



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SISTEM PENGUKURAN VISKOSITAS CAIRAN  
DENGAN METODE OSILASI TEREDAM**

**SKRIPSI**

**ISMOYO SURO WASKITO  
0806365040**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
PROGRAM FISIKA INSTRUMENTASI  
DEPOK  
2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SISTEM PENGUKURAN VISKOSITAS CAIRAN  
DENGAN METODE OSILASI TEREDAM**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana sains**

**ISMOYO SURO WASKITO  
0806365040**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN  
ALAM  
PROGRAM FISIKA INSTRUMENTASI  
DEPOK  
2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Ismoyo Suro Waskito

NPM : 0806365040

Tanda Tangan :



Tanggal : Juni 2011

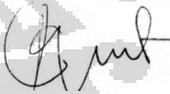
## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Ismoyo Suro Waskito  
NPM : 0806365040  
Program Studi : Fisika Instrumentasi  
Judul Skripsi : Sistem Pengukuran Viskositas Cairan Dengan  
Metode Osilasi Terdam

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Sains pada Program Studi Fisika Instrumentasi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Drs. Arief Sudarmaji, M.T (  )  
Pembimbing : Dr. rer. nat. Agus Salam (  )  
Penguji : Dr. Prawito (  )  
Penguji : Drs. Lingga Hermanto, M.Si (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 24 Juni 2011

## KATA PENGANTAR

Segala puji hanya milik Allah SWT tuhan semesta Alam, pemilik langit dan bumi dan segala sesuatu yang berada di dalamnya. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada manusia termulia nabi Muhammad SAW.

Banyak hambatan dan rintangan yang penulis temui dalam penyusunan skripsi ini, akan tetapi hal tersebut penulis jadikan sebagai pemicu untuk terus berusaha lebih keras. Penulis bersyukur kepada Allah SWT karena banyak hal-hal baru yang penulis temui dalam penyusunan skripsi ini yang menjadi pelajaran bagi penulis untuk pengembangan dimasa yang akan datang. Dan karena rahmat dan petunjukNya lah akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Sains Jurusan Fisika Instrumentasi pada Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sejak dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Drs. Arief Sudarmaji, M.T, selaku dosen pembimbing pertama yang telah banyak menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk membantu saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. rer. nat Agus Salam, M.Si selaku dosen pembimbing kedua yang telah banyak memberikan ilmu, arahan dan bimbingannya.
3. PPPTMGB Lemigas, tempat saya bekerja yang telah memberikan dukungan dan waktunya untuk penulis belajar dan menyelesaikan skripsi ini
4. Orang tua penulis yang tak pernah putus memanjatkan doa dan dukungan moril untuk kelancaran, dan keberhasilan penulis menuntut ilmu.
5. Istri dan anak penulis yang sudah banyak memberikan waktu, perhatian dan dukungannya, serta doanya sehingga semuanya menjadi lebih mudah dan ringan untuk dikerjakan

6. Sahabat-sahabat penulis, Ahmad Bani Labanie, Muhammad Pukis Lutfi, Handoko sebagai teman seperjuangan penulis dalam penyelesaian skripsi ini.
7. Mas Cahyo, Pak Maymuchar, Mas Dimitri, Mas Andri, Mas Reza, yang sudah banyak memberikan dukungan, bantuan dan waktu untuk penulis.
8. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah membantu penulis dalam penyelesaian skripsi ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan.

Jakarta, Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Ismoyo Suro Waskito  
NPM : 0806365040  
Program Studi : Fisika Instrumentasi  
Departemen : Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis karya : Skripsi

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Sistem Pengukuran Viskositas Cairan Dengan Metode Osilasi Teredam**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : Juni 2011

Yang menyatakan,



(Ismoyo Suro Waskito)

## ABSTRAK

Pengukuran koefisien viskositas dapat dilakukan secara statik ataupun secara dinamik. Secara statik pengukuran koefisien viskositas hanya dipengaruhi oleh gravitasi tanpa adanya pengaruh gaya luar sedangkan pengukuran secara dinamik dipengaruhi oleh gaya luar. Metode pengukuran koefisien viskositas secara dinamik lebih bervariasi dibandingkan pengukuran secara statis. Beberapa metode yang sering digunakan adalah *falling ball method*, *rotary method*, *ultrasonic method* dan *oscillating method*.

Dalam tulisan ini dilakukan pengukuran koefisien viskositas dengan metode osilasi teredam (*damped oscillation method*). Pengukuran ini menghubungkan persamaan osilasi teredam dari hukum Newton dengan persamaan Stokes tentang gaya redaman yang dialami benda berbentuk bola dalam fluida. Hubungan kedua persamaan tersebut memperlihatkan besarnya redaman akan dipengaruhi oleh nilai koefisien viskositas dari cairan yang diukur. Besarnya redaman dihitung dari data osilasi percepatan yang diperoleh melalui rangkaian mikrokontroler dengan *accelerometer* sebagai sensornya. Data osilasi percepatan kemudian ditampilkan melalui komputer dengan pemrograman LabView sebagai *Graphical User Interface* nya.

Hasil yang diperoleh dari tiga jenis sampel yang digunakan dalam pengukuran (pelumas SAE50, MFO, dan gliserin) memperlihatkan amplitudo osilasi dari percepatan semakin kecil secara eksponensial. Koefisien redaman  $-b$  juga semakin kecil dengan semakin tingginya suhu pengukuran. Hasil pengujian pada suhu  $100^{\circ}\text{C}$  dari sampel pelumas SAE50 dan gliserin diperoleh hasil 14,7 cPoise dan 13,98 cPoise yang mendekati hasil pengujian laboratorium.

Kata kunci : koefisien viskositas dinamik, persamaan osilasi teredam, persamaan Stokes, *accelerometer*

## ABSTRACT

Viscosity coefficient measurement can be done both in static or dynamic method. In static method the viscosity coefficient measured under the influence of gravity only without external force and in dynamic method the viscosity coefficient measured under external force. There is more variation method in dynamic measurement than in static. Some method that usually used in dynamic method are *falling ball method, rotary method, ultrasonic method and oscillating method*.

In this report has been done the measurement of viscosity coefficient with *damped oscillating method*. This measurement relates damped oscillation equation from Newton Law with Stokes equation that describes retarding force at spherical object in the fluids. Relation from these equation shows that the damping coefficient will influence by viscosity coefficient from fluid that measured. The damping coefficient calculates from acceleration oscillation data which get from microcontroller circuit with accelerometer as a sensor. The acceleration oscillation data then displayed on computer with LabView programming as the Graphical User Interface.

Measurement result from three type of liquids (lubricant SAE50, MFO and gliserin) shows the amplitude of acceleration oscillation decrease in exponential. Damping coefficient  $-b$  also decrease respecting the increase of temperature measurement. Measurement result at 100°C from lubricant SAE50 and gliserin sample are 14,7 cPosie and 13,98 cPoise which came near the laboratory result.

Keywords : dynamic viscosity coefficient, damped oscillating equation, Stokes equation, accelerometer

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
ORISINALITAS	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiii
<b>1. PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metode Penelitian	4
<b>2. TEORI DASAR</b>	<b>5</b>
2.1 Viskositas	5
2.2 Hukum Stokes	9
2.3 Gerak harmonik	10
2.3.1 Gerak Harmonik Pada Pegas	11
2.3.2 Gerak Harmonik Teredam	14
2.4 Hubungan Antara Gerak Harmonik Teredam Dengan Hukum Stokes Sebagai Dasar Penentuan Viskositas Cairan	17
2.5 Sensor <i>Accelerometer</i>	18

2.6	Mikrokontroler ATmega8	20
2.7	Komunikasi Serial	21
<b>3.</b>	<b>PERANCANGAN SISTEM</b>	<b>25</b>
3.1	Perancangan Sistem Mekanik Osilasi Pegas Vertikal	25
3.1.1	Pegas	26
3.1.2	Beban	26
3.1.3	Batang Penghubung dan Bola Pejal Logam	27
3.1.4	Wadah Cairan dan Pemanas	27
3.2	Perancangan Piranti Elektronika Pendeteksi Getaran	
	Sistem Pegas	27
3.2.1	Sensor Accelerometer	28
3.2.2	Rangkaian Minimum Sistem Mikrokontroler ATmega 8	32
3.2.3	Komunikasi Data Serial	34
3.3	Perancangan Perangkat Lunak	36
3.3.1	Pemrograman Mikrokontroler	36
3.3.2	Pemrograman LabView	37
<b>4.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN</b>	<b>40</b>
4.1	Kalibrasi Sensor Accelerometer	40
4.2	Osilasi Tanpa Redaman Cairan	42
4.3	Osilasi Tereadam Pada Beberapa Cairan dan Nilai Viskositasnya	45
4.3.1	Osilasi Tereadam Sampel Pelumas	45
4.3.2	Osilasi Tereadam Sampel Marine Fuel Oil (MFO)	52
4.3.3	Osilasi Tereadam Sampel Gliserin	59
<b>5.</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>68</b>
5.1	Kesimpulan	68
5.2	Saran	69
	<b>REFERENSI</b>	<b>70</b>
	<b>LAMPIRAN</b>	

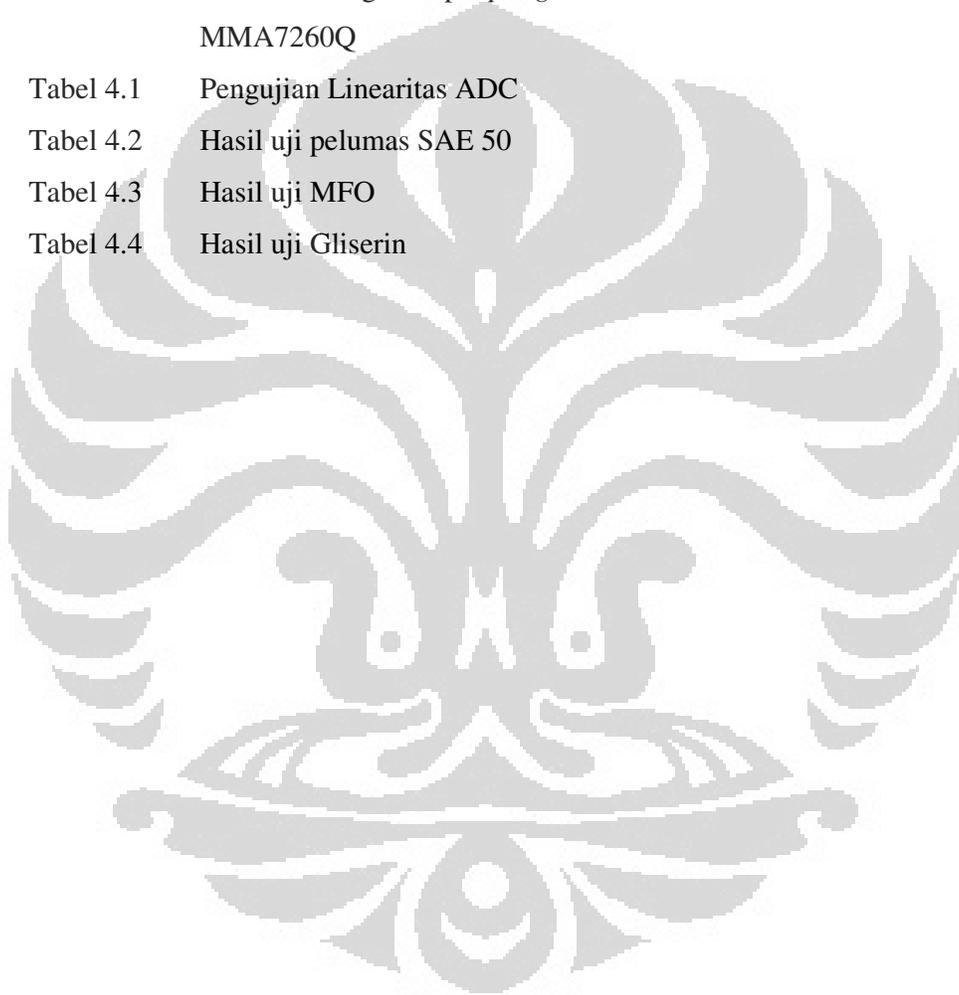
## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Konsep viskositas	5
Gambar 2.2	Shear stress dan gradien kecepatan	6
Gambar 2.3	Ilustrasi gerak harmonik	10
Gambar 2.4	Gerak harmonik sederhana	12
Gambar 2.5	Grafik 3 jenis osilasi teredam	16
Gambar 2.6	Struktur multi axis <i>capasitive accelerometer</i>	19
Gambar 2.7	Blok diagram ATmega8	20
Gambar 2.8	Konfigurasi pin konektor DB9	22
Gambar 2.9	Konfigurasi pin IC MAX232	23
Gambar 3.1	Sistem mekanik osilasi pegas	25
Gambar 3.2	Blok diagram sistem pengukuran viskositas	28
Gambar 3.3	Perubahan kapasitansi sebagai prinsip dasar accelerometer MMA7260	29
Gambar 3.4	Konfigurasi pin accelerometer MMA7260Q	29
Gambar 3.5	Modul DC-SS009	31
Gambar 3.6	Konfigurasi pin mikrokontroler ATmega8	33
Gambar 3.7	Minimum sistem mikrokontroler ATmega8	34
Gambar 3.8	Koneksi pin-pin IC MAX-232	35
Gambar 3.9	Diagram alur program Mikrokontroler	36
Gambar 3.10	Diagram alur program akuisisi data Labview	38
Gambar 3.11	Tampilan GUI dari program yang digunakan	39
Gambar 4.1	Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu x	40
Gambar 4.2	Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu y	41
Gambar 4.3	Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu z	41
Gambar 4.4	Gelombang osilasi sistem tanpa redaman cairan	43
Gambar 4.5	Kurva redaman sistem tanpa cairan	44
Gambar 4.6	Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C	46

Gambar 4.7	Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C	47
Gambar 4.8	Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 40°C	48
Gambar 4.9	Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 40°C	49
Gambar 4.10	Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 100°C	50
Gambar 4.11	Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 100°C	51
Gambar 4.12	Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C, 40°C dan 100°C	52
Gambar 4.13	Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu 27°C	53
Gambar 4.14	Kurva redaman sistem pada MFO suhu 27°C	54
Gambar 4.15	Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu 40°C	55
Gambar 4.16	Kurva redaman sistem pada MFO suhu 40°C	56
Gambar 4.17	Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu 100°C	57
Gambar 4.18	Kurva redaman sistem pada MFO suhu 100°C	58
Gambar 4.19	Kurva redaman sistem pada MFO suhu 27°C, 40°C dan 100°C	59
Gambar 4.20	Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 27°C	60
Gambar 4.21	Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 27°C	61
Gambar 4.22	Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 60°C	62
Gambar 4.23	Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 60°C	63
Gambar 4.24	Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 100°C	64
Gambar 4.25	Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 100°C	65
Gambar 4.26	Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 27°C, 60°C dan 100°C	66

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Deskripsi pin accelerometer MMA7260Q	30
Tabel 3.2	Kombinasi logika input <i>pin g-select</i> accelerometer MMA7260Q	30
Tabel 4.1	Pengujian Linearitas ADC	42
Tabel 4.2	Hasil uji pelumas SAE 50	53
Tabel 4.3	Hasil uji MFO	60
Tabel 4.4	Hasil uji Gliserin	67



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Viskositas atau kekentalan merupakan gaya gesek antara molekul-molekul yang menyusun suatu fluida. Biasa disebut juga sebagai gaya gesek internal dalam fluida tersebut. Molekul-molekul yang ada dalam fluida akan bergesekan ketika fluida tersebut mengalir atau ketika diberikan gaya. Salah satu contoh fluida adalah cairan. Cairan yang lebih cair memiliki viskositas yang lebih kecil dan biasanya lebih mudah untuk mengalir sedangkan cairan yang lebih kental memiliki viskositas yang lebih besar dan akan lebih sulit untuk mengalir. Ketika diberikan gaya untuk menggeser satu bagian cairan yang memiliki viskositas yang besar terhadap bagian yang lain dari cairan tersebut maka gaya yang dibutuhkan juga akan lebih besar dan sebaliknya pada cairan dengan viskositas yang lebih kecil gaya yang dibutuhkan juga lebih kecil.

Pada dunia industri pengukuran viskositas merupakan hal yang sangat penting. Salah satu industri yang sangat memperhatikan masalah viskositas adalah industri pelumas. Sedemikian pentingnya sehingga nilai viskositas dari suatu pelumas menjadi parameter pertama yang diukur di laboratorium industri pelumas. Tingkat kekentalan suatu pelumas akan menentukan penggunaan pelumas yang tepat pada mesin kendaraan. Aplikasi lain dari penentuan nilai viskositas adalah pada aliran cairan dalam pipa, aliran darah dalam pembuluh darah hingga erupsi lahar dari gunung berapi.

Pengukuran besar nilai viskositas cairan dapat dilakukan dengan dua cara yaitu secara kinematik (*kinematik viscosity*) dan secara dinamik (*dynamic viscosity*). Pengukuran secara kinematik adalah pengukuran viskositas berdasarkan gaya gesek saat cairan itu mengalir dan berdasarkan gravitasinya.

Yang termasuk metode pengukuran dengan cara ini adalah pengukuran viskositas dengan pipa kapiler (*capillary tube method*). Sedangkan pengukuran secara dinamik dilakukan dengan memberikan gaya dari luar pada cairan tersebut.

Beberapa metode yang termasuk metode pengukuran secara dinamik adalah metode benda jatuh (*falling body method*), metode putaran (*rotary method*), metode ultrasonik (*ultrasonic method*) dan metode osilasi (*oscillating method*). Masing-masing metode tersebut memiliki kelebihan dan kekurangan dimana penggunaan metode-metode tersebut juga disesuaikan dengan cairan yang diukur viskositasnya untuk mendapatkan hasil pengukuran yang baik.

Dari banyak metode pengukuran viskositas di atas, pada tugas akhir ini akan dilakukan perancangan sistem pengukuran viskositas dengan metode osilasi karena metode ini masih terbilang jarang digunakan dibandingkan dengan metode putaran atau metode pipa kapiler. Karena osilasi yang terjadi adalah osilasi teredam maka bisa disebut juga sebagai metode osilasi teredam (*damped oscillation method*).

Pengukuran viskositas dengan metode osilasi teredam pada tugas akhir ini dilakukan dengan menggunakan pegas yang diberi beban, pada ujungnya diberi bola pejal yang akan berada dalam cairan yang akan diukur viskositasnya. Pemberian gaya pada sistem pegas dan beban akan menimbulkan gerakan harmonik teredam yang besarnya redaman akan tergantung dari viskositas cairan yang diukur.

## 1.2 Perumusan Masalah

Saat sistem pegas diberikan gaya berupa simpangan maka akan timbul gaya pemulih sesuai dengan hukum Hooke sebesar  $F = -k.y$ . Besar gaya  $F$  berbanding lurus dengan besarnya simpangan yang diberikan sedangkan tanda negatif menandakan bahwa gaya pemulih ini berlawanan arah dengan simpangan yang diberikan. Sistem ini kemudian akan berosilasi dengan gerakan harmonik sederhana berdasarkan persamaan  $y = A \sin(\omega t + \phi)$  dimana  $\omega = \sqrt{k/m}$  dengan  $k$  = konstanta pegas.

Gerakan harmonik yang terjadi dalam pengukuran viskositas ini adalah gerakan harmonik yang teredam dimana besarnya redaman dipengaruhi oleh nilai koefisien viskositas dari cairan yang diukur.

Persamaan gelombang teredam  $y = Ae^{-bt} \sin(\omega t + \emptyset)$  mengandung nilai redaman  $-b$ , yang bila dihubungkan dengan persamaan Stokes  $F_d = -6\pi\eta r v$  akan didapatkan nilai viskositas dinamik dari cairan.

Besarnya percepatan dari beban yang digantung di bawah pegas akan dideteksi oleh *accelerometer* sebagai sensor percepatan. Hasilnya kemudian dimasukkan ke dalam persamaan untuk kemudian didapatkan koefisien viskositasnya.

### 1.3 Tujuan Penelitian

Berikut ini adalah beberapa hal yang menjadi tujuan penelitian.

- Membuat mekanika sistem osilasi pegas dengan cairan sebagai redamannya
- Membuat piranti elektronika yang mampu mendeteksi posisi dan percepatan beban pada pegas dan mengirimnya ke computer
- Membuat piranti lunak yang mampu menampilkan data percepatan dan posisi beban pada pegas
- Pada akhirnya penelitian ini diharapkan mampu memperlihatkan hubungan antara persamaan osilasi teredam, persamaan viskositas dan koefisien viskositas cairan

### 1.4 Batasan Masalah

Pada tugas akhir ini masalah dibatasi pada pembuatan mekanika osilasi, perancangan rangkaian mikrokontroller dan pemrogramannya serta pengolahan data hasil percobaan berdasarkan persamaan-persamaan fisika tentang gerak harmonik teredam dan persamaan Stokes.

## 1.5 Metode Penelitian

### 1. Studi Literatur

Studi literatur digunakan untuk memperoleh informasi tentang teori-teori dasar sebagai sumber penulisan skripsi.

Informasi dan pustaka yang berkaitan dengan masalah ini diperoleh dari buku-buku literatur, penjelasan yang diberikan dosen pembimbing, rekan-rekan mahasiswa, internet, *data sheet*, dan sumber-sumber lainnya.

### 2. Perancangan dan Pembuatan Sistem

Perancangan alat merupakan tahap awal penulis untuk mencoba memahami, menerapkan, dan menggabungkan semua literatur yang diperoleh maupun yang telah dipelajari untuk melengkapi sistem serupa yang pernah dikembangkan, dan selanjutnya penulis dapat merealisasikan sistem sesuai dengan tujuan.

### 3. Uji Sistem dan Pengambilan Data

Uji sistem ini berkaitan dengan pengujian sistem yang telah dibuat apakah sudah sesuai dengan yang diharapkan. Selanjutnya dilakukan pengambilan data-data yang dibutuhkan untuk diolah lebih lanjut guna memperoleh hasil perhitungan.

### 4. Analisa Data

Data hasil pengukuran kemudian diolah sedemikian rupa berdasarkan persamaan-persamaan fisika yang menjadi dasar penulisan skripsi ini untuk mendapatkan hasil yang menjadi tujuan penulisan skripsi ini.

### 5. Kesimpulan dan Saran

Dari hasil pengukuran dan pengolahan data kemudian ditarik kesimpulan dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

## BAB 2

### TEORI DASAR

#### 2.1 Viskositas

Viskositas atau kekentalan merupakan gaya gesek antara molekul-molekul yang menyusun suatu fluida. Biasa disebut juga sebagai gaya gesek internal dalam fluida tersebut. Molekul-molekul yang ada dalam fluida akan bergesekan ketika fluida tersebut mengalir atau ketika diberikan gaya. Salah satu contoh fluida adalah cairan. Cairan yang lebih cair memiliki viskositas yang lebih kecil dan biasanya lebih mudah untuk mengalir sedangkan cairan yang lebih kental memiliki viskositas yang lebih besar dan akan lebih sulit untuk mengalir. Ketika diberikan gaya untuk menggeser satu bagian cairan yang memiliki viskositas yang besar terhadap bagian yang lain dari cairan tersebut maka gaya yang dibutuhkan juga akan lebih besar dan sebaliknya pada cairan dengan viskositas yang lebih kecil gaya yang dibutuhkan juga lebih kecil. Gambaran lebih jelas tentang konsep viskositas dapat dijelaskan dengan meninjau pada gambar 2.1.

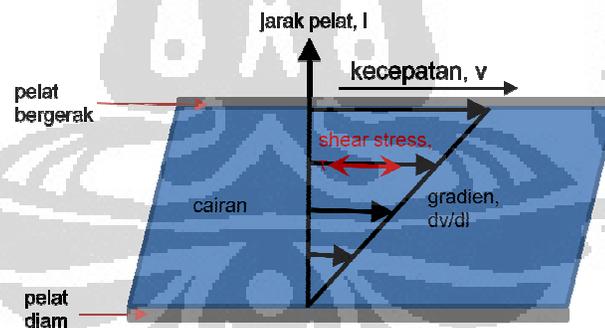


Gambar 2.1. Konsep viskositas

Pada gambar di atas lapisan cairan tipis ditempatkan di antara 2 pelat. Antara pelat dan cairan terdapat gaya adhesi atau gaya tarik menarik antara

molekul yang tidak sejenis. Sedangkan di dalam cairan sendiri terdapat gaya kohesi atau gaya tarik menarik antara molekul yang. Gaya adhesi bekerja antara pelat dan lapisan fluida yang menempel dengan pelat (molekul fluida dan molekul pelat saling tarik menarik) sedangkan gaya kohesi bekerja di antara selaput fluida (molekul fluida saling tarik menarik).

