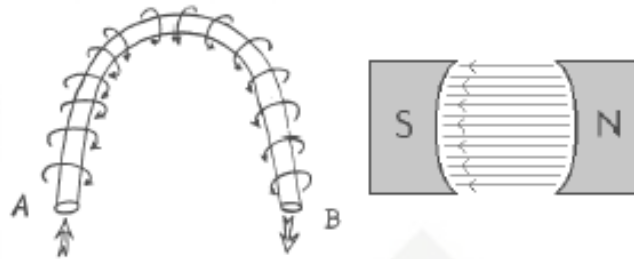
Aturan Genggaman Tangan Kanan bisa dipakai untuk menentukan arah garis fluks di sekitar konduktor. Genggam konduktor dengan tangan kanan dengan jempol mengarah pada arah aliran arus, maka jari-jari anda akan menunjukkan arah garis fluks. Gambar 2.3 menunjukkan medan magnet yang terbentuk di sekitar konduktor berubah arah karena bentuk U.



Gambar 2.3. Medan magnet yang membawa arus mengelilingi konduktor.[13]

Hak cipta dilindungi Undang-Undang  
 2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumber:  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah,  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Medan magnet hanya terjadi di sekitar sebuah konduktor jika ada arus mengalir pada konduktor tersebut. Pada motor listrik konduktor berbentuk U disebut angker dinamo.



Gambar 2.4. Medan magnet mengelilingi konduktor dan diantara kutub.[13]

Jika konduktor berbentuk U (angker dinamo) diletakkan di antara kutub utara dan selatan yang kuat medan magnet konduktor akan berinteraksi dengan medan magnet kutub. Lihat gambar 2.5.



Gambar 2.5. Reaksi garis fluks.[13]

Lingkar bertanda A dan B merupakan ujung konduktor yang dilengkungkan (*looped conductor*). Arus mengalir masuk melalui ujung A dan keluar melalui ujung B. Medan konduktor A yang searah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di bawah konduktor. Konduktor akan berusaha bergerak ke atas untuk keluar dari medan kuat ini. Medan konduktor B yang berlawanan arah jarum jam akan menambah medan pada kutub dan menimbulkan medan yang kuat di atas konduktor. Konduktor akan berusaha untuk bergerak turun agar keluar dari medan yang kuat tersebut. Gaya-gaya tersebut akan membuat angker dinamo berputar searah jarum jam.[13]

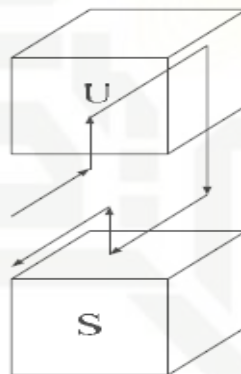




Mekanisme kerja untuk seluruh jenis motor secara umum :

- a. Arus listrik dalam medan magnet akan memberikan gaya.
- b. 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.
- c. Pasangan gaya menghasilkan tenaga putar / *torque* untuk memutar kumparan.
- d. 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.

Pada motor dc, daerah kumparan medan yang dialiri arus listrik akan menghasilkan medan magnet yang melingkupi kumparan jangkar dengan arah tertentu. Konversi dari energi listrik menjadi energi mekanik (motor) maupun sebaliknya berlangsung melalui medan magnet, dengan demikian medan magnet disini selain berfungsi sebagai tempat untuk menyimpan energi, sekaligus sebagai tempat berlangsungnya proses perubahan energi, daerah tersebut dapat dilihat pada gambar di bawah ini :



Gambar 2.6. Prinsip kerja motor dc[13]

Agar proses perubahan energi mekanik dapat berlangsung secara sempurna, maka tegangan sumber harus lebih besar daripada tegangan gerak yang disebabkan reaksi lawan. Dengan memberi arus pada kumparan jangkar yang dilindungi oleh medan maka menimbulkan perputaran pada motor. Dalam memahami sebuah motor, penting untuk mengerti apa yang dimaksud dengan beban motor. Beban dalam hal ini mengacu kepada keluaran tenaga putar /





*torque* sesuai dengan kecepatan yang diperlukan. Beban umumnya dapat dikategorikan ke dalam tiga kelompok :

