

# PERANCANGAN SISTEM PEMANAS BEARING MENGUNAKAN KONTROL PI BERBASIS MIKROKONTROLER ATMEGA 8535

Sigit Purwanto.<sup>1</sup>, Sumardi, ST. MT.<sup>2</sup>, Iwan Setiawan, ST. MT.<sup>2</sup>  
Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,  
Jln. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia

## Abstrak

*Bearing merupakan komponen penting dari motor dan generator, bearing digunakan sebagai komponen penyangga shaft rotor yang berfungsi mengurangi gesekan antara shaft rotor dan housing. Kerusakan pada bearing dapat mengakibatkan meningkatnya konsumsi daya, gesekan besar sehingga menimbulkan getaran yang berlebih dan kebisingan suara pada motor maupun generator.*

*Menurut survey SKF, 16 % dari kerusakan dini pada bearing diakibatkan dari cara pemasangannya yang tidak sesuai dengan ketentuan yaitu; bearing dimasukkan pada shaft rotor secara paksa dengan jalan dipukul atau dengan dipanasi menggunakan las asetelin.*

*Pembuatan tugas akhir ini adalah merancang pemanas bearing menggunakan metode kontrol PI secara digital dengan Mikrokontroler ATmega 8535 sebagai pengolah data digital dan untuk melakukan pengendalian tersebut. Alat ini dapat membangkitkan kenaikan temperatur yang linear dan panas yang merata. Selain itu, pemanasan bearing juga dapat dijaga antara suhu 80 – 90 °C. Dengan alat ini, bearing yang dipanasi dapat berkembang diameternya, pemanasannya merata dan suhu bearing dapat terkontrol, sehingga dapat dengan mudah dimasukkan ke shaft rotor.*

**Kata kunci :** Pemanas bearing, kontrol PI (Proporsional-Integral), Mikrokontroler ATmega 8535

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

*Bearing merupakan komponen penting dari motor dan generator, bearing digunakan sebagai komponen penyangga shaft rotor yang berfungsi mengurangi gesekan antara shaft rotor dan housing. Kerusakan pada bearing dapat mengakibatkan meningkatnya konsumsi daya, gesekan besar sehingga menimbulkan getaran yang berlebih dan kebisingan suara pada motor maupun generator.*

*Bearing adalah kelengkapan penting suatu motor listrik, maka bearing harus dirawat dengan baik dan cara pemasangan bearing harus dengan cara yang benar pula. Pemasangan bearing pada shaft rotor motor-motor pada dunia industri biasanya dilakukan dengan metode pemanasan dengan menggunakan las asetelin. Kemudian setelah bearing tersebut panas, maka bearing dengan mudah dipasang pada shaft rotor motor listrik. Pemasangan bearing dengan metode pemanasan dengan menggunakan las asetelin dipandang sebagai metode yang kurang baik dan tidak benar.*

Dari pertimbangan diatas maka didapatkan ide untuk mencoba membuat rancang bangun suatu peralatan alat pemanas bearing dengan prinsip induksi. Metode induksi ini nantinya diharapkan dapat menggantikan metode pemanasan menggunakan api atau las asetelin. Dengan metode pemanas induksi ini temperatur bearing dapat dijaga antara 80°C – 90°C, sehingga tidak memberikan

temperatur panas yang berlebihan pada bearing tersebut.

Seiring dengan perkembangan teknologi elektronika terutama dalam bidang mikrokontroler, maka alat yang akan digunakan untuk pemanasan bearing ini akan dirancang dengan memadukan rangkaian-rangkaian analog dengan mikrokontroler. Mikrokontroler di sini digunakan sebagai pengolahan data-data yang digunakan untuk mengendalikan sistem pemanasan bearing dan juga digunakan untuk memberikan indikator yang dibutuhkan, misalnya error indikator, kecepatan kipas pendingin pada plant tersebut.

### 1.2 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah

1. Menerapkan kontroler PI (Proporsional Integral) pada plant pengendalian suhu yang digunakan pada sistem pemanas bearing secara trial and error dengan mikrokontroler ATmega 8535 sebagai media pengendali.
2. Membuat alat pemanas bearing dengan pemanasan induksi agar bearing dapat dipasang dengan baik pada shaft rotor motor dan memiliki waktu pakai yang panjang.

### 1.3 Pembatasan Masalah

Dalam penyusunan tugas akhir ini permasalahan-permasalahan yang akan dibahas meliputi hal-hal sebagai berikut :

1. *Plant* yang digunakan sistem pemanas *bearing* dengan metode pemanasan induksi.
2. Perancangan sistem pemanas *bearing* menggunakan mikrokontroler ATmega 8535 dengan menggunakan bahasa *C embedded* sebagai pengendaliannya.
3. Metode pengontrolnya PI (Proporsional dan Integral) yang digunakan adalah metode *trial and error*.
4. Karakteristik *plant* yang dikontrol dianggap linier.
5. Type *Bearing* yang digunakan *Cylindrical roller bearings, Spherical roller bearings* dan *Deep groove ball bearings*.
6. *Bearing* yang digunakan berukuran diameter dalam (Din)  $\geq 70\text{mm}$ .
7. Tidak membahas cara pemasangan *bearing* ke *shaft* motor hanya cara pemanasan *bearing* dengan *setting pointnya* antara  $80^{\circ}\text{C} - 90^{\circ}\text{C}$ .

## II. DASAR TEORI

### 2.1 Pengendali PI

Pengendali PI adalah sistem pengendali gabungan antara pengendali proporsional dan integral. Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PI dirumuskan sebagai :

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad \dots (2.1)$$

dengan :

$u(t)$  = sinyal keluaran pengendali PI

$K_p$  = konstanta proporsional

$T_i$  = waktu integral

$K_i$  = konstanta integral

$e(t)$  = sinyal kesalahan ( $e(t) = \text{referensi} - \text{keluaran plant}$ )

Jadi, fungsi alih pengendali PI (dalam domain  $s$ ) dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$G_s(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad \dots (2.2)$$

Diagram blok pengendali PI dapat dilihat pada Gambar 2.1.