Mula-mula pelat dan lapisan cairan dalam keadaan diam (gambar 2.1.a), setelah itu pelat yang ada di sebelah atas ditarik ke kanan dengan gaya  $F$  sedangkan pelat yang ada di sebelah bawah dalam keadaan diam. Besar gaya tarik diatur sedemikian rupa sehingga pelat yang ada di sebelah atas bergeser ke kanan dengan laju tetap sebesar  $v$ . Karena ada gaya adhesi yang bekerja antara pelat bagian atas dengan bagian cairan yang bersinggungan dengan pelat, maka bagian cairan yang bersinggungan dengan pelat bagian atas itu ikut bergeser ke kanan. Dan karena ada gaya kohesi antara molekul cairan, maka cairan pada bagian atas akan menarik cairan yang ada di sebelah bawahnya sehingga cairan yang berada di sebelah bawah juga akan ikut bergeser ke kanan. Bagian molekul cairan yang tertarik tadi akan menarik bagian cairan yang berada di bawahnya lagi, begitu seterusnya.



**Gambar 2.2.** Shear stress dan gradien kecepatan

Sementara pelat bagian bawah dalam keadaan diam dan ada gaya adhesi antara pelat bagian bawah dengan cairan yang bersentuhan dengan pelat maka bagian cairan yang bersinggungan dengan pelat bagian bawah juga diam dan akan

menahan bagian lain dari cairan yang ada di atasnya, begitu seterusnya sehingga kondisi lapisan cairan tadi dapat dilihat seperti pada gambar 2.1.b. Hal ini menyebabkan laju cairan bervariasi dimana cairan yang berada pada bagian atas bergerak lebih cepat dari pada cairan di bagian bawah. Pada kondisi tersebut akan timbul gaya internal pada molekul cairan tersebut (*shear stress*) dimana hubungan antara *shear stress* dengan gradien kecepatan ditunjukkan pada gambar 2.2. Dari gambar terlihat bahwa *shear stress*,  $\tau$  berbanding lurus dengan gradient kecepatan,

$$\tau \propto \frac{dv}{dl} \quad (2.1)$$

Jika diasumsikan pelat memiliki luas yang sangat besar dengan luas area  $A$  dan gaya diberikan pada pelat bagian atas maka cairan bagian atas akan ikut bergerak karena gaya tarik pada pelat dengan kecepatan  $v$ . Gaya yang bekerja pada pelat akan berbanding lurus dengan luas pelat dan kecepatan cairan  $v$  serta berbanding terbalik dengan jarak pelat  $l$ . Jika hubungan tersebut dituliskan dalam bentuk matematis :

$$F \propto A \frac{v}{l} \quad (2.2)$$

Seperti telah diketahui bahwa cairan yang lebih cair akan lebih mudah mengalir dan sebaliknya cairan yang lebih kental akan lebih sulit mengalir. Tingkat kekentalan cairan ini dinyatakan dengan koefisien viskositas. Sehingga jika cairan makin kental maka gaya tarik yang dibutuhkan juga makin besar. Dalam hal ini, gaya tarik berbanding lurus dengan koefisien kekentalan. Sehingga persamaan di atas ditulis sebagai berikut :

$$F \propto \eta A \frac{v}{l} \quad (2.3)$$

$$\eta = \frac{Fl}{Av} \quad (2.4)$$

Dimana :

$\eta$  = koefisien viskositas ( $\text{Ns/m}^2$ ) atau ( $\text{kg/m.s}$ )

$F$  = gaya ( $\text{kg.m/s}^2$ )

$l$  = jarak pelat (m)

$A$  = luas pelat ( $\text{m}^2$ )

$v$  = kecepatan pelat (m/s)

Satuan Sistem Internasional (SI) untuk koefisien viskositas adalah  $\text{kg/(m.s)}$  atau ( $\text{Ns}/\text{m}^2$ ). Dimana  $1 \text{ kg/(m.s)} = 1 \text{ Ns/m}^2 = 1 \text{ Pa.s}$  (Pascal sekon). Sedangkan satuan dalam CGS (centimeter gram sekon) adalah  $\text{gram/(cm.s)}$ . Viskositas juga sering dinyatakan dalam satuan Poise (P) atau centiPoise (cPoise), dimana  $1 \text{ kg/(m.s)} = 1 \text{ Ns/m}^2 = 10 \text{ Poise} = 10^3 \text{ cPoise}$ .

Koefisien viskositas di atas adalah koefisien viskositas dinamik, dimana besarnya koefisien didapatkan karena adanya pengaruh gaya dari luar. Selain koefisien viskositas dinamik dikenal pula koefisien viskositas kinematik dimana koefisien ini diperoleh karena pengaruh gesekan cairan dan gaya gravitasi. Untuk mengetahui besarnya koefisien viskositas kinematik perlu diketahui terlebih dahulu besarnya massa jenis cairan yang akan di ukur. Dimana koefisien viskositas kinematik adalah perbandingan antara koefisien viskositas dinamik suatu cairandengan masaa jenisnya.

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.5)$$

Dimana :

$v$  = koefisien viskositas kinematik (cSt) atau  $\text{m}^2/\text{s}$

$\eta$  = koefisien viskositas dinamik ( $\text{Ns/m}^2$ ) atau ( $\text{kg/ms}$ )

$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg/m}^3$ )

## 2.2 Hukum Stokes

Bila sebuah benda digerakkan pada permukaan zat padat yang kasar maka benda tersebut akan mengalami gaya gesekan. Analog dengan hal itu, maka sebuah benda yang bergerak dalam zat cair yang kental juga akan mengalami gaya gesekan/gaya pengereman (*drag force*) yang disebabkan oleh kekentalan zat cair tersebut. Dalam hal ini gaya gesekan pada benda yang bergerak dalam zat cair kental dapat kita ketahui melalui besar kecepatan benda. Besar gaya gesekan pada benda yang bergerak dalam cairan disamping tergantung pada koefisien kekentalan  $\eta$  juga tergantung pada bentuk bendanya. Menurut hukum Stokes, gaya gesekan yang dialami oleh sebuah bola pejal yang bergerak dalam zat cair yang kental adalah :

$$F_d = -6\pi\eta Rv \quad (2.6)$$

Dimana :

$F_d$  = gaya gesek (drag force) (kg.m/s<sup>2</sup>)

$\eta$  = koefisien kekentalan (Ns/m<sup>2</sup>)

$R$  = jari-jari bola pejal (m)

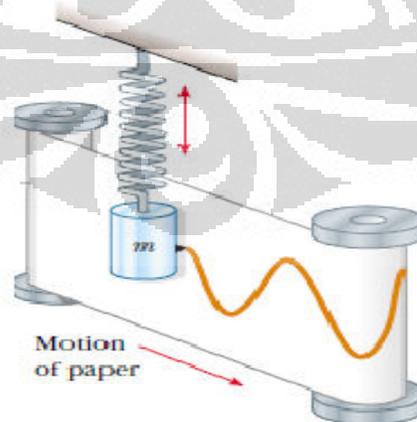
$v$  = kecepatan gerak benda (m/s)

Persamaan hukum Stokes tersebut dalam penerapannya memerlukan syarat sebagai berikut :

- Ruang tempat cairan tidak terbatas (ukurannya jauh lebih besar dari ukuran bola pejal)
- Tidak terjadi aliran turbuensi dalam cairan
- Kecepatan  $v$  tidak besar

### 2.3 Gerak Harmonik

Jika sebuah benda diberikan gaya yang menyebabkan benda tersebut bergeser atau menyimpang pada jarak tertentu dari titik awal maka besar simpangannya akan sebanding dengan gaya yang diberikan. Jika kemudian gaya ini dihilangkan dan benda tersebut kembali ke posisi semula (titik kesetimbangan) dan kemudian bergerak ke arah berlawanan dan kembali lagi ke titik kesetimbangan dan seterusnya maka akan terjadi gerakan periodik yang biasa disebut juga gerakan harmonik, osilasi atau getaran. Dengan kata lain setiap gerak yang terjadi secara berulang melalui titik kesetimbangan dalam lintasan yang sama disebut gerak periodik dan karena gerakan ini terjadi secara teratur dalam interval waktu tertentu maka disebut osilasi. Beberapa besaran pada gerak harmonik ini adalah Amplitudo ( $A$ ) yaitu simpangan terbesar yang dihitung dari titik kesetimbangan dari sebuah gerak harmonik, Periode ( $T$ ) yaitu waktu yang digunakan untuk satu kali getaran (disebut satu getaran jika benda bergerak dari titik di mana benda tersebut mulai bergerak dan kembali lagi ke titik tersebut), satuan periode adalah sekon atau detik dan Frekuensi ( $f$ ) adalah banyaknya getaran yang terjadi dalam satu detik. Satuan frekuensi adalah 1/sekon atau  $s^{-1}$ . 1/sekon atau  $s^{-1}$  disebut juga Hertz. Gerakan harmonik dapat diilustrasikan seperti pada gambar 2.3.



**Gambar 2.3.** Ilustrasi gerak harmonik

Sebuah sistem pegas yang berosilasi akan membentuk grafik seperti pada gambar di atas. Jika ujung pena yang membentuk grafik dimisalkan sebagai sebuah partikel yang bergerak maka posisi partikel tersebut dapat dinyatakan dengan persamaan

$$y = A \sin (\omega t + \phi) \quad (2.7)$$

dimana  $y$  adalah posisi dari partikel,  $A$  adalah amplitudo yang menunjukkan pergeseran maksimum dari partikel dan  $\omega$  adalah frekuensi angular dengan satuan radian per detik. Persamaan  $y$  di atas akan berulang secara periodik dengan interval  $\omega t$  atau  $\omega t + 2\pi$  rad. Perioda  $T$  dari gerakan tersebut adalah ketika partikel bergerak dalam satu siklus penuh. Sehingga dapat dikatakan bahwa partikel tersebut telah membuat satu osilasi. Dari sini dapat disimpulkan bahwa nilai  $x$  pada waktu  $t$  sama dengan nilai  $x$  pada waktu  $t + T$ , sehingga :

$$\omega t + 2\pi = \omega(t + T) \quad (2.8)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.9)$$

Sedangkan frekuensinya

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.10)$$

$$\omega = 2\pi f \quad (2.11)$$

### 2.3.1 Gerak Harmonik Sederhana pada Pegas

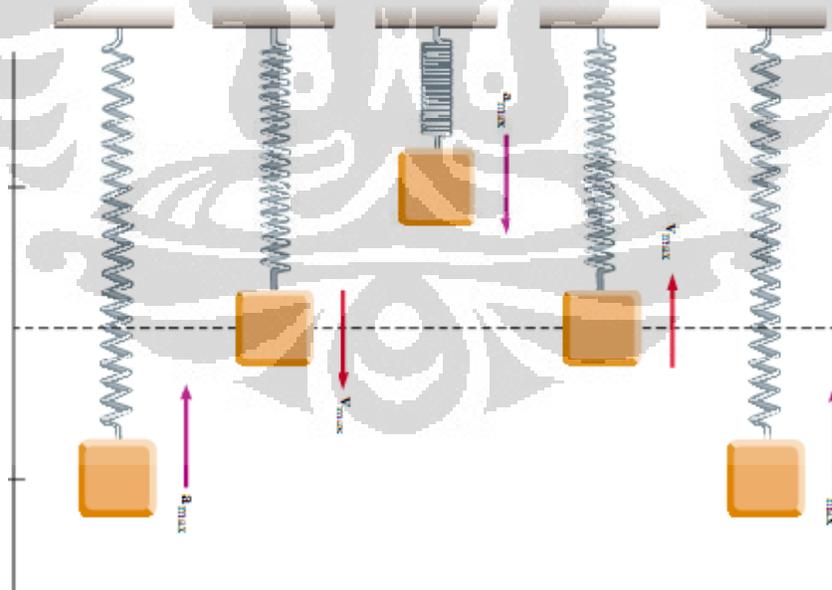
Salah satu contoh gerak harmonik sederhana adalah gerakan pegas dalam posisi vertikal yang diujungnya diberi beban  $m$  dimana gaya gesek dengan udara diabaikan. Sistem tersebut digambarkan seperti pada gambar 2.4. Ketika pegas tidak mendapatkan gaya maka benda  $m$  berada di titik  $y = 0$ , yang disebut sebagai

titik kesetimbangan sistem. Ketika pegas diberikan gaya dengan ditarik maka pada pegas akan timbul gaya pemulih (*restoring force*)  $F_s$  yang besarnya berbanding lurus dengan simpangan  $y$  dan berlawanan arah dengan arah gaya pada pegas. Jika dituliskan dalam bentuk matematis :

$$F_s = -ky \quad (2.12)$$

Persamaan di atas sebagai persamaan pegas dan merupakan hukum Hooke dimana  $k$  adalah konstanta pegas dan  $y$  adalah simpangan. Tanda negatif menunjukkan bahwa gaya pemulih  $F_s$  mempunyai arah berlawanan dengan simpangan  $y$ . Ketika pegas di tarik ke bawah maka  $y$  bernilai positif, tetapi arah  $F_s$  ke atas (berlawanan arah dengan simpangan  $y$ ) sehingga gaya  $F_s$  selalu bekerja berlawanan arah dengan arah simpangan  $y$ .

Konstanta pegas  $k$  berkaitan dengan elastisitas sebuah pegas. Semakin besar konstanta pegas, semakin besar gaya yang diperlukan untuk menekan atau meregangkan pegas. Semakin kecil konstanta pegas, semakin kecil gaya yang diperlukan untuk meregangkan pegas.



**Gambar 2.4.** Gerak harmonik sederhana

Jika persamaan 2.12 ditinjau dengan hukum kedua Newton :

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = -ky \quad (2.13)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + ky = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (2.15)$$

Jika  $k/m = \omega^2$  maka persamaan 2.15 menjadi

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 y = 0 \quad (2.16)$$

Persamaan 2.16 ditulis dalam bentuk lain

$$D^2 y + \omega^2 y = 0 \quad (2.17)$$

$$(D^2 + \omega^2)y = 0 \quad (2.18)$$

Solusi umum dari persamaan diferensial orde dua di atas adalah

$$y = A \sin (\omega t + \phi) \quad (2.19)$$

yang merupakan persamaan posisi dari benda yang bergerak secara harmonik. Jika persamaan tersebut diturunkan terhadap waktu diperoleh persamaan kecepatan dari benda dan jika diturunkan lagi maka akan diperoleh persamaan percepatan dari benda.

$$\frac{dy}{dt} = \omega A \cos (\omega t + \phi) \quad (2.20)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\omega A \sin (\omega t + \phi) \quad (2.21)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + \omega^2 x = 0 \quad (2.22)$$

Frekuensi  $f$  dan perioda  $T$  dari sistem pegas tersebut adalah :

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.23)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.24)$$

### 2.3.2 Gerak Harmonik Teredam

Gerak harmonik teredam terjadi ketika energi mekanik yang ada pada gerak harmonik lama kelamaan menghilang sehingga akhirnya gerakan tersebut berhenti. Hal ini terjadi karena adanya gaya hambat (*retarding force*) yang terjadi pada sistem yang bergerak. Gaya ini bisa berupa gaya gesek dengan udara atau dengan medium lain. Gaya hambat ini arahnya berlawanan dengan arah gerakan benda. Gaya hambat ini dinotasikan dengan  $R = r \frac{dy}{dt}$  dimana  $r$  adalah koefisien redaman. Dengan gaya pemulih dari sistem  $-ky$  maka persamaan sistem dapat ditulis :

$$\sum F = -ky - r \frac{dy}{dt} = m \frac{d^2y}{dt^2} \quad (2.25)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + r \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{r}{m} \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (2.27)$$

Jika  $r/m = 2b$  dan  $k/m = \omega_0^2$ , persamaan 2.27 menjadi

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2b \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (2.28)$$

Jika ditulis dalam bentuk lain

$$(D^2 + 2bD + \omega_0^2)y = 0 \quad (2.29)$$

Dimana akar-akar dari persamaan tersebut adalah

$$D = \frac{-2b \pm \sqrt{4b^2 - 4\omega_0^2}}{2} = -b \pm \sqrt{b^2 - \omega_0^2} \quad (2.30)$$

Nilai  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  merupakan frekuensi osilasi dari sistem gerak harmonik teredam dimana besar nilai tersebut dapat bernilai positif, nol atau negatif yang akan memberikan respon frekuensi yang berbeda.

- a. Jika  $b^2 < \omega_0^2$  maka sistem dikatakan sebagai *underdamped oscillation* dimana pada kondisi ini osilasi akan terjadi akan tetapi amplitudonya akan menurun terhadap waktu. Sehingga  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  bernilai imajiner. Misalkan nilai imajiner dari  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  adalah  $i\omega$ , maka akar-akar persamaan 2.29 menjadi  $(-b \pm i\omega)$ . Sehingga solusi umum persamaan 2.29 untuk kondisi ini adalah :

$$y = Ae^{-bt} \sin(\omega t + \emptyset) \quad (2.31)$$

- b. Jika  $b^2 = \omega_0^2$  maka sistem dikatakan sebagai *critically damped oscillation*. Pada kondisi ini sistem tidak berosilasi dan akan mendekati titik kesetimbangan dari suatu titik diluar titik kesetimbangan. Sehingga  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  bernilai nol dan akar-akar persamaan 2.29 bernilai sama yaitu  $b$ . Maka solusi umum persamaan 2.29 untuk kondisi ini adalah :

$$y = (A + Bt)e^{-bt} \quad (2.32)$$

- c. Jika  $b^2 > \omega_0^2$  maka sistem dikatakan sebagai *overdamped oscillation*. Pada kondisi ini sistem tidak berosilasi akan tetapi akan kembali kepada titik kesetimbangan. Sehingga  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  akan bernilai positif atau merupakan bilangan real. Maka solusi umum dari persamaan 2.29 untuk kondisi ini adalah :

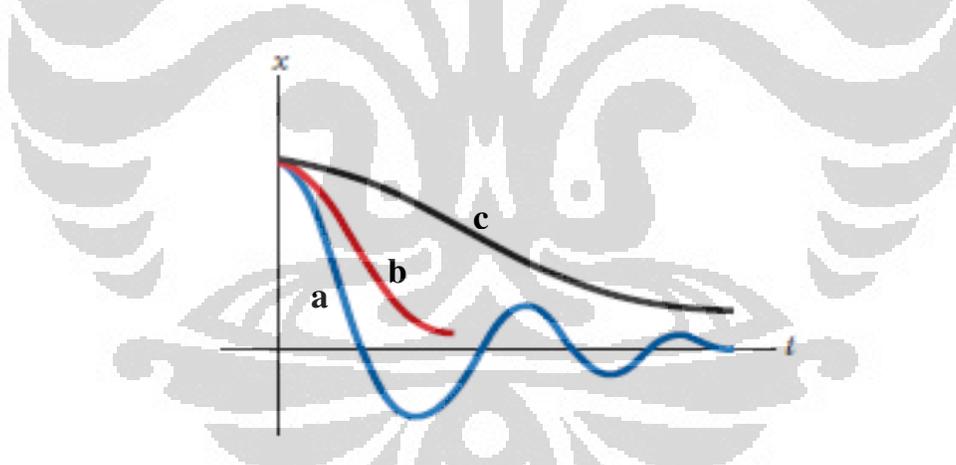
$$y = Ae^{-\lambda t} + Be^{-\mu t} \quad (2.33)$$

dimana :

$$\lambda = b + \sqrt{b^2 - \omega_0^2}$$

$$\mu = b - \sqrt{b^2 - \omega_0^2}$$

Grafik dari ketiga macam jenis osilasi teredam ini diperlihatkan dalam gambar 2.5.



**Gambar 2.5** Grafik 3 jenis osilasi teredam, a). underdamped oscillation, b). critically damped oscillation, c). overdamped oscillation

## 2.4 Hubungan Antara Gerak Harmonik Teredam Dengan Hukum Stokes Sebagai Dasar Penentuan Viskositas Cairan

Dari persamaan 2.26 (ditulis lagi sebagai persamaan 2.34)

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + r \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (2.34)$$

Gaya redaman dari persamaan 2.34 adalah suku  $r \frac{dy}{dt}$  dimana  $r$  adalah sebagai koefisien redaman.

Dari Persamaan hukum Stokes (persamaan 2.6, ditulis lagi sebagai persamaan 2.35)

$$F_d = -6\pi\eta Rv \quad (2.35)$$

Jika  $-6\pi\eta R$  adalah sebagai koefisien redaman dan  $v$  adalah kecepatan, maka dapat diasumsikan bahwa

$$r \frac{dy}{dt} = 6\pi\eta Rv \quad (2.36)$$

Dimana  $\frac{dy}{dt} = v$  yang sama-sama merupakan kecepatan, sehingga

$$r = 6\pi\eta R \quad (2.37)$$

Persamaan osilasi teredam pada persamaan 2.34 memiliki solusi umum seperti persamaan 2.31 (ditulis lagi sebagai persamaan 2.38) yang merupakan persamaan posisi dari benda yang berosilasi teredam.

$$y = Ae^{-bt} \sin(\omega t + \emptyset) \quad (2.38)$$

Pada persamaan 2.38,  $(-b)$  adalah sebagai koefisien redaman yang menunjukkan besarnya redaman secara eksponensial. Jika persamaan 2.38 diturunkan dua kali terhadap waktu diperoleh persamaan percepatan dari benda yang berosilasi teredam.

$$\dot{y} = Ae^{-bt}(-b) \sin(\omega t + \phi) + Ae^{-bt} \omega \cos(\omega t + \phi) \quad (2.39)$$

$$\begin{aligned} \ddot{y} = Ae^{-bt}b^2 \sin(\omega t + \phi) - Ae^{-bt}b\omega \cos(\omega t + \phi) \\ - Ae^{-bt}b\omega \cos(\omega t + \phi) - Ae^{-bt}\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \end{aligned} \quad (2.40)$$

$$\ddot{y} = Ae^{-bt}[(b^2 - \omega^2) \sin(\omega t + \phi) - 2b\omega \cos(\omega t + \phi)] \quad (2.41)$$

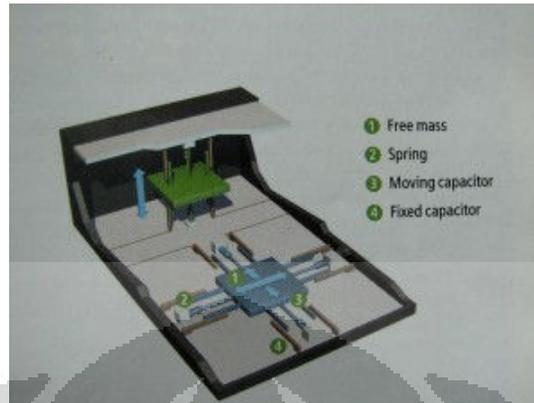
Dari persamaan 2.39 sampai 2.41 terlihat bahwa koefisien redaman ( $-b$ ) adalah sama. Dengan memperoleh nilai  $b$  dari data pengukuran dapat kita peroleh besarnya  $r$  berdasarkan persamaan

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m} \quad (2.42)$$

Sehingga nilai koefisien viskositas dapat diperoleh dengan persamaan 2.37.

## 2.5 Sensor Accelerometer

Sensor accelerometer adalah piranti yang dapat mengukur perubahan percepatan yang terjadi, juga bisa digunakan untuk mendeteksi dan mengukur getaran. Accelerometer juga dapat membandingkan percepatan yang terjadi terhadap percepatan gravitasi. Accelerometer mampu mendeteksi gerakan walau gerakan tersebut terjadi sangat sedikit, mengukur kemiringan sampai mendeteksi terjadinya getaran terkecil dari alat musik. Di dalam struktur sensor accelerometer terdapat rangkaian yang terintegrasi yang dapat mengakibatkan perubahan muatan listrik jika sensor digerakan. Rangkaian ini bisa dibangun dengan prinsip perubahan resistansi bahan, perubahan kapasitansi bahan atau perubahan suhu akibat terjadinya percepatan tergantung jenisnya dan pabrikan masing-masing produk. Gambar 2.6 memperlihatkan contoh struktur dari *capacitive accelerometer*.



