

Perancangan dan Implementasi Kontroler *Knowledge Based-PI* pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

Muhammad Faisal Afif Alhamdi, Josaphat Pramudijanto

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: alhamdi23@gmail.com, jos@ee.its.ac.id

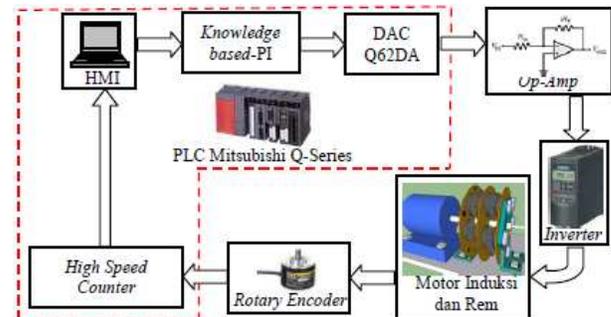
Abstrak—Tugas Akhir ini membahas desain dan implementasi kontroler *Knowledge Based-PI* untuk pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa yang diberikan efek pembebanan melalui sebuah rem elektromagnetik. Rem elektromagnetik terdiri dari beberapa kumparan yang diberi *input* tegangan DC melalui sebuah auto transformator (0-240V) yang telah disearahkan. Prinsip dasar rem elektromagnetik menggunakan hukum *Faraday* dan hukum *Lenz*. Kedua hukum ini menimbulkan arus *eddy* yang melingkar dan menginduksi medan magnet sehingga dapat memberikan gaya lawan terhadap arah gaya pergerakan. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah kontroler agar kecepatan motor tetap konstan sesuai *Set Point* dengan tingkatan pembebanan yang berbeda-beda. Kontroler *Knowledge Based-PI* dapat menjadi solusi dari permasalahan ini dengan cara membentuk sebuah direktori parameter kontrol PI (*Proportional Integrator*) untuk berbagai kondisi pembebanan yang dimuat ke dalam sebuah fungsi *look-up table*. Metode *knowledge base* bekerja berdasarkan pengambilan dan pencocokan data (*appropriate*). Adanya hubungan langsung antara *input* dan *output*, maka diperoleh banyak kemungkinan keputusan aksi kontrol. Penggunaan kontroler *knowledge based-PI* dapat mengurangi *Error Steady State* serta memberikan kemudahan dalam menentukan berbagai macam model sesuai dengan variasi pembebanan.

Kata Kunci—Motor Induksi, *Knowledge Based-PI*, *Look-up Table*, PLC.

I. PENDAHULUAN

Motor induksi 3 fasa merupakan motor arus bolak-balik yang paling banyak dan paling luas digunakan dalam dunia industri disebabkan karena harganya yang relatif murah, konstruksinya yang sederhana, memiliki kehandalan yang baik, serta perawatannya yang mudah. Dari namanya diketahui bahwa arus rotornya tidak berasal dari sumber tertentu, namun merupakan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar magnetis yang dihasilkan arus rotor.

Satu hal yang menjadi kelemahan motor induksi adalah pengaturannya yang jauh lebih sulit dibandingkan motor arus searah. Hal ini disebabkan karena tidak ada hubungan yang linear antara arus motor dengan torsi yang dihasilkan. Padahal dalam aplikasinya motor induksi seringkali dituntut untuk bekerja pada kecepatan tertentu (*setpoint*). Bertambahnya beban akan memperbesar kopel motor, yang oleh karenanya akan memperbesar arus induksi pada rotor



Gambar 1. Blok Diagram Arsitektur Sistem

sehingga *slip* antara medan putar dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Perubahan beban ini akan menyebabkan berubahnya parameter motor sehingga kecepatan motor induksi turun dan tidak mencapai nilai *setpoint*. Perubahan parameter secara otomatis mengakibatkan pemodelan matematis dari motor induksi yang merepresentasikan karakteristik motor menjadi tidak sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Kontroler PI (*Proportional Integrator*) dapat menjadi solusi dari permasalahan di atas karena sifatnya yang dapat memperbaiki performansi *plant* dengan cara mengeliminasi *error*. Untuk mengatasi banyaknya variabel beban, maka hasil *tunning Kp* dan *Ki* untuk setiap kondisi pembebanan dimasukkan ke dalam sebuah fungsi hubungan input-output (*lookup table*). Metode ini disebut dengan *knowledge base*. *Knowledge base* merupakan metode kontrol yang menggunakan model berdasarkan pengalaman atau pengetahuan tentang kecocokan (*appropriate*) antara input dan output yang di-transformasikan ke dalam bentuk *rule base (IF-THEN)*, kemudian dimuat dalam sebuah direktori.