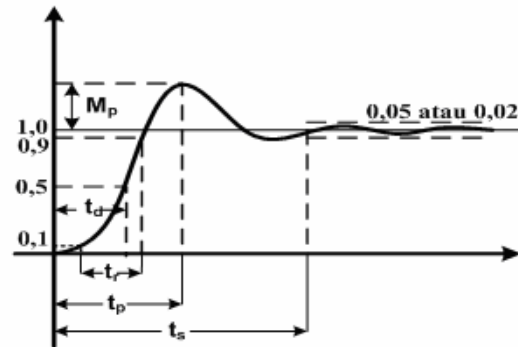
Gambar 2.1 Diagram blok pengendali PI

Sedangkan dalam kawasan sistem diskret, pengendali PI dapat dituliskan dalam bentuk persamaan beda sebagai berikut:

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot T \cdot \sum_{i=0}^{k-1} (e(i)) \quad \dots (2.3)$$

### 2.2 Analisis Tanggapan Peralihan

Karakteristik kinerja sistem kendali dapat dinyatakan dalam bentuk tanggapan peralihan terhadap masukan tangga (*step*), dapat dilihat pada Gambar 2.2. Beberapa parameter yang dapat ditentukan antara lain :



Gambar 2.2 Kurva tanggapan sistem dengan masukan tangga.

#### 1. Waktu naik (*rise time*)

Waktu naik,  $t_r$ , adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk naik dari persentase 10%-90% dari nilai akhir.

#### 2. Waktu tunda (*delay time*)

Waktu tunda,  $t_d$ , adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai setengah nilai akhir yang pertama kali.

#### 3. Waktu puncak (*peak time*)

Waktu puncak,  $t_p$ , adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.

#### 4. Lonjakan maksimum (*maximum overshoot*)

Lonjakan maksimum,  $M_p$ , adalah persentase nilai puncak maksimum kurva tanggapan terhadap nilai pada keadaan tunaknya. Lonjakan maksimum dapat dinyatakan sesuai Persamaan 2.4.

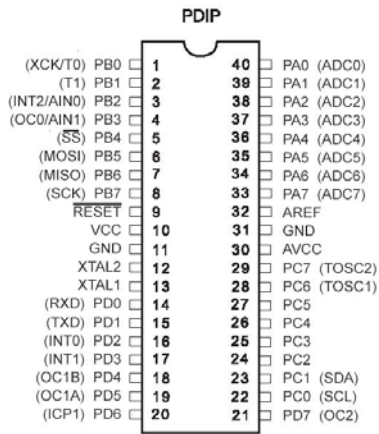
$$M_p = \frac{y(t_p) - y(\infty)}{y(\infty)} \times 100 \% \quad \dots (2.4)$$

#### 5. Waktu penetapan (*settling time*)

Waktu penetapan,  $T_s$ , adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk menetap dalam daerah di sekitar nilai akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari nilai akhir (biasanya 5 % atau 2 %).

### 2.3 Mikrokontroler Atmega 8535

Susunan kaki ATmega 8535 dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Susunan kaki mikrokontroler ATmega 8535.

## 2.4 Pengontrol Tegangan AC

Jika sebuah saklar *thyristor* dihubungkan antara sumber AC dan beban, maka aliran energi dapat dikontrol oleh variasi nilai rms dari Tegangan AC yang digunakan oleh beban, dan jenis rangkaian energi ini disebut sebagai pengontrol tegangan AC (*AC voltage controller*). Untuk transfer energi, dua jenis pengontrol yang biasa digunakan yaitu:

1. Kontrol *on-off*
2. Kontrol sudut fasa

Pada kontrol *on-off*, saklar *thyristor* menghubungkan beban dengan sumber AC selama beberapa putaran tegangan masukan dan diputus selama beberapa putaran yang lain. Pada kontrol sudut fasa, saklar *thyristor* menghubungkan beban dengan sumber AC untuk setiap bagian dari putaran tegangan masukan.

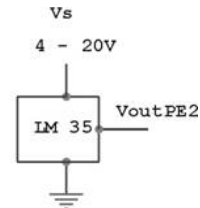
Pengontrol Tegangan AC dapat digolongkan menjadi dua: (1) Pengontrol satu fasa dan (2) Pengontrol tiga fasa. Tiap jenis dapat dibagi lagi menjadi: kontrol setengah gelombang atau banyak arah dan kontrol gelombang penuh atau dua arah. Karena tegangan masukannya AC, *thyristor* merupakan komutasi garis dan natural, sehingga tidak ada rangkaian komutasi tambahan dan rangkaian untuk pengontrol Tegangan ACnya sangat sederhana.

## 2.5 Sensor LM 35

Sensor suhu LM35 digunakan untuk mengetahui besarnya suhu ruangan. IC ini akan mengubah nilai suhu menjadi besaran tegangan. Jangkauan (*range*) suhu yang mampu dirasakan oleh LM35 adalah dari  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  sampai dengan  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Tegangan keluaran sensor ini akan mengalami perubahan  $10\text{ mV}$  untuk setiap perubahan suhu  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  atau memenuhi Persamaan 2.5

$$V_{out} = 10mV \times T \quad \dots(2.5)$$

dengan  $T$  adalah suhu yang dideteksi dalam derajat Celcius.