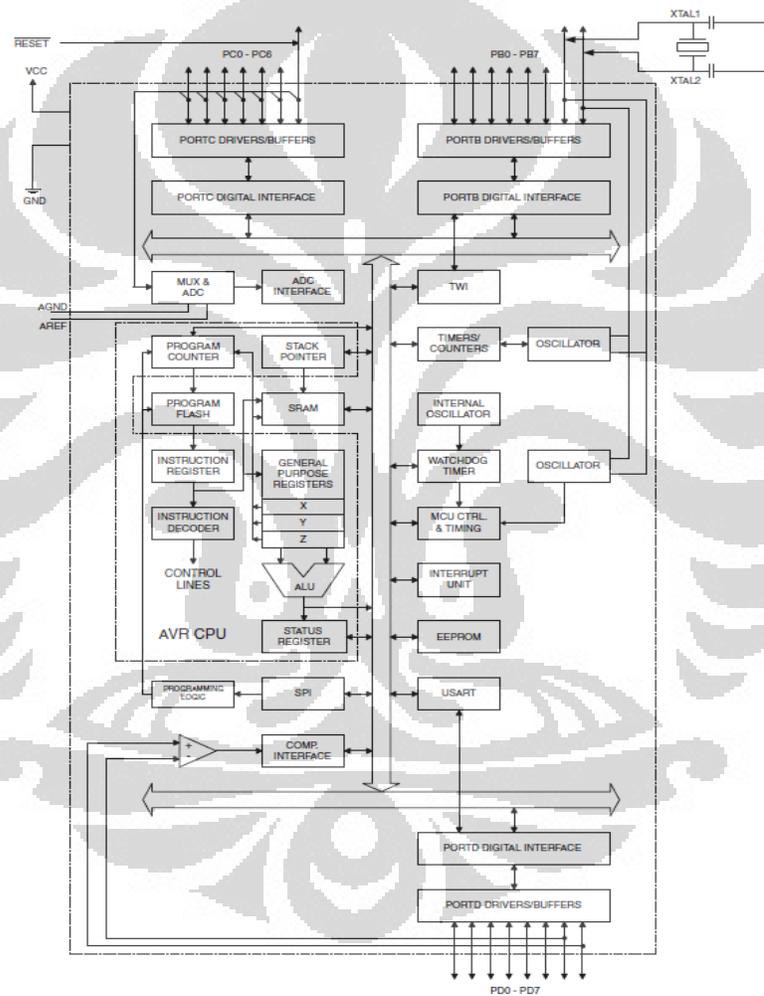
**Gambar 2.6** Struktur multi axis *capasitive accelerometer*

Output dari sensor accelerometer ada yang berupa tegangan analog ada pula yang berupa data digital. Besarnya percepatan yang dapat diukur juga bervariasi tergantung dari tipe dan pabrik pembuatnya. Beberapa hal yang biasanya dijadikan pertimbangan dalam memilih sensor accelerometer adalah *dynamic range* yaitu batas pengukuran dari accelerometer tersebut. Sensitivitas yaitu respon perubahan output terhadap perubahan input. Sensitivitas akan menunjukkan kemampuan accelerometer mendeteksi perubahan gerakan atau percepatan. Hal lainnya adalah sumbu ukur (*sensitive axis*) yaitu berapa banyak sumbu atau bidang pengukuran yang dapat dideteksi perubahannya. Accelerometer dengan 2 axis hanya dapat mengukur perubahan pada sumbu x dan y sementara accelerometer dengan 3 axis dapat mengukur sumbu x, y dan z. Massa dari accelerometer juga menjadi pertimbangan dalam pemilihan jenis accelerometer yang digunakan.

Percepatan di ukur dalam unit satuan  $g$ , dimana notasi  $g$  menunjukkan besarnya percepatan untuk gravitasi di bumi yaitu  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

## 2.6 Mikrokontroler ATmega8

ATmega8 adalah mikrokontroler 8 bit CMOS daya rendah berbasis arsitektur AVR buatan Atmel. ATmega8 mampu mengeksekusi 1MIPS per MHz sehingga memungkinkan penggunaannya mengoptimalkan konsumsi daya dan kecepatan proses instruksi. AVR memiliki banyak instruksi set dan 32 general purpose register.



**Gambar 2.7** Blok diagram ATmega8

Semua register terhubung langsung dengan Arithmetic Logic Unit (ALU) sehingga memungkinkan dua buah register yang berlainan di akses dengan menggunakan satu instruksi yang di eksekusi dengan satu clock pulsa.

ATmega8 menyediakan beberapa fasilitas diantaranya 8Kbyte In-System Programable Flash dengan kemampuan *read while write*, 512 byte EEPROM, 1 Kbyte SRAM, 23 line general purpose I/O, 32 general purpose register, tiga buah flexible timer/counter dengan compare modes, internal dan eksternal interup, serial programmable USART, 6 chanel ADC dengan akurasi 10 bit dan programmable watchdog timer dengan internal oscillator. Mikrokontroler ini dibuat dengan menggunakan tehnologi high density non-volatile memory. Flash program memory dapat di program secara In-System melalui SPI serial interface. Gambar blok diagram dari ATmega8 dapat dilihat pada gambar 2.7.

## 2.7 Komunikasi Serial

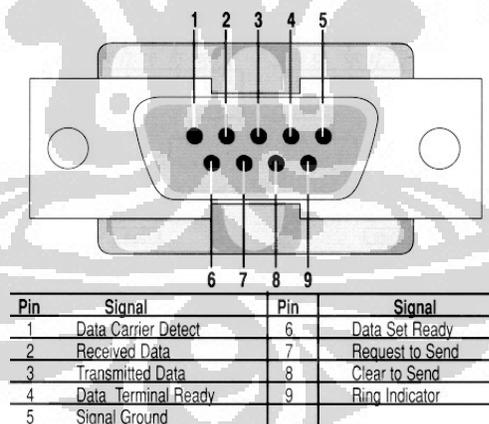
Dalam komunikasi data serial data dikirim dalam bentuk pulsa listrik kontinyu yang disebut bit. Pengiriman bit data ini dilakukan bit per bit melalui suatu kanal komunikasi. Ada tiga metode yang di jumpai pada komunikasi data serial yaitu *simplex*, *half duplex* dan *full duplex*. Pada transmisi data *simplex*, data dikirimkan hanya dalam satu arah saja. Pada *half duplex* data dapat dikirim dalam dua arah secara bergantian. Sedangkan pada *full duplex* data dapat dikirim dalam dua arah secara bersamaan.

Dalam komunikasi data serial ada dua metode dasar yang digunakan yaitu komunikasi serial sinkron dan komunikasi serial asinkron. Komunikasi serial sinkron adalah komunikasi dimana hanya ada satu pihak yaitu pengirim atau penerima yang menghasilkan clock dan data mengirimkan clock tersebut bersama-sama dengan data. Sedangkan pada komunikasi serial asinkron antara pengirim dan penerima keduanya menghasilkan clock dan hanya data yang ditransmisikan. Agar data yang dikirim sama dengan data yang diterima maka kedua frekuensi clock harus sama dan harus terdapat sinkronisasi. Setelah ada sinkronisasi pengirim akan mengirimkan datanya sesuai dengan frekuensi clock penerima.

Perangkat komunikasi serial dibagi menjadi dua bagian yaitu *Data Communication Equipment (DCE)* dan *Data Terminal Equipment (DTE)*. Kecepatan transfer data harus sama antara pengirim dan penerima karena jika tidak sama akan terjadi over flow. Kecepatan transmisi transfer data sering disebut *baudrate*.

Port komunikasi serial menggunakan level RS-232, RS (*Recommended Standard*) dikeluarkan oleh EIA (*Electronics Industry Association*) dengan ketentuan level tegangan sebagai berikut :

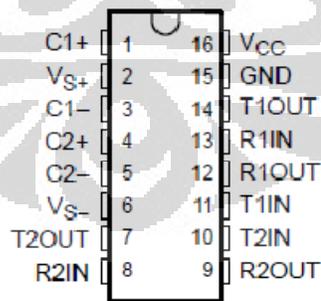
1. “Space” (logika 0) ialah tegangan antara + 3 hingga +25 V.
2. “Mark” (logika 1) ialah tegangan antara –3 hingga –25 V.
3. Daerah tegangan antara -3 Volt sampai +3 Volt adalah invalid level, yaitu daerah tegangan yang tidak memiliki level logika pasti sehingga harus dihindari. Demikian juga level tegangan dibawah -25 Volt dan diatas +25 Volt juga harus dihindari karena bisa merusak line driver pada saluran RS232
4. Arus hubungan singkat tidak boleh melebihi 500mA.



**Gambar 2.8.** Konfigurasi pin konektor DB9

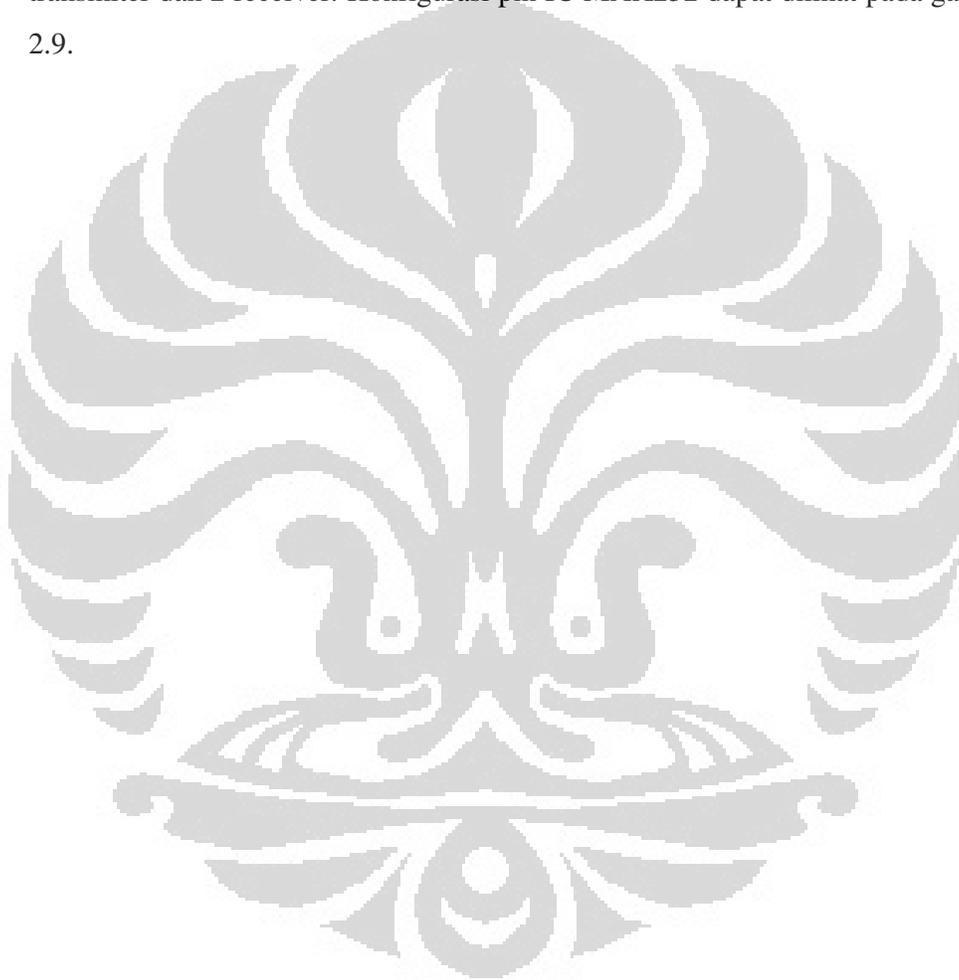
Untuk melakukan komunikasi serial antara mikrokontroller dengan PC dibutuhkan port atau konektor sebagai saluran data. Port yang digunakan untuk komunikasi ini adalah DB9. Gambar 2.8 memperlihatkan konfigurasi pin dari konektor DB9. Keterangan mengenai fungsi saluran RS232 pada konektor DB-9 adalah sebagai berikut :

1. Received Line Signal Detect/Data Carrier Detect, dengan saluran ini DCE memberitahukan ke DTE bahwa pada terminal masukan ada data masuk.
2. Receive Data, digunakan DTE menerima data dari DCE.
3. Transmit Data, digunakan DTE mengirimkan data ke DCE.
4. Data Terminal Ready, pada saluran ini DTE memberitahukan kesiapan terminalnya.
5. Signal Ground, saluran ground
6. DCE Ready / Data Set Ready, sinyal aktif pada saluran ini menunjukkan bahwa DCE sudah siap.
7. Request to Send, dengan saluran ini DCE diminta mengirim data oleh DTE.
8. Clear to Send, dengan saluran ini DCE memberitahukan bahwa DTE boleh mulai mengirim data.
9. Ring Indicator, pada saluran ini DCE memberitahukan ke DTE bahwa sebuah stasiun menghendaki hubungan dengannya



**Gambar 2.9.** Konfigurasi pin IC MAX232

Agar komunikasi antara mikrokontroller yang menggunakan level tegangan TTL dapat berkomunikasi dengan komputer yang menggunakan level RS232 maka tegangan TTL harus dikonversi terlebih dahulu. Konverter yang paling mudah adalah IC MAX-232. Di dalam IC ini terdapat Charge Pump yang akan membangkitkan +10 Volt dan -10 Volt dari sumber +5 Volt tunggal. Dalam IC DIP (*Dual In-line Package*) 16 pin (8 pin x 2 baris) ini terdapat 2 buah transmiter dan 2 receiver. Konfigurasi pin IC MAX232 dapat dilihat pada gambar 2.9.



## BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

### 3.1 Perancangan Sistem Mekanik Osilasi Pegas Vertikal

Sistem mekanik osilasi pegas vertikal adalah sebagai sumber getaran yang akan diukur frekuensi osilasinya. Getaran yang terjadi akan mengalami redaman dari cairan yang akan diukur viskositasnya sehingga frekuensi osilasi yang dihasilkan dari masing-masing cairan yang diukur akan berbeda. Untuk mendapatkan data hasil pengukuran yang baik maka perancangan sistem mekanik osilasi harus mempertimbangkan beberapa hal diantaranya pegas yang digunakan



**Gambar 3.1** Sistem mekanik osilasi pegas

yang berhubungan dengan konstanta pegas, beban untuk menghasilkan osilasi, bola pejal dan batang penghubung serta wadah cairan yang digunakan. Sistem mekanik osilasi pegas akan tampak seperti gambar 3.1.

### **3.1.1 Pegas**

Pegas yang digunakan dalam sistem ini adalah jenis pegas tarik (*extension spring*) dengan spesifikasi panjang normal 50 mm dan diameter luar 10 mm sedangkan diameter besi pegasnya 0.8 mm. Konstantan pegas didapatkan dengan melakukan pengukuran secara dinamis ketika sistem mekanik dan elektronik selesai dengan demikian akan didapatkan konstanta pegas dari sistem secara keseluruhan.

### **3.1.2 Beban**

Beban digunakan untuk menghasilkan osilasi pada pegas. Beban yang digunakan adalah sebuah balok pejal yang terbuat dari logam dengan berat yang disesuaikan dengan konstanta pegas agar sistem dapat berosilasi dengan baik. Penentuan besar beban yang digunakan dilakukan dengan cara melakukan percobaan beberapa berat beban yang diberikan dan kemudian diberikan gaya berupa simpangan pada pegas untuk berosilasi. Beban dengan berat yang dipilih adalah yang menghasilkan osilasi yang paling baik. Dari spesifikasi pegas yang digunakan dengan memberikan beban sebesar lebih kurang 500 gram sistem pegas dapat menghasilkan osilasi jika diberikan simpangan sebesar 3 cm. Berat beban ini adalah berat beban keseluruhan yaitu berat logam, rangkaian elektronik, bola pejal serta batang penghubung antara bola pejal dan logam.

### **3.1.3 Batang Penghubung dan Bola Pejal Logam**

Batang penghubung terbuat dari bahan logam yang digunakan untuk menghubungkan beban balok logam dengan bola pejal. Batang yang digunakan mempunyai spesifikasi panjang 13 mm dengan diameter 2 mm. Sedangkan bola logam pejal digunakan sebagai permukaan yang akan memberikan gaya hambat berupa redaman dari osilasi yang terjadi. Redaman ini terjadi karena bola pejal yang berosilasi dalam cairan akan bergesekan dengan cairan tersebut sesuai dengan hukum stokes. Bola pejal logam yang digunakan sedemikian rupa sehingga memiliki perbandingan yang jauh lebih kecil dari wadah yang digunakan. Dalam hal ini diameter bola yang digunakan adalah 10 mm.

### **3.1.4 Wadah Cairan dan Pemanas**

Wadah cairan digunakan sebagai tempat dari cairan yang akan diukur koefisien viskositasnya. Wadah yang digunakan sedemikian rupa sehingga memiliki diameter yang jauh lebih besar dari diameter bola pejal logam. Dalam hal ini wadah yang digunakan memiliki diameter 104 mm dengan tinggi 170 mm. Wadah cairan ini dilengkapi dengan pemanas listrik yang berfungsi sebagai pengatur suhu cairan yang akan diukur. Sehingga pada saat dilakukan pengukuran diharapkan data yang diperoleh dapat divariasikan berdasarkan perbedaan suhu mengingat pengukuran viskositas cairan sangat tergantung dengan suhu cairan tersebut.

## **3.2 Perancangan Piranti Elektronika Pendeteksi Getaran Sistem Pegas**

Sistem pengukuran viskositas cairan dengan metode osilasi teredam adalah untuk mendapatkan seberapa besar redaman dari frekuensi osilasi yang terjadi ketika dilakukan pengukuran terhadap sebuah sampel cairan. Besarnya faktor redaman ini akan berbanding lurus dengan besarnya koefisien viskositas cairan,

artinya semakin kecil redaman akan semakin kecil juga koefisien viskositas cairan yang diukur dan sebaliknya semakin besar redaman semakin besar juga koefisien viskositasnya. Untuk dapat mengukur seberapa besar redaman pada osilasi yang terjadi maka diperlukan piranti elektronika yang dapat mendeteksi besarnya redaman tersebut. Piranti elektronika ini terdiri dari sensor getaran atau percepatan (accelerometer), rangkaian minimum sistem mikrokontroller yang dilengkapi dengan rangkaian ADC sebagai pengkondisi signal dan komunikasi serial untuk melakukan komunikasi antara rangkaian elektronika dengan komputer. Secara garis besar cara kerja piranti elektroniknya digambarkan pada blok diagram seperti gambar 3.2.



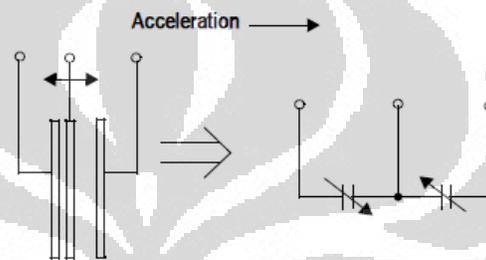
**Gambar 3.2** Blok diagram sistem pengukuran viskositas

Sensor accelerometer akan mendeteksi perubahan percepatan dari osilasi yang terjadi karena adanya redaman dari cairan yang akan diukur koefisien viskositasnya. Keluaran dari sensor accelerometer adalah berupa tegangan analog yang diumpankan ke rangkaian ADC yang ada pada mikrokontroller. Dari mikrokontroller data pengukuran kemudian dikirim ke komputer melalui port komunikasi serial.

### 3.2.1 Sensor Accelerometer

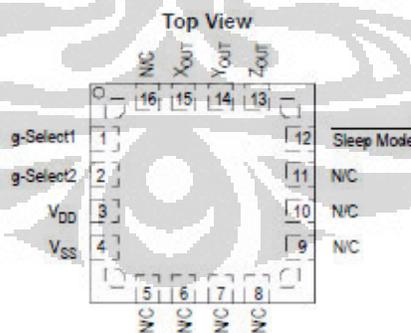
Sensor accelerometer digunakan untuk mendeteksi perubahan percepatan dari osilasi sistem pegas yang digunakan mengukur viskositas cairan. Perubahan percepatan osilasi ini terjadi karena adanya redaman yang berasal dari gaya gesek antara cairan dengan permukaan bola. Accelerometer yang digunakan dalam tugas

akhir ini adalah *three axis MMA7260QT accelerometer* buatan *Freescale Semiconductor* dengan sensitivitas 1,5g sampai 6g. Accelerometer tipe ini bekerja dengan prinsip perubahan kapasitansi yang terangkai dalam satu chip. Analogi prinsip kerja accelerometer tipe ini ditunjukkan pada gambar 3.3. Dengan terjadinya perubahan akselerasi yang dialami chip maka akan berakibat pada perubahan kapasitansi didalam chip sehingga memberikan beda tegangan keluaran analog yang bervariasi dimana proses ini terjadi pada setiap axis.



**Gambar 3.3** Perubahan kapasitansi sebagai prinsip dasar accelerometer MMA7260

Accelerator MMA7260QT memiliki 16 pin dengan konfigurasi pin seperti pada gambar 3.4, sedangkan deskripsi pin nya ada pada table 3.1.



**Gambar 3.4.** Konfigurasi pin accelerometer MMA7260Q

**Tabel 3.1** Deskripsi pin accelerometer MMA7260Q

Pin No.	Pin Name	Description
1	g-Select1	Logic input pin to select g level.
2	g-Select2	Logic input pin to select g level.
3	V <sub>DD</sub>	Power Supply Input
4	V <sub>SS</sub>	Power Supply Ground
5 - 7	N/C	No internal connection. Leave unconnected.
8 - 11	N/C	Unused for factory trim. Leave unconnected.
12	Sleep Mode	Logic input pin to enable product or Sleep Mode.
13	Z <sub>OUT</sub>	Z direction output voltage.
14	Y <sub>OUT</sub>	Y direction output voltage.
15	X <sub>OUT</sub>	X direction output voltage.
16	N/C	No internal connection. Leave unconnected.

Fitur utama dari chip ini adalah sensitivitasnya yang dapat dipilih (1,5g/2g/4g/6g) melalui pin *g-select*. Kombinasi logika input dari pin *g-select* ini akan menentukan besarnya sensitivitas tersebut. Tabel 3.2 memperlihatkan kombinasi logika input pada pin *g-select*.

**Tabel 3.2** Kombinasi logika input *pin g-select* accelerometer MMA7260Q

g-Select2	g-Select1	g-Range	Sensitivity
0	0	1.5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

Fitur lainnya adalah *sleep mode* koneksinya ada pada pin 12. Ketika *sleep mode* ini aktif dengan memberikan logika nol pada pin 12, output dari accelerometer ini akan off sehingga akan menurunkan arus operasi pada kondisi typical 500  $\mu\text{A}$  menjadi arus pada kondisi *sleep mode* 3  $\mu\text{A}$ .

Pada tugas akhir ini digunakan IC accelerometer MMA7260QT yang sudah dipadukan dengan modul DC-SS009 sebagai modul sensor accelerometranya. Modul ini telah memadukan chip MMA7260 dengan komponen diskrit yang dirangkai sehingga penggunaanya mudah melakukan koneksi antarmuka dengan piranti lain. Didalam modul DC-SS009 telah terpadu rangkaian lowpass filter untuk setiap keluaran analog masing-masing axis dan regulator beda tegangan 5 volt menjadi 3.3 volt. Gambar 3.5 menunjukkan modul DC-SS009 yang digunakan.



