

# DESAIN PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR INDUKSI 3 PHASE DENGAN PID KONTROLLER

Zulfatman<sup>1</sup>

## ABSTRACT

This research considered to study how to control the dynamic changing of induction motor speed, if there were various loads or inputs from out of system by using PID Controller. Every changing of loads on induction motor caused the changing of speed perform of induction motor and system specification. Therefore, there were several changing on values of  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  components of PID Controller. Every component of PID Controller was designed for every dynamic changing of output signal of induction motor, that could use to prepare it's specification such as rise time ( $t_r$ ), steady time ( $t_s$ ) and maximum overshoot ( $M_p$ ) depending on system perform that have wanted to design. The results of analysis from modeling system and PID Controller design simulated by using Matlab 6.5 and Simulink. Various of load were based on five load conditions when induction motor move in normal condition below it's full load, full load, 100% over full load, 200% over full load and 300% over full load. The simulation indicated that even though there were several various loads in five different conditions, induction motor can move in good perform and the speed can keep well. That was indicated by results of simulation, especially such as rise time ( $t_r$ ), steady time ( $t_s$ ) and maximum overshoot ( $M_p$ ) were better than without PID Controller

**Keyword :** *Induction Motor , PID Controller, Speed Control*

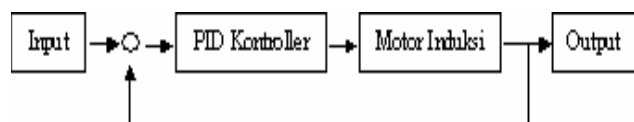
## 1. PENDAHULUAN

Untuk menunjang perkembangan infrastruktur industri modern yang lebih efisien dan handal, terutama mesin-mesin canggih yang digunakan dalam proses produksi harus dalam kondisi dan performa yang benar-benar sempurna untuk menjaga kuantitas dan kualitas produksi. Salah satu cara meningkatkan performansi mesin-mesin (motor-motor induksi) yang digunakan terutama untuk menjaga stabilitas kecepatan putaran motor akibat berbagai keadaan pembebanan, diperlukan pengontrolan dengan teknik kontrol otomatis.

Banyak alternatif pengontrolan yang dapat digunakan dalam mengontrol kecepatan motor induksi, antara lain dengan pengaturan frekuensi dan jala-jala, vektor kontrol dan lain-lain. Namun model pengontrolan yang belum pernah digunakan dalam pengontrolan motor-motor induksi adalah dengan PID kontroller, yang selama ini lebih familiar digunakan pada motor-motor DC, yaitu dengan mengatur arus jangkar, kecepatan dan perpindahan posisi motor.

Oleh karena itu dilakukan studi agar kontroller PID (Proporsional, Integral dan Differensial) juga dapat digunakan untuk pengontrolan kecepatan motor-motor induksi (dalam hal ini adalah Motor Induksi 3 Phase). PID kontroller akan mengontrol setiap variabel keadaan motor induksi yang terukur untuk diumpambalikkan. Dengan menterjemahkan

parameter-parameter fisis motor induksi menjadi model matematik dengan menggunakan teori pemodelan sistem yang digunakan dalam kontrol modern. Model matematik dari motor ini, yang sederhanakan dengan metode transformasi Laplace akan dibentuk menjadi sebuah *fungsi alih* yang kemudian dianggap sebagai sebuah *plant*. Fungsi alih inilah yang kemudian dikontrol dengan PID kontroller. Desain  $K_p$ ,  $K_i$  dan  $K_d$  dari PID kontroller ini akan tergantung pada fungsi alih dari plant yang akan dikontrol. Diagram blok sistem dapat dilihat pada gambar 1 berikut :



**Gambar 1.** *Sistem Kontrol PID Motor Induksi*  
Sumber : *Rancangan*

Perancangan kontroller PID untuk menentukan parameter-parameter sistem agar memenuhi spesifikasi transien dan keadaan tunak sistem lup tertutup, dilakukan dengan pendekatan analitik melalui persamaan differensial fungsi alih secara keseluruhan.

## 2. LANDASAN TEORI

Sistem kontrol modern merupakan sebuah sistem yang kompleks baik dari segi jumlah input, output, maupun parameter-parameter 'plant'nya.

<sup>1</sup> Zulfatman. Fakultas Teknik. Jurusan Teknik Elektro. Universitas Muhammadiyah Malang

Untuk memudahkan dalam perancangan system kontrol harus terlebih dahulu mengenal persamaan differensial, transformasi Laplace, fungsi alih, blok diagram, pemodelan matematis sistem fisis (listrik-mekanis) dan langkah menggambarkan diagram blok.

## 2.1. Prinsip Dasar Pendesainan Sistem Kontrol

Mendapatkan model matematika yang cukup tepat dari suatu komponen fisik adalah salah satu masalah yang paling penting dalam rekayasa kontrol. Model matematika harus menggambarkan aspek-aspek penting komponen fisik sistem. Perkiraan terhadap perilaku sistem berdasarkan model matematika yang sama. Penggunaan model matematika demikian memungkinkan para ahli rekayasa kontrol mengembangkan teori kontrol yang komprehensif. Pada rekayasa kontrol persamaan differensial waktu tidak berubah, linear, fungsi alih, dan persamaan variabel kedudukan, umumnya digunakan untuk model matematika sistem linear, waktu tidak berubah, waktu berkesinambungan.

Langkah-langkah pendesainan diawali dengan mendapat model matematika dari 'plant'. Lalu dengan menggunakan model matematika yang diperoleh tersebut kita mendesain kontroler sedemikian rupa sehingga sistem lup tertutup tersebut akan memenuhi spesifikasi yang diberikan. Setelah desain matematika diselesaikan, maka ahli kontrol mensimulasikan model tersebut dengan komputer untuk mengetes perilaku sistem yang dihasilkan dalam hal tanggapan terhadap berbagai sinyal dan gangguan. Biasanya konfigurasi sistem awal tidak memuaskan. Sistem harus didesain kembali dan di analisis yang berkaitan diselesaikan. Proses desain dan analisis ini diulang sampai sistem yang memuaskan diperoleh dan diteruskan dengan pembuatan prototip sistem.

## 2.2 Pemodelan Matematika Sistem Dinamik

Langkah pertama dalam analisis sistem dinamik adalah menurunkan model matematikanya. Yang harus selalu diingat adalah menurunkan model matematika yang benar merupakan bagian paling penting dalam analisis secara keseluruhan.