Gambar 2.4 Sensor suhu LM 35

## 2.6 Inti Besi

Inti besi adalah bagian mutlak pada transformator. Inti ini terdiri dari besi-besi tipis yang dinamakan plat besi. Plat besi ini mempunyai tebal berkisar  $0,2 - 1,5\text{ mm}$ . Plat ini akan disusun sehingga merupakan suatu tumpukan besi. Setiap kali mengadakan penumpukan pada besi tersebut harus diberi isolasi dari kertas. Kertas tersebut sangat tipis setebal  $0,02\text{ mm}$ . Kadang-kadang digunakan pula isolasi lak. Kalau ditinjau bentuk inti besi ada 3 macam yaitu :

- a. Inti besi berbentuk bulat.
- b. Inti besi berbentuk U – I
- c. Inti besi berbentuk E - I

Ketiganya mempunyai keuntungan dan kerugian sehingga harus diperhitungkan mana yang paling efektif kita gunakan. Karena kesalahan pemilihan inti besi akan mengakibatkan hasil yang tidak diharapkan.

## III. PERANCANGAN

Secara umum, diagram blok perancangan sistem pemanas *bearing* ditunjukkan seperti pada Gambar 3.1.

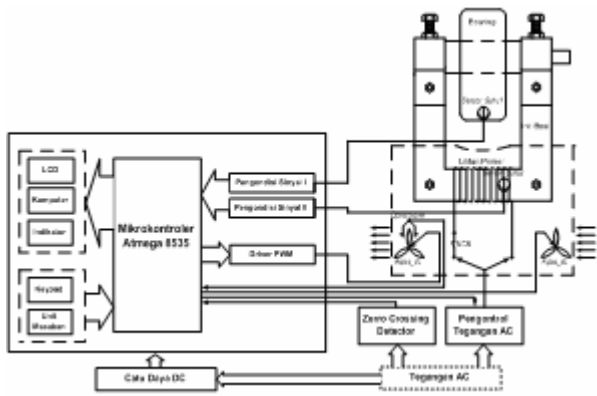


Gambar 3.1 Blok diagram rancangan alat

Perancangan sistem pemanas *bearing* meliputi perancangan perangkat keras (*hardware*) dan perancangan perangkat lunak (*software*).

### 3.1 Perancangan Perangkat Keras (*Hardware*)

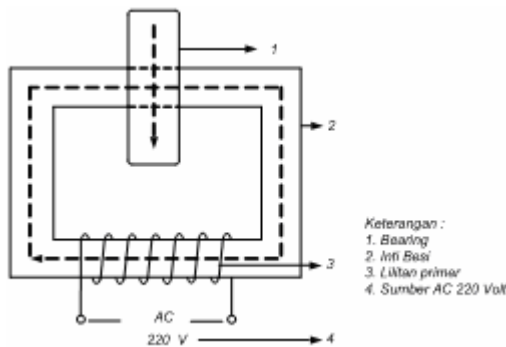
Perancangan perangkat keras dapat ditunjukkan seperti Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram blok perancangan perangkat keras

### 3.1.1 Perancangan Alat Pemanas bearing

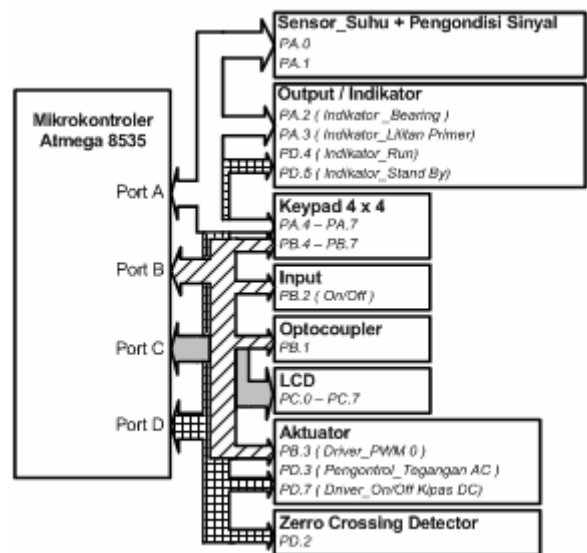
Plant sistem pemanas bearing yang digunakan untuk pengendalian suhu bearing pada intinya terletak pada pemanas bearingnya. Pemanas yang digunakan adalah transformator 1 fasa dengan inti besi berbentuk U - I dengan tegangan 800 VA/220 VAC. Transformator yang digunakan sebagai pemanas bearing ini mempunyai 590 lilitan pada primer, 1 lilitan sekunder yang diumpamakan sebagai bearing yang akan dikendalikan suhunya. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3 konstruksi dasar pemanas bearing.



Gambar 3.3 Kontruksi dasar pemanas bearing

### 3.1.2 Sistem Minimum Mikrokontroler ATmega 8535

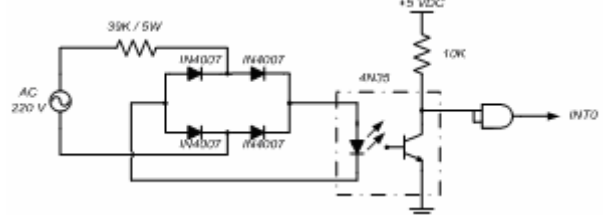
Sistem mikrokontroler ATmega 8535 dibentuk dari beberapa piranti masukan-keluaran. Hubungan mikrokontroler ATmega 8535 dengan piranti masukan-keluaran ditunjukkan seperti pada Gambar 3.4.



Gambar 3.4 Interaksi sistem mikrokontroler ATmega 8535 dengan komponen I/O

### 3.1.3 Zerro Crossing Detector

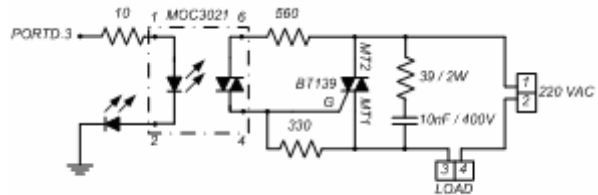
Zero crossing detector adalah rangkaian yang digunakan untuk mendeteksi gelombang sinus AC 220 volt saat melewati titik tegangan nol. Seberangan-seberangan titik nol ini merupakan acuan yang digunakan sebagai awal pemberian nilai waktu tunda untuk pemucuan triac. Rangkaian zero crossing detector ditunjukkan pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Rangkaian zero crossing detector