**Gambar 3.5** Modul DC-SS009

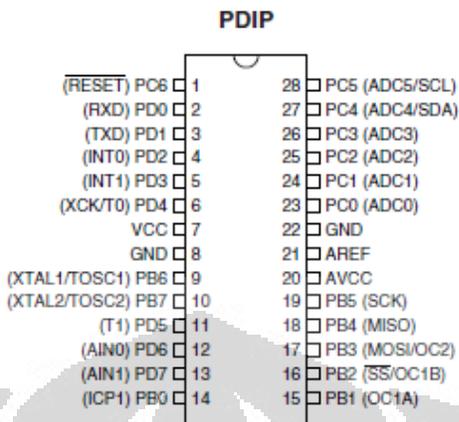
Untuk mengukur percepatan dari sistem yang dibuat, sensor accelerometer diset dengan range pengukuran 1,5g dimana setelah dilakukan percobaan percepatan yang terukur tidak melebihi dari range pengukuran yang dipilih. Pemilihan range 1,5g dilakukan dengan menset pin *g-select* 1 dan 2 pada kondisi 0. Untuk range pengukuran ini sensitivitas dari sensor berdasarkan data sheet adalah 800mV/g. Data pengukuran yang akan diambil dari pembacaan sensor accelerometer ini

adalah pengukuran dari sumbu Y. Dengan memposisikan arah Y yang tertera pada sensor ke atas atau ke bawah maka data pengukuran percepatan pada sumbu Y akan didapat.

### 3.2.2 Rangkaian Minimum Sistem Mikrokontroler ATmega 8

Data perubahan percepatan yang dialami oleh sistem pegas yang dideteksi oleh accelerometer dikirim ke mikrokontroler yang akan membaca data tersebut dan mengolahnya lebih lanjut. Mikrokontroler yang digunakan pada tugas akhir ini adalah ATmega8 produksi Atmel. Pemilihan mikrokontroler jenis ini disamping karena ukurannya yang kecil dengan 28 pin, mikrokontroler ini juga sudah memiliki fitur yang mencukupi untuk melakukan proses pembacaan dan pengolahan data dari sensor accelerometer.

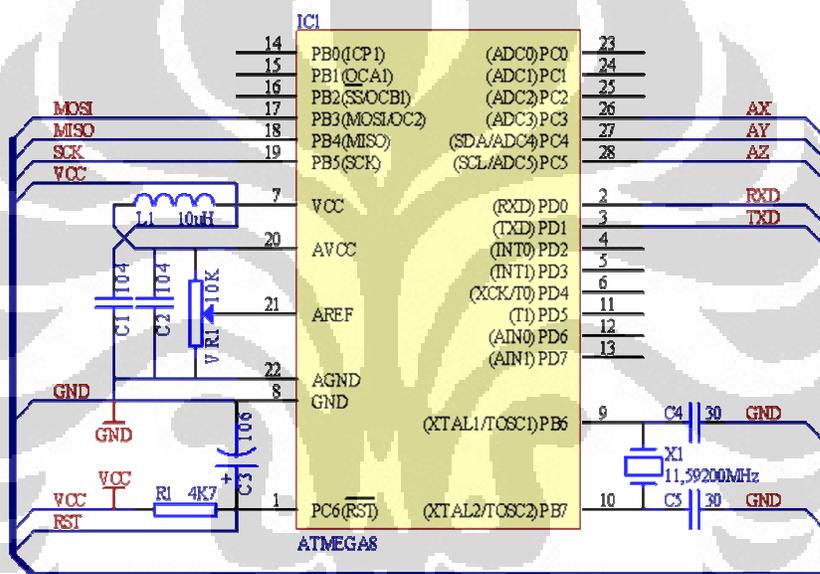
ATmega8 memiliki 32 general purpose register dan instruksi set yang cukup banyak. Semua register terhubung langsung dengan Arithmetic Logic Unit (ALU) sehingga memungkinkan dua buah register yang berlainan diakses dengan menggunakan satu instruksi yang dieksekusi dengan satu clock pulsa. ATmega8 juga menyediakan 8Kbyte In-System Programable Flash memory, 512 byte EEPROM, 1 Kbyte SRAM, 23 line general purpose I/O, 32 general purpose register, tiga buah flexible timer/counter dengan compare modes, internal dan eksternal interup, serial programmable USART, 6 channel ADC dengan akurasi 10 bit dan programmable watchdog timer dengan internal oscillator. Gambar konfigurasi pin dari ATmega8 dapat dilihat pada gambar 3.6.



**Gambar 3.6** Konfigurasi pin mikrokontroler ATmega8

Data dari sensor accelerometer berupa tegangan analog yang besarnya tergantung dari besarnya percepatan yang diukur. Karena accelerometer yang digunakan adalah jenis tiga sumbu x, y dan z maka percepatan yang akan terukur adalah percepatan pada tiga sumbu x, y dan z. Akan tetapi dalam hal ini data yang akan diambil adalah data pengukuran percepatan pada sumbu y. Signal tegangan dari accelerometer dimasukkan ke mikrokontroler melalui pin ADC untuk dikonversi dan dikuantisasi menjadi signal digital. ADC yang terintegrasi pada IC mikrokontroler ATmega 8 adalah ADC 10 bit yang berarti bahwa *full scale* output ADC dalam bentuk desimal adalah 1023. Pin AREF pada mikrokontroler digunakan sebagai tegangan referensi bagi ADC untuk mengkonversi tegangan analog yang terbaca. Tegangan referensi ini didapat dengan menambahkan variabel resistor yang dihubungkan dengan VCC. Variabel resistor ini akan bertindak sebagai pembagi tegangan untuk mengatur besarnya tegangan referensi. Berdasarkan data sheet sensor accelerometer untuk pemilihan range pengukuran 1,5g output tegangan analog dari accelerometer pada kondisi 1g adalah 2,45V. yang akan Besarnya tegangan referensi yang diberikan pada perancangan sistem ini sebesar 2,5V. Berdasarkan percobaan di awal bahwa pengukuran yang akan dilakukan tidak akan lebih dari 1g, maka pemberian tegangan referensi bagi ADC sebesar 2,5V sudah mencukupi untuk membaca data digital yang ditampilkan dalam bentuk grafik bilangan desimal pada LabView.

Untuk memprogram mikrokontroler dilakukan secara *In-System Programming* (ISP) sehingga pin MOSI, MISO, SCK pada mikrokontroler dihubungkan dengan konektor ISP programmer. Pembangkit clock untuk mikrokontroler berasal dari kristal 11,592 Mhz yang terhubung dengan pin XTAL1 dan XTAL2 pada mikrokontroler. Komunikasi antara mikrokontroler dengan PC dilakukan secara serial menggunakan IC MAX232 sebagai pengubah level tegangan dari level tegangan TTL ke level tegangan PC. Rangkaian minimum sistem ATmega8 yang digunakan tampak pada gambar 3.7.

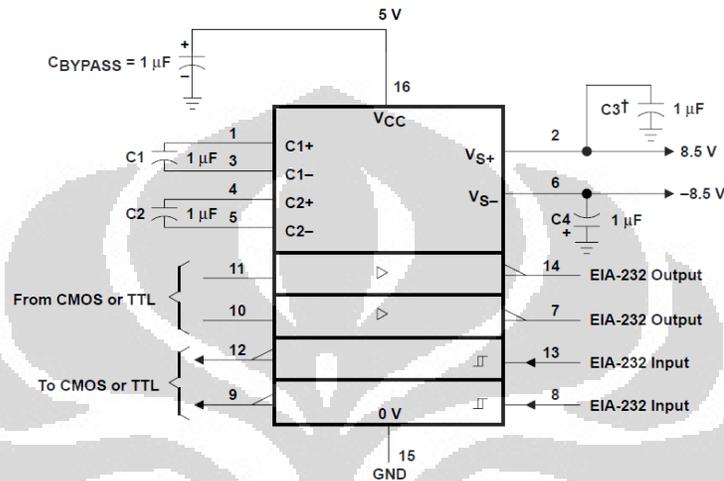


Gambar 3.7 Minimum sistem mikrokontroler ATmega8

### 3.2.3 Komunikasi Data Serial

Komunikasi antara mikrokontroler dengan PC dilakukan secara serial. Untuk dapat melakukan hal ini maka data dari mikrokontroler yang berupa tegangan dengan level TTL harus dikonversi terlebih dahulu sesuai dengan tegangan pada level PC. Konverter yang paling mudah adalah IC MAX-232. Di dalam IC ini terdapat Charge Pump yang akan membangkitkan +10 Volt dan -10

Volt dari sumber +5 Volt tunggal. Dalam IC DIP (*Dual In-line Package*) 16 pin (8 pin x 2 baris) ini terdapat 2 buah transmiter dan 2 receiver. Koneksi pin-pin dari IC MAX-232 dapat dilihat pada gambar 3.8.



**Gambar 3.8** Koneksi pin-pin IC MAX-232

Antar muka untuk melakukan komunikasi serial antara mikrokontroler dengan PC menggunakan port serial RS-232 yang dalam hal ini digunakan konektor DB9. Konektor DB9 digunakan sebagai saluran data komunikasi antara mikrokontroler dengan PC. Konektor DB9 memiliki 9 pin dengan konfigurasi seperti pada gambar 2.8 pada bab 2. Dalam perancangan ini pin yang digunakan adalah pin Rx, Tx dan GND. Pin Rx digunakan untuk menerima data dari mikrokontroler ke PC dan sebaliknya pin Tx digunakan untuk mengirim data dari PC ke mikrokontroler.

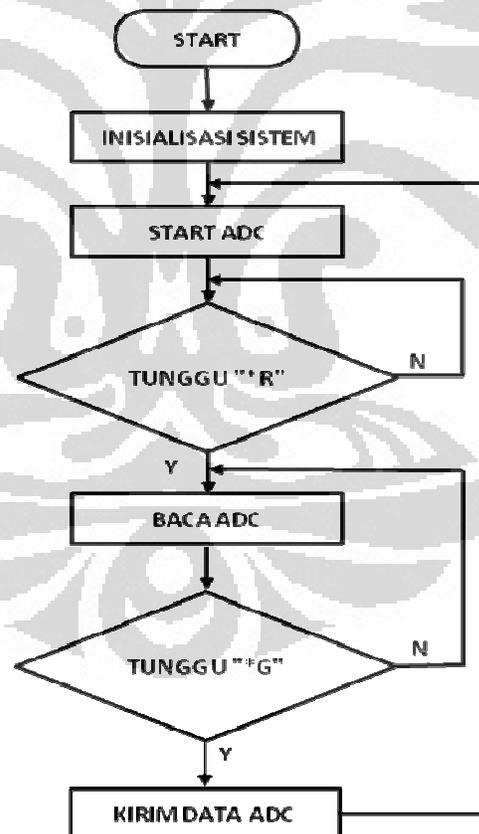
Pada PC agar dapat melakukan komunikasi secara serial maka harus diketahui terlebih dahulu port dari PC yang digunakan. Port ini dinyatakan dengan COM yang harus disesuaikan antar COM pada PC dengan COM pada software sehingga komunikasi dapat berjalan.

### 3.3 Perancangan Perangkat Lunak

Perancangan perangkat lunak dari sistem pengukuran viskositas ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu perancangan program mikrokontroller dan program LabView.

#### 3.3.1 Pemrograman Mikrokontroller

Mikrokontroller pada sistem ini digunakan untuk membaca data dari sensor accelerometer akibat perubahan percepatan pada sistem yang terdeteksi. Data perubahan percepatan yang merupakan besaran analog dikonversi menjadi besaran digital oleh ADC pada mikrokontroller. Tegangan analog ini diumpukan melalui port ADC yang terintegrasi pada IC ATmega8. Perancangan pemrograman mikrokontroller ini menggunakan bahasa Basic dari aplikasi



**Gambar 3.9** Diagram alur program Mikrokontroller

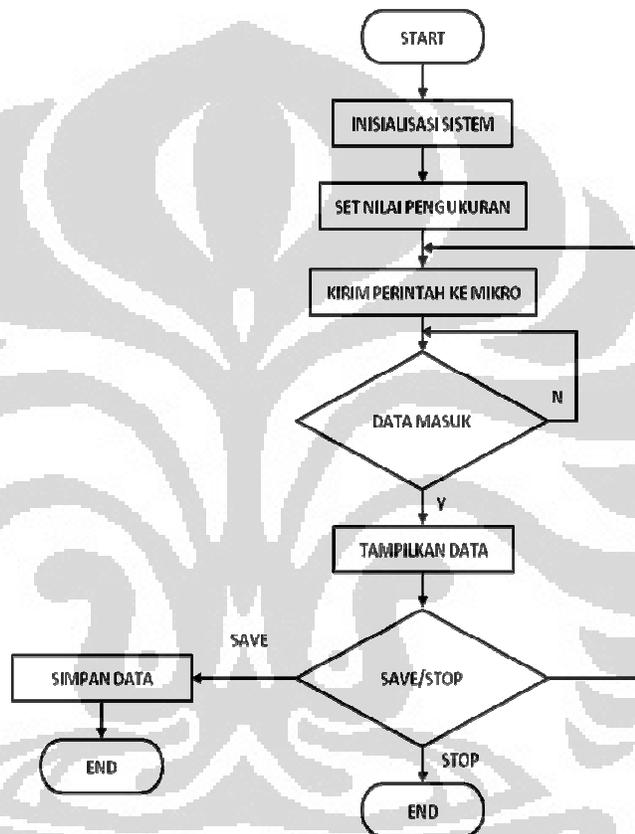
Bascom AVR. Gambar 3.9 menunjukkan diagram alur dari program mikrokontroler yang diunduh kedalam chip ATmega8 dengan bahasa *Basic*. Setelah inialisasi sistem ADC akan diaktifkan dan mulai membaca data dari sensor. Data ADC pada setiap kanal chip ATmega8 sudah tersimpan pada masing-masing register. Setelah proses menyimpan data ADC maka program mengecek variabel tunggu apakah sudah ada perintah dari PC untuk memulai komunikasi berupa karakter "\*R" atau belum. Jika sudah ada dilanjutkan dengan mengecek perintah berupa karakter "\*G" dari PC sebagai instruksi setor data ADC ke PC. Jika perintah berupa karakter "\*G" sudah ada maka data ADC dikirim ke PC secara serial, dan jika belum ada perintah maka program akan tetap menunggu sampai ada perintah dari PC.

### 3.3.2 Pemrograman LabView

Pemrograman akuisisi data pada PC menggunakan LabVIEW 8.5. Sebuah bahasa pemrograman keluaran National Instrument yang berbasis pada visual. Gambar 3.10 menunjukkan diagram alur dari kerja piranti lunak akuisisi data yang dibangun dengan LabVIEW 8.5. Pemrograman LabView ini dibangun didalam satu looping utama yang mencakup keseluruhan proses kerja. Didalam looping besar utama tersebut dibangun urutan kerja sesuai kebutuhan perancangan sistem.

Pertama-tama dibangun urutan langkah kerja yang berurutan dengan menggunakan struktur sequensial. Didalam urutan pertama struktur sequensial dibangun inialisasi Visa serial. Dimana inialisasi ini menentukan konfigurasi tentang parameter *baudrate*, kanal COMM, panjang data dalam satuan bit, paritas, dan bit stop. Pada urutan pertama ini juga menginisialisasikan banyak data yang disampling per satuan waktu. Urutan kedua yang tersusun adalah membangun sebuah looping berbasis waktu yang dikenal dengan nama *timed Loop*. Tujuan menggunakan looping berbasis waktu ini adalah tidak lain untuk

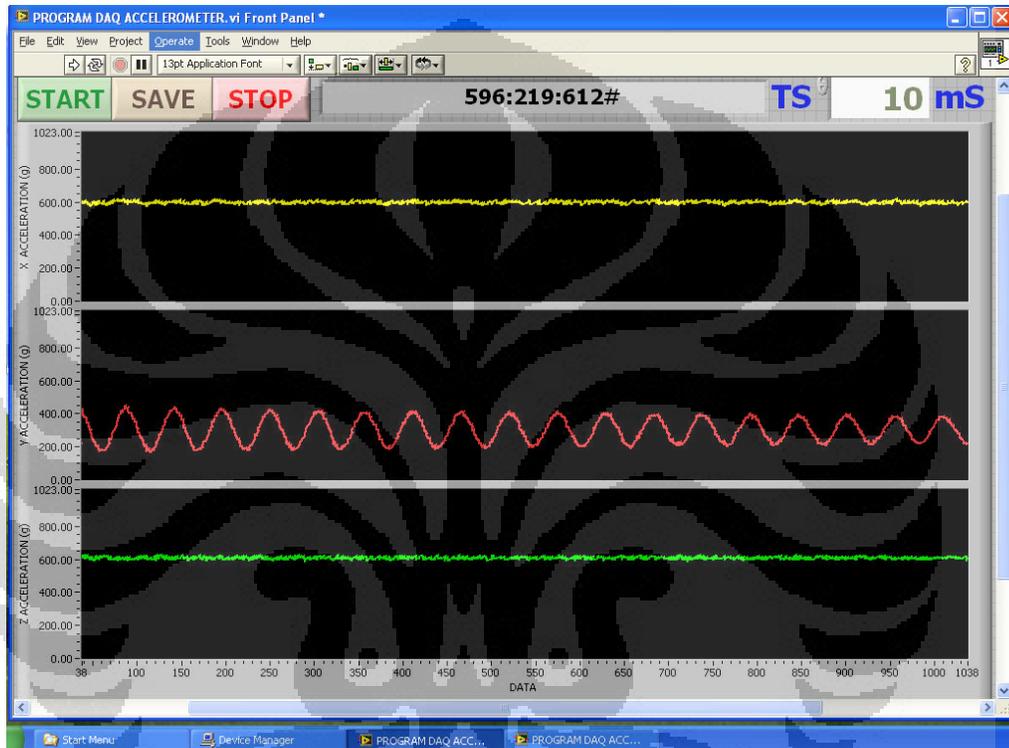
mengatur waktu sampling yang digunakan. Didalam urutan kedua ini dikerjakannya inti dari program yang dibangun. Program yang dibangun pada urutan ini bertugas membaca dan mengirimkan dari dan keluar PC melalui visa serial. Pada bagian ini juga dibangun program untuk memberikan perintah kepada mikrokontroller untuk mengirim data ADC melalui komunikasi serial.



**Gambar 3.10** Diagram alur program akuisisi data Labview

Setelah mengirimkan perintah ke mikrokontroller maka urutan ini bertugas untuk menampilkan data ADC dari masing-masing kanal secara grafik. Urutan ini terus bekerja berulang-ulang sampai satu kondisi yang dijadikan kontrol looping

memberikan informasi untuk berhenti bekerja. Urutan ketiga adalah program yang dibangun untuk dapat mencatat data menjadi file dot xls, yaitu aplikasi Excel file yang memudahkan penulis untuk mengolah data lebih lanjut. Gambar 3.10 menunjukkan diagram alur dari kerja piranti lunak akuisisi data yang dibangun dengan LabVIEW 8.5.



**Gambar 3.11** Tampilan GUI dari program yang digunakan

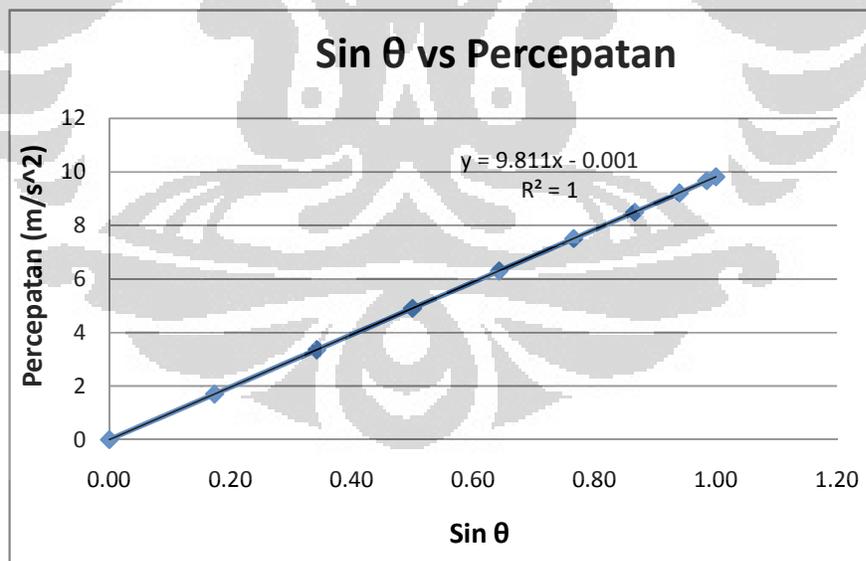
## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

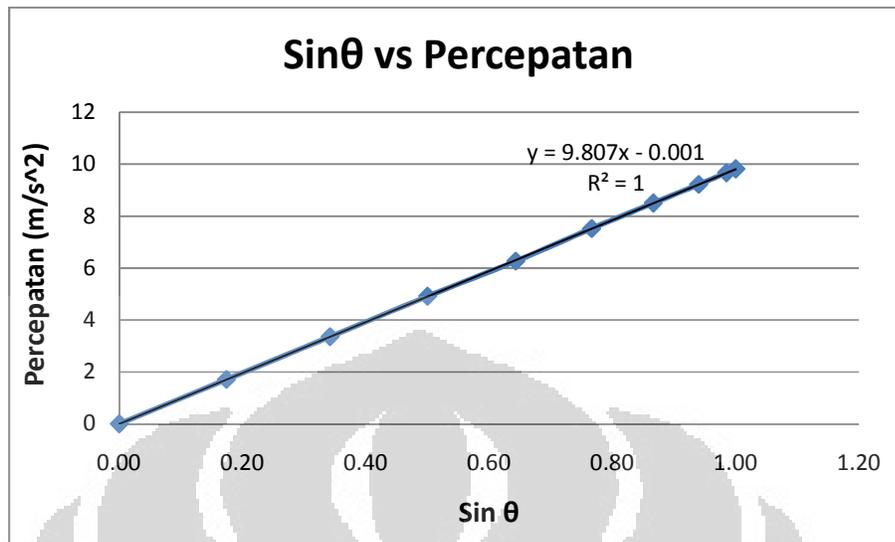
#### 4.1 Kalibrasi Sensor Accelerometer

Kalibrasi sensor accelerometer dilakukan untuk memastikan kebenaran nilai besaran output tetap sesuai dengan spesifikasinya. Kalibrasi pada sensor accelerometer dilakukan dengan merubah posisi kemiringan sensor sedemikian rupa sehingga didapatkan output yang berbeda. Karena accelerometer yang digunakan adalah jenis 3 axis maka kalibrasi yang dilakukan juga meliputi 3 axis x, y dan z. Hasil kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu x, y dan z dapat dilihat pada gambar 4.1, 4.2 dan 4.3.

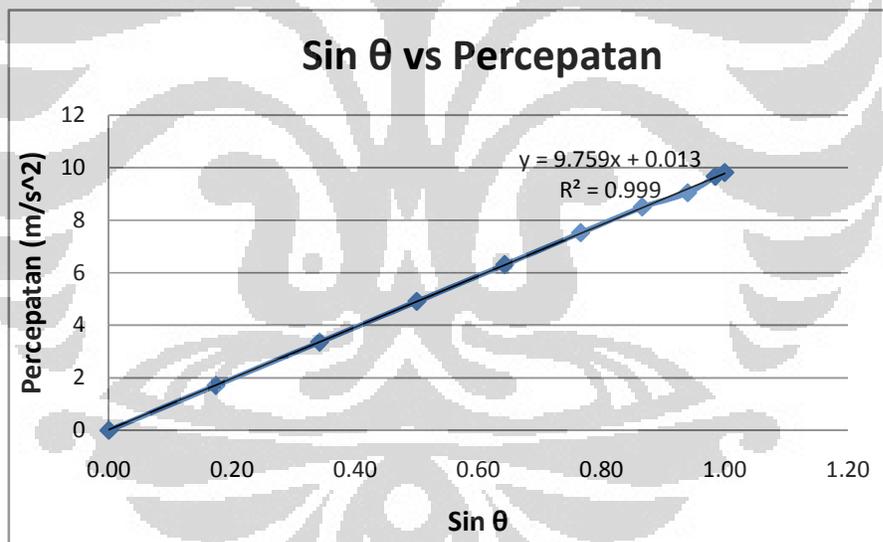
Data ADC yang diperoleh dari kalibrasi dirubah menjadi data percepatan, sehingga besar percepatan dalam posisi kemiringan tertentu ditentukan dengan persamaan  $a = g \sin\theta$ .



Gambar 4.1 Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu X



Gambar 4.2 Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu Y



Gambar 4.3 Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu Z

Dari ketiga grafik tersebut dapat terlihat bahwa gradient garis hasil kalibrasi adalah 9,811, 9,807 dan 9,759 dimana nilainya mendekati nilai gravitasi  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Hal ini menunjukkan bahwa sensor accelerometer dapat digunakan.