Model matematika terkadang banyak mengambil model yang berbeda-beda. Tergantung dari sistem tertentu, satu model matematika mungkin lebih cocok dari pada model matematika yang lain. Misalnya pada kontrol optimum lebih menguntungkan menggunakan tempat gambaran kedudukan akar. Di pihak lain, untuk analisis tanggapan transien atau tanggapan frekuensi dari sistem masukan tunggal,

keluaran tunggal, linear, waktu tidak berubah, gambaran fungsi alih lebih baik dan mudah dari yang lain. Yang perlu diperhatikan bahwa gambaran tempat kedudukan paling cocok mengerjakan sistem dengan multi input dan output.

Mungkin sekali untuk memperbaiki ketepatan model matematika dilakukan dengan meningkatkan kerumitannya. Pada beberapa kasus, harus memasukkan ratusan persamaan untuk menjelaskan sistem yang lengkap. Tetapi dalam hal mendapatkan model matematika, kita harus melakukan kompromi dengan antara kesederhanaan model dengan ketepatan hasil analisis. Dalam menurunkan model yang disederhanakan seringkali merasa perlu untuk mengabaikan suatu sifat fisis dari sistem. Terutama jika menginginkan model matematika linear parameter terkumpul (yaitu suatu model yang menggunakan persamaan differensial biasa), maka perlu mengabaikan suatu ketidak linearan dan parameter terdistribusi.

## 2.3. Gambaran Tempat Kedudukan Sistem Dinamik

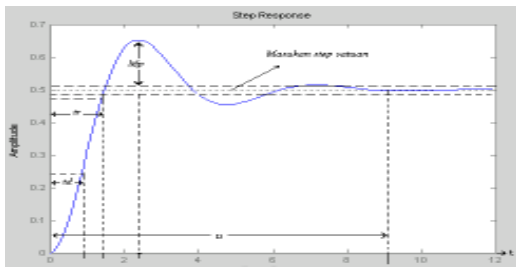
Suatu sistem dinamik yang mengandung sejumlah elemen bungkah dapat digambarkan dengan persamaan differensial biasa dengan waktu sebagai variabel bebasnya. Dengan notasi matriks vektor, persamaan diferensial orde ke- $n$  dapat dinyatakan dengan persamaan diferensial matriks orde pertama. Jika  $n$  elemen dari vektor membentuk variabel keadaan, maka persamaan diferensial matriks vektor disebut persamaan keadaan.

## 2.4. Analisa Tanggapan Transien dan Kesalahan Keadaan Tunak

Setelah proses pemodelan matematik sistem dilakukan, maka langkah selanjutnya adalah menganalisa kinerja sistem dengan menggunakan berbagai metode. Untuk menganalisis dan mendesain sistem kontrol, kita harus mempunyai dasar perbandingan kinerja berbagai sistem kontrol dengan menetapkan sinyal-sinyal uji tertentu dan membandingkan respon berbagai sistem terhadap sinyal-sinyal masukan ini. Sinyal uji tersebut dapat berupa sinyal impuls, step, maupun ramp.

Tanggapan transien adalah tanggapan sistem yang berlangsung dari keadaan awal sampai keadaan akhir. Sementara, tanggapan keadaan tunak (steady state) merupakan sebagai perilaku keluaran sistem jika mendekati tak terhingga.

Dalam menentukan karakteristik tanggapan transien sistem terhadap masukan, biasanya diberi spesifikasi seperti Gambar 2. berikut.



**Gambar 3** Kurva Keluaran Sistem Orde Kedua  
 Sumber: Kuo. *Teknik Kontrol Automatik 1*, 1995, Hal. 270

**Motor Induksi 3 Phase**

Motor induksi 3 phase konstruksinya sangatlah sederhana, jika dibandingkan dengan motor-motor dc. Motor induksi memiliki konstruksi yang sangat kuat dan karakteristik kerja yang baik serta jenis motor ac yang paling banyak digunakan. Motor induksi memiliki konstruksi yang sangat sederhana, terdiri dari stator merupakan bagian yang diam dan rotor sebagai bagian yang berputar.

**Prinsip Kerja Motor Induksi**

Dalam motor dc, arus ditarik dari catu tegangan dan diteruskan ke konduktor jangkar melalui sikat-sikat dan komutator. Jika konduktor jangkar mengalirkan arus dalam medan magnetik yang dihasilkan oleh rangkaian medan, maka konduktor dikenai gaya yang berusaha menggerakannya dalam arah tegak lurus medan.

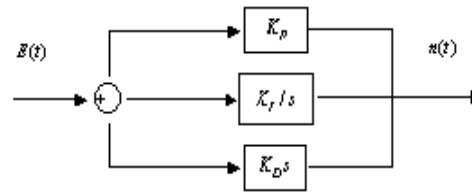
Dalam motor induksi, tidak ada hubungan listrik ke rotor, arus rotor merupakan arus induksi. Tetapi ada kondisi yang sama seperti dalam motor dc, yaitu konduktor rotor mengalirkan arus dalam medan magnetik sehingga terjadi gaya padanya yang berusaha menggerakannya dalam arah tegak lurus medan.

Jika lilitan stator diberi energi dari catu tiga fase, dibangkitkan medan magnetik putar yang berputar pada kecepatan sinkron. Ketika medan melewati medan konduktor rotor, dalam konduktor ini diinduksikan ggl yang sama seperti ggl yang diinduksikan dalam lilitan sekunder transformator oleh fluksi arus primer. Rangkaian rotor adalah lengkap, baik melalui cincin ujung atau tahanan luar, ggl induksi menyebabkan arus mengalir dalam konduktor rotor. Jadi konduktor rotor yang mengalirkan arus dalam medan stator mempunyai gaya yang bekerja padanya.