- a. Beban *torque* konstan adalah beban dimana permintaan keluaran energinya bervariasi dengan kecepatan operasinya namun *torquencya* tidak bervariasi. Contoh beban dengan *torque* konstan adalah *corveyors*, *rotary kilns*, dan pompa *displacement* konstan.
- b. Beban dengan variabel *torque* adalah beban dengan *torque* yang bervariasi dengan kecepatan operasi. Contoh beban dengan variabel *torque* adalah pompa sentrifugal dan *fan* (*torque* bervariasi sebagai kuadrat kecepatan). Peralatan Energi Listrik : Motor Listrik.
- c. Beban dengan energi konstan adalah beban dengan permintaan *torque* yang berubah dan berbanding terbalik dengan kecepatan. Contoh untuk beban dengan daya konstan adalah peralatan-peralatan mesin.

Untuk menentukan arah putaran motor digunakan kaedah *Flamming* tangan kiri. Kutub-kutub magnet akan menghasilkan medan magnet dengan arah dari kutub utara ke kutub selatan. Jika medan magnet memotong sebuah kawat penghantar yang dialiri arus searah dengan empat jari, maka akan timbul gerak searah ibu jari. Gaya ini disebut gaya *Lorentz*, yang besarnya sama dengan  $F$ . Prinsip motor adalah aliran arus di dalam penghantar yang berada di dalam pengaruh medan magnet akan menghasilkan gerakan. Besarnya gaya pada penghantar akan bertambah besar jika arus yang melalui penghantar bertambah besar.

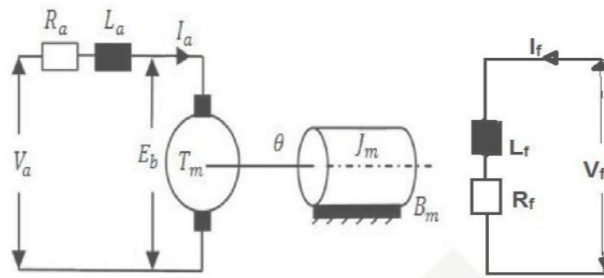
### 2.2.3 Model Matematika Motor DC

Pemodelan matematis sistem motor DC dilakukan dengan cara menurunkan persamaan berdasarkan hukum-hukum fisika yang diilustrasikan pada Gambar 2.8 berikut ini. Gambar 2.8 merupakan rangkaian ekuivalen untuk motor DC. Perlu disepakati bahwa anak-panah menggambarkan arah patokan bagi arus terhadap rangkaian untuk memudahkan pemodelan. Dalam aplikasi sistem servo, motor dc ini umumnya diopersikan pada daerah kurva kemagnetan yang linear. Oleh sebab itu fluksi pada celah udara ( $K_f$ ) sebanding dengan arus medannya ( $i_f$ ), dalam hal ini adalah:

$$\phi = K_f i_f \quad (2.1)$$

Model pengendalian motor dc dengan armature terkendali ditunjukkan pada Gambar 2.8

berikut ini.



Gambar 2.7. Rangkaian Motor DC[14]

Karena motor DC sering digunakan pada sistem kendali untuk tujuan analisis, sehingga perlu dibuat model matematis motor DC untuk diaplikasikan pada kendali menggunakan gambar rangkaian ekuivalen untuk mempresentasikan motor DC dengan magnet permanen. Untuk analisis linier diasumsikan bahwa torsi yang dihasilkan motor ( $T_m$ ) sebanding dengan fluks pemisah udara, arus medan dan arus jangkar.

$$T_m = K_1 K_f I_f i_a \quad (2.1)$$

dimana  $K_1$  adalah suatu konstanta.

Pada motor dc armatur terkendali, arus medan selalu terjaga konstan, oleh karena itu persamaan 2.1 dapat ditulis:

$$T_m = K_T i_a \quad (2.2)$$

dimana  $K_T$  adalah konstanta dari torsi motor.