### 3.1.4 Rangkaian Pengontrol Tegangan AC

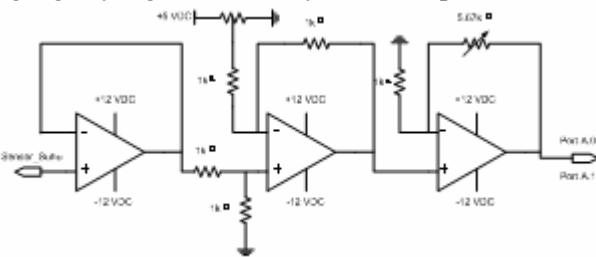
Perancangan rangkaian pengontrol Tegangan AC adalah seperti ditunjukkan pada Gambar 3.6. Gambar 3.6 merupakan rangkaian untuk pengontrol Tegangan AC gelombang penuh satu fasa. Sebagai komponen pengontrol tegangan digunakan triac BT 139.



Gambar 3.6 Rangkaian pengontrol Tegangan AC

### 3.1.5 Sensor LM35 dan Pengondisi Sinyal

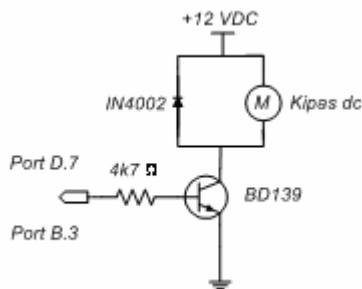
Jangkauan pengukuran sistem ini antara 25°C sampai dengan 100°C, sehingga tegangan yang dikeluarkan sensor LM35 berada dalam jangkauan 0,25 volt sampai 1 volt. Rangkaian pengondisi sinyal yang sesuai untuk mengubah jangkauan tegangan antara 0,25 sampai 1 volt menjadi 0 sampai 5 volt adalah penguat selisih, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.7. Penguat ini akan mengurangi tegangan masukan dengan nilai 0,25 volt, sebagai tegangan paling kecil yang diukur, sehingga jangkauan tegangan yang akan dikuatkan menjadi 0 sampai 0,75 volt. Selanjutnya, tegangan dengan jangkauan 0 sampai 0,75 volt ini akan dikuatkan sebesar 6,67 kali agar sesuai dengan tegangan yang dibutuhkan yaitu 0 sampai 5 volt.



Gambar 3.7 Rangkaian pengondisi sinyal I dan II

### 3.1.6 Driver Kipas dc (arus searah) dan Driver PWM (Pulse Width Modulation)

Driver Kipas dc dan driver PWM ditunjukkan pada Gambar 3.8.

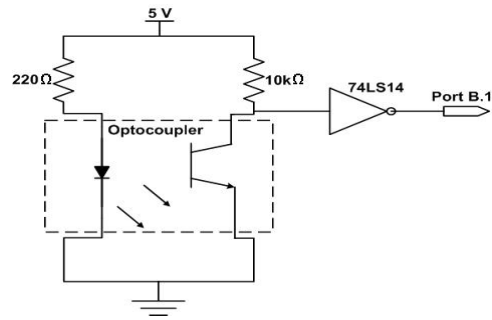


Gambar 3.8 Rangkaian driver kipas dc dan driver PWM

Pada rangkaian driver kipas dc dan driver PWM terdapat transistor npn BD 139 yang berfungsi sebagai saklar. Transistor ini akan on (aktif) apabila keluaran Port D.7 untuk kipas dc atau Port B.3 untuk PWM0 pada mikrokontroler ATmega 8535 berlogika 1, sedangkan akan off apabila keluaran berlogika 0.

### 3.1.7 Rangkaian Optocoupler

Rangkaian optocoupler adalah sebagai berikut:

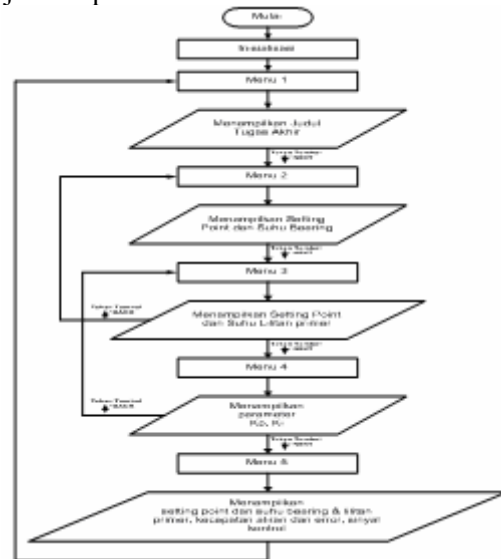


Gambar 3.9 Rangkaian sensor optocoupler

Optocoupler terdiri dari LED dan detektor cahaya (phototransistor) yang berfungsi untuk menerima cahaya yang dipancarkan oleh LED. Sesuai dengan rangkaian pada Gambar 3.9, maka optocoupler akan menghasilkan tegangan keluaran high pada saat tidak ada cahaya yang mengenai permukaan detektor. Sedangkan saat cahaya mengenai detektor maka tegangan keluaran dari detektor adalah low.

### 3.2 Perancangan Perangkat Lunak (Software)

Program utama mengatur keseluruhan jalannya program yang meliputi sub rutin-sub rutin. Sub rutin akan melaksanakan fungsi-fungsi tertentu yang dibutuhkan untuk sistem pengendalian. Adapun diagram alir dari program utama ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Diagram alir program utama

#### 3.2.1 Sub Rutin Interupsi External 0

Sub rutin interupsi external 0 digunakan untuk pemecuan triac pada pengontrol Tegangan AC. Pemecuan dilakukan setiap setengah siklus gelombang jala-jala dan dihitung dari titik persimpangan nol (zero crossing detector). Dengan frekuensi jala-jala 50 Hz maka untuk waktu setengah periode adalah:



$$T = 0.5 \times \frac{1}{f} = 0.5 \times \frac{1}{50} = 0.01 \text{detik}$$

Interupsi *external timer 2* dari *zero crossing detector*. Interupsi tersebut digunakan sebagai awal pemberian nilai sinyal kontrol untuk waktu tunda pemicuan *triac*.