**PID Kontroller**

Kontroller PID merupakan salah satu kontrolleer yang banyak digunakan dalam

pengontrolan sebuah ‘plant’ atau sistem, disamping penguat dan kompensator. Kontroller ini dapat digambarkan dalam bentuk :



**Gambar 3.** Diagram PID Kontroller  
 Sumber : Ogata, *Control Automatic*, 1995, Hal. 691, 672

**3. METODE PENELITIAN**

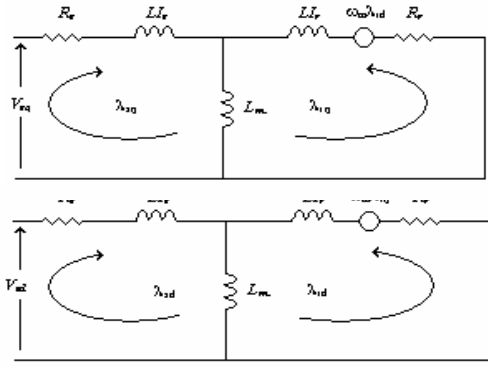
Penelitian ini dilakukan dengan mengembangkan metodologi yang berbasis pada perancangan dengan uraian sebagai berikut:

1. Melakukan pemodelan sistem fisik motor induksi dengan model ‘rekaan’ ke dalam bentuk matematis, hingga diperoleh sebuah fungsi alih motor induksi.
2. Merancang besarnya nilai kontroller P, I dan D berdasarkan pada fungsi alih motor induksi yang diperoleh dengan metode analitik matematis.
3. Melakukan pengujian dengan menempatkan fungsi alih sistem serial terhadap kontroler PID hasil desain menggunakan Matlab 6.5 dan Simulink. Pengujian terdiri dari pengujian pada sistem tanpa kontroler PID dan pengujian sistem dengan kontroler PID hasil perancangan, agar dapat diketahui apakah ada perbaikan spesifikasi keluaran sistem setelah diberi sebuah kontroler PID.

**3.1 Pemodelan Motor Induksi**

**a. Rangkaian Equivalen dan Parameter Motor Induksi**

Pada bagian ini digunakan sebuah model tinjauan baku motor induksi. Model rangkaian ini merupakan model yang paling umum digunakan dalam berbagai penganalisaan terhadap motor induksi. Sebuah model ‘rekaan’ yang mendeskripsikan motor induksi sebagai sistem yang terdiri dari vektor-vektor yang didefinisikan dengan dua koordinat *orthogonal* dan *polar*. Komponen vektor ruang diasosiasikan dengan pasangan variabel, yaitu bagian *direct* dan *quadrature (d-q)*. Model rangkaian equivalen digambarkan sebagai berikut :



**Gambar 4.** Model Rangkaian Equivalen MotorInduksi  
Sumber: A.B. Proca, A. Keyhani, *Induction Motor Parameter Identification*, 1999

Model rangkaian ini dideskripsikan dari perilaku fisik motor putaran sinkron (d-q) *reference frame* untuk memperoleh model persamaan matematika. Namun yang harus dipahami, pada pendesainan model tidak ada keharusan atau hal baku yang harus dijadikan pedoman. Yang terpenting adalah kita dapat menjelaskan apa yang diinginkan dan memiliki pemahaman yang baik tentang karakteristik dan fenomena fisik yang terjadi pada motor induksi.

Semua proses pemodelan harus dimulai dengan mendefinisikan variabel-variabel dan parameter-parameter yang digunakan, untuk memudahkan kita dalam menguraikan dan memberikan nilai pada variable-variabel dan parameter-parameter dari model matematika sistem sebagaimana terlampir.

### b. Model Matematika Motor Induksi

Model matematika motor induksi diperoleh melalui proses analisa dinamik dari motor induksi.

Persamaan tegangan acuan :

$$V_{sd}(t) = R_s \cdot i_{sd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sq} + \frac{d}{dt} \lambda_{sd} \quad (1)$$

$$V_{sq}(t) = R_s \cdot i_{sq}(t) + n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{sd} + \frac{d}{dt} \lambda_{sq} \quad (2)$$

$$V_{rd}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rd}(t) - n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} + \frac{d}{dt} \lambda_{rds} \quad (3)$$

$$V_{rq}(t) = 0 = R_r \cdot i_{rq}(t) + n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rd} + \frac{d}{dt} \lambda_{rq} \quad (4)$$

$V_{rd}(t)$  ,  $V_{rq}(t) = 0$  jika menggunakan jenis motor squerrel cage (sangkar tupai).

Persamaan medan putarnya adalah

$$\lambda_{sd} = L_s \cdot i_{sd}(t) + L_m \cdot i_{rd}(t) \quad (5)$$

$$\lambda_{sq} = L_s \cdot i_{sq}(t) + L_m \cdot i_{rq}(t) \quad (6)$$

$$\lambda_{rd} = L_s \cdot i_{rd}(t) + L_m \cdot i_{sd}(t) \quad (7)$$

$$\lambda_{rq} = L_s \cdot i_{rq}(t) + L_m \cdot i_{sq}(t) \quad (8)$$

Torsi elektromagnetiknya adalah

$$T_{em} = n_p \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t)) \quad (9)$$

Sementara persamaan elektrodinamikny adalah :

$$J_{eq} \frac{d}{dt} \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_b(t) - T_L(t) \quad (10)$$

$$T_b(t) = B_m \cdot \omega_m(t) \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \theta_m(t) = \omega_m(t) \quad (12)$$

### c. Persamaan Ruang Keadaan dan Diagram Keadaan Motor Induksi

Dari model matematika di atas, persamaan-persamaan tersebut dapat disederhanakan untuk memperoleh persamaan keadaan (*state space*) yang kemudian digambarkan dalam bentuk vektor matriks persamaan keadaan. Selanjutnya dari persamaan keadaan akan didapatkan diagram keadaan yang kan membantu kita dalam menentukan diagram blok sistem nantinya.

Pertama, persamaan yang harus diuraikan adalah persamaan tegangan acuan masukan (1) dan (4) :

$$\frac{d}{dt} i_{sd}(t) = \beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \beta \lambda_{rd} + \gamma i_{sd}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd}(t) \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt} i_{sq}(t) = -\beta n_p \omega_m(t) \lambda_{rd} + \eta \beta \lambda_{rq} - \gamma i_{sq}(t) + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq}(t) \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) = -n_p \omega_m(t) \cdot \lambda_{rq} - \eta \cdot \lambda_{rd} + \eta \cdot L_m \cdot i_{rd}(t) \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) = n_p \cdot \omega_m(t) \cdot \lambda_{rd} - \eta \cdot \lambda_{rq} + \eta \cdot L_m \cdot i_{rq}(t) \quad (16)$$

Dari persamaan (10) dan (12) maka :

$$\frac{d}{dt} \omega_m(t) = n_p \cdot \frac{L_m \cdot (\lambda_{rd} \cdot i_{sq}(t) - \lambda_{rq} \cdot i_{sd}(t))}{L_r \cdot J_{eq}} - \frac{B_m}{J_{eq}} \omega_m(t) - \frac{T_L(t)}{J_{eq}} \quad (17)$$