Pada bagian mekanik motor DC, terdapat persamaan kesetimbangan torsi motor dengan beban. Momen inersia dan torsi *damp*er terletak pada bagian beban. Torsi yang dihasilkan motor bekerja terhadap inersia dan torsi beban, sehingga persamaan torsi motor  $T_m$  terhadap waktu ( $t$ ) dapat ditulis sebagai berikut:

$$T_m(t) = J \frac{d\omega}{dt}(t) + T_L \omega(t) \quad (2.3)$$



Dengan mensubstitusikan persamaan (2.2) kedalam persamaan (2.3) maka didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$K_T i_a(t) = J \frac{d\omega}{dt}(t) + T_L \omega(t) \tag{2.4}$$

Dengan membentuk transformasi Laplace dari persamaan (2.4), maka persamaan tersebut menjadi:

$$K_T I_a(s) = sJ\omega(s) + T_L \omega(s) \tag{2.5}$$

Ketika konduktor bergerak pada medan magnet, suatu tegangan dibangkitkan melintasi ujung-ujungnya. Tegangan ini, emf balik yang sebanding dengan kecepatan motor, berlawanan dengan kecepatan motor, berlawanan dengan aliran arus. Hubungan balik ( $e_b$ ) Volt dengan kecepatan motor ( $\omega$ ) rad/detik adalah:

$$e_b(t) = K_b \omega(t) \tag{2.6}$$

dimana  $K_b$  adalah konstanta emf lawan.

Komponen elektrik yang merupakan kumparan jangkar terdiri atas tahanan dan induktansi jangkar, maka persamaan diferensial pada rangkaian jangkar berdasarkan hukum Kirchoof dapat ditulis sebagai berikut

$$V_a(t) = i_a R_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt}(t) + e_b(t) \tag{2.7}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.6) ke dalam persamaan (2.7), maka didapatkan persamaan berikut:

$$V_a(t) = i_a R_a(t) + L_a \frac{di_a}{dt}(t) + K_b \omega(t) \tag{2.8}$$

Dengan membentuk transformasi Laplace dari persamaan (2.8), maka persamaan tersebut menjadi:

$$V_a(s) = i_a R_a(s) + sL_a I_a(s) + K_b \omega(s) \tag{2.9}$$

Dalam kasus motor DC, yang menjadi *input* adalah energi listrik  $V_a(s)$  sedangkan *output* adalah energi mekanik  $\omega(s)$ . Maka untuk mendapatkan fungsi alih dari sistem motor DC yaitu

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.  
 Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
 a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang  
 UIN Suska Riau  
 State Islamic University of Sultan Saifuddin Kasim Riau





$G(s) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)}$ , maka persamaan Laplace (2.9) disubstitusikan kedalam persamaan Laplace (2.5),

sehingga persamaan fungsi alih untuk motor DC menjadi:

$$G(S) = \frac{\omega(s)}{V_a(s)} = \frac{\frac{K_T}{JL_a}}{s^2 + s(L_a T_L + J R_a) + (R_a T_L + K_b K_T)} \quad (2.10)$$

Dimana:

$V_a$  = Tegangan Masukan (Volt),

$K_T$  = Konstanta Torsi (Nm/A),

$J$  = Momen Inersia Ekuivalen ( $Kgm^2$ ),

$L_a$  = Induktansi kumparan jangkar (H),

$T_L$  = Torka Beban (Nm),

$\omega$  = Kecepatan motor (rad/s),

$R_a$  = Tahanan Jangkar ( $\Omega$ ),

$K_b$  = Konstanta EMF balik (V/s.rad),

$I_a$  = Arus kumparan jangkar (A).

Pada rancangan ini motor DC yang digunakan adalah type PITMAN Series GM 14900 type 1, dimana spesifikasi motor yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 2.1 parameter Motor DC[15]

No	Parameter motor DC	Nilai
1	No-Load Speed	4230 rad/s
2	No-Loas Current	0,20 A
3	Tegangan Jangkar ( $V_a$ )	240 V
4	Konstanta Aplifier ( $K_A$ )	10 N-m/A
5	Konstanta Torsi Motor ( $K_T$ )	9,46 Nm/A
6	Back-EMF Konstan ( $K_b$ )	6,99 (V/krad/s)
7	Torka Beban ( $T_L$ )	3,53 Nm
8	Momen Inersia (J)	$1,13 \times 10^{-3} g/m^2$
9	Induksi Jangkar ( $L_a$ )	4,10 mH
10	Resistansi ( $R_a$ )	4,45 ohm