#### 4.2 Pengujian Linearitas ADC dengan Aref 2,5V

Tegangan referensi ADC pada perancangan ini sebesar 2,5 V dimaksudkan agar data biner dari ADC memiliki resolusi yang lebih baik. Dengan memberikan Aref 2,5 V maka resolusi yang didapat adalah 0,00244 V/bit. Pengujian linearitas ADC dengan Aref 2,5 V tampak pada table 4.1

**Tabel 4.1** Pengujian Linearitas ADC

Aref (V)	ADC (Biner)		
	X	Y	Z
0	0	0	0
0.5	215	209	212
1	426	430	427
1.5	626	625	621
2	847	845	847
2.5	1023	1023	1023
3	1023	1023	1023
3.5	1023	1023	1023
4	1023	1023	1023
4.5	1023	1023	1023
5	1023	1023	1023

#### 4.2 Osilasi Tanpa Redaman Cairan

Pengambilan data osilasi tanpa redaman diperlukan untuk mengetahui frekuensi osilasi awal dan konstanta pegas yang digunakan. Selain itu pada data osilasi tanpa redaman cairan sesungguhnya sudah ada redaman udara terhadap sistem, sehingga redaman yang akan terjadi saat menggunakan cairan (redaman total) adalah redaman udara ditambah dengan redaman cairan. Sedangkan dalam perhitungan nilai viskositas redaman yang diperhitungkan hanya redaman dari cairan. Jika dituliskan dalam bentuk matematis

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + r_{udara} \frac{dy}{dt} + r_{cairan} \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (4.1)$$

$$m \frac{d^2y}{dt^2} + (r_{udara} + r_{cairan}) \frac{dy}{dt} + ky = 0 \quad (4.2)$$

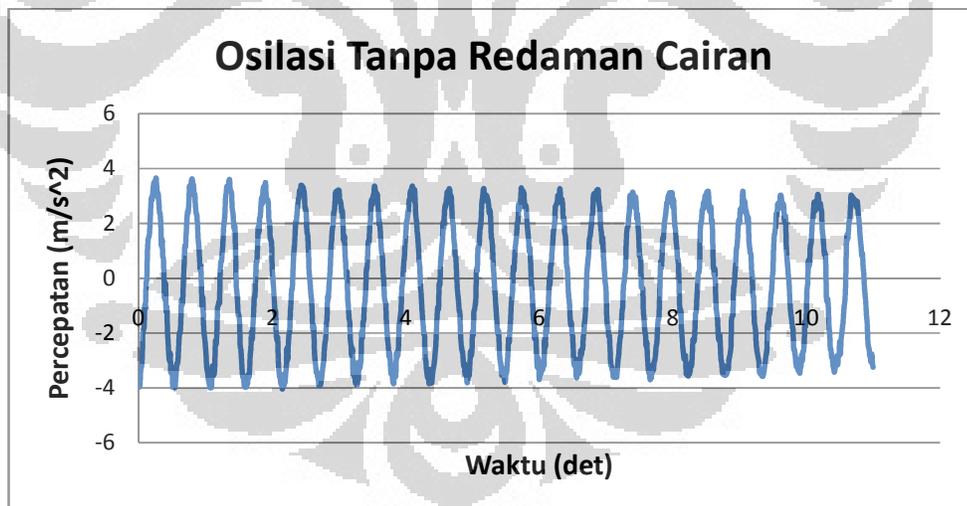
$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{(r_{udara} + r_{cairan})}{m} \frac{dy}{dt} + \frac{k}{m} y = 0 \quad (4.3)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + (2b_{udara} + 2b_{cairan}) \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = 0 \quad (4.4)$$

Sehingga

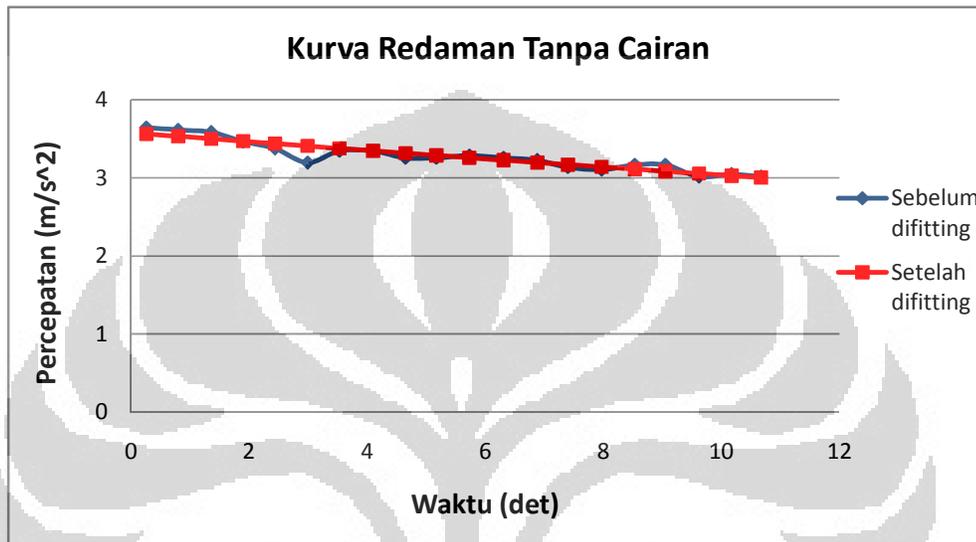
$$b_{total} = b_{udara} + b_{cairan} \quad (4.5)$$

Gelombang osilasi tanpa redaman cairan yang terjadi tampak seperti pada gambar 4.4.



**Gambar 4.4** Gelombang osilasi sistem tanpa redaman cairan

Jika puncak-puncak dari osilasi tanpa redaman cairan tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,5791$  dan  $b=0.0165$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.5



**Gambar 4.5** Kurva redaman sistem tanpa cairan

Dari data osilasi tanpa redaman diperoleh nilai perioda gelombang adalah sebesar 0,55 detik sehingga frekuensi osilasi tanpa redaman adalah 1,818 Hz. Jika diasumsikan redaman terhadap udara sangat kecil dan diabaikan, maka berdasarkan persamaan 2.24 dapat diperoleh nilai konstanta pegas  $k$  sebesar :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$\left(\frac{T}{2\pi}\right)^2 = \frac{m}{k}$$

dengan massa sebesar 0,474 kg maka besarnya konstanta pegas adalah

$$k = \frac{m \cdot 4\pi^2}{T^2}$$

$$= \frac{0,474 \cdot 4 \cdot 3,14^2}{0,55^2} = 61,798 \text{ N/m}$$

Jika besarnya redaman udara diperhitungkan maka berdasarkan persamaan 2.30 dimana nilai  $\sqrt{b^2 - \omega_0^2}$  merupakan frekuensi osilasi dari sistem, maka besarnya konstanta pegas dapat diperoleh sebagai berikut :

$$\omega = |\sqrt{b^2 - \omega_0^2}|$$

$$\omega^2 = \omega_0^2 - b^2$$

$$\omega_0^2 = \omega^2 + b^2$$

$$\omega_0^2 = \omega^2 + b^2$$

$$\frac{k}{m} = \omega^2 + b^2$$

$$k = m(\omega^2 + b^2) = m \left[ \left( \frac{2\pi}{T} \right)^2 + b^2 \right]$$

$$= 0,474 \left[ \left( \frac{2 \cdot 3,14}{0,55} \right)^2 + 0,0165^2 \right]$$

$$= 0,474(130,375 + 0,000272)$$

$$= 0,474(130,375 + 0,000272)$$

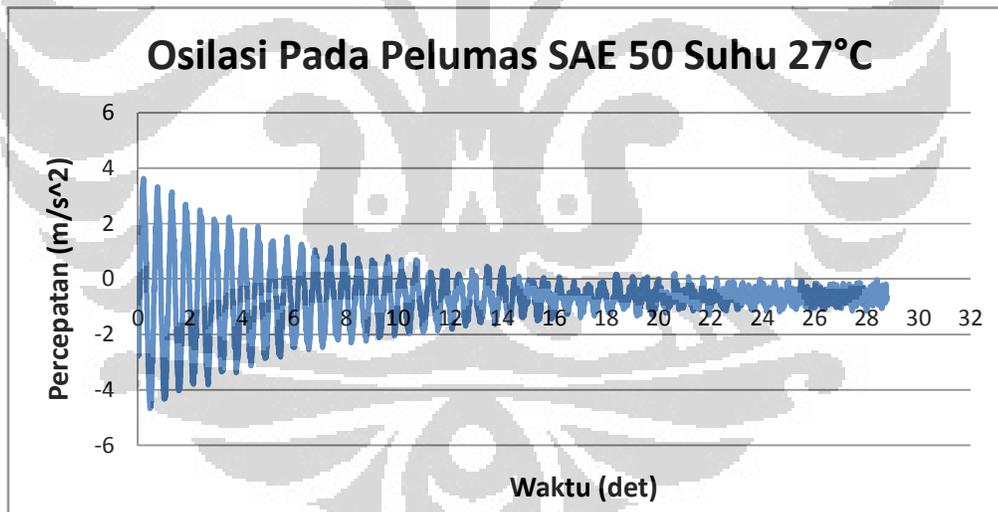
$$= 61,798 \text{ N/m}$$

Dari hasil perhitungan konstanta pegas dengan atau tanpa memperhitungkan redaman udara memperlihatkan hasil yang sama karena redaman udara yang sangat kecil.

### 4.3 Osilasi Teredam Pada Beberapa Cairan dan Nilai Viskositasnya

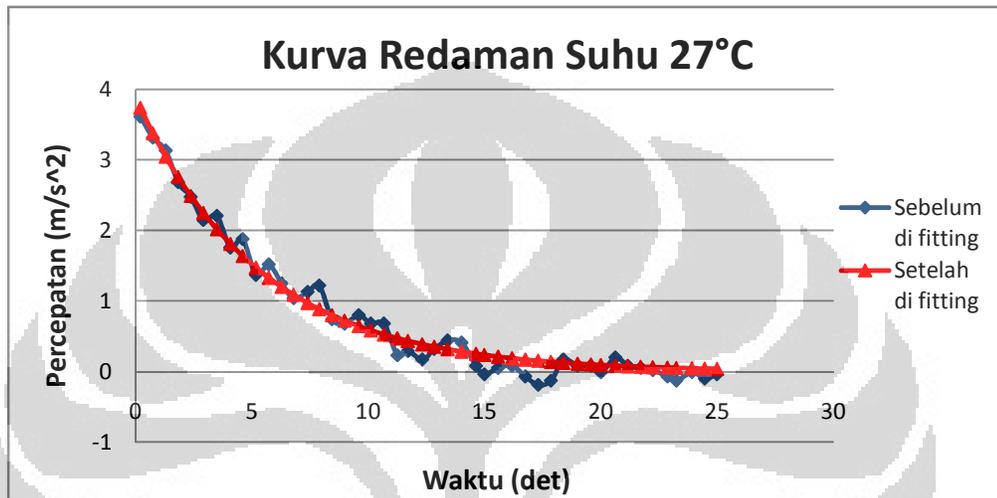
#### 4.3.1 Osilasi Teredam Sampel Pelumas

Pelumas yang dijadikan sampel adalah pelumas industri jenis *gear oil* ISO VG 220 setara dengan SAE 50. Pengambilan data redaman dilakukan pada suhu rung 27°C, 40°C dan 100°C. Pengambilan data pada suhu tersebut untuk menyesuaikan dengan metode ASTM D 445 dimana untuk pengukuran viskositas kinematik dilakukan pada suhu 40°C dan 100°C. Hasil pengujian viskositas kinematik di laboratorium dengan metode ASTM D 445 untuk suhu 40°C adalah 218 cSt atau  $218 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  sedangkan untuk suhu 100°C adalah 18,7 cSt atau  $18,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dengan besar densitas  $899 \text{ kg/m}^3$ , maka viskositas dinamiknnya untuk suhu 40°C adalah 0,196 kg/ms atau 1,96 Poise sedangkan untuk suhu 100°C adalah 0,0168 kg/ms atau 0,168 Poise. Gelombang osilasi teredam pelumas SAE 50 pada suhu 27°C tampak pada gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,888$  dan  $b=0.1875$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.7.



**Gambar 4.7** Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel pelumas SAE 50 pada suhu 27°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3.888$  dan  $b=0.1875$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,1875 - 0,0165 = 0,171 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,171 \left( \frac{1}{s} \right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,1621 \frac{kg}{s}$$

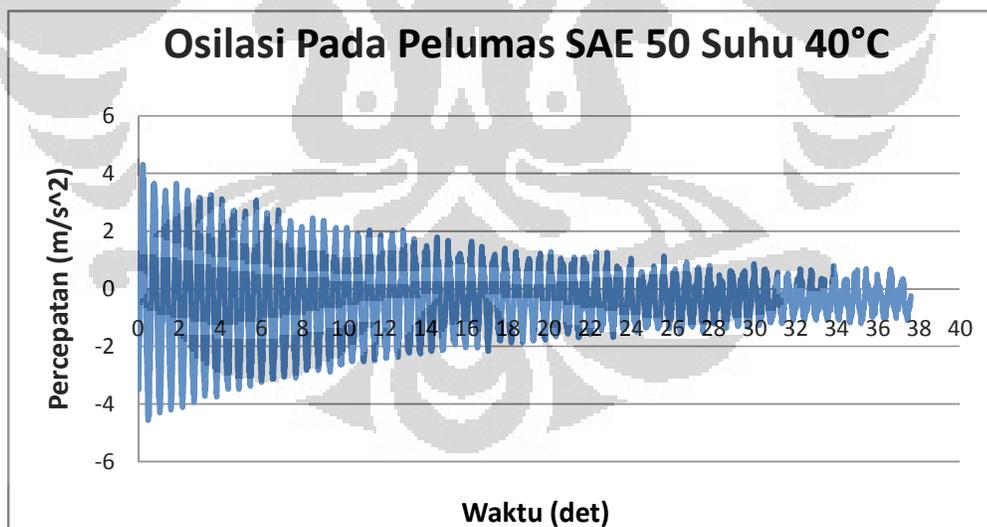
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas pelumas SAE 50 pada suhu 27°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,1621 \left( \frac{kg}{s} \right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,172 \frac{kg}{ms}$$

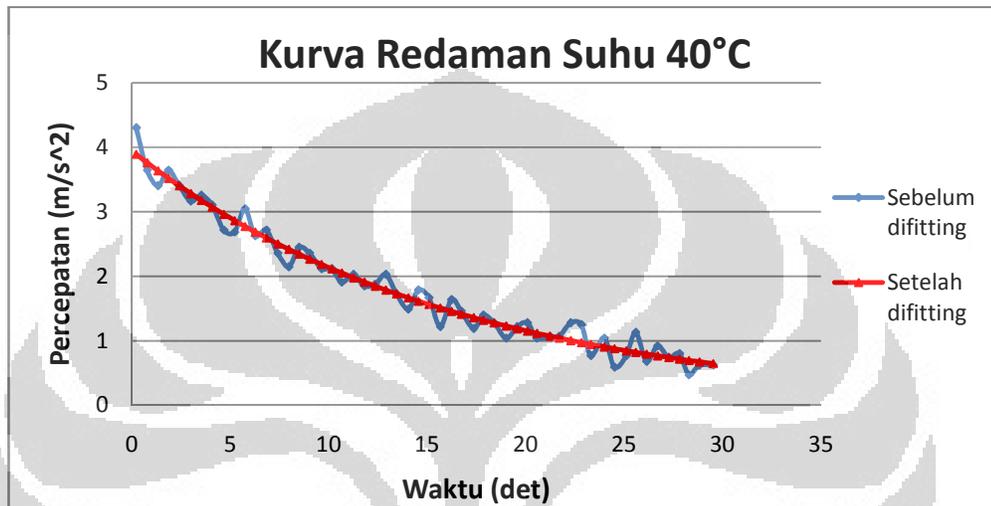
$$= 1,72 \text{ Poise} = 172 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 40°C, gelombang osilasi teredam pelumas SAE 50 tampak seperti pada gambar 4.8.



**Gambar 4.8** Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 40°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,945$  dan  $b=0.0614$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.9.



**Gambar 4.9** Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 40°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel pelumas SAE 50 pada suhu 40°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3.945$  dan  $b=0.0614$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,0614 - 0,0165 = 0,0449 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,0449 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,0426 \frac{kg}{s}$$

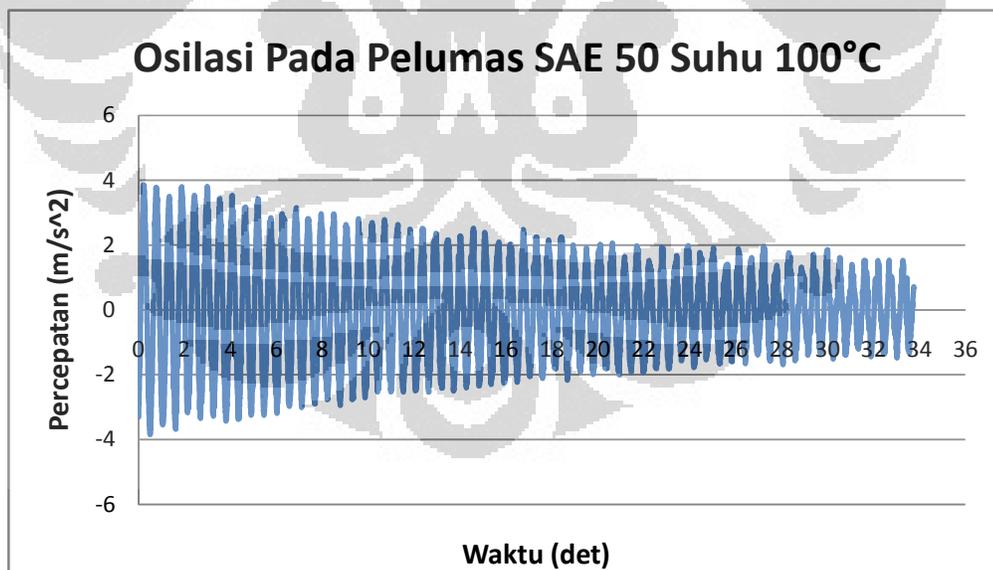
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas pelumas SAE 50 pada suhu 40°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,0426 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,0452 \frac{kg}{ms}$$

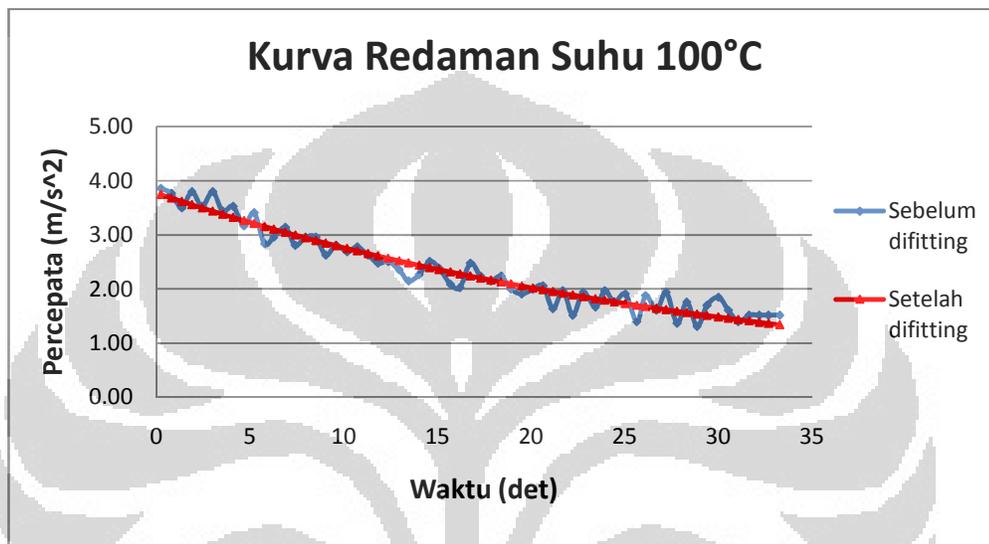
$$= 0,452 \text{ Poise} = 45,2 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 100°C, gelombang osilasi teredam pelumas SAE 50 tampak seperti pada gambar 4.10.



**Gambar 4.10** Gelombang osilasi sistem pada pelumas SAE 50 suhu 100°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,7697$  dan  $b=0.0311$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.11.



**Gambar 4.11** Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 100°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel pelumas SAE 50 pada suhu 100°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,7697$  dan  $b = 0.0311$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,0311 - 0,0165 = 0,0146 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,0146 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,01384 \frac{kg}{s}$$

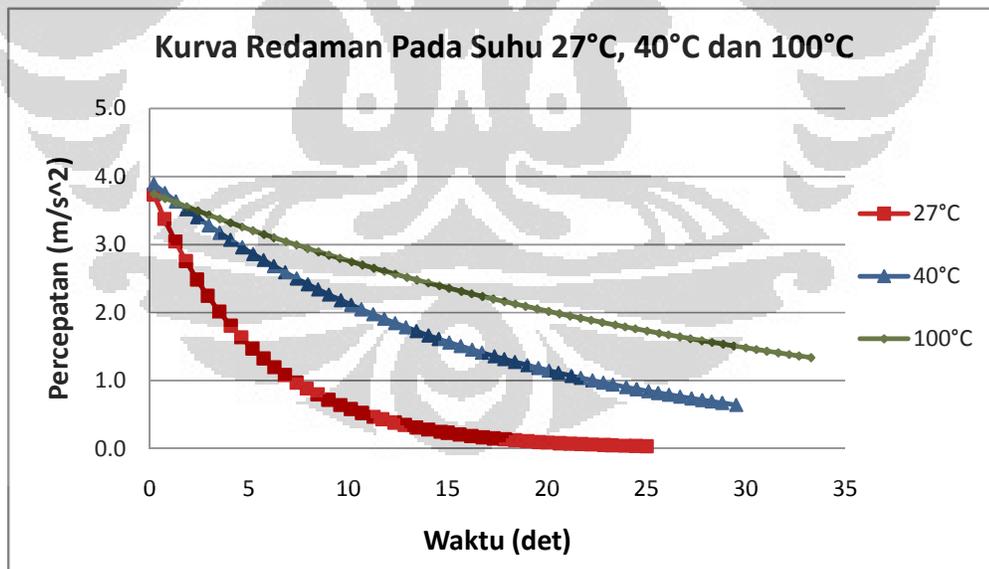
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas pelumas SAE 50 pada suhu 100°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,01384 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,0147 \frac{kg}{ms}$$

$$= 0,147 \text{ Poise} = 14,7 \text{ cPoise}$$

Gambar ketiga kurva redaman pelumas SAE 50 pada suhu 27°C, 40°C dan 100°C tampak seperti pada gambar 4.12.



**Gambar 4.12** Kurva redaman sistem pada pelumas SAE 50 suhu 27°C, 40°C dan 100°C

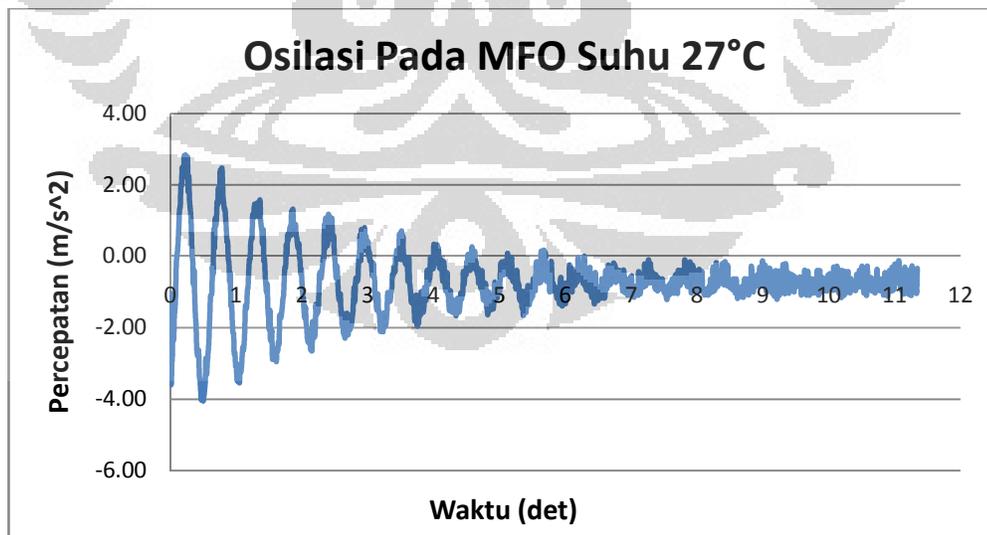
Perbandingan hasil pengujian sampel pelumas SAE 50 di laboratorium dengan hasil pengujian menggunakan osilasi teredam disajikan pada tabel 4.1.