### 3.2.2 Sub Rutin Interupsi Timer 0

Sub rutin interupsi *Timer 0* digunakan untuk waktu cuplik menghitung kecepatan aliran udara yang keluar, waktu cuplik pengambilan ADC internal, waktu cuplik perhitungan sinyal kontrol, dan sebagai PWM, untuk menghasilkan PWM (*Pulse Width Modulation*) internal. PWM internal ini terletak pada Port B.3 untuk *Timer 0*, waktu cuplik pengiriman data serial

### 3.2.3 Sub Rutin Interupsi Timer 1

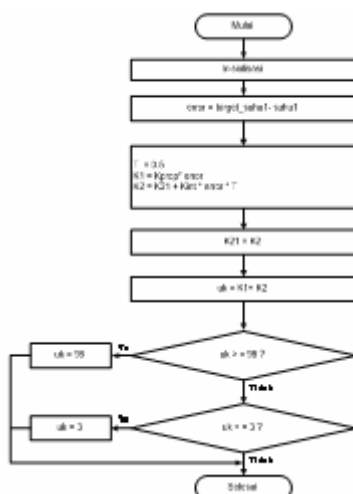
Sub rutin interupsi *Timer 1* berfungsi sebagai pencacah frekuensi eksternal yang berasal dari *optocoupler*. Di mana dengan mencacah frekuensi eksternal yang berasal dari *optocoupler*, dapat menghitung besarnya kecepatan aliran uap.

### 3.2.4 Sub Rutin Interupsi Timer 2

Sub rutin interupsi *Timer 2* digunakan untuk mematikan pemicuan *triac* pada pengontrol Tegangan AC.

### 3.2.5 Sub Rutin Pengendalian PI

Proses penalaan proporsional-integral bertujuan untuk mendapatkan parameter-parameter proporsional-integral sesuai dengan metode *trial and error*. di mana sinyal kontrol dari pengendali akan mengendalikan pemicuan *triac* pada pengontrol Tegangan AC. Perhitungan pengendali proporsional-integral yang dilakukan pada mikrokontroler sesuai dengan diagram alir pada Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Diagram alir penalaan parameter-parameter kendali PI

## IV. ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pengujian alat pemanas *bearing* terdiri dari pengujian perangkat keras, perangkat lunak, dan perubahan muai *bearing*. Pengujian ini dilakukan agar sistem alat pemanas *bearing* dapat memanaskan *bearing* sesuai dengan *setting pointnya*.

### 4.1 Pengujian Perangkat Keras

Pengujian perangkat keras dilakukan untuk mengetahui apakah perangkat keras yang telah dirancang dapat bekerja dan berfungsi dengan baik sebagaimana yang diinginkan. Pengujian ini meliputi pengujian terhadap komponen-komponen yang digunakan seperti linearitas sensor suhu LM35 yang digunakan pada pemanasan *bearing* dan pengaman lilitan primer, sistem mikrokontroler, rangkaian *zero crossing detector*, kendali Tegangan AC.

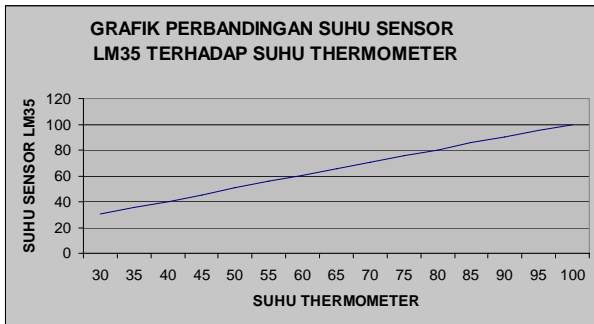
#### 4.1.1 Pengujian Sensor Suhu LM35

Dalam pengujian sensor LM35 dilakukan dengan cara mengukur suhu *bearing* yang sebenarnya menggunakan *thermometer*. Suhu yang terukur oleh *thermometer* kemudian dibandingkan dengan suhu yang terdeteksi oleh sensor LM35, yang tertampil di LCD. Data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian sensor LM35 dan *Thermometer*

NO	Suhu terukur <i>thermometer</i> (°C)	Sensor LM35
		Suhu (°C)
1	30	30.3
2	35	35.5
3	40	40.2
4	45	45.4
5	50	50.9
6	55	55.7
7	60	60.6
8	65	65.1
9	70	70.4
10	75	75.6
11	80	80.3
12	85	85.8
13	90	90.2
12	95	95.4
13	100	100.00

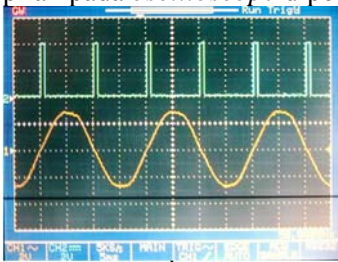
Grafik perbandingan suhu sensor LM35 dengan suhu yang terukur *thermometer* dapat dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Grafik perbandingan suhu sensor LM25 dengan *thermometer*

#### 4.1.2 Pengujian Rangkaian Zero Crossing Detector

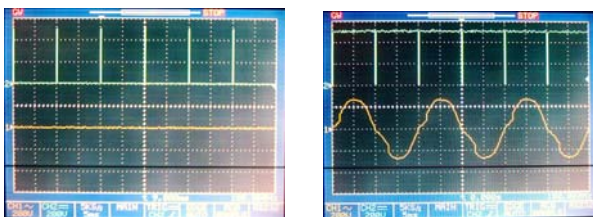
Pengujian rangkaian *zero crossing detector* dilakukan dengan cara memberikan masukan berupa tegangan 220 volt ke rangkaian *zero crossing detector*. Kemudian dilakukan pengukuran pada bagian masukan dan keluaran dari rangkaian *zero crossing detector* menggunakan *oscilloscope*. Melalui tampilan pada *oscilloscope* diperoleh bentuk