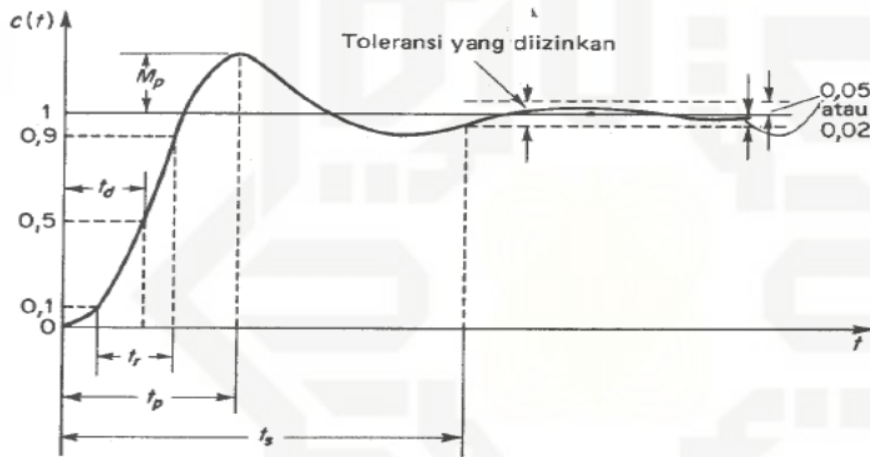


## 2.5 Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem yang mengacu pada respon transien sistem dalam kondisi loop tertutup.

### 2.5.1 Respon Transient Sistem Orde Dua

Metode ini mengidentifikasi sistem berdasarkan pengamatan grafis terhadap masukan *step*. Dimana sinyal uji diberikan kepada sistem untuk mengetahui respon sistem *open loop*. Dari respon sistem, dapat diketahui karakteristik-karakteristik penting dari sistem. Sistem yang digunakan untuk pengaturan posisi pada *magnetic levitation ball* merupakan sistem orde 2 yang ditunjukkan pada gambar 2.9 sebagai berikut :



Gambar 2.9 Respon Orde Dua[14]

Respon transien sistem orde dua:

1. Konstanta waktu ( $\tau$ ), adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai dari  $t=0$  sampai dengan respon mencapai 63,2% dari respon *steady state*. Konstanta waktu yang lebih kecil akan mempercepat respon sistem.
2. Waktu tunak atau *settling time* ( $t_s$ ), adalah waktu yang dibutuhkan kurva respon sistem untuk menetap pada daerah stabil. Formula untuk mendapatkan nilai settling time ( $t_s$ ) berdasarkan nilai konstanta waktu ( $\tau$ ) adalah :

$$t_s (\pm 3\%) \approx 5\tau$$

$$t_s (\pm 4\%) \approx 2\tau$$



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.  
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

$$t_s (\pm 5\%) \approx 0,5\tau$$

3. Waktu naik atau *rise time* ( $t_r$ ), adalah waktu yang menyatakan bahwa respon sistem telah naik dari 5% ke 95% atau 10% ke 90% dari nilai respon pada keadaan tunak (*steady state*). Formula untuk mendapatkan nilai settling time ( $t_r$ ) berdasarkan nilai konstanta waktu ( $\tau$ ) adalah :

$$t_r (5\% - 95\%) \approx \tau \ln 19$$

$$t_r (10\% - 90\%) \approx \tau \ln 9$$

4. Waktu tunda atau *delay time* ( $t_d$ ), adalah waktu yang dibutuhkan respon mulai  $t=0$  sampai respon mencapai 50% dari nilainya pada keadaan tunak (*steady state*). Waktu tunda menyatakan besarnya faktor keterlambatan respon akibat proses *sampling*. Formula untuk mendapatkan nilai settling time ( $t_d$ ) berdasarkan nilai konstanta waktu ( $\tau$ ) adalah :  $t_d (\pm 3\%) \approx \tau \ln 12$

5. Waktu puncak ( $t_p$ ) : Waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak pertama overshoot.
6. Maksimum *overshoot* ( $M_p$ ) : nilai yang menyatakan perbandingan antara nilai maksimum respon (*overshoot*) yang melampaui nilai *steady state* dibanding dengan nilai *steady state*. Besarnya persen *overshoot* dinyatakan sebagai berikut:

$$\% M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \tag{2.11}$$

Overshoot hanya terjadi jika sistem kurang teredam sehingga harga ( $\zeta < 1$ ).