II. DESKRIPSI SISTEM

Sistem secara keseluruhan diperlihatkan oleh blok diagram di bawah. Pada Gambar 1 diperlihatkan bahwa untuk menjalankan motor induksi digunakan sebuah komputer yang berfungsi sebagai *Human Machine Interface (HMI)*. HMI digunakan untuk memonitoring nilai *setpoint*, *present value*, *error*, dan parameter kontrol. Kontroler *knowledge based-PI* ditanamkan di dalam PLC Mitsubishi *Q-Series* yang secara langsung mengatur kecepatan motor induksi 3 fasa.

Aksi kontrol dari PLC adalah berupa tegangan 0–5 VDC. Tegangan ini yang akan masuk ke Inverter untuk diubah menjadi frekuensi (Hz).



Gambar 2. Foto Plant

Namun, tegangan DC yang dapat diterima oleh *Inverter* harus berkisar antara 0 – 10 V dengan *range* frekuensi yang dihasilkan sebesar 0 – 50 Hz. Hal ini sesuai dengan spesifikasi *inverter* yang digunakan yaitu Siemens tipe *Micromaster 420*. Oleh karena itu diperlukan suatu rangkaian penguat dua kali (*Operational Amplifier*) agar tegangan DC yang dikeluarkan PLC menjadi 0 – 10 volt. Saat *inverter* mendapatkan tegangan DC yang sesuai maka tegangan tersebut akan diubah menjadi frekuensi (Hz) sehingga dapat memutar motor induksi 3 fasa. Poros motor induksi dirancang dikopel dengan sensor *rotary encoder* yang dapat mendeteksi kecepatan (RPM) dengan cara mengkonversi jumlah pulsa yang dihasilkan dalam setiap putaran motor. Output sensor *rotary encoder* dapat langsung dibaca oleh modul QD62 (*High Speed Counter*) yang ada pada PLC Mitsubishi untuk diproses sebagai sebagai sinyal *feedback*.

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Perancangan Plant Motor Induksi 3 Fasa

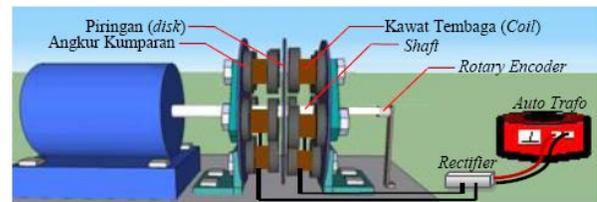
Plant yang diatur dalam Tugas Akhir ini adalah motor induksi 3 fasa. Deskripsi *plant* dapat dilihat pada Gambar 2, dimana motor induksi dirancang untuk dapat dilakukan pembebanan dengan menggunakan rem elektromagnetik.

Shaft motor induksi diberi sebuah piringan besi yang kedua sisinya diapit oleh rem elektromagnetik. Rem elektromagnetik ini terdiri dari beberapa kumparan yang diberi input tegangan DC dari *auto transformer* (0 - 220 V) yang telah disearahkan oleh sebuah rangkaian *full wave rectifier*. Pada ujung *shaft* motor dipasang sensor *rotary encoder* agar kecepatan putaran motor dapat dideteksi.

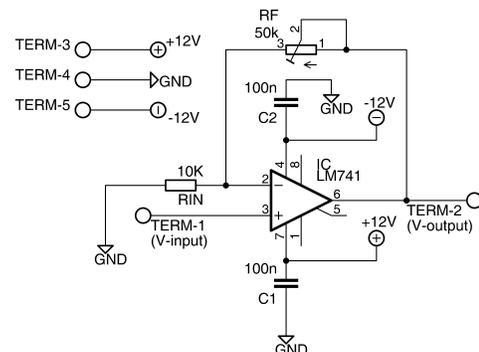
B. Perancangan Rem Elektromagnetik

Rem elektromagnetik didefinisikan sebagai beban pada motor induksi 3 fasa. Rem elektromagnetik ditempatkan di kedua sisi piringan (*disk*) yang melekat di tengah *shaft* motor. Rem elektromagnetik ini terdiri dari 5 buah kumparan untuk setiap masing-masing sisi. Setiap kumparan memiliki ukuran kawat tembaga (koil), jumlah lilitan, dan arah lilitan yang identik. Ukuran kawat tembaga yang digunakan untuk setiap kumparan adalah 0,3 mm dengan jumlah lilitan 216 m. Keseluruhan kumparan dihubungkan secara seri.