Dimana :

$$\eta = \frac{R_r}{L_r}; \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s \cdot L_r}; \quad \beta = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r};$$

$$\gamma = \frac{L_m}{\sigma \cdot L_a \cdot L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma \cdot L_s} \text{ dan } \mu = n_p \frac{L_m}{J_{eq} \cdot L_r};$$

Dari persamaan (13) sampai dengan persamaan (12) di atas dapat digambarkan dengan vektor matriks persamaan ruang keadaan (*state space*) berikut ini :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rd}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \\ \frac{d}{dt} \omega_m(t) \\ \frac{d}{dt} \theta_m(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta\beta & \beta n_p \omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta n_p \omega_m & -\eta\beta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\eta & -n_p \omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ n_p \omega_m & -\eta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu i_{sq}(t) & -\mu i_{sd}(t) & 0 & 0 & -\frac{B_m}{J_{eq}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_r \\ \lambda_{rq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \omega_m(t) \end{bmatrix}$$

$$- \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta L_m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta L_m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ i_{rd}(t) \\ i_{rq}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\sigma \cdot L_s} \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/J_{eq} \\ 0 \end{bmatrix} T_L(t)$$

(18)

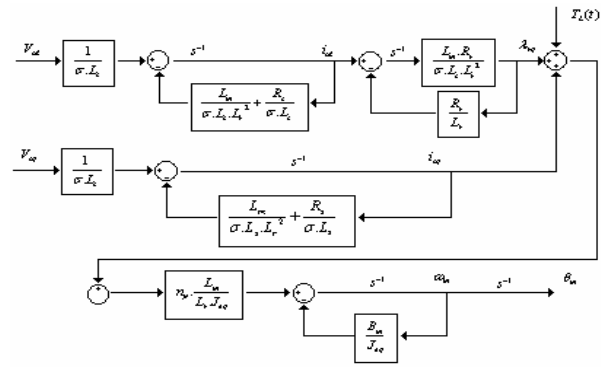
Untuk memudahkan memperoleh diagram keadaan dan diagram blok dari persamaan di atas, maka perlu penyederhanaan terhadap vektor matriks (18) di atas dengan mengambil bagian yang dianggap perlu dideskripsikan :

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & \eta\beta \\ 0 & 0 & -\eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sigma \cdot L_s}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \\ \frac{d}{dt} i_{sq}(t) \\ \frac{d}{dt} \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} + \frac{R_s}{\sigma L_s} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r^2} - \frac{R_s}{\sigma L_s} & \frac{R_r L_m}{\sigma L_s L_r^2} \\ 0 & 0 & -\frac{R_r}{L_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}(t) \\ i_{sq}(t) \\ \lambda_{rq}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{sd}(t) \\ V_{sq}(t) \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{\sigma L_s}$$

(19)

Sehingga, dari vektor matriks di atas didapatkan diagram keadaan motor induksi :



**Gambar 5. Diagram Keadaan Motor Induksi**  
Sumber : Perancangan

**d. Fungsi Alih dan Digram Blok Motor Induksi**

Sebagai sistem yang memiliki banyak masukan, dalam hal ini model (d-q) *reference frame* adalah  $V_{sd}(t)$ ,  $V_{sq}(t)$  dan  $T_L(t)$ . Maka untuk mendapatkan fungsi alihnya lebih rumit jika dibandingkan dengan sistem masukan tunggal. Seperti motor dc, kita hanya membandingkan antara  $\omega_m(t)$  sebagai keluaran dengan  $E_a(t)$  sebagai masukan acuan.

Demikian juga halnya dengan motor induksi, untuk mendapatkan fungsi alih, maka akan dibandingkan antara  $\omega_m(t)$  sebagai keluaran dengan  $V_{sd}(t)$  dan  $V_{sq}(t)$  sebagai masukan dua koordinat orthogonal dan polar, *direct – quadrature (d-q)*. Untuk mendapatkan fungsi alih, maka salah satu dari tegangan acuan masukan dan  $T_L(t)$  harus sama dengan nol.

Dari persamaan (10) di atas :

$$(J_{eq} s + B_m) \cdot \omega_m(t) = T_{em}(t) - T_L(t)$$

(20)

Dari persamaan (13) :

$$V_{sd}(t) = n_p \cdot \beta \cdot \omega_m(t) \lambda_{rq} + \eta \cdot \beta \cdot \lambda_{rd} + \gamma i_{sd}(t) + \frac{d}{dt} i_{sd}(t) \cdot \sigma \cdot L_s$$

Jika  $\beta$ ,  $\gamma$ , dan  $\eta$  disubstitusikan :

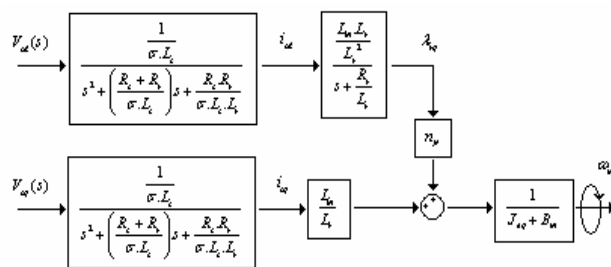
$$V_{sd}(s) = n_p \cdot \frac{L_m}{L_r} \omega_m(s) \lambda_{rq} + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} + \left( \frac{L_m}{L_r} + R_s + \sigma L_s \cdot s \right) i_{sd}(s) \quad (21)$$

Maka, persamaan fungsi alih motor induksi adalah :



$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{n_p L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq} s + B_m)} = \frac{n_p L_m (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s))}{L_r (J_{eq} \sigma L_s^2 i_{sd}(s) + (R_s + \frac{L_m}{L_r}) i_{sd}(s) + \frac{R_r L_m}{L_r^2} \lambda_{rd} i_{sq}(s) + \frac{n_p^2 L_m^2}{L_r^2} (\lambda_{rd} i_{sq}(s) - \lambda_{rq} i_{sd}(s)))}$$

Maka, dari fungsi alih seperti persamaan (22) diperoleh diagram blok motor induksi :



Gambar 6. Diagram Blok Motor Induksi

Sumber : Liu-Kung-Chao, *Speed Estimation of Induction Motor Using Non Linear Identification Technique*, 1999, hal. 110

Jenis motor induksi yang akan digunakan pada pendesainan ini adalah motor jenis squerrel caqe (sangkar tupai) 3 Phase