### 2.5.2 Integral Absolute Error

Kriteria integrasi membutuhkan data tanggapan mulai dari hingga mencapai keadaan tunak. Dengan demikian kriteria ini didasarkan pada seluruh tanggapan dari proses yang bersangkutan. Kriteria integral yang digunakan pada penelitian ini adalah kriteria IAE (*Integral of Absolute Error*) yang bertujuan untuk mendapatkan nilai IAE sekecil mungkin dengan pemilihan kriteria tergantung pada karakteristik sistem proses dan beberapa syarat tambahan yang diperoleh dari tanggapan lup tertutup. Kriteria IAE lebih dipopuler dikalangan praktisi industri sebab mudah dalam pemakaiannya serta sangat cocok untuk menekan error yang kecil

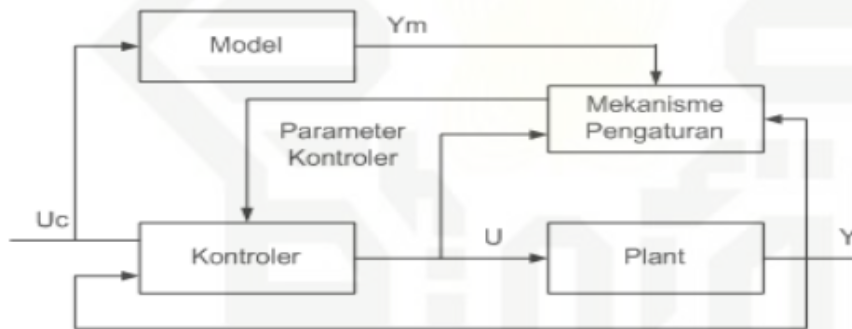
[4].



$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \tag{2.13}$$

### 2.5 Model Reference Adaptive Control (MRAC)

Sistem kontrol adaptif adalah sistem kontrol dimana parameter-parameternya dapat diatur dan juga memiliki mekanisme untuk mengatur parameter-parameter tersebut. Pengendali adaptif mampu beradaptasi terhadap perubahan lingkungan eksternal maupun internalnya untuk dapat menjaga kestabilan sistem. *Model Reference Adaptive Control*(MRAC) merupakan salah satu skema kendali adaptif dimana performansi keluaran sistem (proses) mengikuti performansi keluaran model referensinya. Parameter-parameter kontroler diatur melalui mekanisme pengaturan yang didasarkan pada error yang merupakan selisih antara antara keluaran proses dengan keluaran model referensinya [18]. Blok diagram skema *Model Reference Adaptive Control*(MRAC)ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 2.9 Respon Orde Dua[18]

Skema sistem MRAC memiliki dua loop yaitu *loop* pertama (*inner loop*) yang merupakan *loop* umpan balik antara proses dan kontroler sedangkan *loop* kedua (*outer loop*) adalah *loop* yang mengubah parameter-parameter kontroler berdasarkan sinyal  $e = y - y_m$  . Pengaturan dilakukan dengan meminimalkan sinyal *error* sehingga keluaran sistem (y) sesuai dengan keluaran model referensinya ( $y_m$ ) . Mekanisme pengaturan pada *Model Reference Adaptive Control*(MRAC) terhadap parameter-parameternya dapat dilakukan dengan beberapa metode diantaranya dan Teori Kestabilan *Lyapunov* dan dengan metode *MIT Rule* [18].