Saat kumparan diberikan input tegangan DC yang berasal dari *auto trafo* yang telah disearahkan, maka kumparan akan menimbulkan arus *eddy* sehingga muncul medan magnet di sekitar piringan besi. Medan magnet ini membentuk kutub



Gambar 3. Konfigurasi Rem Elektromagnetik



Gambar 4. Rancangan Rangkaian Non Inverting Amplifier

utara-selatan di kedua sisi kumparan sehingga terjadi gaya tarik menarik. Akibatnya terdapat gaya lawan yang melawan arah putar piringan besi. Gaya lawan inilah yang merupakan beban yang harus ditanggung oleh motor induksi 3 fasa.

C. Perancangan Rangkaian Non Inverting Amplifier

Rangkaian *Operational Amplifier* (Op-Amp) diperlukan untuk menguatkan tegangan *output* dari PLC (modul Q62DA) yang akan masuk ke inverter. Tegangan *output* PLC berkisar 0–5 V, sedangkan inverter memerlukan tegangan 0–10 V untuk menggerakkan motor. Oleh karena itu dibutuhkan penguatan sebesar 2 kali, agar inverter dapat bekerja sesuai yang diharapkan.

Rangkaian *Non Inverting Amplifier* di atas dirancang dengan menggunakan IC LM741. Resistor yang digunakan adalah $R_f = 50\text{ K}\Omega$ (*variable*) dan resistor $R_{IN} = 10\text{ K}\Omega$ (*fix*), sehingga besarnya penguatan bersifat *adjustable*, bisa mencapai 6 kali penguatan. Prinsip utama rangkaian penguat *non-inverting* adalah apabila tegangan masukan bernilai positif maka tegangan keluaran akan tetap positif, begitupun sebaliknya, sehingga tegangan keluaran akan sefasa dengan tegangan masukan. Besarnya penguatan dan tegangan keluaran dapat dijelaskan pada Persamaan 1 dan Persamaan 2.

$$G = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 1 + \frac{R_f}{R_{IN}} = 1 + \frac{10\text{K}\Omega}{10\text{K}\Omega} = 2\text{kali} \tag{1}$$

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_f}{R_{IN}}\right) \times V_{IN} = \left(1 + \frac{10\text{K}}{10\text{K}}\right) \times 5\text{V} = 10\text{V} \tag{2}$$

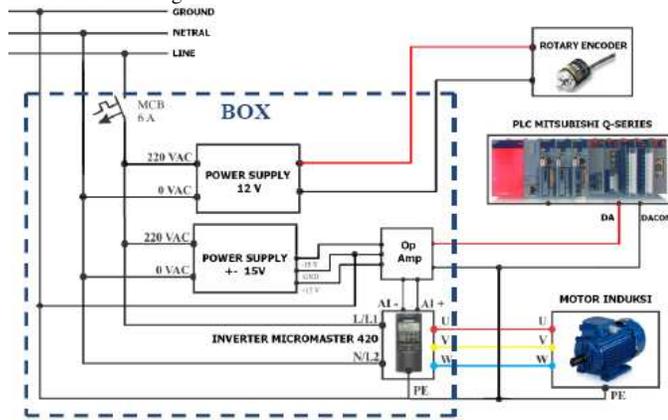
D. Inverter Siemens Micromaster 420

Inverter Micromaster 420 adalah *inverter* pengendali frekuensi untuk putar balik motor AC tiga fasa. *Inverter* Micromaster 420 dapat dikendalikan dengan dua varian yang berbeda yaitu varian analog dan USS. Varian analog cocok digunakan untuk aplikasi yang berdiri sendiri, sedangkan varian USS cocok digunakan untuk aplikasi jaringan dengan



(a) Tampak Depan (b) Tampak Dalam

Gambar 5. Rancangan Kotak Panel Inverter



Gambar 6. Wiring Diagram Kotak Panel Inverter

menggunakan bus komunikasi RS-485 interface.

Inverter cukup berbahaya untuk dioperasikan karena berhubungan langsung dengan jaringan listrik AC 220V. Disamping itu, DC link yang terdapat pada inverter masih dapat menyimpan tegangan selama 5 menit setelah supply dimatikan. Oleh karena itu inverter dilindungi oleh sebuah kotak panel berbahan kayu agar memberikan keselamatan terhadap pengguna (safety).

Wiring diagram kotak panel inverter dan hubungan antar input-outputnya secara keseluruhan dapat dilihat pada Gambar 6.