Agar dapat didesain maka harus diketahui terlebih dahulu nilai dari parameter-parameter yang dimiliki oleh motor induksi tersebut. Dengan spesifikasi fisis seperti Tabel 1 berikut :

Tabel 1 Spesifikasi Fisis Motor Induksi Squerrel Cae

$n$	Tegangan sumber terukur	230	Volt.
$P$	Jumlah pole	2	-
$f_s$	Frekuensi stator	60	Hz
$J_{eq}$	Momen inersia stator	0.3	$Kg.m^2$
$R_s$	Tahanan stator	0.08	Ohm
$R_r$	Tahanan rotor	0.04	Ohm
$L_s$	Induktansi stator	15.4	mH
$L_r$	Induktansi rotor	16.38	mH
$L_m$	Induktansi magnetik	14.60	mH
$S$	Slip	0.02	-
$B_m$	Koefisien gesekan	-	$Nm/rad/sec$

Nilai-nilai dari parameter ini kemudian akan disubstitusikan ke dalam bentuk sebuah fungsi alih dari persamaan (22) di atas sebagai fungsi alih motor induksi yang akan dilengkapi dan disempurnakan spesifikasi keluarannya dengan kontroller.

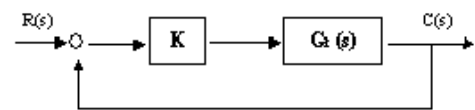
$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{1.78}{0.72 \times 10^{-3} s^2 + 0.0157 s + 3.168}$$

$$\frac{\omega_m(s)}{V_{sd}(s)} = \frac{2470}{s^2 + 21.79 s + 4400} \quad (23)$$

### 3.2 Perancangan PID Kontroller

#### a. Konsep Perancangan PID Kontroller

Sistem secara lengkap yang terdiri dari plant dan sebuah kontroller dapat digambarkan dengan diagram blok berikut :



Gambar 7.. Sistem dengan Plant dan Kontroller

K adalah kontroller yang digunakan dalam sistem untuk memperbaiki keluaran sistem, yaitu berupa kontroller PID. G(s) merupakan fungsi alih dari plant yang akan dikontrol, dalam hal ini adalah motor induksi. Namun yang perlu menjadi catatan dalam pendesainan PID Kontroller adalah bahwa tidak selamanya komponen P (Proporsional), I (Integral), dan D (Diferensial) digunakan secara bersamaan. Ada kalanya hanya komponen P saja yang digunakan, PI, PD dan PID. Tergantung dari spesifikasi plant yang akan dikontrol. Namun ketiganya saling berkaitan satu sama lain.

Untuk mempermudah kita memahami karakteristik dari masing-masing Kontroller P, I dan D, dapat diuraikan pada Tabel 2 berikut ini :

Tabel 2 Karakteristik Kontroller P, I dan D

Dari Tabel 2 di atas, sebuah Kontroller Proporsional (Kp) akan berpengaruh pada berkurangnya waktu naik ( $t_r$ ) dan error steady state ( $e_{ss}$ ), bertambahnya lewatan maksimum ( $M_p$ ) serta perubahan kecil pada waktu penetapan ( $t_s$ ).

Kontroller Integral (Ki) akan berpengaruh pada tereliminasi error steady state ( $e_{ss}$ ), berkurangnya waktu naik ( $t_r$ ), dan bertambahnya waktu penetapan ( $t_s$ ) dan lewatan maksimum ( $M_p$ ). Sementara itu Derivatif kontroller (Kd) akan berpengaruh pada bertambahnya stabilitas sistem, mengecilnya lewatan maksimum ( $M_p$ ) dan waktu penetapan ( $t_s$ ), serta perubahan kecil pada waktu naik ( $t_r$ ).

Pendesainan PID kontroller pada dasarnya adalah untuk memperbaiki performansi spesifikasi keluaran sistem berupa waktu naik ( $t_r$ ), waktu penetapan ( $t_s$ ), waktu puncak ( $t_p$ ), lewatan maksimum ( $M_p$ ) dan error steady state ( $e_{ss}$ ) menjadi kondisi mendekati ideal.

## b. Karakteristik dan Spesifikasi Motor Induksi

Dari pemodelan sistem pada bab sebelumnya sudah didapatkan sebuah fungsi alih :

Persamaan fungsi alih lup tertutupnya adalah :

$$G_p(s) = \frac{2470}{s^2 + 21.79s + 6870} \quad (24)$$

Persamaan karakteristik dari plant adalah :

$$s^2 + 21.70s + 6870 = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 \quad (25)$$

Frekuensi alami tak teredam :

$$\omega_n = 82.885 \text{ rad/det}$$

Rasio redaman :

Performansi dari sistem lup tertutup tersebut adalah

@ Waktu tunda ( $t_d$ )

@ Waktu naik ( $t_r$ )

@ Waktu puncak ( $t_p$ )

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \\ = 0.0382 \text{ det.}$$

@ Waktu penetapan ( $t_s$ )

$$t_s = \frac{3.2}{\zeta \cdot \omega_n} \\ = 0.293 \text{ det.}$$

@ Lewatan maksimum ( $M_p$ )

$$M_p = e^{-\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2}} \times 100 \% \\ = 65.9 \%$$

## c. Desain PID Kontroller

Dalam melakukan pendesainan PID kontroller, maka yang harus ditetapkan terlebih dahulu adalah spesifikasi performansi sistem yang ingin diwujudkan. Dengan mempertimbangkan karakteristik dan fenomena fisik yang dimiliki oleh plant (motor induksi).

Sebagai dasar pertimbangan untuk menetapkan besarnya error steady state ( $e_{ss}$ ), lewatan maksimum ( $M_p$ ), waktu naik ( $t_r$ ), dan waktu penetapan ( $t_s$ ) yang ingin diwujudkan adalah teori dasar motor induksi yang sudah dibahas sebelumnya. Motor induksi sangkar tupai standart memiliki harga Slip ( $S$ ) 3 sampai 5 persen pada kondisi beban penuh. Pertambahan beban yang tidak terlalu besar di atas beban penuh pada motor induksi sangkar tupai standart tidak akan terlalu berpengaruh pada slip, karena kepesatan konstant yang dimilikinya. Lain halnya jika beban berada 200-300 persen di atas beban penuh. Pada saat star misalnya, dimana dibutuhkan 2 – 2.5 kali catu dibandingkan kondisi berputar normal dengan beban nol sampai beban penuh. Atau jika kondisi slip pada 10 persen dan 20 persen.