2.7 MIT Rule

MIT Rule adalah salah satu metode yang dipakai pada MRAC selain metode kestabilan *lyapunov*. Metode MIT Rule dipilih karena persamaan matematis yang sedikit dan tidak terlalu rumit. Berikut ini akan dijabarkan metode *MIT Rule* pada sistem *loop* tertutup yang mana kontrolernya memiliki sebuah parameter yang dapat diatur berupa  $\theta$ . Respon sistem *loop* tertutup ditentukan oleh model yang keluarannya dinotasikan  $y_m$ , *output* proses dinotasikan sebagai  $y$ . *Error* merupakan selisih antara keluaran  $y$  dari sistem *loop* tertutup dan keluaran dari model  $y_m$ . *Error* dinotasikan sebagai  $e$ . Pengaturan parameter dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian (*The loss function, J(θ)*) [18]:

$$J(\theta) = \frac{1}{2} e^2 \tag{2.14}$$

Agar  $J$  kecil dilakukan perubahan parameter pada gradien negatif dari  $J$  :

$$\frac{d\theta}{dt} = -\gamma \frac{\partial J}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \tag{2.15}$$

Persamaan di atas disebut aturan *MIT (MIT Rule)*. Turunan parsial  $\frac{d\theta}{dt}$  disebut sebagai turunan kepekaan (*sensitivity derivative*) sistem yang menunjukkan bagaimana *error* dipengaruhi oleh parameter yang dapat diukur (*adjustable parameters*). Jika diasumsikan parameter berubah lebih lambat dari variabel lain dari sistem,  $\frac{d\theta}{dt}$  diasumsikan konstan. Selanjutnya nilai eror didefinisikan sebagai berikut :

$$e = y - y_m = kGU - k_0GU_c = kG\theta U_c - k_0GU_c \tag{2.16}$$

dengan menurunkan *error e* terhadap  $\theta$ , maka didapatkan

$$\frac{\partial e}{\partial \theta} = kGU_c = k * \frac{y_m}{k_0} = \frac{k}{k_0} y_m \tag{2.17}$$

Terakhir MIT Rule diterapkann untuk *update* parameter  $\theta$  sebagai berikut

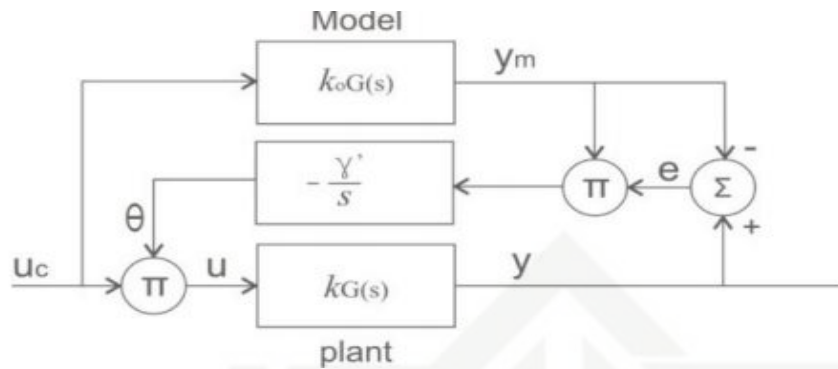
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} = -\gamma e \frac{k}{k_0} y_m = -\gamma' y_m e \tag{2.18}$$

$$\theta = \int (-\gamma' y_m e) dt \tag{2.19}$$

Hak Cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperjualbelikan atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.  
 1. Diwajibkan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.  
 2. Dilarang mengumumkannya dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Dengan  $-\gamma'$  adalah  $-\gamma \frac{k}{k_0}$ , sehingga perancangan sistem akhirnya menjadi seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.10. MRAC dengan Skema MIT Rule[18]

## 2.8 Proportional Integral Derivative (PID)

PID adalah salah satu pengendali otomatis yang terdiri dari perpaduan tiga aksi dasar kendali yaitu Proporsional, Integral, dan Derivatif. Pengendali PID merupakan pengendali berumpanbalik yang paling populer di dunia industri. Selama lebih dari 50 tahun, pengendali PID dimanfaatkan dengan baik pada beberapa aplikasi proses petroleium, proses polimer, dan lain sebagainya.

Adapun bentuk umum dari aksi kendali PID sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (2.20)$$

Persamaan 2.20 diubah ke dalam bentuk Laplace menjadi

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \quad (2.21)$$

Dimana:

$K_p$  = Proporsional Gain

$K_i$  = Integral Gain





$K_d$  = Derivatif *Gain*

Pengendali proporsional ( $K_p$ ) akan memberikan efek mengurangi waktu naik, tetapi tidak menghapus *error steady state*. Pengendali integral ( $K_i$ ) akan memberikan efek menghapus *error steady state* tetapi berakibat buruk saat menanggapi respon. Pengendali derivatif ( $K_d$ ) berdampak pada meningkatnya stabilitas sistem, mengurangi kesalahan keadaan tunak dan menaikkan respon transien. Hubungan dari ketiga aksi pengendali tersebut ditunjukkan pada Table 2.2.