**Tabel 4.2** Hasil uji pelumas SAE 50

Suhu Pengujian	Hasil Laboratorium (cPoise)	Hasil Pengujian (cPosie)
27 °C	-	172
40 °C	196	45,2
100 °C	16,8	14,7

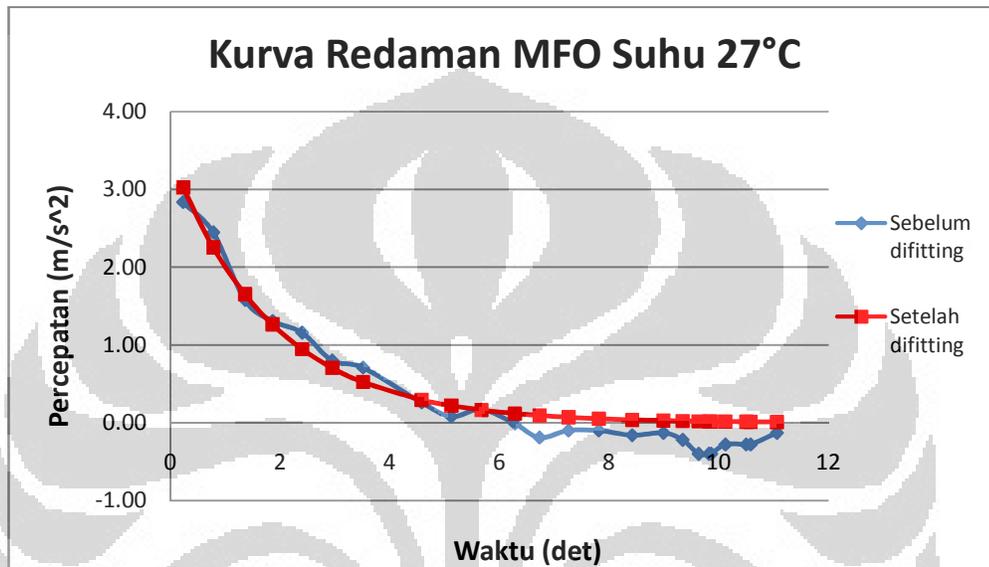
#### 4.3.2 Osilasi Teredam Sampel Marine Fuel Oil (MFO)

Marine Fuel Oil adalah bahan bakar yang digunakan pada kapal laut. Bahan bakar ini memiliki kekentalan atau viskositas yang cukup besar. Hasil pengujian viskositas kinematik di laboratorium dengan metode ASTM D 445 mendapatkan hasil 173,7 cSt atau  $173,7 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Dengan besar densitas  $964,3 \text{ kg/m}^3$ , maka viskositas dinamikny adalah  $0,167 \text{ kg/m.s}$  atau 1,67 Poise. Pengambilan data redaman dilakukan pada suhu rung  $27^\circ\text{C}$ ,  $40^\circ\text{C}$  dan  $100^\circ\text{C}$ . Gelombang osilasi teredam MFO pada suhu  $27^\circ\text{C}$  tampak pada gambar 4.13.



**Gambar 4.13** Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu  $27^\circ\text{C}$

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,4197$  dan  $b = 0,5349$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.14.



Gambar 4.14 Kurva redaman sistem pada MFO suhu 27°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Marine Fuel Oil (MFO) pada suhu 27°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,4197$  dan  $b = 0,5349$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,5349 - 0,0165 = 0,5184 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,5184 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,4914 \frac{kg}{s}$$

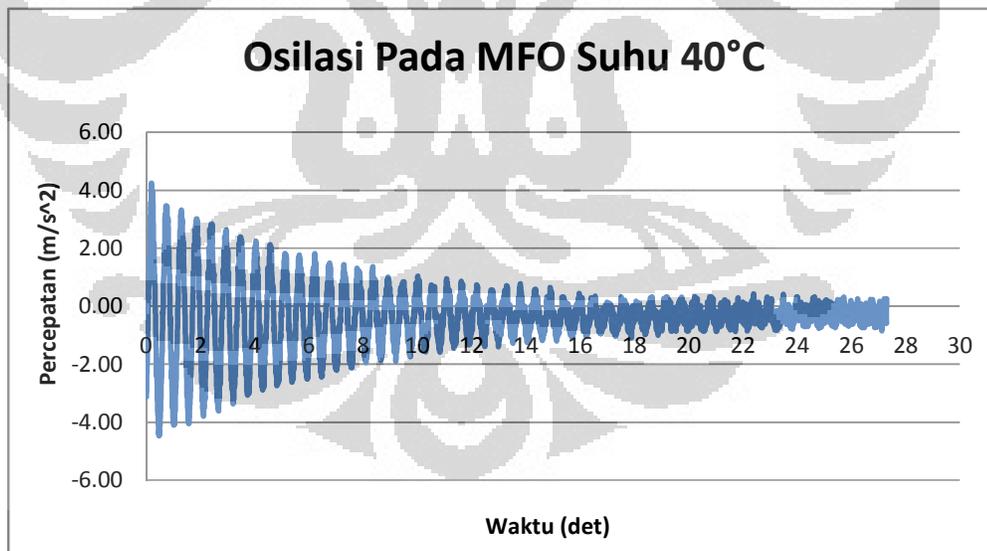
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas MFO pada suhu 27°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,4914 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,5216 \frac{kg}{ms}$$

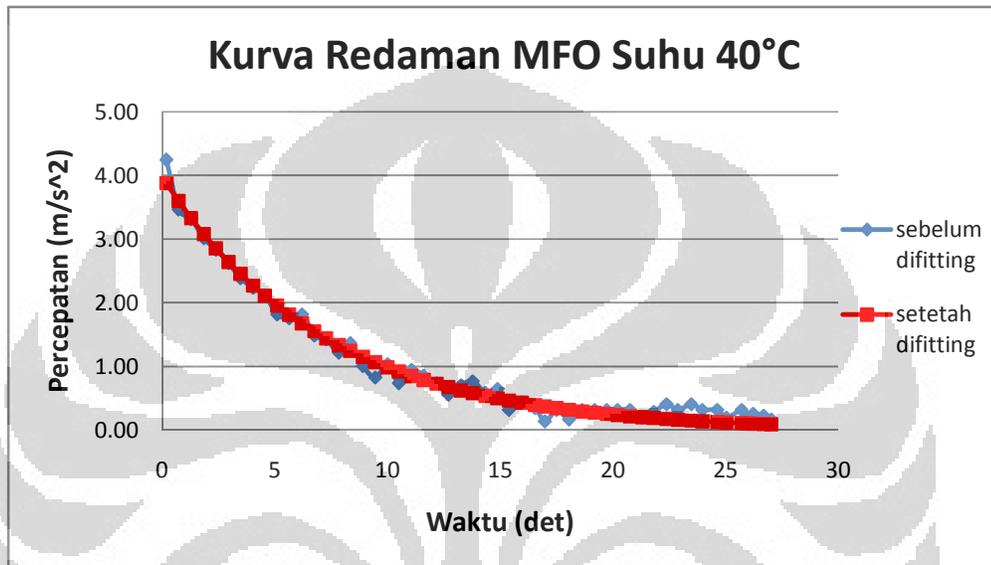
$$= 5,216 \text{ Poise} = 512,6 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 40°C, gelombang osilasi teredam MFO tampak pada gambar 4.15.



**Gambar 4.15** Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu 40°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,9842$  dan  $b = 0,1394$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.16.



. Gambar 4.16 Kurva redaman sistem pada MFO suhu 40°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Marine Fuel Oil (MFO) pada suhu 40°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,9842$  dan  $b = 0,1394$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,1394 - 0,0165 = 0,1229 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,1229 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,1165 \frac{kg}{s}$$

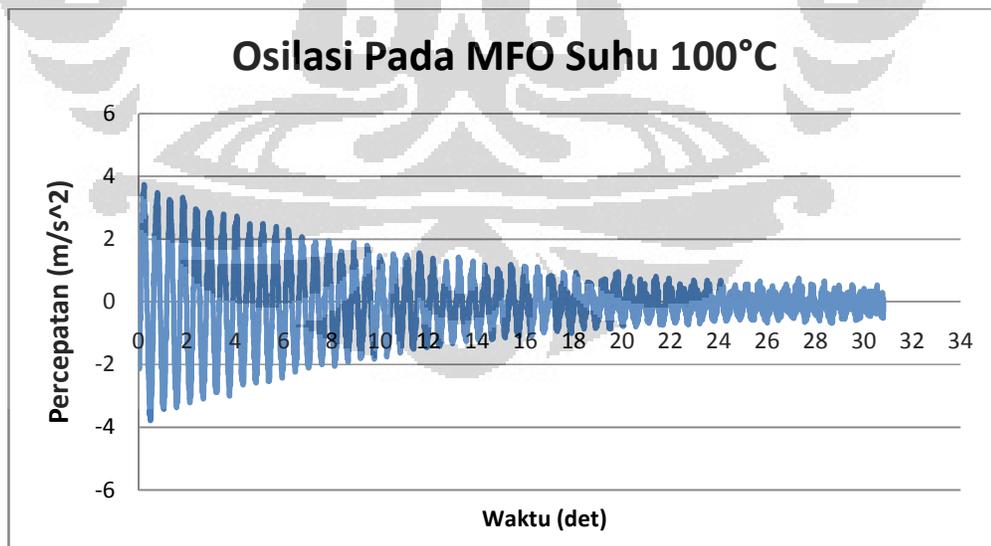
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas MFO pada suhu 40°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,1165 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,1237 \frac{kg}{ms}$$

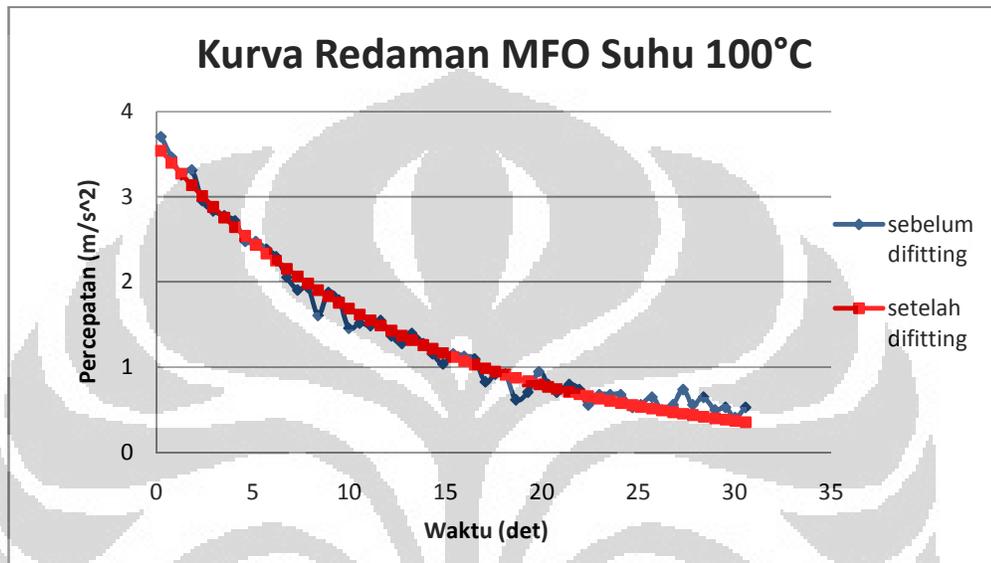
$$= 1,237 \text{ Poise} = 123,7 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 100°C, gelombang osilasi teredam MFO tampak pada gambar 4.17.



**Gambar 4.17** Gelombang osilasi sistem pada MFO suhu 100°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,6003$  dan  $b = 0,076$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.18.



. Gambar 4.18 Kurva redaman sistem pada MFO suhu 100°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Marine Fuel Oil (MFO) pada suhu 100°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,6003$  dan  $b = 0,076$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,076 - 0,0165 = 0,0595 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,0595 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,0564 \frac{kg}{s}$$

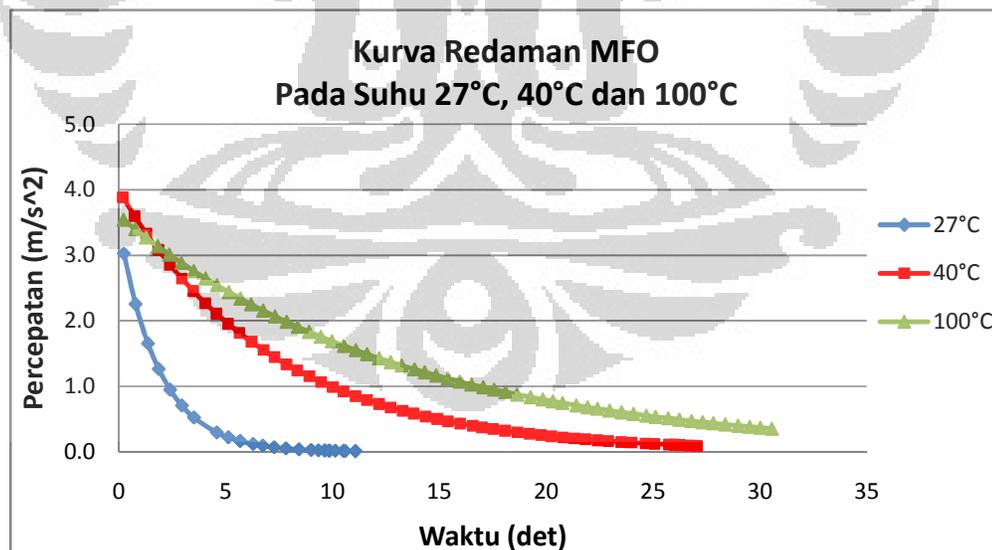
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas MFO pada suhu 100°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,0564 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,05987 \frac{kg}{ms}$$

$$= 0,5987 \text{ Poise} = 59,87 \text{ cPoise}$$

Gambar ketiga kurva redaman Marine Fuel Oil pada suhu 27°C, 40°C dan 100°C tampak seperti pada gambar 4.19.



**Gambar 4.19** Kurva redaman sistem pada MFO suhu 27°C, 40°C dan 100°C

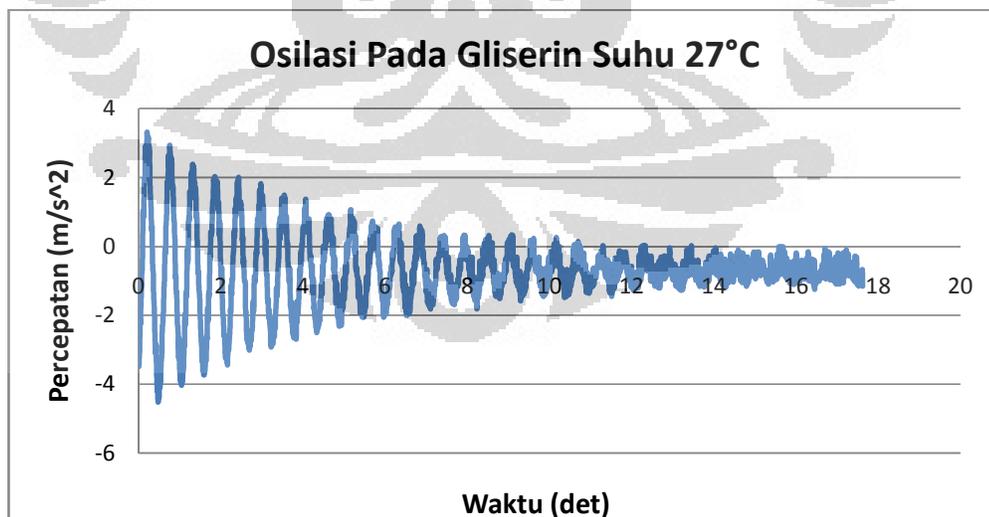
Perbandingan hasil pengujian sampel MFO di laboratorium dengan hasil pengujian menggunakan osilasi teredam disajikan pada tabel 4.2.

**Tabel 4.3** Hasil uji MFO

Suhu Pengujian	Hasil Laboratorium (cPoise)	Hasil Pengujian (cPosie)
27 °C	-	512,6
40 °C	167	123,7
100 °C	-	59,87

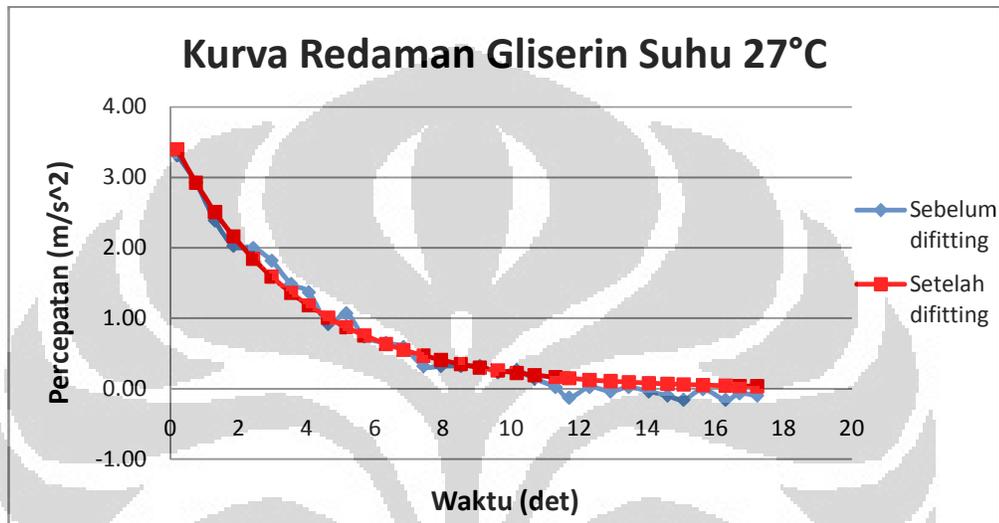
#### 4.3.3 Osilasi Teredam Sampel Gliserin

Data mengenai viskositas gliserin penulis dapatkan dari beberapa sumber seperti buku dan internet. Data tersebut menunjukkan viskositas gliserin pada suhu 0°C, 20°C dan 60°C. Untuk suhu 0°C, 20°C penulis tidak dapat mengambil data pengukuran karena keterbatasan dari alat yang dibuat. Untuk itu penulis mengambil data pengukuran osilasi teredaman pada gliserin pada suhu 27°C, 60°C dan 100°C. Gelombang osilasi teredam Gliserin pada suhu 27°C tampak pada gambar 4.20.



. **Gambar 4.20** Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 27°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,5906$  dan  $b = 0,2743$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.21.



. **Gambar 4.21** Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 27°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Gliserin pada suhu 27°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,5906$  dan  $b = 0,2743$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,2743 - 0,0165 = 0,2578 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,2578 \left( \frac{1}{s} \right) \cdot 2(0,474) (kg)$$

$$= 0,2444 \frac{kg}{s}$$

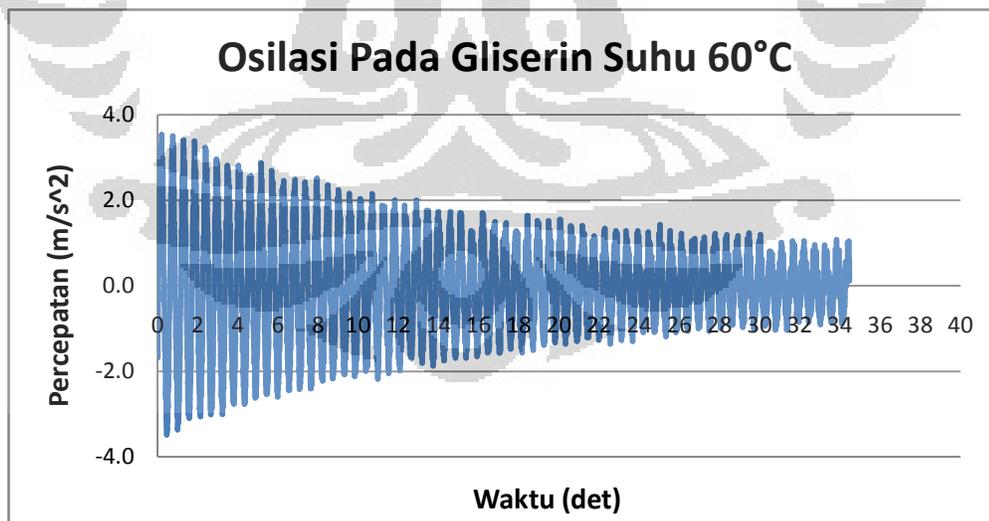
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas Gliserin pada suhu 27°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,2444 \left( \frac{kg}{s} \right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,2594 \frac{kg}{ms}$$

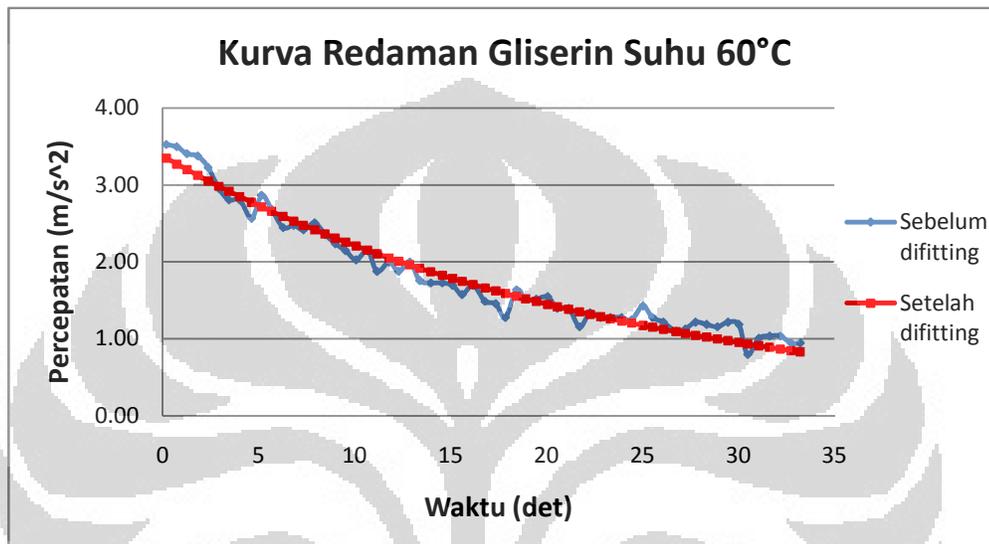
$$= 2,594 \text{ Poise} = 259,4 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 60°C, gelombang osilasi teredam Gliserin tampak pada gambar 4.22.



. **Gambar 4.22** Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 60°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3,377$  dan  $b = 0,0422$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.23.