Namun pada pembahasan (pendesainan) ini difokuskan pada kondisi motor induksi berputar normal dengan beban penuh dan pembebanan yang tidak melebihi 2 kali beban penuh.

Dengan plant dari persamaan (24) di atas :

$$G_p(s) = \frac{2470}{s^2 + 21.79s + 6870}$$

Spesifikasi sistem yang ingin dicapai adalah :

- Error steady state ( $e_{ss}$ ) (untuk masukan ramp) d'' 0,05
- Lewatan Maksimum ( $M_p$ ) d'' 5 %
- Waktu naik ( $t_r$ ) d'' 0,03 det
- Waktu penetapan ( $t_s$ ) d'' 0,1 det

Untuk mewujudkan spesifikasi dari sistem di atas, maka akan dilakukan penggunaan pasangan-pasangan kontroller yang paling mungkin dan paling baik keluarannya, untuk kemudian dipilih kira-kira kontroller mana yang paling mungkin untuk digunakan.

PID kontroller dipilih sebagai alternatif kontroller untuk menutupi kelemahan dari masing-masing PD kontroller dan PI. PD kontroller memiliki kelebihan pada waktu naiknya ( $t_r$ ) yang kecil, tetapi menghasilkan lewatan maksimum ( $M_p$ ) yang lebih besar, sehingga tidak memenuhi spesifikasi sistem. Sebaliknya, PI kontroller menghasilkan sinyal keluaran dengan waktu naik ( $t_r$ ) lebih besar, akan tetapi memiliki lewatan maksimum ( $M_p$ ) yang lebih baik dan memenuhi spesifikasi sistem.

Namun, jika spesifikasi sistem yang diinginkan sudah terpenuhi oleh salah satu pasangan kontroller - waktu naik ( $t_r$ ) dan lewatan maksimum ( $M_p$ ) kecil –

baik PD controller, PI controller atau PID controller. Maka tidak diperlukan lagi tambahan controller.

#### d. PD Kontroller

Fungsi alih sistem :

$$G_p(s) = \frac{2470}{s^2 + 21.79s + 6870}$$

Sementara fungsi alih lengkapnya :

$$G_p(s) = \frac{2470 K (K_p + K_D s)}{s^2 + 21.79s + 6870}$$

Untuk memenuhi nilai maksimum error steady state ( $e_{ss}$ ) = 0.05, maka diperlukan  $K$  sebagai penguat.  $K$  harus di set pada 0.176

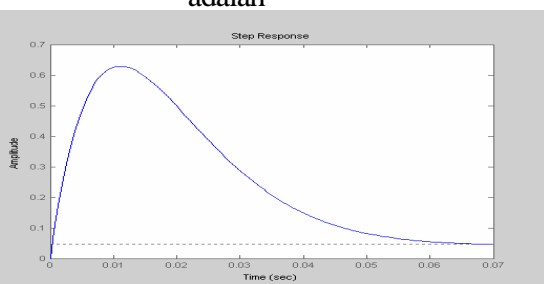
Dengan demikian fungsi alih lup tertutup dengan PD kontroller :

$$G(s) = \frac{2470 K (K_p + K_D s)}{s^2 + (21.79 + 2470 K K_D)s + 6870 + 2470 K K_p}$$

$$G(s) = \frac{435.8 (K_p + K_D s)}{s^2 + (21.79 + 435.8 K_D)s + 6870 + 435.8 K_p} \quad (26)$$

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = \frac{435.8 K_p}{21.79} = 20 K_p \quad (27)$$

Error steady state ( $e_{ss}$ ) untuk masukan ramp adalah



$20 K_p$

naikan dengan

ik sistem :

$$s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2 = s^2 + (21.79 + 4918758K_D)s + 6870 + 4918758K_p \quad (28)$$

$$\omega_n = \sqrt{6870 + 435.8(1)} = 85.47 \quad (29)$$

Rasio redaman ( $\zeta$ ) sistem adalah :

$$(30)$$

Dengan pendekatan persamaan di atas, maka untuk mendapatkan spesifikasi sistem, yaitu waktu naik ( $t_r$ ), waktu penetapan ( $t_s$ ) dan lewatan maksimum ( $M_p$ ) dilakukan perhitungan dengan  $0 < \zeta < 1$ . Hasil perhitungan tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini.

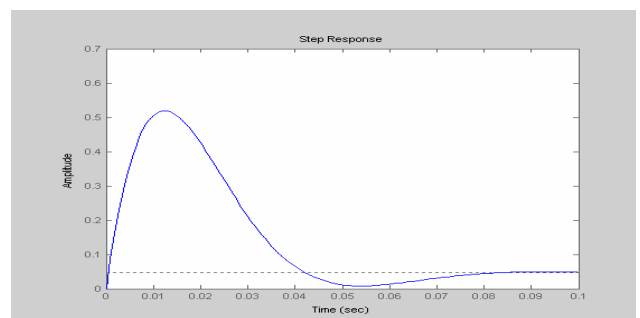
**Tabel 3** Spesifikasi keluaran sistem dengan berbagai harga  $K_D$ .

$\zeta$	$K_D$	$t_r$ (det)	$t_s$ (det)	$M_p$ (%)
1	0.342	0.0409	0.0526	4.328
0.8	0.264	0.0296	0.0621	1.520
<b>0.707</b>	<b>0.227</b>	<b>0.0225</b>	<b>0.0744</b>	<b>4.333</b>
0.5	0.146	0.0176	0.0748	16.30
0.3	0.068	0.0133	0.1248	35.50
0.2	0.028	0.0121	0.1872	52.65

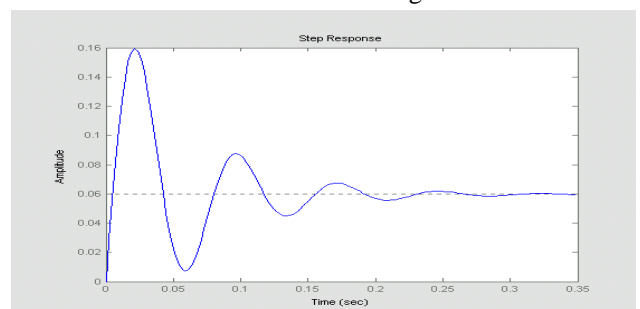
Kalau diperhatikan tabel di atas, dengan rasio redaman . PD kontroller sudah cukup dapat memenuhi spesifikasi sistem yang diinginkan dengan  $t_r = 0.0225$  detik,  $t_s = 0.0744$  detik, dan  $M_p = 4.333\%$ . Sehingga sudah tidak diperlukan lagi tambahan jenis kontroller PI atau PID.