Gambar 4.2 Bentuk gelombang masukan dan keluaran *zero crossing detector*

#### 4.1.3 Pengujian Rangkain Kendali Tegangan AC

Pengujian rangkaian pengendali tegangan AC, digunakan bantuan rangkaian *zero crossing detector* dan sistem mikrokontroler ATmega 8535. Pengamatan dilakukan dengan *oscilloscope* terhadap gelombang picu *triac* dari mikrokontroler dan keluaran pengendali Tegangan AC yang diberikan ke beban berdasarkan pengaturan sinyal kontrol. Pengujian dilakukan pada saat kendali tegangan AC dalam keadaan hidup (sinyal kontrol = 98%) dan mati (sinyal kontrol = 3%) pemberian pada beban.. Hasil pengujian untuk 2 nilai sinyal kontrol pemecuan ditunjukkan seperti pada Gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.3 Sinyal picu dan tegangan beban untuk sinyal kontrol 3 % dan sinyal kontrol 98 %

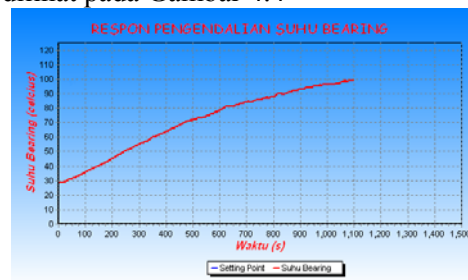
Dari kedua bentuk gelombang tegangan pada beban, dapat diketahui bahwa semakin besar waktu tunda untuk pemecuan *triac*, maka bagian dari tegangan AC yang diberikan ke beban untuk tiap fasenya (fase positif dan fase negatife) akan semakin besar, yang berarti bahwa tegangan listrik yang diberikan ke beban akan semakin besar.

### 4.2 Pengujian Perangkat Lunak

Pengujian perangkat lunak dilakukan untuk mengetahui karakteristik *software* dalam proses sistem pemanas *bearing*. Pengujian ini terdiri dari pengujian kalang terbuka, pengujian PI dengan variasi Kp, pengujian PI dengan variasi Kd, Pengujian pengendali PI.

#### 4.2.1 Pengujian Kalang Terbuka

Karakteristik *plant* pemanas *bearing* dapat diketahui dengan melakukan pengujian kalang terbuka. Pengujian kalang terbuka dilakukan dengan memberikan nilai uk sebesar 98 atau sudut picu *triac* pada rangkaian pengontrol Tegangan AC sebesar 98%, dan *driver* motor dc dijalankan dalam keadaan kecepatan penuh atau diberi tegangan 12 VDC.. *Bearing* yang digunakan dengan diameter dalam (Din) sebesar 70mm. Tanggapan *plant* pemanas *bearing* untuk pengujian kalang terbuka dapat dilihat pada Gambar 4.4



Gambar 4.4 Tanggapan *plant* pemanas *bearing* untuk pengujian kalang terbuka

Tanggapan *plant* suhu menunjukkan bahwa pada *plant* pemanas *bearing* ini terdapat waktu tunda (*delay time*). Untuk *plant* pemanas *bearing* ini digunakan metode *trial and error* untuk mendapatkan nilai Kp dan Ki pada pengendali PI yang terbaik.

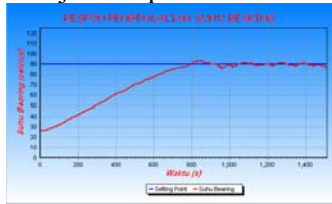
#### 4.2.2 Pengujian Pengendali PI dengan Trial and Error

Pengendalian PI pada pengujian ini dilakukan dengan menggunakan nilai parameter-parameter secara *trial and error*, dalam pengujian ini digunakan *bearing* dengan diameter dalam (Din) = 70mm. Sehingga didapat nilai parameter yang menghasilkan pengendalian yang paling optimal. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja pengendali PI dengan parameter-parameter

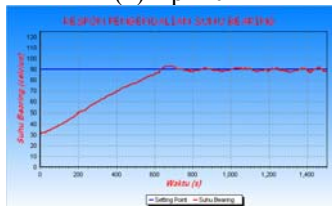
tersebut, terhadap nilai *setting point* suhu bearing yang diberikan, yaitu sebesar 90°C.

#### 4.2.2.1 Pengujian Pengendali PI dengan Variasi nilai Kp

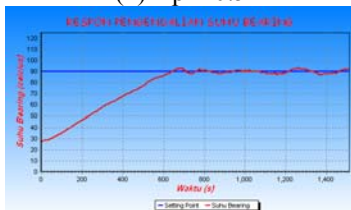
Tanggapan suhu *bearing* pada alat pemanas *bearing*. dengan variasi nilai  $K_p = 0, 0.5, 1, 5$  dan nilai  $K_i = 1$  ditunjukkan pada Gambar 4.5.



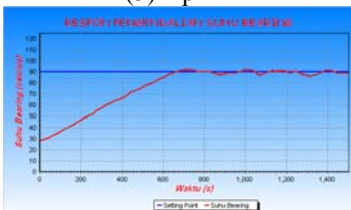
(1)  $K_p = 0$



(2)  $K_p = 0.5$



(3)  $K_p = 1$



(4)  $K_p = 5$

Gambar 4.5 Respon alat pemanas *bearing* untuk pengendali PI dengan  $K_i = 1$

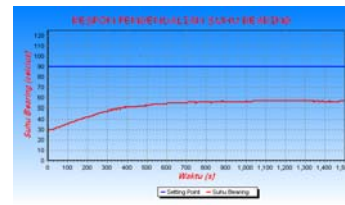
Dari keempat gambar tanggapan *plant* terhadap pengendali PI, dapat diketahui beberapa karakteristik alat pemanas *Bearing* terhadap variasi nilai  $K_p$ . Karakteristik sistem ditabelkan dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Karakteristik tanggapan sistem terhadap perubahan nilai  $K_p$  (*setting point* = 90°C).