Panel Box ini terdiri dari beberapa komponen seperti rangkaian Op-Amp, power supply ± 15 V, power supply 12 V, dan terminal kabel. Keseluruhan supply 220V dari masing-masing komponen disatukan secara terpusat dengan sebuah MCB (Mini Circuit Breaker) sebagai pemutus. Pada bagian atas box terdapat beberapa jack kabel untuk kabel R-S-T motor induksi fasa, kabel Digital Analog (DA) PLC Mitsubishi, dan kabel supply 12V rotary encoder.

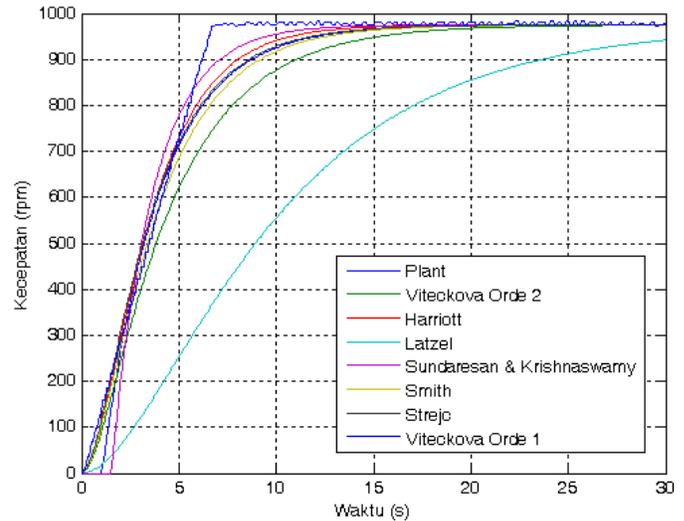
E. Identifikasi Sistem

Identifikasi merupakan suatu metode yang dilakukan untuk mengetahui model matematika dari suatu plant. Pada Tugas Akhir ini, proses identifikasi dilakukan secara open loop dan statis dengan memberikan sinyal step dan melihat respon berupa kecepatan putar. Sinyal uji step diberikan melalui PLC Mitsubishi dengan setpoint 1000 rpm.

Rem elektromagnetik arus eddy didefinisikan sebagai beban motor induksi 3 fasa. Pembebanan diklasifikasikan ke dalam 7 kondisi berdasarkan nilai tegangan auto transformator yang

Tabel 1.

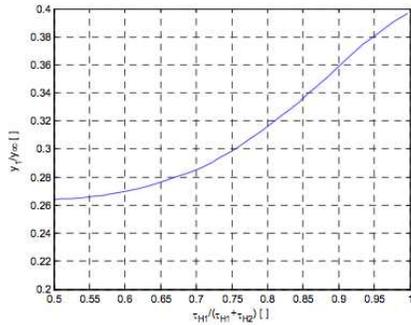
Validasi Model Matematika dari 7 Metode Identifikasi pada Beban 220V			
No	Metode	Model Matematika	ISE
1.	Viteckova 1 st Order	$\frac{0,975}{3,008s + 1} e^{-1,052s}$	189,41
2.	Viteckova 2 nd Order	$\frac{0,975}{3,678s^2 + 4,836s + 1}$	176,17
3.	Latzel	$\frac{0,975}{24,01s^2 + 10,8s + 1}$	829,02
4.	Harriott	$\frac{0,975}{3,2s^2 + 3,75s + 1}$	123,07
5.	Smith	$\frac{0,975}{3,3s^2 + 4,15s + 1}$	167,31
6.	Strejc	$\frac{0,975}{2,75s^2 + 3,853s + 1}$	230,84
7.	Sundaresan & Krishnaswamy	$\frac{0,975}{2,184s + 1} e^{-1,51s}$	684,41



Gambar 7. Perbandingan Respon Model dari 7 Metode Identifikasi

masuk ke rem elektromagnetik, yaitu 100V, 120V, 140V, 160V, 180V, 200V, dan 220V. Beban minimal dipilih saat auto trafo berada pada posisi 100V karena pada tegangan ini rem elektromagnetik mulai berpengaruh pada kecepatan motor.

Ada 7 metode identifikasi yang diujicobakan pada satu sampel data untuk mendapatkan respon model yang paling mendekati respon plant. Ketujuh metode identifikasi tersebut adalah metode Viteckova 1st Order, Viteckova 2nd Order, Latzel, Smith, Harriott, Strejc dan Sundaresan-Krishnaswamy. Model matematika dari 7 metode identifikasi perlu diuji validasi dengan menggunakan metode ISE (Integral Square Error) untuk membuktikan bahwa model memiliki kesamaan dengan plant dalam kondisi nyata. Hasil validasi pemodelan berbagai metode beserta nilai ISE dari masing – masing metode dapat dilihat pada Tabel 1, sedangkan perbandingan respon pemodelan dengan respon plant nyata ditampilkan pada



Gambar 8. Kurva Harriott

Gambar 7.