Sinyal keluaran sistem dengan  $K_p = 1$ , untuk  $K_D$  masing-masing 0.342, 0.227 dan 0.028 seperti pada Gambar 8, 9, dan 10 di bawah ini, dapat diamati dan dianalisa untuk menentukan besar  $K_D$  dan yang dapat digunakan.

**Gambar 8.** Sinyal Keluaran Sistem Dengan  $K_D = 0.342$   
Sumber : Perancangan



**Gambar 9.** Sinyal Keluaran Sistem Dengan  $K_D = 0.227$   
Sumber : Perancangan



**Gambar 10.** Sinyal Keluaran Sistem Dengan  $K_D = 0.028$   
Sumber : Perancangan

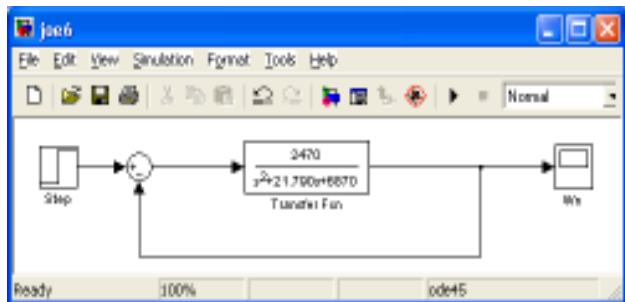


Dengan demikian, dari tiga kondisi sinyal keluaran untuk Gambar 8 sampai Gambar 10 di atas, maka jenis PID controller yang akan digunakan adalah jenis PD Controller dengan harga  $K_p = 1$  dan  $K_D = 0.227$ .

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

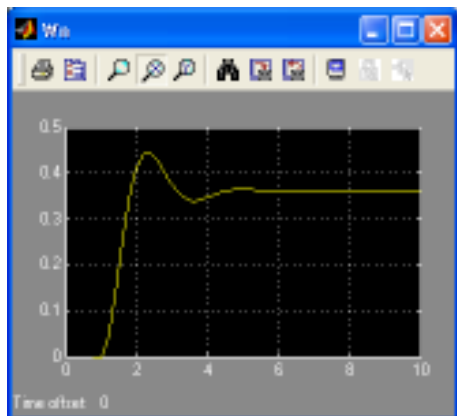
#### 3.1 Simulasi Sistem Tanpa PID Controller

Simulasi pertama berupa simulasi dengan model rangkaian tanpa PID Controller.



Gambar 11. Model Simulink Motor Induksi ( $w_m$ )

Sumber : Perancangan

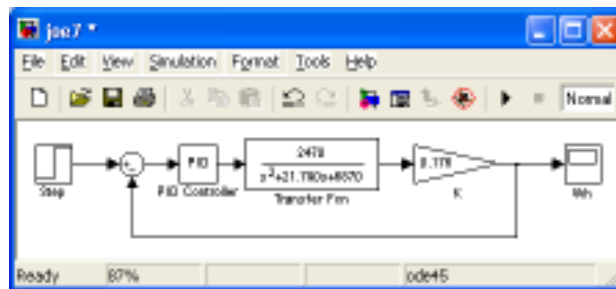


Gambar 12. Sinyal Keluaran Kecepatan Sudut Motor Induksi ( $w_m$ ) Tanpa PID

Sumber : Perancangan

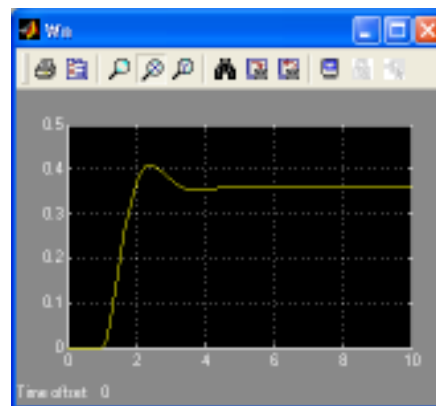
#### 3.2 Simulasi Sistem Dengan PID Controller

Simulasi sistem dengan PID controller adalah simulasi lengkap sistem, seperti pada Gambar 11 di atas yang kemudian digabung dengan PID controller dalam sebuah diagram blok tertutup.



Gambar 13. Model Simulink Motor Induksi 3 Phase - PID Controller ( $w_m$ )

Sumber : Perancangan



Gambar 14. Sinyal Keluaran Kecepatan Sudut Motor Induksi ( $w_m$ ) dengan PID

Sumber : Perancangan

#### 3.3 Pembahasan

Untuk mempermudah dalam menganalisis dari sistem yang telah didesain sebelumnya, maka pada Tabel 4 berikut akan dibandingkan antara spesifikasi keluaran sistem tanpa PID controller dengan keluaran sistem dengan PID controller ( $K_p = 1$  dan  $K_D = 0.227$ ).

Tabel 4 Perbandingan Spesifikasi Sistem

Spesifikasi	Tanpa PID Controller	Dengan PID Controller
Rasio redaman ( $\zeta$ )	0.13145	0.707
Frek. alamiah tak teredam ( $\omega_n$ )	82.885	85.47
Waktu tunda ( $t_d$ )	0.0132 det	0.0179 det
Waktu naik ( $t_r$ )	0.0245 det	0.0225 det
Waktu penetapan ( $t_s$ )	0.2930 det	0.0744 det
Lewatan Maks. ( $M_p$ )	65.9 %	4.333 %
Error steady state ( $e_{ss}$ )	0	0.05