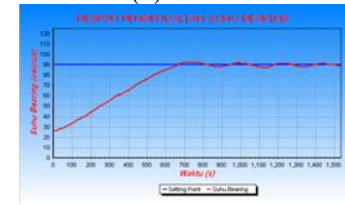
$K_p$	$K_i$	$T_r$	$T_p$	$T_s$	$M_p$
0	1	508	842	1039	3.33 %
0.5	1	499	685	825	3.33 %
1	1	475	680	750	2.22 %
5	1	505	718	834	1.11 %

#### 4.2.2.2 Pengujian Pengendali PI dengan Variasi nilai Ki

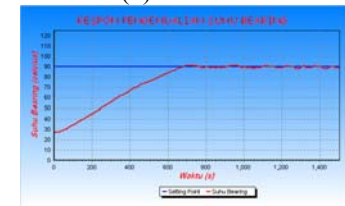
Tanggapan suhu *bearing* pada alat pemanas *bearing*. dengan variasi nilai  $K_i = 0, 0.5, 5, 10$  dan nilai  $K_p = 1$  ditunjukkan pada Gambar 4.6.



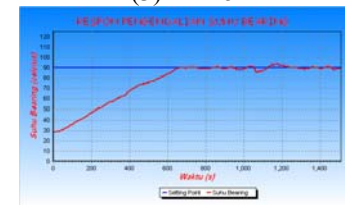
(1)  $K_i = 0$



(2)  $K_i = 0.5$



(3)  $K_i = 5$



(4)  $K_i = 10$

Gambar 4.6 Respon alat pemanas *bearing* untuk pengendali PI dengan  $K_p = 1$

Dari keempat gambar tanggapan alat pemanas *bearing* terhadap pengendali PI, dapat diketahui beberapa karakteristik alat pemanas *Bearing* terhadap variasi nilai  $K_i$ . Karakteristik sistem ditabelkan dalam Tabel 4.3.

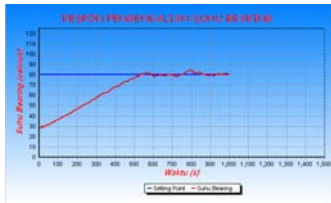
Tabel 4.3 Karakteristik tanggapan sistem terhadap perubahan nilai  $K_i$  (*setting point* = 90°C).

$K_p$	$K_i$	$T_r$	$T_p$	$T_s$	$M_p$
1	0	-	-	-	-
1	0.5	480	740	935	2.22 %
1	5	515	715	758	1.11 %
1	10	510	675	705	0 %

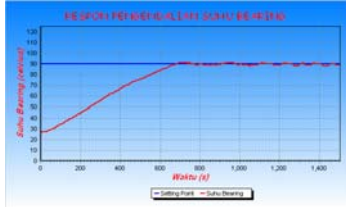
#### 4.2.2.3 Pengujian Pengendali PI

Pengendalian PI pada pengujian ini dilakukan dengan menerapkan parameter-parameter yang didapat dari pengujian penelaan. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja pengendali PI dengan parameter-parameter tersebut, terhadap perubahan nilai *setting point* suhu *bearing* yang diberikan dan besar kecilnya *bearing* yang digunakan. *Setting point* suhu *bearing* yang diberikan 80°C, 85°C, 90°C, dan ukuran *bearing* yang digunakan dengan diameter dalam (Din) *bearing* sebesar 70mm, 80mm, 90mm. ditunjukkan pada Gambar 4.7.

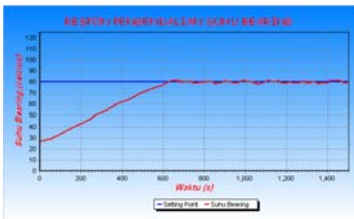




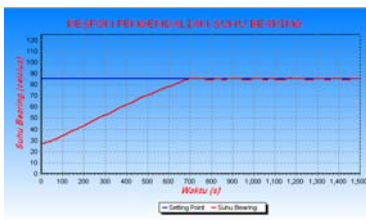
(1) Din = 70mm, setting point = 80°C



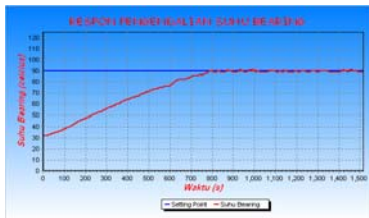
(2) Din = 70mm, setting point = 90°C



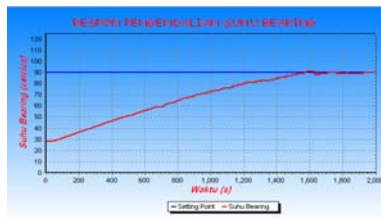
(3) Din = 80mm, setting point = 80°C



(4) Din = 80mm, setting point = 85°C



(5) Din = 80mm, setting point = 90°C



(6) Din = 90mm, setting point = 90°C

Gambar 4.7 Respon alat pemanas bearing untuk pengendali PI dengan setting point 80°C, 85°C, 90°C dan ukuran diameter dalam bearing 70mm, 80mm, 90mm

Dari keenam gambar tanggapan alat pemanas bearing terhadap pengendalian PI, dapat diketahui beberapa karakteristik alat pemanas Bearing terhadap variasi nilai setting point dan ukuran

bearing (diameter dalam bearing) Karakteristik sistem ditabelkan dalam Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Karakteristik tanggapan sistem terhadap perubahan nilai setting point & ukuran bearing.