Metode Harriott dipilih karena memiliki validasi nilai ISE yang terkecil diantara metode-metode yang lain. Gambar 7 di atas juga menunjukkan bahwa grafik respon model pendekatan Harriott adalah respon model yang paling mirip dengan respon *plant*.

F. Metode Identifikasi Harriott

Hasil respon dari pendekatan Harriott yang didapatkan adalah berupa respon orde 2 tanpa *delay*. Metode ini kemudian diterapkan untuk keseluruhan proses identifikasi dan pemodelan *plant* pada setiap kondisi pembebanan.

Dari grafik respon sistem untuk setiap kondisi dilakukan perhitungan untuk mendapatkan parameter model matematika *plant* sesuai dengan aturan Harriott. Perhitungan di bawah ini merupakan perhitungan Metode Harriott untuk kondisi tanpa beban.

$$\begin{aligned}
 Y_{ss} &= 1000,268 \\
 X_{ss} &= 1000 \\
 K &= \frac{1000,268}{1000} = 1,00027
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Dari grafik respon didapatkan waktu saat respon mencapai 73% dari Y_{ss}

$$\begin{aligned}
 t_{73} &= 4,885 \\
 (\tau_{H1} + \tau_{H2}) &= \frac{t_{73}}{1,3} = 3,75
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

$$\frac{t_1}{(\tau_{H1} + \tau_{H2})} = 0,5
 \tag{5}$$

$$t_1 = 0,5 \times (\tau_{H1} + \tau_{H2}) = 1,875$$

Maka saat t_1 nilai $y_1 = 287$ rpm. Dari nilai y_1/y_{∞} , temukan nilai estimasi $(\tau_{H1} + \tau_{H2})$ pada kurva *Smith* (Gambar 8).

$$\frac{y_1}{y_{\infty}} = \frac{287}{1000,268} = 0,287
 \tag{6}$$

Melalui kurva *Smith* pada Gambar 8 didapatkan nilai estimasi dari parameter τ_{H1} dan τ_{H2} yaitu

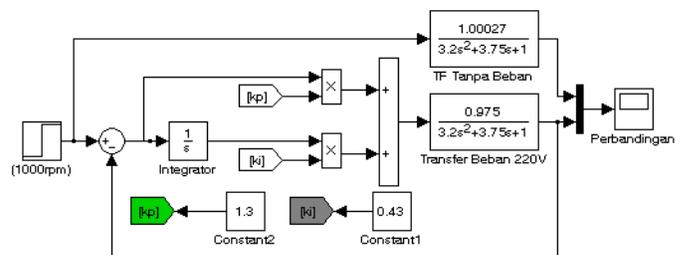
$$\frac{\tau_{H1}}{(\tau_{H1} + \tau_{H2})} = 0,675$$

Dengan demikian didapatkan nilai τ_{H1}

$$\tau_{H1} = (\tau_{H1} + \tau_{H2}) \times 0,675 = 3,75 \times 0,675 = 2,53
 \tag{7}$$

Tabel 2.

Model Matematika <i>Plant</i> untuk Setiap Kondisi		
No	Kondisi <i>Plant</i>	Model Matematika
1.	Tanpa Beban	$\frac{1,00027}{3,097s^2 + 3,75s + 1}$
2.	Beban 100V	$\frac{0,991}{2,65s^2 + 3,75s + 1}$
3.	Beban 120V	$\frac{0,989}{2,97s^2 + 3,61s + 1}$
4.	Beban 140V	$\frac{0,987}{3,087s^2 + 3,737s + 1}$
5.	Beban 160V	$\frac{0,984}{3,23s^2 + 3,746s + 1}$
6.	Beban 180V	$\frac{0,982}{3,337s^2 + 3,769s + 1}$
7.	Beban 200V	$\frac{0,978}{3,193s^2 + 3,734s + 1}$
8.	Beban 220V	$\frac{0,975}{3,2s^2 + 3,75s + 1}$



Gambar 9. Simulasi *Tuning* Parameter kontroler PI

Dengan mensubstitusikan hasil dari Persamaan 7 ke Persamaan 4 didapatkan nilai dari τ_{H2}

$$\tau_{H2} = (\tau_{H1} + \tau_{H2}) - \tau_{H1} = 1,22$$

Dari nilai τ_{H1} dan τ_{H2} , maka didapatkan *transfer function* model seperti Persamaan 8.