### 2.8.1 Penalaan Parameter PID

*Tuning* atau penalaan parameter P, I, dan D merupakan hal krusial dalam desain pengendali PID. Untuk itu perlu dilakukan penalaan terhadap parameter tersebut. Metode penalaan parameter pengendali yang digunakan adalah metode uji coba atau Metode Heuristik. Yaitu dengan mengkombinasikan antara parameter pengendali hingga didapatkan respon yang memuaskan.

Hubungan dari ketiga aksi pengendali tersebut ditunjukkan pada Table 2.2.

Tabel 2.2. Hubungan antara kendali P, I, dan D.[19]

Respon lup tertutup	Waktu naik	<i>overshoot</i>	Waktu turun	Kesalahan keadaan tunak
$K_p$	Menurun	Meningkat	Perubahan kecil	Menurun
$K_i$	Menurun	Meningkat	Meningkat	Hilang
$K_d$	Perubahan kecil	Menurun	Menurun	Perubahan kecil

### 2.8.2 Pengendali PID Metode Heuristik

Metode Heuristik merupakan sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba. Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode Heuristik ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan. Untuk perancangan sistem pengendalian PID dilakukan pencarian nilai besarnya  $K_p$ ,  $T_i$ , dan  $T_d$ . Maka pengujian dilakukan dalam beberapa tahap, dengan penalaan (*Heuristic Method*):

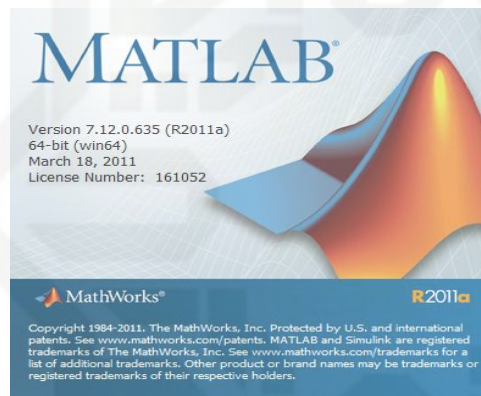


1. Penalaan parameter pengendali dimulai dengan hanya menggunakan pengendali P,
2. kemudian baru ditambahkan pengendali I.
3. dan terakhir ditambahkan dengan pengendali D.

Pemberian nilai parameter disesuaikan dengan karakteristik respon sistem yang diperoleh.[20]

## 2.9 Perangkat lunak MATLAB

Matlab merupakan suatu program komputer yang bisa membantu memecahkan berbagai masalah matematis yang kerap kita temui dalam bidang teknis. Matlab merupakan sebuah singkatan dari *Matrix Laboratory*, yang pertama kali dikenalkan oleh University of New Mexico dan University of Stanford pada tahun 1970. *Software* ini pertama kali memang digunakan untuk keperluan analisis numerik, aljabar linier dan teori tentang matriks.



Gambar 2.11. Tampilan awal MATLAB R2011a

Fitur yang akan dipakai pada Matlab R2011a adalah *Simulink*. *Simulink* merupakan sebuah kumpulan aplikasi dalam Matlab untuk melakukan modeling, simulasi, dan untuk melakukan analisis dinamik pada suatu sistem. Program *simulink* memudahkan *user* untuk membuat suatu simulasi lebih interaktif. Tiruan sistem diharapkan mempunyai perilaku yang sangat mirip dengan sistem fisik. Jika digunakan dengan benar, simulasi akan membantu proses analisis dan desain sistem. *Simulink* dalam Matlab juga dapat menunjukkan performansi sistem dalam bentuk dua ataupun tiga dimensi. Dalam perancangannya *user* menjadi mudah karena adanya blok-blok diagram yang dapat dengan mudah diatur sedemikian rupa, sesuai dengan model matematis dari sistem atau *plant* yang akan dikendalikan.