Diameter Dalam (Din)	Setting Point	Tr	Tp	Ts	Mp
70mm	80°C	408	570	630	2.22%
70mm	90°C	515	715	758	1.11 %
80mm	80°C	475	655	705	1.11%
80mm	85°C	540	730	820	0%
80mm	90°C	585	795	830	0%
90mm	90°C	1455	1600	1725	1.11%

### 4.3 Pengujian Perubahan Muai Bearing

Pengujian perubahan muai bearing dilakukan dengan mengukur bearing setelah dipanasi dengan alat pemanas bearing. Pengukuran bearing dilakukan dengan menggunakan alat pengukur jangka sorong dengan tingkat ketelitian 0.05mm. Bearing yang digunakan untuk pengujian bearing yang mempunyai diameter dalam (Din) 70mm, 80mm, 90mm. Data hasil pengukuran perubahan muai bearing dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Pengukuran perubahan muai bearing.

(Din)	(Dout)	Tebal (T)	Setting Point	Muai Bearing (mm)
70mm	125mm	24mm	70°C	0
70mm	125mm	24mm	75°C	0.05
70mm	125mm	24mm	80°C	0.10
70mm	125mm	24mm	85°C	0.15
70mm	125mm	24mm	90°C	0.20
80mm	140mm	26.1mm	70°C	0
80mm	140mm	26.1mm	73°C	0
80mm	140mm	26.1mm	76°C	0.05
80mm	140mm	26.1mm	79°C	0.10
80mm	140mm	26.1mm	82°C	0.10
80mm	140mm	26.1mm	85°C	0.15
80mm	140mm	26.1mm	88°C	0.20
80mm	140mm	26.1mm	91°C	0..20
90mm	161.3mm	30mm	70°C	0
90mm	161.3mm	30mm	74°C	0.05
90mm	161.3mm	30mm	78°C	0.10
90mm	161.3mm	30mm	82°C	0.10
90mm	161.3mm	30mm	86°C	0.15
90mm	161.3mm	30mm	90°C	0.20

Dari tabel 4.5 pengukuran perubahan muai bearing dapat dibuat grafik hubungan antara suhu dengan perubahan muai bearing, dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik hubungan antara suhu bearing dengan perubahan muai bearing

## V. PENUTUP

### 5.1 Penutup

Berdasarkan perancangan, pengujian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut :

1. Besarnya nilai waktu naik ( $T_r$ ) sistem tergantung pada suhu awal bearing, udara disekitar alat pemanas bearing dan ukuran bearing yang digunakan.
2. Dengan menggunakan  $K_p$  yang lebih besar ( $K_p=5$ ) maka nilai overshoot lebih kecil ( $0^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ ) daripada  $K_p$  yang digunakan lebih kecil ( $K_p=0.5$ ) atau tidak menggunakan nilai  $K_p$  ( $K_p=0$ ) maka nilai overshoot lebih besar.
3. Dengan menggunakan  $K_i$  yang lebih besar ( $K_i=10$ ) maka nilai overshoot lebih kecil ( $0^\circ\text{C} - 1^\circ\text{C}$ ) daripada  $K_i$  yang digunakan lebih kecil ( $K_i=0.5$ ) maka nilai overshoot lebih besar sekitar ( $3^\circ\text{C}$ ).
4. Ukuran bearing yang lebih besar (diameter dalam) mempengaruhi nilai waktu naik ( $T_r$ ) atau semakin besar ukuran bearing maka semakin lama nilai waktu naik ( $T_r$ ).
5. Pemuai bearing setelah dipanasi antara  $0.1\text{mm} - 0.2\text{mm}$  dengan suhu antara  $80^\circ\text{C} - 90^\circ\text{C}$ , dengan pemuai sebesar  $0.1\text{mm} - 0.2\text{mm}$  bearing dapat masuk pada shaft rotor dengan mudah

### 5.2 Saran

Beberapa hal yang dapat disarankan dari pelaksanaan tugas akhir ini adalah :

1. Plant alat pemanas bearing ini masih bisa dikembangkan lagi dengan mengubah controller yang digunakan. Misal PI dengan metode Ziegler-Nichols, Algoritma Genetik, Jaringan Syaraf Tiruan dan Fuzzy.
2. Untuk ukuran bearing yang lebih besar maka harus dirancang transformator (pemanas) yang

mempunyai daya lebih besar, supaya nilai waktu naik ( $T_r$ ) lebih kecil.

3. Dalam melakukan pengujian pengukuran bearing disarankan menggunakan alat pengukur jangka sorong yang mempunyai tingkat ketelitian  $0.01\text{mm}$ . agar dalam pengukuran lebih tepat.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 1*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [2] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik Jilid 2*, diterjemahkan oleh Edi Leksono, Erlangga, Jakarta, 1994.
- [3] Rashid, Muhammad H., *Elektronika Daya*, PT. Prenhallindo, Jakarta, 1999.
- [4] Sarjono, Bambang, *Buku Pegangan Kuliah Mahasiswa: Transformator 1 (Satu)*, Politeknik Negeri Semarang, Semarang, 1999.
- [5] Wardhana, Lingga, *Belajar Sendiri Mikrokontroler AVR Seri ATmega8535 Simulasi, Hardware, dan Aplikasi*, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2006.
- [6] Wasito S., *Vademekum Elektronika*, PT. Gramedia, Jakarta, 1985.
- [7] Wijaya, Mochtar, *Dasar – Dasar Mesin Listrik*, Penerbit Djambatan, Jakarta, 2001.
- [8] -----, *Liquid Crystal Display Module H2004A : User Manual*, Seiko Instrument Inc., Japan, 1987.
- [9] -----, *SKF Maintenance and Lubrication Product*, Verweij Printing, Mijdrecht, The Netherlands, 2003.

## BIODATA MAHASISWA



### SIGIT PURWANTO

(L2F 305 239)

Mahasiswa Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang, dengan pilihan konsentrasi Kontrol.

Mengetahui/Mengesahkan,

Pembimbing I

Pembimbing II

**Sumardi, ST. MT.**  
NIP. 132 125 670

**Iwan Setiawan, ST. MT.**  
NIP. 132 283 183