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{K}{(\tau_{H1}s + 1)(\tau_{H2}s + 1)} = \frac{1,00027}{(2,53s + 1)(1,22s + 1)} \\
 G(s) &= \frac{1,00027}{3,097s^2 + 3,75s + 1}
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

Model matematika untuk setiap kondisi pembebanan dihitung dengan menggunakan perhitungan di atas. Model matematika hasil pendekatan Harriott untuk setiap kondisi yang diambil dari validasi 4 sampel data dapat dilihat pada Tabel 2.

G. Perancangan Kontroler Knowledge Based-PI

Pada tahap perancangan kontroler yang harus dilakukan terlebih dahulu adalah mencari parameter-parameter yang dibutuhkan oleh kontroler. Proses pencarian ini disebut dengan penalaan (*tuning*). Pada Tugas Akhir ini, percobaan proses *tuning* parameter PI seperti Kp dan Ki dilakukan secara eksperimental dengan bantuan *simulink* MATLAB.

Tabel 3.
Hasil tuning Parameter

Beban	Kp	Ki
100V	1,3	0,38
120V	1,3	0,4
140V	1,3	0,41
160V	1,3	0,415
180V	1,3	0,425
200V	1,3	0,43
220V	1,3	0,44

Tabel 4.
Fungsi Look-up Table

IF	THEN	
Error (rpm)	Kp	Ki
-20	0,9	0,1
-10	1,05	0,15
0	1,1	0,2
9	1,2	0,38
11	1,25	0,4
13	1,3	0,41
16	1,35	0,415
18	1,4	0,425
22	1,45	0,43
25	1,5	0,44

Hasil tuning nilai Kp, Ki dari simulasi di atas untuk semua kondisi pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.

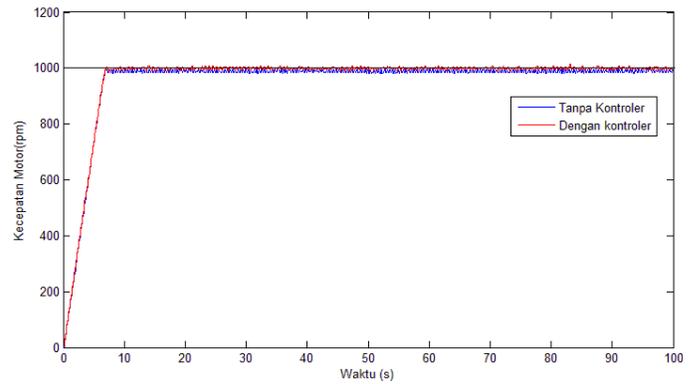
Adanya efek magnetisasi dari rem elektromagnetik menyebabkan terjadinya selisih kecepatan antara *setpoint* dengan *present value (error)*. Nilai *error* ini kemudian dimuat bersama hasil tuning ke dalam sebuah fungsi *look-up table*. Disinilah *Knowledge Base System* bekerja dengan menunjukkan adanya suatu hubungan langsung antara respon *plant* yang akan dikontrol dengan model yang diinginkan. Fungsi *look-up table* menggunakan aturan kontrol (*rule base*) berupa *IF (input) - THEN (output)* dimana *error* didefinisikan sebagai *input*, sedangkan Kp dan Ki sebagai *output*. Fungsi *look-up table* dapat dilihat pada Tabel 4.

Saat motor induksi berputar maka sensor *rotary encoder* akan mengirim data rpm ke PLC, kemudian PLC akan membandingkan hasil data rpm dengan *set point*. Jika nilai $error \leq 0$ maka PLC akan mengeluarkan aksi kontrol dengan nilai Kp dan Ki yang sangat kecil sehingga kecepatan motor tidak melebihi nilai *setpoint*.

IV. PENGUJIAN DAN ANALISA

Rem elektromagnetik diuji efek kemagnetannya dengan memberikan sumber tegangan DC 0 - 240V melalui *auto transformer*. Pengereman maksimal hanya dapat memberikan pengurangan kecepatan motor antara 30-40 rpm. Kecilnya dampak pengereman kemungkinan disebabkan pada kesalahan pemilihan ukuran kawat tembaga saat masa perancangan, yaitu 0,3 mm. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, rem elektromagnetik juga tidak memberikan efek pembebanan yang pasti sehingga nilai *error* untuk setiap tegangan *auto trafo* selalu berubah-ubah. Hal ini tidak ada hubungannya dengan kemungkinan penurunan arus yang masuk ke kumparan. Namun timbulnya sifat magnet permanen pada piringan *shaft* diperkirakan menjadi penyebabnya.