**Gambar 4.23** Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 60°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Gliserin pada suhu 60°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3,377$  dan  $b = 0,0422$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,0422 - 0,0165 = 0,2578 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,0257 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,02436 \frac{kg}{s}$$

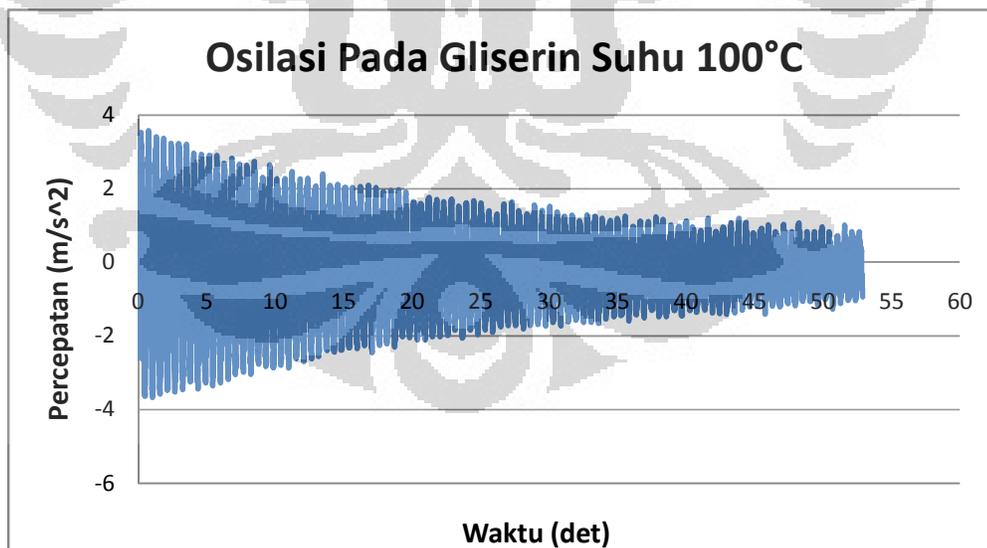
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas Gliserin pada suhu 60°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,02436 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,02586 \frac{kg}{ms}$$

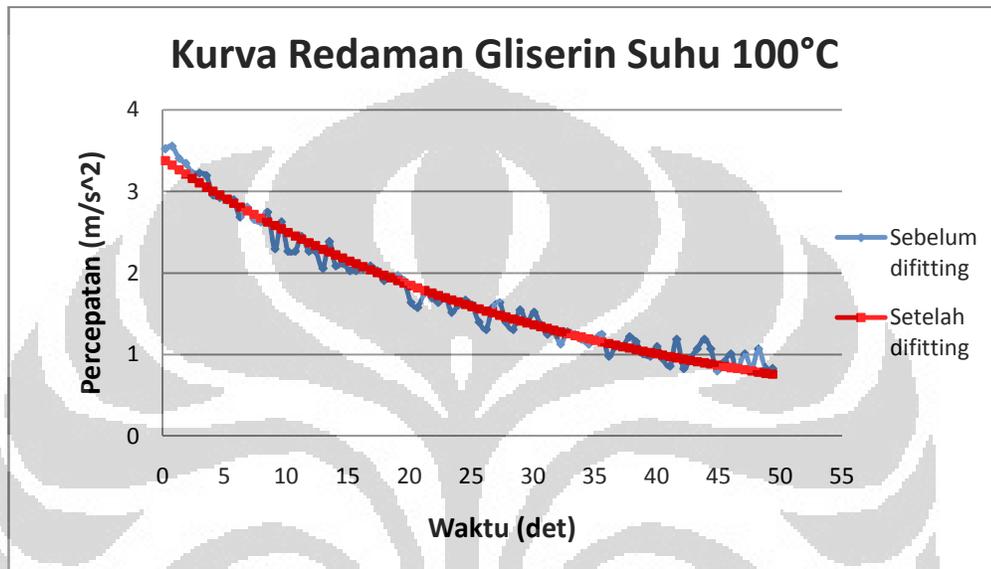
$$= 0,2586 \text{ Poise} = 25,86 \text{ cPoise}$$

Untuk pengukuran pada suhu 100°C, gelombang osilasi teredam Gliserin tampak pada gambar 4.24.



**Gambar 4.24** Gelombang osilasi sistem pada Gliserin suhu 100°C

Jika puncak-puncak dari gelombang teredam tersebut diambil, diplot dan kemudian dilakukan fitting dengan persamaan  $y = Ae^{-bt}$ , akan diperoleh nilai  $A = 3.3962$  dan  $b = 0.0304$ . Gambar kurva data sebelum dan sesudah dilakukan fitting tampak pada gambar 4.25



. Gambar 4.25 Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 100°C

Perhitungan nilai koefisien viskositas sampel Gliserin pada suhu 100°C adalah sebagai berikut :

Dari hasil fitting data diperoleh nilai  $A = 3.3962$  dan  $b = 0.0304$

$$\begin{aligned} b_{\text{cairan}} &= b_{\text{total}} - b_{\text{udara}} \\ &= 0,0304 - 0,0165 = 0,0139 \end{aligned}$$

Dari persamaan 2.42 dan 2.37

$$2b = \frac{r}{m} \quad \text{atau} \quad b = \frac{r}{2m}$$

Dengan massa yang digunakan sebesar 0,474 kg, maka diperoleh nilai  $r$  sebesar

$$b = \frac{r}{2m}$$

$$r = b \cdot 2m = 0,0139 \left(\frac{1}{s}\right) \cdot 2(0,474)(kg) = 0,01317 \frac{kg}{s}$$

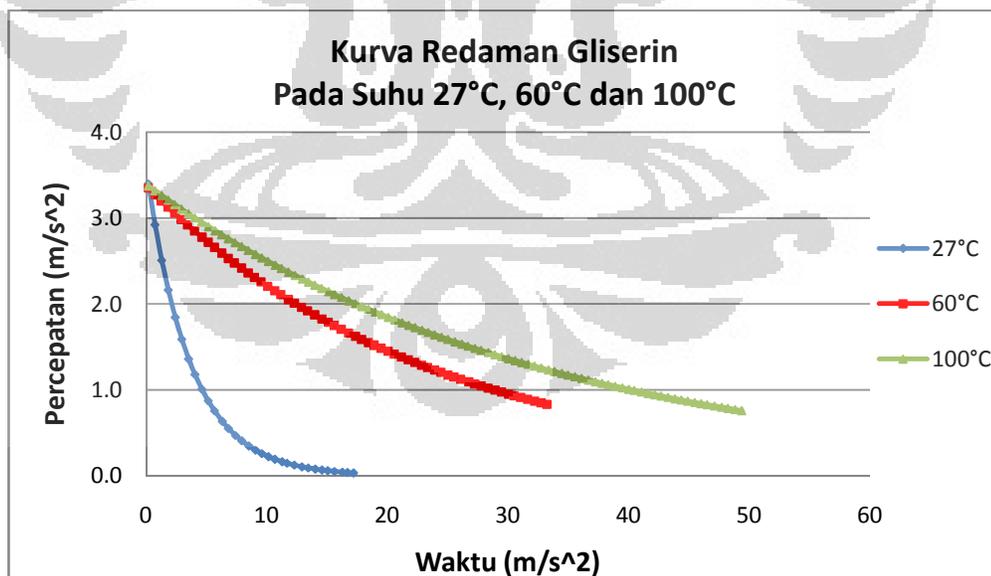
Dengan persamaan 2.37 diperoleh koefisien viskositas Gliserin pada suhu 100°C sebesar

$$r = 6\pi\eta R$$

$$\eta = \frac{r}{6\pi R} = \frac{0,01317 \left(\frac{kg}{s}\right)}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,05 (m)} = 0,01398 \frac{kg}{ms}$$

$$= 0,1398 \text{ Poise} = 13,98 \text{ cPoise}$$

Gambar ketiga kurva redaman Gliserin pada suhu 27°C, 60°C dan 100°C tampak seperti pada gambar 4.26.



**Gambar 4.26** Kurva redaman sistem pada Gliserin suhu 27°C, 60°C dan 100°C

Perbandingan hasil pengujian sampel Gliserin di laboratorium dengan hasil pengujian menggunakan osilasi teredam disajikan pada tabel 4.3.

**Tabel 4.4** Hasil uji Gliserin

<b>Suhu Pengujian</b>	<b>Hasil Laboratorium (cPoise)</b>	<b>Hasil Pengujian (cPosie)</b>
27 °C	-	259,4
60 °C	81,3	25,86
100 °C	14,8	13,98



## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

Setelah menyelesaikan perancangan dan pengujian sistem serta pengambilan data dan analisisnya diambil kesimpulan dan saran-saran yang dituliskan dibawah ini.

#### 5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat setelah melakukan perancangan dan pengujian sistem serta pengambilan data dan analisisnya adalah sebagai berikut :

1. Pembuatan sistem mekanik osilasi dengan massa 0,474 kg, konstantan pegas 61,798 N/m dan cairan sebagai redamannya akan terjadi *underdamped oscillation*.
2. Pembuatan perangkat elektronika dengan menggunakan mikrokontroller ATmega8, modul sensor *accelerometer* DC-SS009 dan komunikasi serial dengan PC dapat mendeteksi percepatan pada massa yang berosilasi dan dapat mengirim signal percepatan tersebut ke PC.
3. Pemrograman dengan LabView 8.5 sebagai *Graphical User Interface* dapat menampilkan data osilasi massa pada pegas.
4. Persamaan osilasi teredam dan persamaan Stokes tentang gaya gesek pada cairan dapat digunakan untuk mengukur koefisien viskositas dinamik suatu cairan dari besarnya nilai koefisien redaman.
5. Semakin tinggi suhu suatu cairan akan semakin kecil nilai koefisien viskositas cairan tersebut
6. Hubungan antara koefisien redaman dengan koefisien viskositas dinamik dari suatu cairan adalah berbanding lurus dimana semakin besar koefisien redaman akan semakin besar pula koefisien viskositas dinamikny.

7. Hasil pengujian viskositas dinamik dengan metode osilasi teredam pada suhu yang semakin tinggi menunjukkan hasil yang semakin mendekati hasil pengujian di laboratorium yang menggunakan metode standard ASTM D445.

## 5.2 Saran

Dari pengerjaan skripsi ini penulis memberikan beberapa saran sebagai berikut :

1. Untuk dapat menghasilkan osilasi yang lebih baik pemilihan pegas, penentuan berat beban dan bentuk bebannya serta pembuatan sistem mekanik harus dibuat sedemikian rupa sehingga osilasi yang terjadi tidak terlalu cepat, meminimalkan gerakan selain gerakan pada sumbu y dan meminimalkan terjadinya redaman akibat gesekan udara.
2. Pengaturan temperatur cairan perlu dibuat lebih baik dan lebih stabil sehingga pengukuran viskositas pada suatu temperatur benar-benar sesuai pada temperatur yang diharapkan.
3. Perlu diteliti kecenderungan metode osilasi teredam untuk mengukur viskositas cairan apakah lebih sesuai untuk sampel yang kental atau sampel yang lebih encer, atau untuk batasan suhu tertentu, mengingat beberapa metode pengujian viskositas lebih sesuai untuk suatu sampel dan tidak sesuai untuk sampel yang lain dari sisi kekentalannya.
4. Perlu diteliti lebih lanjut perbandingan penggunaan metode osilasi teredam untuk mendapatkan koefisien viskositas dinamik dengan penggunaan metode standar ASTM D445 sebagai metode pengukuran koefisien viskositas kinematik dan viskositas dinamik.

## DAFTAR REFERENSI

1. Viswanath, D.S (2007) *Viscosity of Liquids Theory, Estimation, Experiment and Data*, Springer.
2. Raymond, A.S dan John, W.J (2010) *Physics for Scientists and Engineers with Modern physics*, Brooks/Cole 20 Davis Drive Belmont, CA 94002-3098 USA
3. Pain, H.J (2005) *The Physics of Vibrations and Waves*, John Wiley & Sons Ltd, England
4. Boas, M.L(1983) *Mathematical Methods In The Physical Sciences*, John Wiley & Sons Ltd, Canada
5. Kilian, Christopher. T (2001) *Modern Control Tecnology Components and Systems*, Delmar Thomson Learning
6. Webster, John G (1999) *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*, CRC Press LLC
7. Sure Electronics, *3 Axis Acceleration Sensor Board User's Guide*, Copyright 2004-2007 Sure Electronics Inc
8. Dimension Engineering, *DE-ACCM3D Buffered  $\pm 3g$  Tri-axis Accelerometer* <<http://www.dimensionengineering.com/DE-ACCM3D.htm>>
9. Texas Instrument, *Accelerometers and How They work* <[www2.usfirst.org/2005comp/Manuals/Acceler1.pdf](http://www2.usfirst.org/2005comp/Manuals/Acceler1.pdf)>





## PROGRAM MIKROKONTROLER

```
$regfile = "m8def.dat"      ' Jenis microcontroller yang digunakan ATmega8
$crystal = 11059200        ' Besar frekuensi crystal yang digunakan
$baud = 115200             ' Kecepatan transmisi data seri yang digunakan
```

```
On Urxc Data_seri_in
```

```
Enable Interrupts
Enable Urxc
```

```
Config Adc = Single , Prescaler = Auto , Reference = Avcc
```

```
Dim Kirim_data_flag As Bit
Dim Start_program_flag As Bit
Dim Ulang As Bit
Dim Data_x As Word
Dim Data_y As Word
Dim Data_z As Word
Dim Data_seri As String * 1
```

```
Main_program:
```

```
Start_program_flag = 0
```

```
Ulang = 1
```

```
Start Adc
```

```
Do
```

```
  If Start_program_flag = 1 Then
```

```
    Data_x = Getadc(3)
```

```
    Data_y = Getadc(4)
```

```
    Data_z = Getadc(5)
```

```
  If Kirim_data_flag = 1 Then
```

```
    Kirim_data_flag = 0
```

```
    Print Data_x ; ":" ; Data_y ; ":" ; Data_z ; "#"
```

```
  End If
```

```
End If
```

```
Loop Until Ulang = 0
```

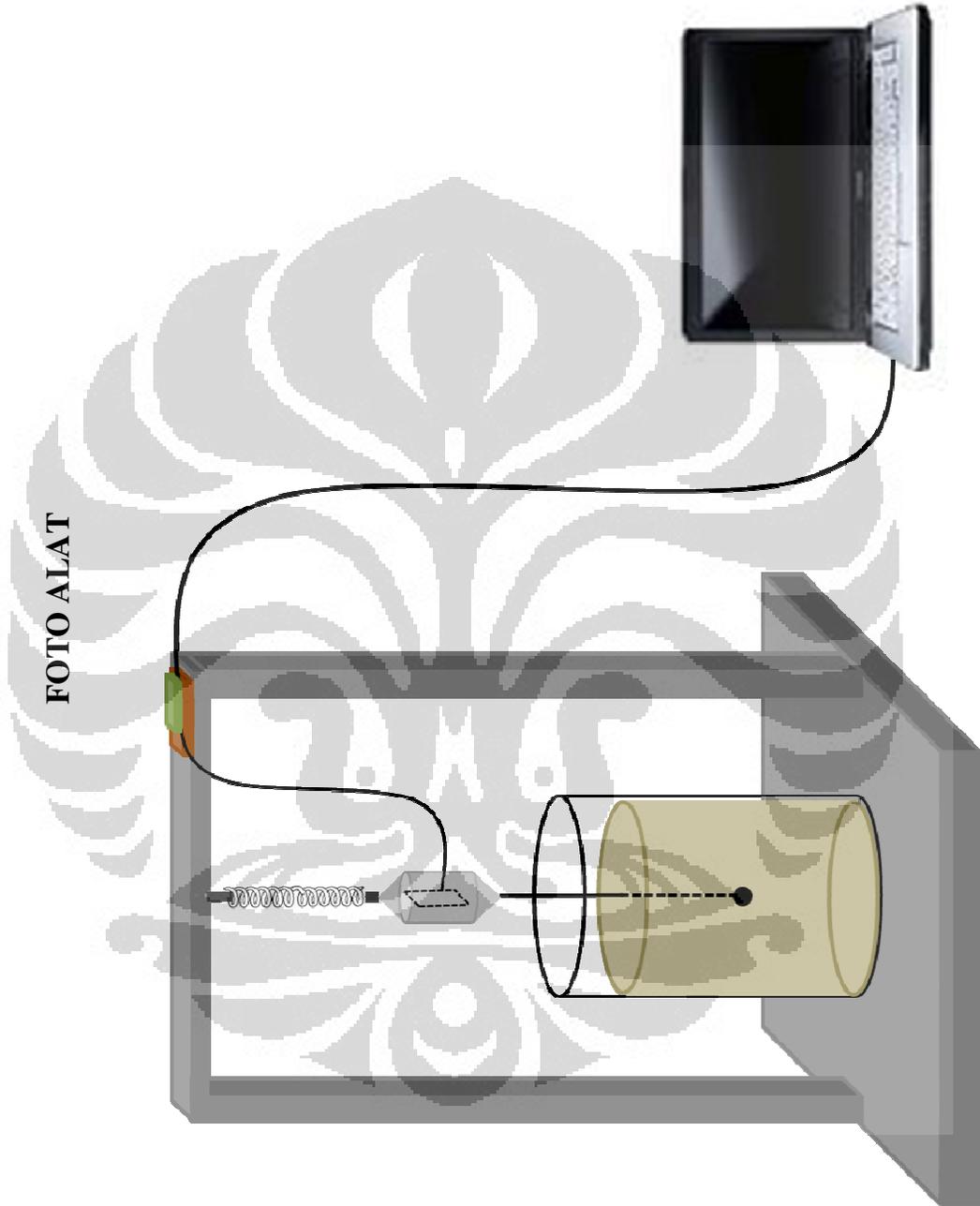
```
Goto Main_program
```

```
Data_seri_in:  
Disable Interrupts  
Data_seri = Inkey()  
If Data_seri = "*" Then  
    Data_seri = Waitkey()  
    If Data_seri = "R" Then Start_program_flag = 1  
    If Data_seri = "G" Then Kirim_data_flag = 1  
    If Data_seri = "S" Then Ulang = 0  
End If  
Enable Interrupts  
Return
```





FOTO ALAT



Universitas Indonesia

### Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu X

$\theta$	Sin $\theta$	Data ADC (Desimal)	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	g sin $\theta$
0	0.000	654.65	1.60	0.00	0.000	0.000
10	0.174	711.52	1.74	0.17	1.702	1.703
20	0.342	766.68	1.87	0.34	3.355	3.355
30	0.500	818.40	2.00	0.50	4.905	4.905
40	0.643	864.97	2.11	0.64	6.300	6.306
50	0.766	905.38	2.21	0.77	7.512	7.515
60	0.866	938.27	2.29	0.87	8.497	8.496
70	0.940	962.14	2.35	0.94	9.212	9.218
80	0.985	977.32	2.39	0.99	9.667	9.661
90	1.000	982.16	2.40	1.00	9.812	9.810

### Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu Y

$\theta$	Sin $\theta$	Data ADC (Desimal)	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	g sin $\theta$
0	0.000	698.79	1.71	0.00	0.000	0.000
10	0.174	756.70	1.85	0.17	1.707	1.703
20	0.342	811.76	1.98	0.34	3.357	3.355
30	0.500	863.52	2.11	0.50	4.908	4.905
40	0.643	908.63	2.22	0.64	6.260	6.306
50	0.766	950.52	2.32	0.77	7.515	7.515
60	0.866	983.23	2.40	0.87	8.496	8.496
70	0.940	1007.26	2.46	0.94	9.216	9.218
80	0.985	1022.16	2.50	0.98	9.662	9.661
90	1.000	1027.18	2.51	1.00	9.813	9.810

### Kalibrasi sensor accelerometer pada sumbu Z

$\theta$	Sin $\theta$	Data ADC (Desimal)	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	g sin $\theta$
0	0.000	665.34	1.63	0.00	0.000	0.000
10	0.174	722.23	1.76	0.17	1.705	1.703
20	0.342	777.26	1.90	0.34	3.354	3.355
30	0.500	829.02	2.03	0.50	4.905	4.905
40	0.643	875.75	2.14	0.64	6.305	6.306
50	0.766	916.22	2.24	0.77	7.518	7.515
60	0.866	948.76	2.32	0.87	8.493	8.496
70	0.940	966.93	2.36	0.92	9.038	9.218
80	0.985	987.75	2.41	0.98	9.662	9.661
90	1.000	992.73	2.43	1.00	9.811	9.810

**Nilai puncak-puncak gelombang osilasi tanpa redaman cairan**

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.5791	b=0.0165
0.26	494	1.207	-0.628	3.645	3.564	
0.8	493	1.205	-0.632	3.615	3.532	
1.36	492	1.202	-0.635	3.585	3.500	
1.9	488	1.193	-0.647	3.465	3.469	
2.44	485	1.185	-0.656	3.375	3.438	
2.99	479	1.171	-0.674	3.195	3.407	
3.53	484	1.183	-0.659	3.345	3.377	
4.1	484	1.183	-0.659	3.345	3.345	
4.65	481	1.175	-0.668	3.255	3.315	
5.17	481	1.175	-0.668	3.255	3.286	
5.73	482	1.178	-0.665	3.285	3.256	
6.31	481	1.175	-0.668	3.255	3.225	
6.88	480	1.173	-0.671	3.225	3.195	
7.4	477	1.166	-0.680	3.135	3.168	
7.97	476	1.163	-0.683	3.105	3.138	
8.53	478	1.168	-0.677	3.165	3.109	
9.05	478	1.168	-0.677	3.165	3.083	
9.62	473	1.156	-0.693	3.016	3.054	
10.17	474	1.158	-0.690	3.045	3.026	
10.67	473	1.156	-0.693	3.016	3.001	

Nilai puncak-puncak gelombang osilasi pelumas SAE 50 suhu 27°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.888	b=0.1875
0.21	493	1.205	-0.632	3.615		3.738
0.75	483	1.180	-0.662	3.315		3.378
1.3	477	1.166	-0.680	3.135		3.047
1.83	462	1.129	-0.726	2.686		2.759
2.38	455	1.112	-0.748	2.476		2.488
2.92	444	1.085	-0.781	2.146		2.249
3.5	446	1.090	-0.775	2.206		2.017
4.08	431	1.053	-0.821	1.757		1.809
4.61	435	1.063	-0.809	1.877		1.638
5.18	418	1.022	-0.861	1.367		1.472
5.73	423	1.034	-0.845	1.517		1.328
6.28	414	1.012	-0.873	1.247		1.198
6.8	407	0.995	-0.894	1.038		1.086
7.4	410	1.002	-0.885	1.128		0.971
7.9	413	1.009	-0.876	1.217		0.884
8.45	397	0.970	-0.925	0.738		0.797
8.99	395	0.965	-0.931	0.678		0.721
9.6	399	0.975	-0.919	0.798		0.643
10.12	395	0.965	-0.931	0.678		0.583
10.68	395	0.965	-0.931	0.678		0.525
11.26	380	0.929	-0.977	0.229		0.471
11.71	382	0.934	-0.971	0.289		0.433
12.33	378	0.924	-0.983	0.169		0.385
12.84	383	0.936	-0.968	0.318		0.350
13.42	387	0.946	-0.955	0.438		0.314
14.02	386	0.943	-0.958	0.408		0.281
14.64	375	0.916	-0.992	0.079		0.250
15	371	0.907	-1.004	-0.041		0.233
15.59	374	0.914	-0.995	0.049		0.209
16.19	375	0.916	-0.992	0.079		0.187
16.76	370	0.904	-1.007	-0.071		0.168
17.31	366	0.894	-1.019	-0.191		0.151
17.86	368	0.899	-1.013	-0.131		0.137
18.39	378	0.924	-0.983	0.169		0.124
19.01	375	0.916	-0.992	0.079		0.110
19.58	375	0.916	-0.992	0.079		0.099
20.01	372	0.909	-1.001	-0.011		0.091
20.63	379	0.926	-0.980	0.199		0.081
21.16	375	0.916	-0.992	0.079		0.074
21.72	374	0.914	-0.995	0.049		0.066
22.24	373	0.912	-0.998	0.019		0.060
22.87	370	0.904	-1.007	-0.071		0.053
23.25	368	0.899	-1.013	-0.131		0.050
23.92	372	0.909	-1.001	-0.011		0.044
24.47	369	0.902	-1.010	-0.101		0.040
25	371	0.907	-1.004	-0.041		0.036