Dari Tabel 4 di atas terdapat beberapa perbedaan spesifikasi sistem antara sistem tanpa PID controller dengan spesifikasi sistem yang memiliki PID controller. PID controller (dalam hal ini PD controller) mampu memperbaiki waktu naik ( $t_r$ ), lewatan maksimum ( $M_p$ ) dan waktu penetapan ( $t_s$ ). Walaupun waktu tunda ( $t_d$ ) mengalami kenaikan, namun tidak jauh meleset dari spesifikasi sistem yang diinginkan. Karena perubahan spesifikasi sistem yang paling diinginkan adalah berkurangnya waktu naik ( $t_r$ ), lewatan maks. ( $M_p$ ) yang kecil, dan lebih pendeknya waktu penetapan ( $t_s$ ). Berkurangnya waktu naik ( $t_r$ ) berarti semakin cepatnya waktu yang diperlukan oleh motor induksi untuk mencapai garis kondisi stabil dari kondisi start atau saat terjadi penambahan beban atau gangguan dari kondisi stabil. Rendahnya presentase lewatan maksimum ( $M_p$ ) menandakan bahwa motor induksi tidak memerlukan daya (catu) terlalu besar untuk mencapai kondisi stabil. Demikian juga halnya dengan berkurangnya waktu penetapan ( $t_s$ ) merupakan gambaran bahwa motor induksi memiliki waktu yang lebih pendek untuk mencapai kondisi steady state. Namun dalam pendesainan controller untuk motor induksi nilai error steady state ( $e_{ss}$ ) tidak bisa sama dengan nol seperti pada motor dc. Akan tetapi harus diberi nilai error steady state ( $e_{ss}$ ) seminimal mungkin. Karena karakteristik dan konstruksi fisis motor induksi memungkinkan untuk terdapat error steady state ( $e_{ss}$ ). Begitu juga dengan presentase lewatan maksimum untuk sinyal keluaran motor induksi ( $M_p$ ), sangat tidak masuk akal jika harus didesain hampir mendekati nol persen seperti pada motor-motor dc.

Oleh karena itu, dalam desain ini unsur I (integral) dianggap tidak terlalu penting untuk diikutsertakan sebagai bagian dari PID controller untuk sistem motor induksi. Ternyata unsur P (proporsional) dan D (diferensial) sudah cukup memenuhi tuntutan untuk memenuhi spesifikasi sistem yang diinginkan. Karena pada dasarnya P dan D controller mampu memperpendek waktu naik ( $t_r$ ), memenuhi kewajaran presentase lewatan maksimum ( $M_p$ ) untuk motor induksi dan mempercepat pencapaian titik kestabilan sistem atau waktu penetapan ( $t_s$ ).

## 4. KESIMPULAN DAN SARAN

### 4.1. Kesimpulan

Dari pembahasan di atas dapat ditarik beberapa kesimpulan :

1. Motor induksi merupakan sistem tak linear (non-superposisi) yang sangat rumit untuk dimodelkan walaupun fisiknya lebih sederhana dari motor dc. Motor induksi dapat dimodelkan dengan

membuat sistem linear yang ekuivalen yang berlaku untuk jangka operasi terbatas untuk tujuan analisis dan desain. Dalam hal ini menggunakan model baku *reference frame* motor induksi. Sebuah model 'rekaan' dengan pasangan variabel *direct* dan *quadrature* ( $d-q$ ).

2. Jenis PID controller yang digunakan adalah PD controller. PD controller dipilih karena dianggap lebih mewakili sifat-sifat fisik motor induksi, selain secara teori sangat memenuhi spesifikasi sistem yang diinginkan.
3. Analisa secara teoritik, yang kemudian dilanjutkan dengan simulasi, memberikan gambaran bahwa kecepatan sudut putaran motor induksi 3 phase dengan berbagai perubahan pembebanan dan gangguan dari luar sistem dapat dikontrol dengan PID kontroler. Sehingga performa dan spesifikasi sistem yang dihasilkan dapat menjadi lebih baik. Hal ini dapat dibuktikan dengan semakin sedikitnya waktu naik ( $t_r$ ) dari 0,0245 detik menjadi 0,0225 detik, lebih pendeknya waktu untuk mencapai titik kestabilan sistem ( $t_s$ ) dari 0,2930 detik menjadi 0,0744 detik dan kecilnya presentase lewatan maksimum ( $M_p$ ) dari 65,9 % menjadi 4,33 % jika terjadi perubahan pembebanan dan gangguan dari luar sistem.

## 5.2 Saran-saran

Dari hasil analisis, simulasi dan kesimpulan di atas maka penulis memberikan beberapa saran antara lain :

1. Dalam prinsip dasar pemodelan sistem tingkat kerumitan dan kespesifikan dari detail aspek fisik yang didefinisikan sangat menentukan akurasi dari hasil yang diperoleh. Penulis dalam hal ini menyarankan kepada pembaca yang berminat untuk melanjutkan studi ini agar dapat meningkatkan tingkat kerumitan pemodelan sistemnya, sehingga fungsi alih yang dihasilkan lebih akurat dan mewakili gambaran sistem sesungguhnya.
2. Karena pendekatan dasar desain setiap sistem kontrol praktis adalah prosedur coba-coba, maka tentunya terdapat kekurangan yang penulis miliki dalam menghasilkan desain yang lebih tepat. Tergantung pada intensitas dan lama waktu proses coba-coba dilakukan. Sehingga semakin sering intensitas coba-coba dilakukan, maka performa sistem yang diperoleh dari desain akan lebih baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- Johnson, Curtis. *Process Control Instrumentation Technology*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1988.
- Kuo, C. Benjamin. *Automatic Control System*, Prentice Hall International, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1995.
- Kuo, C. Benjamin. *Teknik Kontrol Automatik I (terjemahan)*, Prenhallindo, Jakarta, 1998.
- Lister, C. Eugel. *Mesin dan Rangkain Listrik*, Erlangga, Jakarta, 1993.
- Liu, Jui-Jung – Kung, I-Chung dan Chao, Hui-Cheng. *Speed Estimation of Induction Motor Using a Non-Linear Identification Technique*, Proc. National Science Council (ROC), Taiwan, 2001.
- Mellon, Carnegie. *Control Tutorial for Matlab : State Space Tutorial*, The University of Michigan, Michigan, 1997.
- Mellon, Carnegie. *Control Tutorial for Matlab : PID Tutorial*, The University of Michigan, Michigan, 1997.
- Ogata, Katsuhiko. *Teknik Kontrol Automatik I Edisi Pertama (terjemahan : Ir. Edi Laksono)*, Erlangga, Jakarta, 1984.
- Ogata, Katsuhiko. *Teknik Kontrol Automatik I Edisi Kedua (terjemahan : Ir. Edi Laksono)*, Erlangga, Jakarta, 1996.
- Proca, A. B. – Keyhani, A. *Induction Motor Parameter Identification From Operating Data For Electric Drive Application*, IEEE, 1999.
- Panaitescu, C. Razvan. *Induction Motor Simulation Model*, Minesotta University, Minesotta, 2001.
- Rijono, Yon. *Dasar Teknik Tenaga Listrik*, Andi Offset Yogyakarta, Yogyakarta, 1997.