Bahan yang digunakan pada piringan *shaft* adalah berupa



Gambar 10. Perbandingan Respon Tanpa Kontroler dan Dengan Kontroler pada Kondisi Pengereman 140V

Tabel 5.
Perbandingan Spesifikasi Respon

Spesifikasi	Tanpa Kontroler	Dengan Kontroler
<i>Time Constant</i>	4,272 s	4,26 s
<i>Time Delay</i>	3,428 s	3,435s
<i>Settling Time (±5%)</i>	6,435s	6,425s
<i>Rise Time</i>	6,7s	6,6 s

besi yang merupakan salah satu bahan ferromagnetik. Efek pengereman tidak akan berkurang pada saat tegang *auto trafo* diturunkan karena piringan besi telah menyimpan magnet saat awal kumparan diberi masukan tegangan. Oleh karena itu dari hasil beberapa kali pengujian yang menunjukkan bahwa adanya ketidakpastian efek pengereman pada motor.

A. Pengujian Kontroler KBS-PI terhadap Pembebanan Statis

Pembebanan secara statis yaitu dengan cara memutar *auto trafo* pada tegangan tertentu sebelum motor dijalankan. Pengujian kontroler dilakukan pada saat motordiberikan nilai step yaitu 1000 rpm. Pada pengujian beban statis, pengereman yang dipilih adalah pengereman pada saat *auto trafo* diputar pada 140V.

Dari grafik dapat dilihat bahwa efek pengereman yang ditimbulkan pada motor sangat kecil. Grafik di atas menunjukkan bahwa kontroler PI (Proportional Integrator) dapat mengurangi *error steady state (e_{ss})* sebesar 1,4%. Perbandingan spesifikasi respon keduanya dapat dilihat pada Tabel 5. Hasil yang ditunjukkan pada tabel menunjukkan bahwa kontroler Proportional Integrator dapat memperbaiki respon sistem khususnya dalam mengeliminasi *error*.

B. Pengujian Kontroler KBS-PI terhadap Pembebanan Dinamis

Pengujian dengan beban dinamis bertujuan untuk mengetahui kemampuan kontroler PI terhadap pengurangan beban dan penambahan beban dengan jumlah tertentu. Pembebanan dilakukan pada kondisi *steady-state*. Pada bagian ini ditunjukkan respon dari kecepatan motor induksi tiga fasa terhadap perubahan beban dan *error* untuk menunjukkan untuk menunjukkan perubahan parameter PI terhadap perubahan beban. Pada pengujian ini, rem elektromagnetik dirapatkan sedemikian rupa dengan piringan *shaft* motor sehingga terjadi gaya gesek antara kumparan dan piringan pada saat *auto trafo* diputar maksimal ke 240V.

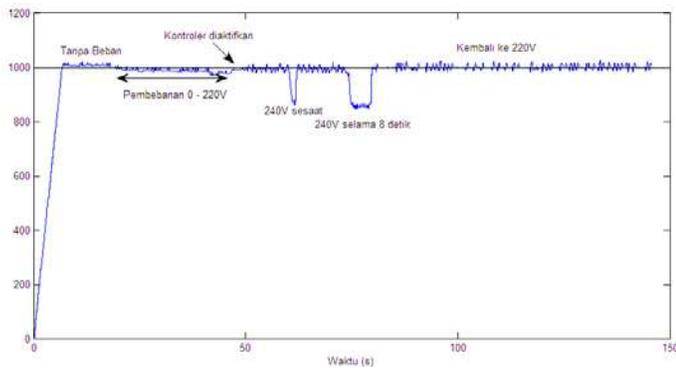
V. KESIMPULAN

Dari hasil desain dan implementasi kontroler Knowledge Based-PI dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