## Nilai puncak-puncak gelombang osilasi pelumas SAE 50 suhu 40°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.945	b=0.0614
0.22	516	1.261	-0.561	4.304	3.892	
0.78	494	1.207	-0.628	3.645	3.761	
1.33	486	1.188	-0.653	3.405	3.636	
1.86	494	1.207	-0.628	3.645	3.519	
2.41	486	1.188	-0.653	3.405	3.402	
2.99	478	1.168	-0.677	3.165	3.283	
3.53	481	1.175	-0.668	3.255	3.176	
4.07	476	1.163	-0.683	3.105	3.073	
4.67	463	1.131	-0.723	2.716	2.962	
5.22	462	1.129	-0.726	2.686	2.863	
5.75	474	1.158	-0.690	3.045	2.772	
6.26	460	1.124	-0.732	2.626	2.686	
6.83	463	1.131	-0.723	2.716	2.594	
7.41	451	1.102	-0.760	2.356	2.503	
7.97	444	1.085	-0.781	2.146	2.418	
8.49	454	1.109	-0.751	2.446	2.342	
9.03	451	1.102	-0.760	2.356	2.266	
9.63	443	1.083	-0.784	2.117	2.184	
10.15	443	1.083	-0.784	2.117	2.115	
10.66	436	1.065	-0.806	1.907	2.050	
11.26	440	1.075	-0.793	2.027	1.976	
11.81	434	1.061	-0.812	1.847	1.910	
12.36	435	1.063	-0.809	1.877	1.847	
12.9	440	1.075	-0.793	2.027	1.787	
13.44	430	1.051	-0.824	1.727	1.728	
14.04	422	1.031	-0.848	1.487	1.666	
14.55	432	1.056	-0.818	1.787	1.615	
15.09	428	1.046	-0.830	1.667	1.562	
15.66	413	1.009	-0.876	1.217	1.508	
16.23	427	1.043	-0.833	1.637	1.456	
16.73	421	1.029	-0.851	1.457	1.412	
17.36	412	1.007	-0.879	1.188	1.359	
17.85	419	1.024	-0.858	1.397	1.318	
18.39	415	1.014	-0.870	1.277	1.275	
19.01	407	0.995	-0.894	1.038	1.228	
19.57	413	1.009	-0.876	1.217	1.186	
20.09	415	1.014	-0.870	1.277	1.149	
20.57	407	0.995	-0.894	1.038	1.116	
21.23	408	0.997	-0.891	1.068	1.071	
21.7	408	0.997	-0.891	1.068	1.041	
22.29	415	1.014	-0.870	1.277	1.004	
22.83	414	1.012	-0.873	1.247	0.971	
23.31	398	0.973	-0.922	0.768	0.943	
23.99	407	0.995	-0.894	1.038	0.904	
24.51	392	0.958	-0.940	0.588	0.876	
25.11	398	0.973	-0.922	0.768	0.844	
25.59	410	1.002	-0.885	1.128	0.820	
26.14	395	0.965	-0.931	0.678	0.793	
26.7	403	0.985	-0.906	0.918	0.766	
27.27	397	0.970	-0.925	0.738	0.739	
27.81	399	0.975	-0.919	0.798	0.715	
28.29	388	0.948	-0.952	0.468	0.695	
28.82	393	0.960	-0.937	0.618	0.672	
29.52	393	0.960	-0.937	0.618	0.644	

Nilai puncak-puncak gelombang osilasi pelumas SAE 50 suhu 100°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.7697	b=0.0311
0.22	501	1.2243	-0.607	3.855		3.744
0.78	498	1.2170	-0.616	3.765		3.679
1.34	489	1.1950	-0.644	3.495		3.616
1.88	499	1.2195	-0.613	3.795		3.556
2.43	490	1.1975	-0.641	3.525		3.495
2.99	499	1.2195	-0.613	3.795		3.435
3.53	487	1.1901	-0.650	3.435		3.378
4.08	490	1.1975	-0.641	3.525		3.320
4.66	478	1.1681	-0.677	3.165		3.261
5.2	486	1.1877	-0.653	3.405		3.207
5.76	467	1.1413	-0.711	2.836		3.151
6.25	471	1.1510	-0.699	2.956		3.104
6.87	477	1.1657	-0.680	3.135		3.045
7.4	466	1.1388	-0.714	2.806		2.995
7.95	471	1.1510	-0.699	2.956		2.944
8.5	471	1.1510	-0.699	2.956		2.894
9.03	460	1.1241	-0.732	2.626		2.847
9.58	466	1.1388	-0.714	2.806		2.798
10.17	462	1.1290	-0.726	2.686		2.748
10.71	465	1.1364	-0.717	2.776		2.702
11.29	460	1.1241	-0.732	2.626		2.653
11.82	455	1.1119	-0.748	2.476		2.610
12.36	456	1.1144	-0.745	2.506		2.567
12.95	451	1.1022	-0.760	2.356		2.520
13.45	444	1.0850	-0.781	2.146		2.481
14.02	448	1.0948	-0.769	2.266		2.438
14.58	456	1.1144	-0.745	2.506		2.395
15.07	452	1.1046	-0.757	2.386		2.359
15.69	442	1.0802	-0.787	2.087		2.314
16.2	440	1.0753	-0.793	2.027		2.278
16.75	455	1.1119	-0.748	2.476		2.239
17.3	447	1.0924	-0.772	2.236		2.201
17.85	444	1.0850	-0.781	2.146		2.164
18.4	447	1.0924	-0.772	2.236		2.127
18.92	439	1.0728	-0.796	1.997		2.093
19.5	436	1.0655	-0.806	1.907		2.056
20.09	439	1.0728	-0.796	1.997		2.018
20.63	441	1.0777	-0.790	2.057		1.985
21.16	427	1.0435	-0.833	1.637		1.952
21.69	438	1.0704	-0.800	1.967		1.920
22.22	423	1.0337	-0.845	1.517		1.889
22.78	437	1.0679	-0.803	1.937		1.856
23.43	428	1.0459	-0.830	1.667		1.819
23.93	438	1.0704	-0.800	1.967		1.791
24.44	431	1.0533	-0.821	1.757		1.763
25.03	436	1.0655	-0.806	1.907		1.731
25.64	419	1.0239	-0.858	1.397		1.698
26.11	435	1.0630	-0.809	1.877		1.674
26.69	426	1.0411	-0.836	1.607		1.644
27.21	437	1.0679	-0.803	1.937		1.617
27.79	418	1.0215	-0.861	1.367		1.588
28.31	431	1.0533	-0.821	1.757		1.563

28.86	416	1.0166	-0.867	1.307	1.536
29.39	429	1.0484	-0.827	1.697	1.511
30	434	1.0606	-0.812	1.847	1.483
30.53	426	1.0411	-0.836	1.607	1.459
31.06	419	1.0239	-0.858	1.397	1.435
31.64	423	1.0337	-0.845	1.517	1.409
32.19	423	1.0337	-0.845	1.517	1.385
32.68	423	1.0337	-0.845	1.517	1.364
33.28	423	1.0337	-0.845	1.517	1.339

### Nilai puncak-puncak gelombang osilasi MFO suhu 27°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.4197	b=0.5349
0.23	467	1.141	-0.711	2.836	3.024	
0.78	454	1.109	-0.751	2.446	2.253	
1.36	425	1.039	-0.839	1.577	1.652	
1.86	416	1.017	-0.867	1.307	1.264	
2.4	411	1.004	-0.882	1.158	0.947	
2.95	399	0.975	-0.919	0.798	0.706	
3.51	396	0.968	-0.928	0.708	0.523	
4.58	381	0.931	-0.974	0.259	0.295	
5.12	375	0.916	-0.992	0.079	0.221	
5.67	378	0.924	-0.983	0.169	0.165	
6.28	372	0.909	-1.001	-0.011	0.119	
6.73	366	0.894	-1.019	-0.191	0.093	
7.26	369	0.902	-1.010	-0.101	0.070	
7.81	369	0.902	-1.010	-0.101	0.052	
8.42	367	0.897	-1.016	-0.161	0.038	
8.99	368	0.899	-1.013	-0.131	0.028	
9.34	365	0.892	-1.023	-0.221	0.023	
9.63	359	0.877	-1.041	-0.401	0.020	
9.82	359	0.877	-1.041	-0.401	0.018	
9.86	359	0.877	-1.041	-0.401	0.018	
10.12	363	0.887	-1.029	-0.281	0.015	
10.5	363	0.887	-1.029	-0.281	0.012	
10.58	363	0.887	-1.029	-0.281	0.012	
11.06	368	0.899	-1.013	-0.131	0.009	

Nilai puncak-puncak gelombang osilasi MFO suhu 40°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.9842	b=0.1394
0.19	514	1.256	-0.567	4.244		3.880
0.73	488	1.193	-0.647	3.465		3.599
1.29	483	1.180	-0.662	3.315		3.328
1.85	473	1.156	-0.693	3.016		3.079
2.39	467	1.141	-0.711	2.836		2.855
2.95	460	1.124	-0.732	2.626		2.641
3.48	452	1.105	-0.757	2.386		2.453
4.04	447	1.092	-0.772	2.236		2.269
4.56	443	1.083	-0.784	2.117		2.110
5.11	433	1.058	-0.815	1.817		1.954
5.64	431	1.053	-0.821	1.757		1.815
6.21	433	1.058	-0.815	1.817		1.676
6.76	422	1.031	-0.848	1.487		1.553
7.28	420	1.026	-0.855	1.427		1.444
7.84	413	1.009	-0.876	1.217		1.336
8.35	418	1.022	-0.861	1.367		1.244
8.91	406	0.992	-0.897	1.008		1.151
9.46	400	0.978	-0.916	0.828		1.066
10.01	407	0.995	-0.894	1.038		0.987
10.51	397	0.970	-0.925	0.738		0.921
11.07	404	0.987	-0.903	0.948		0.851
11.61	401	0.980	-0.913	0.858		0.790
12.18	397	0.970	-0.925	0.738		0.729
12.71	391	0.956	-0.943	0.558		0.677
13.28	396	0.968	-0.928	0.708		0.626
13.79	398	0.973	-0.922	0.768		0.583
14.35	392	0.958	-0.940	0.588		0.539
14.89	394	0.963	-0.934	0.648		0.500
15.39	383	0.936	-0.968	0.318		0.466
15.96	387	0.946	-0.955	0.438		0.431
16.55	384	0.938	-0.964	0.348		0.397
16.99	377	0.921	-0.986	0.139		0.373
17.51	383	0.936	-0.968	0.318		0.347
18.06	378	0.924	-0.983	0.169		0.321
18.65	383	0.936	-0.968	0.318		0.296
19.2	383	0.936	-0.968	0.318		0.274
19.74	383	0.936	-0.968	0.318		0.254
20.22	383	0.936	-0.968	0.318		0.238
20.77	383	0.936	-0.968	0.318		0.220
21.31	379	0.926	-0.980	0.199		0.204
21.82	382	0.934	-0.971	0.289		0.190
22.39	386	0.943	-0.958	0.408		0.176
22.89	383	0.936	-0.968	0.318		0.164
23.49	386	0.943	-0.958	0.408		0.151
23.98	383	0.936	-0.968	0.318		0.141
24.64	383	0.936	-0.968	0.318		0.128
25.05	379	0.926	-0.980	0.199		0.121
25.72	383	0.936	-0.968	0.318		0.110
25.98	379	0.926	-0.980	0.199		0.107
26.23	381	0.931	-0.974	0.259		0.103
26.7	380	0.929	-0.977	0.229		0.096
27.04	378	0.924	-0.983	0.169		0.092

### Nilai puncak-puncak gelombang osilasi MFO suhu 100°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.6003	b=0.076
0.22	496	1.212	-0.622	3.705		3.541
0.77	488	1.193	-0.647	3.465		3.396
1.27	481	1.175	-0.668	3.255		3.269
1.82	483	1.180	-0.662	3.315		3.135
2.36	471	1.151	-0.699	2.956		3.009
2.93	467	1.141	-0.711	2.836		2.882
3.51	465	1.136	-0.717	2.776		2.757
4.06	463	1.131	-0.723	2.716		2.644
4.59	455	1.112	-0.748	2.476		2.540
5.14	455	1.112	-0.748	2.476		2.436
5.69	452	1.105	-0.757	2.386		2.336
6.19	449	1.097	-0.766	2.296		2.249
6.75	441	1.078	-0.790	2.057		2.155
7.31	436	1.065	-0.806	1.907		2.066
7.85	437	1.068	-0.803	1.937		1.983
8.37	426	1.041	-0.836	1.607		1.906
8.9	435	1.063	-0.809	1.877		1.831
9.45	432	1.056	-0.818	1.787		1.756
9.97	421	1.029	-0.851	1.457		1.688
10.53	423	1.034	-0.845	1.517		1.617
11.09	422	1.031	-0.848	1.487		1.550
11.61	424	1.036	-0.842	1.547		1.490
12.17	418	1.022	-0.861	1.367		1.428
12.72	415	1.014	-0.870	1.277		1.369
13.23	419	1.024	-0.858	1.397		1.317
13.83	415	1.014	-0.870	1.277		1.259
14.31	411	1.004	-0.882	1.158		1.213
14.85	407	0.995	-0.894	1.038		1.165
15.39	411	1.004	-0.882	1.158		1.118
15.95	410	1.002	-0.885	1.128		1.071
16.49	409	1.000	-0.888	1.098		1.028
17.05	400	0.978	-0.916	0.828		0.985
17.56	403	0.985	-0.906	0.918		0.948
18.09	403	0.985	-0.906	0.918		0.910
18.63	393	0.960	-0.937	0.618		0.874
19.26	396	0.968	-0.928	0.708		0.833
19.83	404	0.987	-0.903	0.948		0.798
20.31	399	0.975	-0.919	0.798		0.769
20.75	396	0.968	-0.928	0.708		0.744
21.4	399	0.975	-0.919	0.798		0.708
21.93	397	0.970	-0.925	0.738		0.680
22.39	391	0.956	-0.943	0.558		0.657
22.96	395	0.965	-0.931	0.678		0.629
23.52	395	0.965	-0.931	0.678		0.603
24.08	395	0.965	-0.931	0.678		0.577
24.68	390	0.953	-0.946	0.528		0.552
25.11	391	0.956	-0.943	0.558		0.534
25.7	394	0.963	-0.934	0.648		0.511
26.22	389	0.951	-0.949	0.498		0.491
26.79	391	0.956	-0.943	0.558		0.470
27.31	397	0.970	-0.925	0.738		0.452

27.81	391	0.956	-0.943	0.558	0.435
28.37	394	0.963	-0.934	0.648	0.417
28.97	389	0.951	-0.949	0.498	0.398
29.51	390	0.953	-0.946	0.528	0.382
30.01	386	0.943	-0.958	0.408	0.368
30.55	390	0.953	-0.946	0.528	0.353

**Nilai puncak-puncak gelombang osilasi Gliserin suhu 27°C**

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.5906	b=0.2743
0.2	483	1.180	-0.662	3.315		3.399
0.75	470	1.149	-0.702	2.926		2.923
1.31	452	1.105	-0.757	2.386		2.507
1.85	440	1.075	-0.793	2.027		2.162
2.43	439	1.073	-0.796	1.997		1.844
2.97	433	1.058	-0.815	1.817		1.590
3.54	422	1.031	-0.848	1.487		1.360
4.06	418	1.022	-0.861	1.367		1.179
4.63	403	0.985	-0.906	0.918		1.008
5.16	408	0.997	-0.891	1.068		0.872
5.69	397	0.970	-0.925	0.738		0.754
6.33	394	0.963	-0.934	0.648		0.633
6.84	392	0.958	-0.940	0.588		0.550
7.43	383	0.936	-0.968	0.318		0.468
7.94	383	0.936	-0.968	0.318		0.407
8.52	383	0.936	-0.968	0.318		0.347
9.08	383	0.936	-0.968	0.318		0.298
9.61	380	0.929	-0.977	0.229		0.257
10.16	381	0.931	-0.974	0.259		0.221
10.69	377	0.921	-0.986	0.139		0.191
11.3	373	0.912	-0.998	0.019		0.162
11.7	368	0.899	-1.013	-0.131		0.145
12.3	373	0.912	-0.998	0.019		0.123
12.92	371	0.907	-1.004	-0.041		0.104
13.45	373	0.912	-0.998	0.019		0.090
14.04	371	0.907	-1.004	-0.041		0.076
14.59	369	0.902	-1.010	-0.101		0.066
15.06	367	0.897	-1.016	-0.161		0.058
15.63	372	0.909	-1.001	-0.011		0.049
16.29	367	0.897	-1.016	-0.161		0.041
16.7	370	0.904	-1.007	-0.071		0.037
17.22	369	0.902	-1.010	-0.101		0.032

### Nilai puncak-puncak gelombang osilasi Gliserin suhu 60°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.377	b=0.0422
0.2	490	1.197	-0.641	3.525		3.349
0.75	489	1.195	-0.644	3.495		3.272
1.28	486	1.188	-0.653	3.405		3.199
1.84	485	1.185	-0.656	3.375		3.125
2.38	480	1.173	-0.671	3.225		3.054
2.93	471	1.151	-0.699	2.956		2.984
3.46	466	1.139	-0.714	2.806		2.918
4.02	466	1.139	-0.714	2.806		2.850
4.64	458	1.119	-0.738	2.566		2.776
5.16	468	1.144	-0.708	2.866		2.716
5.68	462	1.129	-0.726	2.686		2.657
6.28	454	1.109	-0.751	2.446		2.591
6.84	455	1.112	-0.748	2.476		2.530
7.34	453	1.107	-0.754	2.416		2.477
7.93	456	1.114	-0.745	2.506		2.417
8.47	451	1.102	-0.760	2.356		2.362
9	447	1.092	-0.772	2.236		2.310
9.54	444	1.085	-0.781	2.146		2.258
10.09	440	1.075	-0.793	2.027		2.206
10.68	444	1.085	-0.781	2.146		2.152
11.18	435	1.063	-0.809	1.877		2.107
11.81	439	1.073	-0.796	1.997		2.052
12.3	435	1.063	-0.809	1.877		2.010
12.89	439	1.073	-0.796	1.997		1.960
13.4	431	1.053	-0.821	1.757		1.918
13.98	430	1.051	-0.824	1.727		1.872
14.58	430	1.051	-0.824	1.727		1.825
15.11	429	1.048	-0.827	1.697		1.785
15.61	425	1.039	-0.839	1.577		1.748
16.18	429	1.048	-0.827	1.697		1.706
16.8	422	1.031	-0.848	1.487		1.662
17.36	421	1.029	-0.851	1.457		1.623
17.86	415	1.014	-0.870	1.277		1.589
18.44	427	1.043	-0.833	1.637		1.551
18.92	423	1.034	-0.845	1.517		1.520
19.47	423	1.034	-0.845	1.517		1.485
20.07	424	1.036	-0.842	1.547		1.448
20.57	419	1.024	-0.858	1.397		1.418
21.16	419	1.024	-0.858	1.397		1.383
21.73	411	1.004	-0.882	1.158		1.350
22.28	417	1.019	-0.864	1.337		1.319
22.83	415	1.014	-0.870	1.277		1.289
23.33	415	1.014	-0.870	1.277		1.262
23.92	415	1.014	-0.870	1.277		1.231
24.44	414	1.012	-0.873	1.247		1.204
25.03	420	1.026	-0.855	1.427		1.174
25.53	415	1.014	-0.870	1.277		1.150
26.09	413	1.009	-0.876	1.217		1.123
26.75	409	1.000	-0.888	1.098		1.092
27.24	410	1.002	-0.885	1.128		1.070
27.77	413	1.009	-0.876	1.217		1.046

28.35	412	1.007	-0.879	1.188	1.021
28.91	411	1.004	-0.882	1.158	0.997
29.46	413	1.009	-0.876	1.217	0.974
30.03	412	1.007	-0.879	1.188	0.951
30.49	399	0.975	-0.919	0.798	0.933
31.07	406	0.992	-0.897	1.008	0.910
31.63	407	0.995	-0.894	1.038	0.889
32.19	407	0.995	-0.894	1.038	0.868
32.74	404	0.987	-0.903	0.948	0.848
33.22	404	0.987	-0.903	0.948	0.831

### Nilai puncak-puncak gelombang osilasi Gliserin suhu 100°C

Waktu	ADC	V out	Nilai g	Percepatan (m/s <sup>2</sup> )	$y = Ae^{-bt}$	
					A=3.3962	b=0.0304
0.2	490	1.197	-0.641	3.525	3.376	
0.75	491	1.200	-0.638	3.555	3.320	
1.32	486	1.188	-0.653	3.405	3.263	
1.86	484	1.183	-0.659	3.345	3.209	
2.39	480	1.173	-0.671	3.225	3.158	
2.95	480	1.173	-0.671	3.225	3.105	
3.53	479	1.171	-0.674	3.195	3.051	
4.06	471	1.151	-0.699	2.956	3.002	
4.61	470	1.149	-0.702	2.926	2.952	
5.19	469	1.146	-0.705	2.896	2.900	
5.74	469	1.146	-0.705	2.896	2.852	
6.26	462	1.129	-0.726	2.686	2.808	
6.83	466	1.139	-0.714	2.806	2.759	
7.39	461	1.127	-0.729	2.656	2.713	
7.92	460	1.124	-0.732	2.626	2.669	
8.48	464	1.134	-0.720	2.746	2.624	
9.08	449	1.097	-0.766	2.296	2.577	
9.6	460	1.124	-0.732	2.626	2.537	
10.13	448	1.095	-0.769	2.266	2.496	
10.73	448	1.095	-0.769	2.266	2.451	
11.23	454	1.109	-0.751	2.446	2.414	
11.82	448	1.095	-0.769	2.266	2.371	
12.37	448	1.095	-0.769	2.266	2.332	
12.96	441	1.078	-0.790	2.057	2.290	
13.48	452	1.105	-0.757	2.386	2.254	
14	442	1.080	-0.787	2.087	2.219	
14.56	443	1.083	-0.784	2.117	2.182	
15.14	440	1.075	-0.793	2.027	2.143	
15.64	440	1.075	-0.793	2.027	2.111	
16.21	441	1.078	-0.790	2.057	2.075	
16.81	442	1.080	-0.787	2.087	2.037	
17.36	440	1.075	-0.793	2.027	2.004	
17.9	436	1.065	-0.806	1.907	1.971	
18.45	437	1.068	-0.803	1.937	1.938	

19.01	438	1.070	-0.800	1.967	1.906
19.54	436	1.065	-0.806	1.907	1.875
20.09	427	1.043	-0.833	1.637	1.844
20.63	425	1.039	-0.839	1.577	1.814
21.23	431	1.053	-0.821	1.757	1.781
21.79	429	1.048	-0.827	1.697	1.751
22.3	427	1.043	-0.833	1.637	1.724
22.88	429	1.048	-0.827	1.697	1.694
23.39	423	1.034	-0.845	1.517	1.668
23.93	426	1.041	-0.836	1.607	1.641
24.5	428	1.046	-0.830	1.667	1.613
25.02	426	1.041	-0.836	1.607	1.587
25.61	419	1.024	-0.858	1.397	1.559
26.19	416	1.017	-0.867	1.307	1.532
26.7	425	1.039	-0.839	1.577	1.508
27.28	427	1.043	-0.833	1.637	1.482
27.77	419	1.024	-0.858	1.397	1.460
28.37	416	1.017	-0.867	1.307	1.434
28.92	424	1.036	-0.842	1.547	1.410
29.49	419	1.024	-0.858	1.397	1.386
30.05	423	1.034	-0.845	1.517	1.362
30.59	418	1.022	-0.861	1.367	1.340
31.14	414	1.012	-0.873	1.247	1.318
31.67	415	1.014	-0.870	1.277	1.297
32.21	410	1.002	-0.885	1.128	1.276
32.76	415	1.014	-0.870	1.277	1.255
33.36	414	1.012	-0.873	1.247	1.232
33.87	412	1.007	-0.879	1.188	1.213
34.48	410	1.002	-0.885	1.128	1.191
34.97	412	1.007	-0.879	1.188	1.173
35.55	414	1.012	-0.873	1.247	1.153
36.12	405	0.990	-0.900	0.978	1.133
36.67	409	1.000	-0.888	1.098	1.114
37.24	409	1.000	-0.888	1.098	1.095
37.79	413	1.009	-0.876	1.217	1.077
38.31	411	1.004	-0.882	1.158	1.060
38.88	406	0.992	-0.897	1.008	1.042
39.48	405	0.990	-0.900	0.978	1.023
40.02	409	1.000	-0.888	1.098	1.006
40.47	404	0.987	-0.903	0.948	0.992
41.07	401	0.980	-0.913	0.858	0.974
41.61	412	1.007	-0.879	1.188	0.959
42.17	400	0.978	-0.916	0.828	0.942
42.69	404	0.987	-0.903	0.948	0.928
43.27	408	0.997	-0.891	1.068	0.911
43.85	412	1.007	-0.879	1.188	0.895
44.37	408	0.997	-0.891	1.068	0.881
44.89	399	0.975	-0.919	0.798	0.868
45.49	403	0.985	-0.906	0.918	0.852
46	406	0.992	-0.897	1.008	0.839
46.52	400	0.978	-0.916	0.828	0.826
47.12	406	0.992	-0.897	1.008	0.811
47.71	400	0.978	-0.916	0.828	0.796
48.23	408	0.997	-0.891	1.068	0.784
48.82	400	0.978	-0.916	0.828	0.770
49.37	400	0.978	-0.916	0.828	0.757