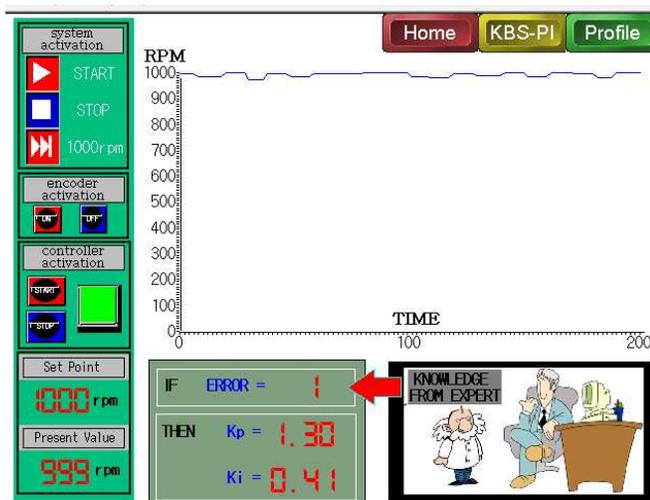
1. Penggunaan kontroler *knowledge based-PI* pada *plant* dapat mengurangi *Error Steady State* (Ess) sebesar 1,4% serta dapat memberikan kemudahan dalam menentukan berbagai macam model sesuai dengan variasi pembebanan.
2. Aksi kontrol dengan metode *look-up table* memberikan tingkat ketelitian yang tinggi, karena digunakannya basis data yang telah diidentifikasi sebelumnya, namun jika semakin banyak data yang terdapat pada direktori *look-up table* maka akan mengurangi kecepatan aksi kontrol secara signifikan.
3. Sistem kendali PI mampu menghasilkan respon dan *recovery time* sebesar 2,04 detik pada saat sistem diberikan *disturbance* berupa rem elektromagnetik 240V selama 8 detik. Dari hasil pengujian sistem dengan pemberian *disturbance*, terjadinya *undershoot* dari pemberian beban dapat diredam

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Rini, Widyanita Sekar, "Perancangan dan Implementasi Internal Kontroler PI-Direct Torque Control sebagai Driver Motor Induksi", *Tugas Akhir*, ITS, Surabaya, 2012.
- [2] Avelino J. González, Douglas D Autor Dankel, *The Engineering of Knowledge Based System: Theory and Practice*, Prentice-Hall International, 1993.
- [3] Alfian, R.M, "Perancangan Dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Kontroler PID Fuzzy Dengan PLC", *Tugas Akhir*, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2013.
- [4] Jamaluddin, S, "Disain Dan Implementasi Pengendali Fuzzy Berbasis Diagram Ladder PLC Mitsubishi Q02H CPU Pada Sistem Motor Induksi", *Skripsi*, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok, 2012.
- [5] Wisnu, Bagus, "Kontroler PID untuk Kecepatan Mesin Sentrifugal", *Tugas Akhir*, D3 Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2013.
- [6] Hidayah, Fahmi, "Perancangan dan Implementasi Pengaturan Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa pada Mesin Sentrifugal dengan Menggunakan Metode Linear Quadratic Tracking (LQT)", *Tugas Akhir*, ITS, Surabaya, 2013.
- [7] Adi, Nugroho, "Perancangan dan Implementasi Kontroler Linear Quadratic Tracking (LQT) untuk Pengaturan Akselerasi pada Simulator Hybrid Electric Vehicle", *Tugas Akhir*, ITS, Surabaya, 2013.
- [8] Jakoubek, Ing. Pavel. "Experimental Identification of Stable Non-Oscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods". *Konference Studenské Tvurcčí Činnosti*. 2009.



Gambar 11. Respon Motor saat pembebanan pada Kondisi *Steady State*



Gambar 12. Tampilan HMI

Beban diberikan pada saat sistem mencapai keadaan *steady state*. Beban diberikan secara bertahap dari 0 sampai 220 V. Hal ini dapat terlihat pada grafik bahwa respon turun ketika terjadi pembebanan. Namun setelah itu respon naik ketika kontroler PI diaktifkan dari PLC.

Pengereman pada 240V akan memberikan gaya gesek yang besar terhadap piringan shaft, sehingga terlihat pada grafik bahwa kecepatan motor turun jauh sekitar 150 rpm. Dalam kondisi ini, kontroler PI tidak mampu memberikan sinyal kontrol sehingga tidak ada *recovery time* pada saat motor dibebani. *Recovery* baru akan terjadi saat beban dikembalikan ke posisi *auto trafo* 220V. Waktu *recovery* yang didapat adalah 1,21 detik pada saat diberikan beban 240V sesaat dan 2,04 detik pada saat diberi beban 240V selama 8 detik. Dari kedua respon pengujian diatas bisa diketahui bahwa hasil kontroler PI dapat memperbaiki respon menjadi lebih baik.

1) Pengujian HMI GT-Designer3

Hasil pembuatan *Human Machine Interface* (HMI) menggunakan *software* HMI GT-Designer3 v1.40S dapat dilihat pada Gambar 12. HMI terbagi menjadi 3 *base* yaitu *Overview*, *KBS-PI* dan *Profile*. Ketiga *base* ini dapat diakses pada *hyperlink* yang terdapat di ujung setiap tampilan *base*.